

國立交通大學

土木工程學系碩士班

碩 士 論 文

挫屈型防震消能元件之研發

**Development of a Buckling Type Energy
Dissipative Damper**

研 究 生：林志軒

指 導 教 授：王彥博 博士

中華民國九十六年七月

挫屈型防震消能元件之研發

Development of a Buckling Type Energy Dissipative Damper

研 究 生：林志軒

Student: Chih-Shiuan Lin


指導教授：王彥博 博士

Advisor: Dr. Yen-Po Wang

國立交通大學

土木工程學系碩士班

碩士論文



A Thesis
Submitted to Department of Civil Engineering
College of Engineering
National Chiao Tung University
in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of
Master of Science
in
Civil Engineering
July 2007
HsinChu, Taiwan, Republic of China.

中華民國九十六年七月

挫屈型防震消能元件之研發

研究生：林志軒

指導教授：王彥博 博士

國立交通大學土木工程研究所

摘要

挫屈原是一種不穩定的結構行為，若無適當支撐，將導致軸力構件側向不穩定之現象；若經適當設計將其變位控制在引導之方向與範圍內，則因其幾何大變形導致材料極易達到非線性，而在往復運動中產生遲滯消能行為，且在變形很小時即發揮消能作用，鋼製挫屈連桿可成為極佳之消能減震(振)元件。國內外目前尚無針對以挫屈連桿作為建築防震控制之相關研究，值得深入探討。本研究旨在建立挫屈連桿之基本力學原理，並透過一系列的元件測試探討其力學特性，掌握最佳之參數設計。試驗結果顯示，挫屈型消能元件之受力 - 位移關係成橢圓形之遲滯迴圈，類似黏滯阻尼，其迴圈路徑穩定而飽滿，具備阻尼器之優異性能。本研究並發展以挫屈連桿為核心之斜撐型抗震裝置，利用振動台完成耐震性能試驗，確認其用於提升結構抗震能力之可行性。最後，並以 ANSYS 進行挫屈型消能元件之非線性應力分析，以印證理論與假設之合理性，作為最佳鋼板切削模式之設計依據。

關鍵字：挫屈、挫屈連桿、挫屈型消能元件、遲滯迴圈、耐震性能試驗、ANSYS

Development of a Buckling Type Energy Dissipative Damper

Student : Chih – Shiuan Lin

Advisor : Dr . Yen – Po Wang

Institute of Civil Engineering
College of Engineering
National Chiao Tung University

Abstract

Buckling is an unstable structural behavior that may lead to lateral instability of axially loaded members if not properly supported. However, if a buckled steel member is deformed in a guided direction and range, it could become an excellent seismic energy dissipative device since its geometrically large deformation will easily lead to inelastic material behavior of the member and help in dissipating energy in cyclic loadings even at relatively small axial displacement. As of today, no such study as using buckled struts for seismic performance control of building structures has been explored. This topic deserves extensive investigation. The purpose of this study is to develop the fundamental principles of buckled strut and characterize its mechanical properties via component tests to serve as the basis for optimum design. Experimental results indicate that the force-displacement relationships of buckled struts are in the form of ellipses, similar to those for viscous fluid dampers. With steady and rich hysteretic loops, the buckled struts are considered of great potential as seismic dampers. In this study, a buckled-strut-based bracing-type seismic damper is

further developed and a series of seismic performance tests by the shaking table is conducted to verify the feasibility of using buckled struts for seismic structural control. Finally, nonlinear analysis of the proposed buckling-type energy dissipative device by ANSYS is carried out to verify adequacy of the assumptions and principles made. The stress distribution pattern in the steel strut will be the basis for determining its optimum shape as a buckling-type damper.

Key words : buckling 、 buckled strut 、 buckling type energy dissipative damper 、 hysteretic loops 、 shaking table 、 the testing of structural seismic 、 ANSYS



誌謝

承蒙 恩師王彥博教授兩年來悉心的指導與觀念啟發，尤其在論文寫作期間，感謝恩師費心指正與修改，方使本論文得以順利完成。此外，恩師的嚴謹治學態度與努力不懈的研究精神，對工作的完美堅持和待人處事之道，都給予我深遠的影響，在此衷心至上最誠摯的心意。

論文口試期間，承蒙 國立高雄第一科技大學 盧煉元教授、國立交通大學 陳誠直教授、國立交通大學 趙文成教授撥冗指正，並提供諸多寶貴意見，使本論文之內容更加詳實完備，特別在此表示感激之意。

於交大研究生活中，首先感謝嘉賞學長在理論公式之推導，以及元件的設計並指導我實驗儀器的安裝與操作，讓我能迅速進入狀況，另外，阿良學長不時提供的寶貴意見，使我受益良多，還有逸軒學長時時刻刻、不厭其煩的幫助我諸多程式和理論的問題，讓我的研究能如期完成。此外，沒有家杰和建華的幫忙我就無法及時完成實驗，你們的熱心協助我銘記在心，還有羅開、哲維在結構大樓陪我談天，伴我度過實驗室等待的時光。

在這兩年中，我很開心能交到欣晏和俊成這兩位同窗的知心夥伴，大夥一起為課業奮戰的時光以及日常生活當中的點點滴滴回憶，我將永遠記得。還有好友子軒學長、建霖、志偉、雅晶、信宏、勝彥、佳穎、啟勇、承儒、俊佑、益鴻等，陪伴我走過這兩年的日子，讓我的研究所生涯更加豐富。好友凱迪、俐君、俊諺、潔鳳、峻鴻、智仁等，你們是我生活的潤滑劑讓我隨時都能分享生活中的喜怒哀樂以及酸甜苦辣。我也要感謝 Mavis 的陪伴帶給我無數喜悅及歡樂。感謝你們伴我度過求學、論文寫作的時光，讓我能順利完成本文。

最後，僅以本文獻給我最敬愛的雙親以及家人，在我求學生涯中，由於你們的默默支持與鼓勵和無怨無悔的付出，讓我能無憂無慮的環境中長大，順利完成學業。

目錄

摘要	I
Abstract	II
誌謝	IV
目錄	V
表目錄	VII
圖目錄	IX
第一章 緒論	1
1.1 研究動機與目的	1
1.2 文獻回顧	3
1.3 研究方向	6
1.4 論文架構	7
第二章 挫屈型消能元件之力學行為解析模式	9
2.1 挫屈連桿之彈性挫屈勁度	9
2.2 挫屈連桿之非線性力-位移關係	21
第三章 挫屈型消能元件之製作與試驗規劃	25
3.1 元件尺寸	25
3.2 挫屈連桿之試驗規劃	26
3.2.1 應變規之佈設	26

3.2.2 試驗規劃	27
3.3 試驗設備與安裝	28
第四章 挫屈型消能元件之試驗與分析	30
4.1 元件測試	30
4.1.1 遲滯迴圈 K' 、 K'' 、 η 之分析	30
4.1.2 試驗結果與數據分析	32
4.2 挫屈消能斜撐之耐震性能測試	35
第五章 挫屈型消能元件之ANSYS分析	38
5.1 前言	38
5.2 ANSYS軟體架構	39
5.2.1 前處理器	39
5.2.2 求解器	43
5.3 挫屈連桿之ANSYS非線性模擬分析	46
5.4 模擬挫屈消能元件之非線性應力分析	49
5.4.1 模擬元件軸向受力之應力分佈	49
5.4.2 比較元件切削前、後軸向受力應力分佈	49
第六章 結論與建議	51
參考文獻	53



表目錄

表 3.1	挫屈型消能元件試體規格.....	53
表 3.2	試驗規劃表.....	53
表 4.1	t4H490 實驗 K' 、 K'' 、 η	54
表 4.2	t4H485 實驗 K' 、 K'' 、 η	55
表 4.3	t4H480 實驗 K' 、 K'' 、 η	56
表 4.4	t5H490 實驗 K' 、 K'' 、 η	57
表 4.5	t5H485 實驗 K' 、 K'' 、 η	58
表 4.6	t5H480 實驗 K' 、 K'' 、 η	59
表 4.7	t6H490 實驗 K' 、 K'' 、 η	60
表 4.8	t6H485 實驗 K' 、 K'' 、 η	61
表 4.9	t6H480 實驗 K' 、 K'' 、 η	62
表 4.10	t4F490 實驗 K' 、 K'' 、 η	63
表 4.11	t4F485 實驗 K' 、 K'' 、 η	64
表 4.12	t4F480 實驗 K' 、 K'' 、 η	65
表 4.13	t5F490 實驗 K' 、 K'' 、 η	66
表 4.14	t5F485 實驗 K' 、 K'' 、 η	67
表 4.15	t5F480 實驗 K' 、 K'' 、 η	68

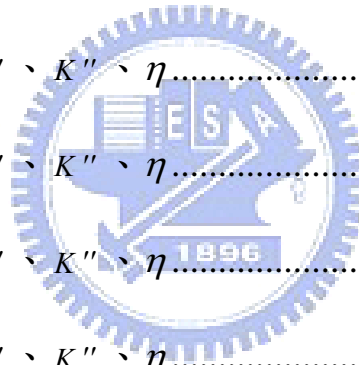


表 4.16	t6F490 實驗 K' 、 K'' 、 η	69
表 4.17	t6F485 實驗 K' 、 K'' 、 η	70
表 4.18	t6F480 實驗 K' 、 K'' 、 η	71
表 4.19	不同邊界條件各試體及振幅之最大出力.....	72
表 4.20	五層樓模型結構細部尺寸.....	73
表 4.21	加速度峰值比較(Kobe Earthquake).....	74
表 4.22	樓層加速度均方根值比較(Kobe Earthquake).....	74
表 4.23	加速度峰值比較(Hachinohe Earthquake).....	75
表 4.24	樓層加速度均方根值比較(Hachinohe Earthquake).....	75
表 5.1	ANSYS 流程操作表.....	76



圖目錄

圖 1.1	挫屈連桿之減振應用【2】	79
圖 1.2	挫屈連桿之變形示意圖【2】	79
圖 1.3	Euler spring vertical isolation stage【3】	79
圖 1.4	Virgin等人實驗裝置照片【2】	80
圖 1.5	Virgin等人實驗結果之 1【2】	80
圖 1.6	Virgin等人實驗結果之 2【2】	80
圖 1.7	可調式挫屈連桿之試驗構架【9】	81
圖 1.8	挫屈連桿 (buckled struts) 元件【10】	81
圖 1.9	挫屈連桿試驗結果與預測之比對【10】	81
圖 2.1	底端固接，頂端自由柱之有效長度 L_e 【11】	82
圖 2.2	兩端固接柱之有效長度 L_e 【11】	82
圖 2.3	柱挫屈強度與邊界條件之關係【11】	83
圖 2.4	鉸接挫屈連桿之變形示意圖	84
圖 2.5	固接挫屈連桿之變形示意圖	84
圖 2.6	鉸接條件下不同初始端點弦切角 q_0 之彈性挫屈勁度曲線	85
圖 2.7	固接條件下不同初始端點弦切角 q_0 之彈性挫屈勁度曲線	85
圖 2.8	橢圓形遲滯迴圈之幾何關係	86
圖 3.1a	t4H490 試體之設計詳圖 (單位: mm)	87

圖 3.1c	t4H480 試體之設計詳圖 (單位: mm)	87
圖 3.3a	t6H490 試體之設計詳圖 (單位: mm)	88
圖 3.3b	t6H485 試體之設計詳圖 (單位: mm)	88
圖 3.3c	t6H480 試體之設計詳圖 (單位: mm)	88
圖 3.4a	t4F490 試體之設計詳圖 (單位: mm)	89
圖 3.4b	t4F485 試體之設計詳圖 (單位: mm)	89
圖 3.4c	t4F480 試體之設計詳圖 (單位: mm)	89
圖 3.5a	t5F490 試體之設計詳圖 (單位: mm)	90
圖 3.5b	t5F485 試體之設計詳圖 (單位: mm)	90
圖 3.5c	t5F480 試體之設計詳圖 (單位: mm)	90
圖 3.6a	t6F490 試體之設計詳圖 (單位: mm)	91
圖 3.6b	t6F485 試體之設計詳圖 (單位: mm)	91
圖 3.6c	t6F480 試體之設計詳圖 (單位: mm)	91
圖 3.7	應變計黏貼位置編號	92
圖 3.8	三個應變計黏貼位置擾動頻率 1.0Hz 振幅 1mm 應變量	93
圖 3.9	三種應變計黏貼位置擾動頻率 1.0Hz 振幅 3mm 應變量	94
圖 3.10	三種應變計黏貼位置擾動頻率 1.0Hz 振幅 5mm 應變量	95
圖 3.11	測試構架底座設計詳圖 (單位: mm)	96
圖 3.12	測試構架反力座尺寸詳圖	96

圖 3.13	1.5t致動器以鋼框架加固.....	97
圖 3.14	接頭連接板.....	97
圖 3.15a	鉸接頭元件.....	98
圖 3.15b	固接頭元件.....	98
圖 3.16a	挫屈連桿試體安裝鉸接.....	99
圖 3.16b	挫屈連桿試體安裝固接頭.....	99
圖 3.17	1.5t 油壓致動器.....	100
圖 3.18	MTS 407 控制器.....	100
圖 3.19	力規 (Load Cell) (出力大小 : 5ton)	101
圖 3.20	致動器轉接頭與試體連接器.....	101
圖 3.21	訊號調節放大器.....	102
圖 3.22	IMC 資料擷取系統.....	102
圖 3.23	Famos 訊號顯示與分析軟體.....	103
圖 3.24	挫屈連桿之安裝 (鉸接試體)	103
圖 3.25	挫屈連桿之安裝 (固接試體)	104
圖 4.1a	t4H490 試體擾動頻率 0.5Hz各振幅之遲滯迴圈.....	105
圖 4.1b	t4H490 試體擾動頻率 1.0Hz各振幅之遲滯迴圈.....	106
圖 4.1c	t4H490 試體擾動頻率 1.5Hz各振幅之遲滯迴圈.....	107
圖 4.1d	t4H490 試體擾動頻率 2.0Hz各振幅之遲滯迴圈.....	108

圖 4.1e	t4H490	試體擾動頻率 2.5Hz各振幅之遲滯迴圈	109
圖 4.1f	t4H490	試體擾動頻率 3.0Hz各振幅之遲滯迴圈	110
圖 4.2a	t4H485	試體擾動頻率 0.5Hz各振幅之遲滯迴圈	111
圖 4.2b	t4H485	試體擾動頻率 1.0Hz各振幅之遲滯迴圈	112
圖 4.2c	t4H485	試體擾動頻率 1.5Hz各振幅之遲滯迴圈	113
圖 4.2d	t4H485	試體擾動頻率 2.0Hz各振幅之遲滯迴圈	114
圖 4.2e	t4H485	試體擾動頻率 2.5Hz各振幅之遲滯迴圈	115
圖 4.2f	t4H485	試體擾動頻率 3.0Hz各振幅之遲滯迴圈	116
圖 4.3a	t4H480	試體擾動頻率 0.5Hz各振幅之遲滯迴圈	117
圖 4.3b	t4H480	試體擾動頻率 1.0Hz各振幅之遲滯迴圈	118
圖 4.3c	t4H480	試體擾動頻率 1.5Hz各振幅之遲滯迴圈	119
圖 4.3d	t4H480	試體擾動頻率 2.0Hz各振幅之遲滯迴圈	120
圖 4.3e	t4H480	試體擾動頻率 2.5Hz各振幅之遲滯迴圈	121
圖 4.3f	t4H480	試體擾動頻率 3.0Hz各振幅之遲滯迴圈	122
圖 4.4a	t5H490	試體擾動頻率 0.5Hz各振幅之遲滯迴圈	123
圖 4.4b	t5H490	試體擾動頻率 1.0Hz各振幅之遲滯迴圈	124
圖 4.4c	t5H490	試體擾動頻率 1.5Hz各振幅之遲滯迴圈	125
圖 4.4d	t5H490	試體擾動頻率 2.0Hz各振幅之遲滯迴圈	126
圖 4.4e	t5H490	試體擾動頻率 2.5Hz各振幅之遲滯迴圈	127

圖 4.4f	t5H490	試體擾動頻率 3.0Hz各振幅之遲滯迴圈.....	128
圖 4.5a	t5H485	試體擾動頻率 0.5Hz各振幅之遲滯迴圈	129
圖 4.5b	t5H485	試體擾動頻率 1.0Hz各振幅之遲滯迴圈	130
圖 4.5c	t5H485	試體擾動頻率 1.5Hz各振幅之遲滯迴圈	131
圖 4.5d	t5H485	試體擾動頻率 2.0Hz各振幅之遲滯迴圈	132
圖 4.5e	t5H485	試體擾動頻率 2.5Hz各振幅之遲滯迴圈	133
圖 4.5f	t5H485	試體擾動頻率 3.0Hz各振幅之遲滯迴圈.....	134
圖 4.6a	t5H480	試體擾動頻率 0.5Hz各振幅之遲滯迴圈	135
圖 4.6b	t5H480	試體擾動頻率 1.0Hz各振幅之遲滯迴圈	136
圖 4.6c	t5H480	試體擾動頻率 1.5Hz各振幅之遲滯迴圈	137
圖 4.6d	t5H480	試體擾動頻率 2.0Hz各振幅之遲滯迴圈	138
圖 4.6e	t5H480	試體擾動頻率 2.5Hz各振幅之遲滯迴圈	139
圖 4.6f	t5H480	試體擾動頻率 3.0Hz各振幅之遲滯迴圈.....	140
圖 4.7a	t6H490	試體擾動頻率 0.5Hz各振幅之遲滯迴圈	141
圖 4.7b	t6H490	試體擾動頻率 1.0Hz各振幅之遲滯迴圈	142
圖 4.7c	t6H490	試體擾動頻率 1.5Hz各振幅之遲滯迴圈	143
圖 4.7d	t6H490	試體擾動頻率 2.0Hz各振幅之遲滯迴圈	144
圖 4.7e	t6H490	試體擾動頻率 2.5Hz各振幅之遲滯迴圈	145
圖 4.7f	t6H490	試體擾動頻率 3.0Hz各振幅之遲滯迴圈.....	146

圖 4.8a	t6H485	試體擾動頻率 0.5Hz各振幅之遲滯迴圈	147
圖 4.8b	t6H485	試體擾動頻率 1.0Hz各振幅之遲滯迴圈	148
圖 4.8c	t6H485	試體擾動頻率 1.5Hz各振幅之遲滯迴圈	149
圖 4.8d	t6H485	試體擾動頻率 2.0Hz各振幅之遲滯迴圈	150
圖 4.8e	t6H485	試體擾動頻率 2.5Hz各振幅之遲滯迴圈	151
圖 4.8f	t6H485	試體擾動頻率 3.0Hz各振幅之遲滯迴圈	152
圖 4.8g	t6H485	試體擾動頻率 5.0Hz各振幅之遲滯迴圈	153
圖 4.9a	t6H480	試體擾動頻率 0.5Hz各振幅之遲滯迴圈	154
圖 4.9b	t6H480	試體擾動頻率 1.0Hz各振幅之遲滯迴圈	155
圖 4.9c	t6H480	試體擾動頻率 1.5Hz各振幅之遲滯迴圈	156
圖 4.9d	t6H480	試體擾動頻率 2.0Hz各振幅之遲滯迴圈	157
圖 4.9e	t6H480	試體擾動頻率 2.5Hz各振幅之遲滯迴圈	158
圖 4.9f	t6H480	試體擾動頻率 3.0Hz各振幅之遲滯迴圈	159
圖 4.10a	t4F490	試體擾動頻率 0.5Hz各振幅之遲滯迴圈	160
圖 4.10b	t4F490	試體擾動頻率 1.0Hz各振幅之遲滯迴圈	161
圖 4.10c	t4F490	試體擾動頻率 1.5Hz各振幅之遲滯迴圈	162
圖 4.10d	t4F490	試體擾動頻率 2.0Hz各振幅之遲滯迴圈	163
圖 4.10e	t4F490	試體擾動頻率 2.5Hz各振幅之遲滯迴圈	164
圖 4.10f	t4F490	試體擾動頻率 3.0Hz各振幅之遲滯迴圈	165

圖 4.11a	t4F485	試體擾動頻率 0.5Hz各振幅之遲滯迴圈	.....	166
圖 4.11b	t4F485	試體擾動頻率 1.0Hz各振幅之遲滯迴圈	.....	167
圖 4.11c	t4F485	試體擾動頻率 1.5Hz各振幅之遲滯迴圈	.....	168
圖 4.11d	t4F485	試體擾動頻率 2.0Hz各振幅之遲滯迴圈	.....	169
圖 4.11e	t4F485	試體擾動頻率 2.5Hz各振幅之遲滯迴圈	.....	170
圖 4.11f	t4F485	試體擾動頻率 3.0Hz各振幅之遲滯迴圈	.....	171
圖 4.12a	t4F480	試體擾動頻率 0.5Hz各振幅之遲滯迴圈	.....	172
圖 4.12b	t4F480	試體擾動頻率 1.0Hz各振幅之遲滯迴圈	.....	173
圖 4.12c	t4F480	試體擾動頻率 1.5Hz各振幅之遲滯迴圈	.....	174
圖 4.12d	t4F480	試體擾動頻率 2.0Hz各振幅之遲滯迴圈	.....	175
圖 4.12e	t4F480	試體擾動頻率 2.5Hz各振幅之遲滯迴圈	.....	176
圖 4.12f	t4F480	試體擾動頻率 3.0Hz各振幅之遲滯迴圈	.....	177
圖 4.13a	t5F490	試體擾動頻率 0.5Hz各振幅之遲滯迴圈	.....	178
圖 4.13b	t5F490	試體擾動頻率 1.0Hz各振幅之遲滯迴圈	.....	179
圖 4.13c	t5F490	試體擾動頻率 1.5Hz各振幅之遲滯迴圈	.....	180
圖 4.13d	t5F490	試體擾動頻率 2.0Hz各振幅之遲滯迴圈	.....	181
圖 4.13e	t5F490	試體擾動頻率 2.5Hz各振幅之遲滯迴圈	.....	182
圖 4.13f	t5F490	試體擾動頻率 3.0Hz各振幅之遲滯迴圈	.....	183
圖 4.14a	t5F485	試體擾動頻率 0.5Hz各振幅之遲滯迴圈	.....	184

圖 4.14b	t5F485	試體擾動頻率 1.0Hz各振幅之遲滯迴圈	.....	185
圖 4.14c	t5F485	試體擾動頻率 1.5Hz各振幅之遲滯迴圈	.....	186
圖 4.14d	t5F485	試體擾動頻率 2.0Hz各振幅之遲滯迴圈	.....	187
圖 4.14e	t5F485	試體擾動頻率 2.5Hz各振幅之遲滯迴圈	.....	188
圖 4.14f	t5F485	試體擾動頻率 3.0Hz各振幅之遲滯迴圈	.....	189
圖 4.15a	t5F480	試體擾動頻率 0.5Hz各振幅之遲滯迴圈	.....	190
圖 4.15b	t5F480	試體擾動頻率 1.0Hz各振幅之遲滯迴圈	.....	191
圖 4.15c	t5F480	試體擾動頻率 1.5Hz各振幅之遲滯迴圈	.....	192
圖 4.15d	t5F480	試體擾動頻率 2.0Hz各振幅之遲滯迴圈	.....	193
圖 4.15e	t5F480	試體擾動頻率 2.5Hz各振幅之遲滯迴圈	.....	194
圖 4.15f	t5F480	試體擾動頻率 3.0Hz各振幅之遲滯迴圈	.....	195
圖 4.16a	t6F490	試體擾動頻率 0.5Hz各振幅之遲滯迴圈	.....	196
圖 4.16b	t6F490	試體擾動頻率 1.0Hz各振幅之遲滯迴圈	.....	197
圖 4.16c	t6F490	試體擾動頻率 1.5Hz各振幅之遲滯迴圈	.....	198
圖 4.16d	t6F490	試體擾動頻率 2.0Hz各振幅之遲滯迴圈	.....	199
圖 4.16e	t6F490	試體擾動頻率 2.5Hz各振幅之遲滯迴圈	.....	200
圖 4.16f	t6F490	試體擾動頻率 3.0Hz各振幅之遲滯迴圈	.....	201
圖 4.17a	t6F485	試體擾動頻率 0.5Hz各振幅之遲滯迴圈	.....	202
圖 4.17b	t6F485	試體擾動頻率 1.0Hz各振幅之遲滯迴圈	.....	203

圖 4.17c	t6F485 試體擾動頻率 1.5Hz各振幅之遲滯迴圈	204
圖 4.17d	t6F485 試體擾動頻率 2.0Hz各振幅之遲滯迴圈	205
圖 4.17e	t6F485 試體擾動頻率 2.5Hz各振幅之遲滯迴圈	206
圖 4.17f	t6F485 試體擾動頻率 3.0Hz各振幅之遲滯迴圈	207
圖 4.17g	t6F485 試體擾動頻率 4.0Hz與 5.0Hz各振幅之遲滯迴圈	208
圖 4.17h	t6F485 試體擾動頻率 6.0Hz與 7.0Hz各振幅之遲滯迴圈	209
圖 4.18a	t6F480 試體擾動頻率 0.5Hz各振幅之遲滯迴圈	210
圖 4.18b	t6F480 試體擾動頻率 1.0Hz各振幅之遲滯迴圈	211
圖 4.18c	t6F480 試體擾動頻率 1.5Hz各振幅之遲滯迴圈	212
圖 4.18d	t6F480 試體擾動頻率 2.0Hz各振幅之遲滯迴圈	213
圖 4.18e	t6F480 試體擾動頻率 2.5Hz各振幅之遲滯迴圈	214
圖 4.18f	t6F480 試體擾動頻率 3.0Hz各振幅之遲滯迴圈	215
圖 4.19-1	t4H490 K' 、 K'' 、 η 與 u_0 的關係圖	216
圖 4.19-2	t4H490 K' 、 K'' 、 η 與 u_0 的關係圖	217
圖 4.20-1	t4H485 K' 、 K'' 、 η 與 u_0 的關係圖	218
圖 4.20-2	t4H485 K' 、 K'' 、 η 與 u_0 的關係圖	219
圖 4.21-1	t4H480 K' 、 K'' 、 η 與 u_0 的關係圖	220
圖 4.21-2	t4H480 K' 、 K'' 、 η 與 u_0 的關係圖	221
圖 4.22-1	t5H490 K' 、 K'' 、 η 與 u_0 的關係圖	222

圖 4.22-2	t5H490	K' 、 K'' 、 η 與 u_0 的關係圖	223
圖 4.23-2	t5H485	K' 、 K'' 、 η 與 u_0 的關係圖	225
圖 4.24-1	t5H480	K' 、 K'' 、 η 與 u_0 的關係圖	226
圖 4.24-2	t5H480	K' 、 K'' 、 η 與 u_0 的關係圖	227
圖 4.25-1	t6H490	K' 、 K'' 、 η 與 u_0 的關係圖	228
圖 4.25-2	t6H490	K' 、 K'' 、 η 與 u_0 的關係圖	229
圖 4.26-1	t6H485	K' 、 K'' 、 η 與 u_0 的關係圖	230
圖 4.26-2	t6H485	K' 、 K'' 、 η 與 u_0 的關係圖	231
圖 4.27-1	t6H480	K' 、 K'' 、 η 與 u_0 的關係圖	233
圖 4.27-2	t6H480	K' 、 K'' 、 η 與 u_0 的關係圖	234
圖 4.29-2	t4F485	K' 、 K'' 、 η 與 u_0 的關係圖	238
圖 4.30-1	t4F480	K' 、 K'' 、 η 與 u_0 的關係圖	239
圖 4.30-2	t4F480	K' 、 K'' 、 η 與 u_0 的關係圖	240
圖 4.31-1	t5F490	K' 、 K'' 、 η 與 u_0 的關係圖	241
圖 4.31-2	t5F490	K' 、 K'' 、 η 與 u_0 的關係圖	242
圖 4.32-1	t5F485	K' 、 K'' 、 η 與 u_0 的關係圖	243
圖 4.32-2	t5F485	K' 、 K'' 、 η 與 u_0 的關係圖	244
圖 4.33-1	t5F480	K' 、 K'' 、 η 與 u_0 的關係圖	245
圖 4.33-2	t5F480	K' 、 K'' 、 η 與 u_0 的關係圖	246

圖 4.34-1	t6F490	K' 、 K'' 、 η 與 u_0 的關係圖	247
圖 4.34-2	t6F490	K' 、 K'' 、 η 與 u_0 的關係圖	248
圖 4.35-1	t6F485	K' 、 K'' 、 η 與 u_0 的關係圖	249
圖 4.35-2	t6F485	K' 、 K'' 、 η 與 u_0 的關係圖	250
圖 4.35-3	t6F485	K' 、 K'' 、 η 與 u_0 的關係圖	251
圖 4.35-4	t6F485	K' 、 K'' 、 η 與 u_0 的關係圖	252
圖 4.36-1	t6F480	K' 、 K'' 、 η 與 u_0 的關係圖	253
圖 4.36-2	t6F480	K' 、 K'' 、 η 與 u_0 的關係圖	254
圖 4.37	t4H490	η 與頻率 f 的關係圖	255
圖 4.38	t4H485	η 與頻率 f 的關係圖	255
圖 4.39	t4H480	η 與頻率 f 的關係圖	255
圖 4.40	t5H490	η 與頻率 f 的關係圖	256
圖 4.41	t5H485	η 與頻率 f 的關係圖	256
圖 4.42	t5H480	η 與頻率 f 的關係圖	256
圖 4.43	t6H490	η 與頻率 f 的關係圖	257
圖 4.44	t6H485	η 與頻率 f 的關係圖	257
圖 4.45	t6H480	η 與頻率 f 的關係圖	257
圖 4.46	t4F490	η 與頻率 f 的關係圖	258
圖 4.47	t4F485	η 與頻率 f 的關係圖	258

圖 4.48	t4F480	η 與頻率 f 的關係圖	258
圖 4.49	t5F490	η 與頻率 f 的關係圖	259
圖 4.50	t5F485	η 與頻率 f 的關係圖	259
圖 4.51	t5F480	η 與頻率 f 的關係圖	259
圖 4.52	t6F490	η 與頻率 f 的關係圖	260
圖 4.53	t6F485	η 與頻率 f 的關係圖	260
圖 4.54	t6F480	η 與頻率 f 的關係圖	260
圖 4.55	t4H490	K' 與頻率 f 的關係圖	261
圖 4.56	t4H485	K' 與頻率 f 的關係圖	261
圖 4.57	t4H480	K' 與頻率 f 的關係圖	261
圖 4.58	t5H490	K' 與頻率 f 的關係圖	262
圖 4.59	t5H485	K' 與頻率 f 的關係圖	262
圖 4.60	t5H480	K' 與頻率 f 的關係圖	262
圖 4.61	t6H490	K' 與頻率 f 的關係圖	263
圖 4.62	t6H485	K' 與頻率 f 的關係圖	263
圖 4.63	t6H480	K' 與頻率 f 的關係圖	263
圖 4.64	t4F490	K' 與頻率 f 的關係圖	264
圖 4.65	t4F485	K' 與頻率 f 的關係圖	264
圖 4.66	t4F480	K' 與頻率 f 的關係圖	264

圖 4.67	t5F490 K' 與頻率 f 的關係圖	265
圖 4.68	t5F485 K' 與頻率 f 的關係圖	265
圖 4.69	t5F480 K' 與頻率 f 的關係圖	265
圖 4.70	t6F490 K' 與頻率 f 的關係圖	266
圖 4.71	t6F485 K' 與頻率 f 的關係圖	266
圖 4.72	t6F480 K' 與頻率 f 的關係圖	266
圖 4.73a	一般tangent函數圖	267
圖 4.73b	tangent函數取絕對值曲線圖	267
圖 4.74a	t6H485 施予不同頻寬之 $|\eta| - f$ 關係圖	268
圖 4.74b	t6F485 施予不同頻寬之 $|\eta| - f$ 關係圖	268
圖 4.75a	不同邊界及長度試體與振幅之最大出力 ($t = 4、5、6\text{mm}$)	269
圖 4.75b	相同長度不同厚度試體與振幅之最大出力 ($t = 4、5、6\text{mm}$)	270
圖 4.76	鉸接與固接遲滯迴圈之比較.....	271
圖 4.77	固接條件下，不同元件厚度及長度之最大出力.....	271
圖 4.78	五層樓模型結構之立面圖.....	272
圖 4.79	挫屈型消能斜撐阻尼器.....	272
圖 4.80	挫屈型消能斜撐阻尼器（局部）.....	273
圖 4.81	裝設阻尼器之五層樓模型結構於振動台上.....	273

圖 4.82	各樓層加速度反應比較 (Kobe ; PGA=0.099g)	274
圖 4.83	各樓層加速度反應比較 (Kobe ; PGA=0.176g)	274
圖 4.84	各樓層加速度反應比較 (Kobe ; PGA=0.323g)	275
圖 4.85	各樓層加速度反應比較 (Kobe ; PGA=0.332g)	275
圖 4.86	各樓層加速度反應比較 (Kobe ; PGA=0.436g)	276
圖 4.87	各樓層加速度反應比較 (Kobe ; PGA=0.576g)	276
圖 4.88	各樓層加速度反應比較 (Hachinohe ; PGA=0.092g)	277
圖 4.89	各樓層加速度反應比較 (Hachinohe ; PGA=0.121g)	277
圖 4.90	各樓層加速度反應比較 (Hachinohe ; PGA=0.172g)	278
圖 4.91	各樓層加速度反應比較 (Hachinohe ; PGA=0.173g)	278
圖 4.92	各樓層加速度反應比較 (Hachinohe ; PGA=0.207g)	279
圖 4.93	各樓層加速度反應比較 (Hachinohe ; PGA=0.312g)	279
圖 5.1	選取solid45 實體元素	280
圖 5.2	solid45 3-D實體結構	280
圖 5.3	solid45 角柱及角錐情形	281
圖 5.4	定義結構分析	281
圖 5.5	材料線性性質之設定	282
圖 5.6	材料非線性性質之設定	282
圖 5.7	partial cylinder選項自定尺寸	283

圖 5.8	輸入關鍵點位置.....	283
圖 5.9	左半邊連桿模型.....	284
圖 5.10	移動工作平面.....	284
圖 5.11	連桿三個主體部分.....	285
圖 5.12	畫面轉換為 3-D.....	285
圖 5.13	移動工作平面到左段模型右端.....	286
圖 5.14	建立適當矩形塊.....	286
圖 5.15	兩端空隙均以矩形塊填滿.....	287
圖 5.16	選擇Align WP with功能.....	287
圖 5.17	使座標沿吾人欲修正方向.....	288
圖 5.18	調整X-Y plane面對欲分割面.....	288
圖 5.19	點選欲清除部份.....	289
圖 5.20	多餘矩形塊清除後情形.....	289
圖 5.21	檢視細部不平整處.....	290
圖 5.22	利用overlap功能潤滑不平整處.....	290
圖 5.23	建模完成（多餘部分清除）.....	291
圖 5.24	網格劃分大小之設定.....	291
圖 5.25	採用規則網格法劃分.....	292
圖 5.26	完成網格化之連桿模型.....	292

圖 5.27a	試體軸向受壓振幅 1mm 變形.....	293
圖 5.27b	試體軸向受壓振幅 2mm 變形	293
圖 5.27c	試體軸向受壓振幅 3mm 變形.....	294
圖 5.27d	試體軸向受壓振幅 4mm 變形	294
圖 5.27e	試體軸向受壓振幅 5mm 變形.....	295
圖 5.28a	試體軸向受壓振幅 1mm 應力分佈.....	295
圖 5.28b	試體軸向受壓振幅 2mm 應力分佈	296
圖 5.28c	試體軸向受壓振幅 3mm 應力分佈.....	296
圖 5.28d	試體軸向受壓振幅 4mm 應力分佈	297
圖 5.28e	試體軸向受壓振幅 5mm 應力分佈.....	297
圖 5.29	型號t6F490 元件俯視圖 (切削後)	298
圖 5.30a	試體軸向受壓振幅 1mm 應力分佈 (切削前)	298
圖 5.30b	試體軸向受壓振幅 2mm 應力分佈 (切削前)	299
圖 5.30c	試體軸向受壓振幅 3mm 應力分佈 (切削前)	299
圖 5.30d	試體軸向受壓振幅 4mm 應力分佈 (切削前)	300
圖 5.30e	試體軸向受壓振幅 5mm 應力分佈 (切削前)	300
圖 5.31a	試體軸向受壓振幅 1mm 應力分佈 (切削後)	301
圖 5.31b	試體軸向受壓振幅 2mm 應力分佈 (切削後)	301
圖 5.31c	試體軸向受壓振幅 3mm 應力分佈 (切削後)	302

圖 5.31d 試體軸向受壓振幅 4mm 應力分佈 (切削後) 302

圖 5.31e 試體軸向受壓振幅 5mm 應力分佈 (切削後) 303

圖 5.32a 試體軸向受壓振幅 5mm 之底部應力分佈 (切削前) 303

圖 5.32b 試體軸向受壓振幅 5mm 之底部應力分佈 (切削後) 304



第一章 緒論

1.1 研究動機與目的

消能減震工法乃利用額外的消能裝置與結構適當地結合，而將結構在地震時的層間位移或相對速度被動轉換為消能裝置的驅動制，使其吸收地震能量，進而提升結構的耐震能力，是近年來頗為業界接受的建築防震工法。由於消能裝置為預製之構件，只要現場的先期配合工程施作完成後即能進行安裝，所需之工期較短，且可選擇於結構局部區域輪流施工，因此對建築使用的干擾程度最低。

就物理及振動力學原理而言，凡構成吸能阻尼材料或裝置者，其元件機構至少必須滿足下列兩個基本要件之一：

a. 塑性變形：利用金屬材料之大幅度變形使其承受之應力超過該材料之屈伏強度，而由彈性行為進入塑性變形，繼而在往復運動中產生吸能之作用者。由於其阻力之大小與構件之位移變形有關，一般稱之為「位移型消能元件」，如金屬降伏阻尼器（metallic yielding - damper）、挫屈束制斜撐（BRB）。「位移型消能元件」除了提供消能機制，對結構也有加勁之作用。

b. 流阻特性：利用阻尼裝置組成構件間之相對運動間接驅動其內含

流質或半固態材料之流動而產生阻力，或材料本身之黏滯性而產生對於振動之抵抗力者。由於其阻力之大小與流體之流動速度有關，一般稱之為「速度型消能元件」，如黏滯性液流阻尼器（viscous fluid damper）。

此外，有些高分子橡膠（polymer rubber）材料兼具彈－塑性變形與黏滯性，可在往復運動中產生消能作用，卻不會永久變形；其阻抗特性與「速度型消能元件」類似，但對結構也有加勁作用，又與「位移型消能元件」相似。此類消能器的代表為黏彈阻尼（visco-elastic damper），過去以美國 3M 公司所發展的 VE 材料最負盛名，不過該材料在溫度超過 40°C 後及在日照下黏彈阻尼器的性能將大幅衰減。

基本上，前述結構消能減震系統之原理或有不同，但功能則大同小異，使用者選擇何種系統之決策依據，除功能外，還需考量價格、施工性、免維護、防火性、耐久性…等因素。舉例來說，液流阻尼器造價較高，安裝定位之精準度要求極高，且油封有老化漏油之虞，長期維護不易，也無法做防火處理（因活塞桿需自由進出油壓缸），因此業主通常會優先考慮其他系統；挫屈束制斜撐國內、外已發展成熟，但由於勁度較大，降伏不易，較不適合 RC 結構之補強。

儘管目前市面上已有各式商品化之結構制震裝置，若吾人能發展出國內本土創新之消能系統，將可促進國內防震工業的發展。以國內

防震市場的需求程度，絕對有開創為新產業的條件，而不只是使用者而已。有鑑於此，擬發展一種可於中、小型地震或風力作用下即發揮減震（振）功能的振動敏感性（vibration-sensitive）消能系統，選擇以挫屈連桿（buckled strut）為核心之斜撐型抗震（振）裝置，經由元件測試掌握其力學行為及最佳之參數設計，並利用振動台試驗進行結構耐震性能試驗，確認其應用於提升結構抗震（振）能力之可行性。

1.2 文獻回顧

挫屈（buckling）原是一種不穩定的結構行為，若無適當支撐，將導致軸力構件側向不穩定之現象，使構件之勁度在未達降伏強度前即迅速衰減而喪失承載能力。但若為非結構桿件，經適當之設計將其變形控制在引導之方向與範圍內，則挫屈連桿鋼材極易降伏的特性將是很好的消能減震（振）元件。近年來利用可變曲率勁度元件（variable curvature stiffness device）或稱挫屈連桿（buckled struts）作為機械設備之減振元件在國外已有應用實例，其力學行為相當於非線性彈簧，如圖 1.1 所示【1、2、3】。可變曲率勁度元件係一鋼製拱形薄板，乃具初始側向變形之軸力構件，可藉由調整其曲率而改變振動頻率。構件受力變形時，其曲率（或勁度）亦隨之變化，非線性之結構行為在往復運動中吸收振動能量，因而達到減振目的。圖 1.2 為兩端均為鉸接

(hinged) 之挫屈連桿受到一軸力作用時之軸向位移及變形曲線示意圖，當桿件處在初始挫屈狀態時，其精確的變形曲線或近似解可分別根據文獻【4】及【5】中的方法求得。

Winterflood 等人【6】於 2002 年提出利用彈性挫屈之桿件作為設備垂直向之隔振裝置 (圖 1.3)。Virgin【2】等人以兩根互相平行且兩端均為鉸接之挫屈柱支撐一重約 24N 的質量塊，並於基座施加一可調整頻率之垂直諧和擾動 (圖 1.4)，測試其隔 (減) 振效率。其結果顯示，於振幅 3mm 之擾動下，擾動頻率愈高，振動反應之功率普密度 (power spectral density, PSD) 愈小 (圖 1.5)。

此一結果也印證 Winterflood 等人【3、5】之研究結果，提到於某些較為敏感的作業環境下，使用 Euler spring 可隔絕高頻擾動對於振動系統之影響。此外由位移歷時圖 (圖 1.6) 最後靜止狀態可知 Euler - spring 亦具有消能特性。文中建議，試驗所採用之邊界條件為理想狀態的簡支 (simply - supported boundary condition) 型式，為此種邊界條件的實現與維持相對較困難，實務應用上仍以兩端束制 (clamped - ends) 型式較為可行。

Plaut 等人【7】延續 Virgin 等人之研究，將助兩端改為束制固定之邊界條件，並討論傳遞率 (transmissibility, TR) 之主要參數，包括系統與柱本身的阻尼 (external and internal damping)、柱本身勁度、所支

撐載重 (supported weight) 及柱之初始曲率 (initial curvature) 等。Ji 和 Hansen 試驗【8】時，考慮挫屈連桿兩端邊界條件為一端固定，另一端為滑動之狀態，此形式之目的是藉由滑動端控制摩擦力大小來調整系統之阻尼比。

Bonello 等人【9】於 2005 利用挫屈連桿作為可調式消能減振元件 (圖 1.7, adaptive tuned vibration absorber, ATVA)，之研究，其主要構件為壓電致動器 (Piezo - actuators) 與挫屈連桿所組成之可變勁度元件 (variable stiffness element, curved beam)，運作時可調節 ATVA 之勁度，以改變系統之振動頻率，解決調頻不精確的問題，使得 ATVA 可控制的頻寬範圍更廣，減振性能亦可提昇。

林科良【10】於 2006 針對挫屈連桿 (圖 1.8) 進行元件測試，往復載重試驗結果顯示，其軸力與軸向變形之關係呈橢圓形遲滯迴圈，證明挫屈連桿具有消能作用。雖然為鋼材，其力學特徵接近黏滯阻尼 (viscous-damping) 之特性，但有勁度，類似黏彈阻尼 (visco-elastic damping) 材料之行為。該研究並利用推測 - 適應過濾 (stochastic-adaptive filtering) 法進行系統識別迴歸出挫屈連桿之遲滯迴圈模型參數，圖 1.9 為其試驗結果與預測值之比較。

上述文獻顯示，挫屈連桿之軸力與變形關係呈非線性，因此具備消能減震 (振) 特性。其力學概念十分簡單，乃基於材料力學【11】

或鋼結構學之挫屈理論而發展。相較於挫屈束制斜撐 (Buckling-Restrained Bracing)，本文擬研發之挫屈連桿 (buckled Struts) 可在變形很小時即發揮消能作用，因此作為建築消能減震 (振) 裝置應當有更大的施展空間。

1.3 研究方向

國內目前尚無針對以挫屈連桿作為建築防震控制之可行性研究，值得深入吾人探討。有鑑於此，將發展以挫屈連桿為核心之斜撐型抗震裝置，經由元件測試掌握其力學行為以及最佳之參數設計，並利用震動台試驗進行結構耐震性能試驗，確認其應用於提升結構抗震能力之可行性。

本文研究方向如下：

1. 求解兩端邊界條件為固接之挫屈連桿非線性軸向勁度理論值 – 由於本計劃之挫屈連桿是做消能斜撐之用，兩端固接可使降伏範圍分布於連桿中央及支承端，使材料的利用更有效率。
2. 本研究將分別製作鉸接與固接邊界條件各 3 組不同厚度及 3 組不同曲率半徑之可變勁度挫屈消能元件試體，俾便進行元件測試以瞭解該系統之遲滯迴圈消能行為，以掌握該系統之動力特性與設計參數。
3. 本研究將針對本系現有之五層樓鋼結構設計挫屈型消能斜撐，由振

動台試驗進行耐震性能測試，以驗證其減震效益。

1.4 論文架構

本論文共分六章，各章內容概述如下：

第一章為緒論、研究動機、研究方向及論文架構；文獻回顧探討目前樓版減震方式，並瞭解挫屈連桿 (buckled struts) 於高科技廠房之應用。系列研究宗旨在探討挫屈連桿應用於抗震 (振) 消能之可行性，先探討挫屈型消能元件之遲滯消能行為、其分析模型之建立。

第二章係有關挫屈型消能元件之力學行為解析模式，並推導挫屈連桿鉸接與固接條件之彈性勁度，以供進一步瞭解其遲滯消能行為。並套用黏彈性阻尼 (visco-elastic damper) 之橢圓遲滯模型於挫屈連桿之分析，因為挫屈消能元件之測試結果顯示其遲滯迴圈類似橢圓形，且隨擾動頻率之不同而改變消能面積。

第三章介紹實驗規劃與初步試驗結果之整理。在實驗規劃方面，為討論初始曲率與斷面尺寸對挫屈連桿之影響，本研究規劃鉸接與固接兩種邊界條件，一共 18 組試體；並解說挫屈型消能元件測試裝置及步驟。

第四章乃經由初步的實驗數據，推算彈性儲存勁度 K' (elastic-

storage stiffness)、損失勁度 K'' (loss stiffness) 及代表遲滯消散能力的損耗因子 η (loss factor)。並利用數據繪出相關圖表。最後進行挫屈型消能斜撐之防震性能測試，比較五層樓結構各樓層加速度峰值與樓層加速度均方根值，俾便探討安裝前後之減震效益。

第五章則是利用有限元素軟體 ANSYS 建構挫屈型消能元件模型，並在靜態下給定位移擾動以觀察元件之非線性應力變化及分佈。

第六章為結論與建議，並提出未來的改善方向及研究課題。



第二章 挫屈型消能元件之力學行為解析模式

2.1 挫屈連桿之彈性挫屈勁度

自然界存在一基本法則，當物理狀態之變化趨勢有不同的可能性時，物理現象必傾向於最容易發生的途徑。細長柱受制於一種稱為挫屈（buckling）的結構行為。當軸向受壓桿件的加載較小時，只造成桿件在軸向的縮短，一但載重達到某一特定的臨界值（挫屈載重）時，桿件會突然側彎，造成大量的變位，而使桿件破壞；因此挫屈行為乃壓力桿件在設計上須排除的破壞模式。挫屈並非因材料之應力達到降伏或極限強度而產生，其應力當挫屈時係受到多重因素影響，包括桿件尺寸、桿件材料性質及支撐條件等。

柱在不同邊界支承條件之臨界載重可透過有效長度（effective length）之概念，得到與作為參考標準的鉸接柱臨界載重（critical load）之的比例關係。茲以利用一底端固接，頂端為自由端之軸向受壓柱（圖 2.1）的情況來說明。此柱之挫屈變形曲線乃一完全正弦曲線的四分之一，若吾人將撓度曲線以固定端為界鏡射，即可看到該曲線變成一鉸端柱之撓度曲線或半個正弦波。有效長度 L_e 乃是等值鉸端柱之長度，或撓度曲線中兩反曲點間之長度，因此對於固定-自由

端柱而言，其有效長度為 $L_e = 2L$ ，所以其臨界載重柱之一般式可表示如下：

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_e^2} \quad (2.1)$$

將 $L_e = 2L$ 代入，便能求得固接-自由端柱之臨界載重。柱之有效長度常用有效長度因數 K 表示，即 $L_e = KL$ (2.2)

因此，式 (2.1) 臨界載重之一般式亦可改寫為 $P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(KL)^2}$ (2.3)

其中底端固接 - 頂端自由柱之 K 值為 2，兩端鉸端柱之 K 值等於 1。

若考慮柱之兩端均為固接 (圖 2.2)，假設柱之兩端彼此能作相向運動，因此當軸壓載重 P 是作用在柱頂部時，底端亦產生一大小相等之反作用力。當挫屈發生時，反作用力矩 M_0 亦會在支承端產生；另一種挫屈模式 (圖 2.2) 之撓度曲線乃一在距兩端距離 $L/4$ 處具有反曲點之三角函數曲線，於兩反曲點間之距離相當有效長度，即 $L_e = \frac{L}{2}$

將其代入式得臨界載重為 $P_{cr} = \frac{4\pi^2 EI}{L^2}$ (2.4)

其臨界載重，乃兩端鉸接柱臨界載重之四倍。

各種邊界條件組合之柱有效長度 L_e 及有效長度因數 K 列於圖 2.3。

有關柱之大變形 (large deflections) 理論，其近似解可利用最小功能原理 (minimization of potential energy) 得到，該方法亦可用來處理具有初始曲率 (initial curvature) 之幾何連桿的幾何非線性行為。

茲探討挫屈連桿 (buckled struts) 之非線性理論如後。本研究將分別考慮兩端鉸接 (hinged) 與兩端固接 (fixed) 等兩種形式挫屈連桿的彈性挫屈勁度。本節所討論之挫屈連桿乃一具有初始曲率的挫屈連桿，其外觀猶如一拱型元件，其邊界條件分別為一端鉸接一端為滾支 (roller)，如圖 2.4 所示；或是兩端均為固接之型式，如圖 2.5 所示；其全長為 L 。假設柱軸力引起之軸向變形可忽略不計，則分析時可採用曲線座標系統 $S(s)$ 以簡化計算。無論是鉸接及固接型式，曲線座標原點均於柱中央 (如圖 2.4，及圖 2.5)， $-\frac{L}{2} \leq s \leq \frac{L}{2}$ 。另，弧長微小長度以 ds 表示。連桿之變形狀態則以弦切徑度角 $\theta(s)$ 為自由度描述之。

Case 1. 邊界條件為鉸接

吾人定義兩端鉸接 (hinge) 挫屈連桿之弦切角函數

$$F(s) = \sin\left(\frac{\pi s}{L}\right), \text{ 挫屈連桿的變形狀態則以弦切徑度角 } \theta(s) \text{ 表示如下:}$$

$$\theta(s) = qF(s) \quad (2.5)$$

其中 q 為反曲點之弦切角，而連桿未變形前之初始弦切徑度角 $\theta_0(s)$ 可表示如下：

$$\theta_0(s) = q_0 F(s) \quad (2.6)$$

其中 q_0 為反曲點之初始弦切角。此外，由於曲率 κ 與曲率半徑 ρ 之關係為 $\kappa = \frac{1}{\rho}$ ，另由幾何關係可得到 $ds = \rho d\theta$ ，因此曲率 κ 與弦切徑度角一

次微分 $\theta'(s)$ 之關係如下：

$$\kappa = \frac{1}{\rho} = \frac{d\theta}{ds} = \theta'(s) \quad (2.7)$$

分別將式 (2.5) 與式 (2.6) 代入式 (2.7) 中，可得曲率函數如下：

$$\kappa = \theta'(s) = qF'(s) \quad (2.8)$$

$$\kappa_0 = \theta'_0(s) = q_0F'(s) \quad (2.9)$$

考慮連桿受一軸力 P 作用後，連桿之軸向挫屈位移可計算得：

$$\begin{aligned} u(q) &= \int_{-L/2}^{L/2} (\cos \theta_0 - \cos \theta) ds \\ &= \int_{-L/2}^{L/2} [\cos(q_0F) - \cos(qF)] ds \end{aligned} \quad (2.10)$$

連桿所儲存之應變能 (strain energy) 可計算如下：

$$\begin{aligned} U^B(q) &= \frac{1}{2} EI \int_{-L/2}^{L/2} (\theta' - \theta'_0)^2 ds \\ &= \frac{1}{2} EI \int_{-L/2}^{L/2} (q - q_0)^2 (F')^2 ds \end{aligned} \quad (2.11)$$

其中， $(\theta' - \theta'_0)$ 表示挫屈連桿受軸力 P 作用後曲率變化。連桿受軸力 P

作功後所釋出之彈性能 (elastic potential energy) 為：

$$U^P(q) = -Pu(q) = -P \int_{-L/2}^{L/2} [\cos(q_0F) - \cos(qF)] ds \quad (2.12)$$

故連桿之系統總能量 (total potential energy) $V(q)$ 可表示為：

$$V(q) = U^B(q) + U^P(q) \quad (2.13a)$$

$$V(q) = \frac{1}{2} EI \int_{-L/2}^{L/2} (q - q_0)^2 (F')^2 ds - P \int_{-L/2}^{L/2} [\cos(q_0F) - \cos(qF)] ds \quad (2.13b)$$

依平衡位能準則，當系統處於平衡狀態時其函數為最小值，滿足

$$\frac{\partial V(q)}{\partial q} = 0 \quad (2.14a)$$

或

$$\frac{\partial V(q)}{\partial q} = EI(q - q_0) \int_{-L/2}^{L/2} (F')^2 ds - P \int_{-L/2}^{L/2} F \sin(qF) ds = 0 \quad (2.14b)$$

上式 (2.14b) 可以轉換為：

$$P = \frac{EI(q - q_0) \int_{-L/2}^{L/2} (F')^2 ds}{\int_{-L/2}^{L/2} F \sin(qF) ds} \quad (2.15)$$

若為理想柱 (perfect columns)，即 $q_0 = 0$ 時， $\sin qF \approx qF$ ，故式 (2.15)

可簡化為如下：

$$\begin{aligned} P &= \frac{EI(q - q_0) \int_{-L/2}^{L/2} (F')^2 ds}{\int_{-L/2}^{L/2} F \sin(qF) ds} \\ &= \frac{EI \left(\frac{\pi}{L}\right)^2 \int_{-L/2}^{L/2} \cos^2\left(\frac{\pi s}{L}\right) ds}{\int_{-L/2}^{L/2} \sin^2\left(\frac{\pi s}{L}\right) ds} \\ &= \frac{EI \left(\frac{\pi}{L}\right)^2 \left(\frac{L}{2}\right)}{\left(\frac{L}{2}\right)} = \frac{\pi^2 EI}{L^2} = P_{cr} \end{aligned} \quad (2.16)$$

上式即為理想柱之挫屈載重。

式 (2.15) 表示挫屈連桿受軸力 P 作用後，任何狀態下之平衡；式 (2.16)

表示起始挫屈時之平衡力 P_{cr} 。若將上式重新整理成軸向力 P 為位移 u

及柱端初始弦切角 q_0 之函數，則軸力 $P(q_0, u)$ 可計算如下：

$$\begin{aligned}
 P(q, q_0) &= \frac{EI(q - q_0) \int_{-L/2}^{L/2} (F')^2 ds}{\int_{-L/2}^{L/2} F \sin(qF) ds} = \frac{EI(q - q_0) \left(\frac{\pi}{l}\right)^2 \int_{-L/2}^{L/2} \cos^2\left(\frac{\pi s}{L}\right) ds}{\int_{-L/2}^{L/2} \sin\left(\frac{\pi s}{L}\right) \sin q \sin\left(\frac{\pi s}{L}\right) ds} \\
 &= \frac{EI \left(\frac{\pi}{L}\right)^2 (q - q_0) \left(\frac{L}{2}\right)}{\int_{-L/2}^{L/2} \sin\left(\frac{\pi s}{L}\right) \left[(q \sin \frac{\pi s}{L}) - \frac{1}{3!} (q \sin \frac{\pi s}{L})^3 + \frac{1}{5!} (q \sin \frac{\pi s}{L})^5 - \dots \right] ds} \\
 &= \frac{EI \left(\frac{\pi}{L}\right)^2 (q - q_0) \left(\frac{L}{2}\right)}{q \frac{L}{2} - \frac{q^3}{6} \left(\frac{3L}{8}\right) + \frac{q^5}{120} \left(\frac{5L}{16}\right) - \dots} = \frac{p_{cr} (q - q_0)}{q \left(1 - \frac{1}{8} q^2 + \frac{1}{192} q^4 - \dots\right)} \\
 &= p_{cr} \left(\frac{q - q_0}{q}\right) \left(1 - \frac{q^2}{8} + \frac{q^4}{192} - \dots\right)^{-1} \quad (2.17)
 \end{aligned}$$

為將上式表示成 $P-u$ 關係式，可利用式 (2.10) 簡化弦切角 q 與位移 u 之關係如下：

$$\begin{aligned}
 u(q) &= \int_{-L/2}^{L/2} (\cos \theta_0 - \cos \theta) ds = \int_{-L/2}^{L/2} [\cos(q_0 F) - \cos(qF)] ds \\
 &= \int_{-L/2}^{L/2} \left\{ \left[1 - \frac{1}{2!} (q_0 F)^2 + \frac{1}{4!} (q_0 F)^4 - \dots \right] - \left[1 - \frac{1}{2!} (qF)^2 + \frac{1}{4!} (qF)^4 - \dots \right] \right\} ds \\
 &\quad (2.18a)
 \end{aligned}$$

若忽略高次項，則

$$\begin{aligned}
 u(q) &\approx \frac{1}{2} (q^2 - q_0^2) \int_{-L/2}^{L/2} F^2 ds = \frac{1}{2} (q^2 - q_0^2) \int_{-L/2}^{L/2} \sin^2 \frac{\pi s}{L} ds \\
 &= \frac{L}{4} (q^2 - q_0^2) \quad (2.18b)
 \end{aligned}$$

將式 (2.18b) 改寫如下：

$$q = \left(\frac{4u}{L} + q_0^2 \right)^{1/2} \quad (2.18c)$$

將上式代入式 (2.17) 中，經整理可得

$$P(q_0, u) = p_{cr} \left(1 - q_0 \left(\frac{4u}{L} + q_0^2 \right)^{-1/2} \right) \left(1 - \frac{u}{2L} - \frac{q_0^2}{8} \right)^{-1} \quad (2.19a)$$

彈性挫屈勁度可進一步表示如下：

$$K(P_{cr}, q_0, u) = \frac{P(P_{cr}, q_0, u)}{u} \quad (2.19b)$$

式(2.19a)考慮不同的初始端點弦切角 q_0 (0.10、0.15 及 0.30)，其彈性挫屈勁度曲線如圖 2.6 所示。當 q_0 愈大時，出力越小，且勁度亦隨著 q_0 增大而降低。



Case2. 邊界條件為固接

茲討論挫屈消能元件其兩端為固接 (圖 2.5) 之彈性挫屈勁度。假設軸向變形可忽略不計，可採用曲線座標系統以簡化計算，其座標原點設於弧長中央 (圖 2.5)， $-\frac{L}{2} \leq s \leq \frac{L}{2}$ 。

定義固接條件下挫屈連桿之弦切角變形函數

$F(s) = \sin\left(\frac{2\pi s}{L} + \pi\right)$ ，其變形同樣可以弦切徑度角 $\theta(s)$ 表示如下：

$$\theta(s) = qF(s) \quad (2.20)$$

其中 q 為反曲點之弦切角，而連桿未變形前之初始弦切徑度角 $\theta_0(s)$ 可

表示如下：

$$\theta_0(s) = q_0 F(s) \quad (2.21)$$

其中 q_0 為反曲點之初始弦切角。此外，由於曲率 κ 與曲率半徑 ρ 之關係式為 $\kappa = \frac{1}{\rho}$ ，由幾何關係可得到 $ds = \rho d\theta$ ，因此，曲率 κ 與弦切角之關係為：

$$\kappa = \frac{1}{\rho} = \theta'(s) \quad (2.22)$$

分別將式 (2.33) 與式 (2.34) 代入式 (2.35) 中，可得曲率函數如下：

$$\kappa = \theta'(s) = qF'(s) \quad (2.23)$$

$$\kappa_0 = \theta'_0(s) = q_0 F'(s) \quad (2.24)$$

考慮挫屈連桿受一軸力 P 作用後，連桿之位移可計算得：

$$\begin{aligned} u(q) &= \int_{-L/2}^{L/2} (\cos \theta_0 - \cos \theta) ds \\ &= \int_{-L/2}^{L/2} [\cos(q_0 F(s)) - \cos(qF(s))] ds \end{aligned} \quad (2.25)$$

連桿所儲存之應變能 (strain energy) 可計算如下：

$$\begin{aligned} U^B(q) &= \frac{1}{2} EI \int_{-L/2}^{L/2} (\theta' - \theta'_0)^2 ds \\ &= \frac{1}{2} EI \int_{-L/2}^{L/2} (q - q_0)^2 (F')^2 ds \end{aligned} \quad (2.26)$$

其中， $(\theta' - \theta'_0)$ 表示挫屈連桿受軸力 P 作用後曲率變化量。連桿受軸力 P 作用後所釋出之彈性能 (elastic potential energy) 為：

$$U^P(q) = -Pu(q) = -P \int_{-L/2}^{L/2} [\cos(q_0 F(s)) - \cos(qF(s))] ds \quad (2.27)$$

故連桿之系統總能量 (total potential energy) 可表示為：

$$V(q) = U^B(q) + U^P(q) \quad (2.28a)$$

$$V(q) = \frac{1}{2}EI \int_{-L/2}^{L/2} (q - q_0)^2 (F')^2 ds - P \int_{-L/2}^{L/2} [\cos(q_0 F) - \cos(qF)] ds \quad (2.28b)$$

依平衡位能準則，當系統處於平衡狀態時之函數最小，

$$\frac{\partial V(q)}{\partial q} = 0 \quad (2.29a)$$

亦即

$$\frac{\partial V(q)}{\partial q} = EI(q - q_0) \int_{-L/2}^{L/2} (F')^2 ds - P \int_{-L/2}^{L/2} F \sin(qF) ds = 0 \quad (2.29b)$$

上式 (2.29b) 可以轉換為如下：

$$P = \frac{EI(q - q_0) \int_{-L/2}^{L/2} (F')^2 ds}{\int_{-L/2}^{L/2} F \sin(qF) ds} \quad (2.30)$$

若為理想柱 (perfect columns) 時 $q_0 = 0$ ， $\sin qF \approx qF$ ，故式 (2.30)

可化簡為

$$\begin{aligned} P &= \frac{EI(q - q_0) \int_{-L/2}^{L/2} (F')^2 ds}{\int_{-L/2}^{L/2} F \sin(qF) ds} \\ &= \frac{EI \int_{-L/2}^{L/2} (F')^2 ds}{\int_{-L/2}^{L/2} F^2 ds} = \frac{EI \left(\frac{\pi}{L}\right)^2 \int_{-L/2}^{L/2} \left[\frac{2\pi}{L} \sin\left(\frac{2\pi s}{L} + \pi\right)\right]^2 ds}{\int_{-L/2}^{L/2} \sin^2\left(\frac{2\pi s}{L} + \pi\right) ds} \end{aligned}$$

$$= \frac{4EI \left(\frac{\pi}{L}\right)^2 \left(\frac{L}{2}\right)}{\left(\frac{L}{2}\right)} = \frac{4\pi^2 EI}{L^2} = P_{cr} \quad (2.31)$$

式(2.30)表示挫屈連桿受軸力 P 作用後，任何狀態下之平衡；式(2.31)

表示起始挫屈時之平衡力 P_{cr} 。若將上式重新整理成軸向力 P 為位移 u

及柱端初始弦切角 q_0 之函數，則軸力 $P(q_0, u)$ 可計算如下：

$$\begin{aligned} P(q, q_0) &= \frac{EI(q - q_0) \int_{-L/2}^{L/2} (F')^2 ds}{\int_{-L/2}^{L/2} F \sin(qF) ds} = \frac{EI(q - q_0) \left(\frac{\pi}{L}\right)^2 \int_{-L/2}^{L/2} \left[\frac{2\pi}{L} \cos\left(\frac{2\pi s}{L} + \pi\right)\right]^2 ds}{\int_{-L/2}^{L/2} \sin\left(\frac{2\pi s}{L} + \pi\right) \sin q \sin\left(\frac{2\pi s}{L} + \pi\right) ds} \\ &= \frac{\frac{4\pi^2 EI}{L^2} (q - q_0) \left(\frac{L}{2}\right)}{\int_{-L/2}^{L/2} \sin\left(\frac{2\pi s}{L} + \pi\right) \left\{ \left[q \sin\left(\frac{2\pi s}{L} + \pi\right) \right] - \frac{1}{3!} \left[q \sin\left(\frac{2\pi s}{L} + \pi\right) \right]^3 + \frac{1}{5!} \left[q \sin\left(\frac{2\pi s}{L} + \pi\right) \right]^5 - \dots \right\} ds} \\ &= \frac{\frac{2\pi^2 EI}{L} (q - q_0)}{\frac{Lq}{2} - \frac{Lq^3}{16}} \\ &= \frac{4\pi^2 EI}{L^2} \left(\frac{q - q_0}{q}\right) \left(1 - \frac{q^2}{8}\right)^{-1} \quad (2.32) \end{aligned}$$

由上式可以整理為：

$$P = P_{cr} \left(\frac{q - q_0}{q}\right) \left(1 - \frac{q^2}{8}\right)^{-1} \quad (2.33)$$

為將上式表示成 $P-u$ 關係式，可利用式(2.25)簡化弦切角 q 與位移 u

之關係如下：

$$\begin{aligned}
 u(q) &= \int_{-L/2}^{L/2} (\cos \theta_0 - \cos \theta) ds = \int_{-L/2}^{L/2} [\cos(q_0 F) - \cos(qF)] ds \\
 &= \int_{-L/2}^{L/2} \left\{ \left[1 - \frac{1}{2!}(q_0 F)^2 + \frac{1}{4!}(q_0 F)^4 - \dots \right] - \left[1 - \frac{1}{2!}(qF)^2 + \frac{1}{4!}(qF)^4 - \dots \right] \right\} ds
 \end{aligned}
 \tag{2.34a}$$

若忽略高次項：

$$\begin{aligned}
 u(q) &\approx \frac{1}{2}(q^2 - q_0^2) \int_{-L/2}^{L/2} F^2 ds = \frac{1}{2}(q^2 - q_0^2) \int_{-L/2}^{L/2} \sin^2 \left(\frac{2\pi s}{L} + \pi \right) ds \\
 &= \frac{L}{4}(q^2 - q_0^2)
 \end{aligned}
 \tag{2.34b}$$

將上式 (2.34b) 改寫如下：

$$q = \left(\frac{4u}{L} + q_0^2 \right)^{1/2}
 \tag{2.34c}$$

代入 (2.33) 式中，經整理後可得：

$$P(q_0, u) = p_{cr} \left(1 - q_0 \left(\frac{4u}{L} + q_0^2 \right)^{-1/2} \right) \left(1 - \frac{u}{2L} - \frac{q_0^2}{8} \right)^{-1}
 \tag{2.35a}$$

吾人可將彈性挫屈勁度進一步表示如下：

$$K(P_{cr}, q_0, u) = \frac{P(P_{cr}, q_0, u)}{u}
 \tag{2.35b}$$

當理想柱承受軸向荷重時，其軸向變形尚屬微小，因此本節所討論之

挫屈連桿軸向力 P 與位移 u 的非線性關係，為假設忽略軸向應變能的條

件下所得。

式(2.35a)考慮不同的初始端點弦切角 q_0 (0.10、0.15 及 0.30)，其彈性挫屈勁度曲線如圖 2.7 所示。當 q_0 愈大時出力越小，且勁度亦隨著 q_0 增大而降低。



2.2 挫屈連桿之非線性力-位移關係

由本研究及先前文獻【9】所進行一系列挫屈連桿之元件試驗結果，顯示其之遲滯迴圈近似橢圓形，且其消能面積與擾動的頻率有關。茲進一步描述其力學行為。假設致動器之位移函數， $u(t)$ ，與力規 (loadcell) 之受力函數， $P(t)$ ，分別表示如下：

$$u(t) = u_0 \sin \omega t, \quad P(t) = P_0 \sin(\omega t + \delta) \quad (2.36)$$

其中， u_0 為最大位移振幅； P_0 為挫屈連桿於簡諧位移擾動下所測得之最大反力； ω 為擾動角頻率； δ 為輸入-輸出反應訊號之相位差 (phase-lag)，為擾動頻率 ω 的函數。

吾人可進一步推導位移與力之關係如下：

$$\begin{aligned} P(t) &= P_0 \sin(\omega t + \delta) \\ &= P_0 (\sin \omega t \cos \delta + \cos \omega t \sin \delta) \\ &= u_0 \left(\frac{P_0}{u_0} \sin \omega t \cos \delta + \frac{P_0}{u_0} \cos \omega t \sin \delta \right) \end{aligned} \quad (2.37)$$

令 $K' = \frac{P_0}{u_0} \cos \delta$ ， $K'' = \frac{P_0}{u_0} \sin \delta$ ，則式 (2.37) 可改寫如下：

$$\begin{aligned} P(t) &= u_0 (K' \sin \omega t + K'' \cos \omega t) \\ &= K' u(t) + K'' u_0 \cos \omega t \end{aligned} \quad (2.38)$$

由式(2.38)可得

$$\cos \omega t = \frac{P(t) - K'u(t)}{K''u_0}$$

(2.39)

利用

$$\sin^2 \omega t + \cos^2 \omega t = 1 \quad (2.40)$$

之關係，可由式(2.36)及式(2.39)得到

$$\left(\frac{u(t)}{u_0}\right)^2 + \left(\frac{P(t) - K'u(t)}{K''u_0}\right)^2 = 1$$

(2.41)

或經化簡得到：

$$P(t) = K'u(t) \pm K''(u_0^2 - u^2(t))^{1/2} \quad (2.42)$$

式(2.41)即為 $P-u$ 座標平面上之橢圓方程式。若定義 K' 為挫屈連桿之彈性儲存勁度 (elastic storage stiffness)， K'' 為損失勁度 (loss-stiffness)，則用以反映挫屈連桿遲滯消散特性之損耗因子 η ，可定義如下：

$$\eta = \frac{K''}{K'} = \tan \delta \quad (2.43)$$

此外，力與位移之遲滯迴圈所圍之面積，即為挫屈連桿經歷一個拉壓週期循環後所消耗之能量，可計算如下：

$$\begin{aligned} E_H &= \int P(t) du = \int_0^{2\pi/\omega} P(t) \dot{u}(t) dt \\ &= \int_0^{2\pi/\omega} u_0^2 \omega \cos \omega t [K' \sin \omega t + K'' \cos \omega t] dt \end{aligned}$$

$$= \pi u_0^2 K'' \quad (2.44)$$

若使用複數的形式，則式 (2.36) 可進一步改寫如下：

$$u(t) = u_0 e^{i\omega t}, \quad P(t) = P_0 e^{i(\omega t + \delta)} \quad (2.45)$$

其中定義 K^* 為複數彈性勁度 (complex elastic stiffness)：

$$\begin{aligned} K^* &= \frac{P(t)}{u(t)} = \frac{P_0}{u_0} e^{i\delta} = K' + iK'' \\ &= K'(1 + i\eta) \end{aligned} \quad (2.47)$$

$$|K^*| = \frac{P_0}{u_0} = [K'^2 + K''^2]^{1/2} \quad (2.48)$$

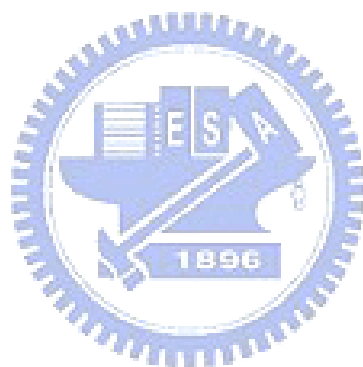
由上述推導可知，挫屈連桿於簡諧位移擾動下，其遲滯消能行為可由 K' 、 K'' ，或 K^* 及 η 決定。

根據式 (2.41) 所建立之橢圓遲滯迴圈模型，如圖 2.8 所示。為便於利用迴歸分析識別 K' 、 K'' 或 η ，吾人亦標示橢圓與座標軸相交或相切之點位，如圖 2.8 所示之 A_1 至 A_8 ，其中， A_1 與 A_5 代表當簡諧位移擾動達最大位移其所對應之力， $A_1 = K'u_0$ ， $A_5 = -K'u_0$ 。

由於挫屈連桿之遲滯迴圈近似橢圓，因此吾人可根據試驗所得的遲滯迴圈曲線求出 K' 。另外， A_3 與 A_7 之意義為當簡諧位移擾動移為 0 時所對應之力， $A_3 = K''u_0$ ， $A_7 = -K''u_0$ 。同理，吾人亦可求得數個迴圈之平均值 K'' ，進而依式 (2.43) 定義求得損耗因子 η 及相位差 δ 。其餘 A_2 、 A_4 、 A_6 及 A_8 點，可供進行模型檢核與修正之用，當出力達最大值時其

對應之位移為 $A_2 = u_0 \cos \delta$ ；當出力為 0 時其對應之位移為

$$A_8 = u_0 \sin \delta ; A_6 = -A_2 , A_4 = -A_8 .$$



第三章 挫屈型消能元件之製作與試驗規劃

3.1 元件尺寸

本研究以連桿斷面之厚度 (t) 及初始弦切角 (q_0) 作為挫屈連桿參數研究之對象，邊界條件分成鉸接及固接兩種情況。

各案例編號中 t4、t5、t6 表示厚度分別為 4mm、5mm、6mm；H490、H485、H480 表示邊界條件為鉸接之試體水平投影長度分別為 490、485 及 480mm；F490、F485、F480 表示邊界條件為固接之試體其水平投影長度分別為 490、485 及 480mm (不包含邊緣夾合份)。本系列試驗考慮之挫屈連桿試體數共 18 組，試體之元件設計圖詳圖 3.1a 至圖 3.6c。

3.2 挫屈連桿之試驗規劃

3.2.1 應變規之佈設

茲以元件型號 t5H485 (圖 3.2b) 為例，考慮應變規之黏貼位置，依序編號為 1 ~ 5 (如圖 3.7)，其中位置 1、3 乃從連桿邊緣向內 1cm 之中心線處，位置 2、4、5 乃連桿中央處之上緣與下緣。由於只有三個訊號放大器可用，因此每次只能選擇三個點佈設，分別將應變規黏貼於三組不同位置之組合，包括 1 - 2、1 - 4 及 1 - 5，並給予三組試體 1.0Hz 擾動頻率及 1mm、3mm、5mm 擾動振幅；經比對發現利用三組不同黏貼位置應變計在同一振幅下，接收到應變規訊號資料繪出之時間歷時均極相似 (圖 3.8 至圖 3.10)，故往後試驗應變計將集中黏貼於其中一根試體上，以節省時間。

3.2.2 試驗規劃

挫屈連桿元件測試之試體規格表列於表 3.1，其詳細設計圖如圖 3.1a ~ 圖 3.6c 所示。

Case 1. 鉸接：

包括 t4H490(圖 3.1a)、t4H485(圖 3.1b)、t4H480(圖 3.1c)、t5H490(圖 3.2a)、t5H485(圖 3.2b)、t5H480(圖 3.2c)、t6H490(圖 3.3a)、t6H485(圖 3.3b) 及 t6H480(圖 3.3c) 等試體。

Case 2. 固接：

包括 t4F490(圖 3.4a)、t4F485(圖 3.4b)、t4F480(圖 3.4c)、t5F490(圖 3.5a)、t5F485(圖 3.5b)、t5F480(圖 3.5c)、t6F490(圖 3.6a)、t6F485(圖 3.6b) 及 t6F480(圖 3.6c) 等試體。

每組試體之測試頻率為 0.5Hz、1.0Hz、1.5Hz、2.0Hz、2.5Hz、3.0Hz、5.0Hz、7.0Hz 及 10.0Hz，其中 0.5Hz ~ 3.0Hz 頻率之測試振幅由 1mm ~ 5mm 振幅，5.0、7.0Hz 頻率之測試振幅由 1mm ~ 3mm，10.0Hz 頻率之測試振幅只考慮 1mm。試驗規劃列於表 3.2。

3.3 試驗設備與安裝

挫屈連桿試驗元件測試構架，係利用實驗室既有的 H 型鋼為之基礎底座（圖 3.11）與既有之反力座（圖 3.12），將油壓致動器安裝於 H 型鋼上適當距離，並利用鋼框架將 1.5 t 油壓致動器固定於基礎底座（圖 3.13）。另外，設鉸接頭與固接頭之夾具設計如圖 3.15a 及 3.15b 所示。測試不同邊界條件時可輕易轉換接頭（圖 3.14），同時轉換試體另一端連接器（圖 3.20）的接頭，俾便將兩根對稱試體固定於其上圖 3.16a ~ 圖 3.16b 而完成測試元件之安裝。為配合不同初始曲率之挫屈連桿試體安裝（長度不同），吾人於 H 型鋼翼版上開兩道平行槽，使反力座能依需要調整距離。



本試驗主要紀錄挫屈連桿之位移及力量，其驅動力來源為 1.5 t 油壓致動器（圖 3.17），透過 MTS 407 控制器（圖 3.18）可將不同頻率及不同位移振幅之控制命令訊號輸入伺服控制器。本系列輸入訊號為正弦波之位移擾動。實際位移量可以由 1.5 t 致動器內建之位移（LVDT）直接讀到，而出力則是以力規（load cell）（圖 3.19）進行量測。力規係安裝於致動器轉接頭與連桿試體連接器（圖 3.20）間，並利用焊錫將應變計及電線接到訊號調節放大器（圖 3.21）。上述感應計之電壓訊號係利用德國 IMC 資料擷取系統（圖 3.22）將類比訊號轉換為數位訊

號 (A-D)，試驗過程中數位訊號同步顯示於電腦螢幕上進行觀察 (圖 3.23)，並透過 Famos 軟體將數位訊號儲存於電腦中，以供後續之資料處理與分析之用。

挫屈連桿鉸接與固接兩種邊界條件之元件安裝如圖 3.24 及圖 3.25 所示。



第四章 挫屈型消能元件之試驗與分析

4.1 元件測試

4.1.1 遲滯迴圈 K' 、 K'' 、 η 之分析

如 2.2 節所述，若以橢圓遲滯模型模擬挫屈連桿之遲滯迴圈，並設定試驗之遲滯迴圈與理論遲滯迴圈之面積誤差百分率為 5% 範圍內，以橢圓形與位移最大值切點及橢圓形力量座標軸之交點（見圖 2.8），即 A_1 或 A_5 ，可求得彈性儲存勁度 K' ；由 A_3 或 A_7 則可求得損失勁度 K'' ，並利用式(2.43)之定義，可計算損失因子 η ，求得參數 K' 、 K'' 、 η 。其相關步驟如下說明：

由於結構存在非線性行為，導致系統往復過程中之遲滯現象。當位移 u 達到給定最大值 u_0 時，其相對之力量並非最大。若由最大位移 $\pm u_0$ 垂直延伸一虛線可切於遲滯迴圈之 A_1 （見圖 2.8）及 A_5 ，其中 $A_1 = |A_5| = K'u_0$ ，且 u_0 為已知，因此可求得彈性儲存勁度 K' 。

本研究試驗過程所得之遲滯迴圈穩定性良好，試驗分析所得之 K' 值係依據不同頻率，如頻率 0.5Hz 時歷時為兩分鐘，而當頻率給定 1.0Hz 時歷時取一分鐘試驗所得總迴圈數之平均結果。所以，當擾動頻率為 0.5Hz 時，兩分鐘試驗即有 60 個遲滯迴圈數，每一迴圈可得一 K' 值，

最後之 K' 值為 60 個 K' 值取平均之結果，其計算式可表示如下：

$$K'_{avg} = \frac{\sum_{i=1}^n (A_{1i} + |A_{5i}|)}{2n} \quad (4.1)$$

其中 n 為迴圈總數。

當擾動位移為 $u=0$ ，因遲滯現象造成其相對應之力量亦非同步為零，橢圓形遲滯迴圈交於力量座標軸之 A_3 及 A_7 兩點，其值為 $K''u_0$ 。因為 u_0 為已知，因此可求得損失勁度 K'' 。如前所述，給定 0.5Hz 試驗所得之 K'' ，亦為歷時兩分鐘 60 個迴圈試驗所得總迴圈數 n 之平均值，即：

$$K''_{avg} = \frac{\sum_{i=1}^n (A_{3i} + |A_{7i}|)}{2n} \quad (4.2)$$

其中 n 為迴圈總數。

耗損因子 η 可將式(4.1)及式(4.2)代入式 (2.43) 求得。各組挫屈連桿元件試驗所得之 K' 、 K'' 及 η 分成鉸接與固接兩種邊界條件分別整理於表 4.1 至 4.9 及表 4.10 至 4.18。

4.1.2 試驗結果與數據分析

實驗所得之遲滯迴圈如圖 4.1 至圖 4.18。其中邊界條件為鉸接之迴圈圖列於圖 4.1 ~ 圖 4.9，邊界為固接之迴圈圖則列於圖 4.10 至圖 4.18。當邊界條件為鉸接時，頻率為 0.5Hz，振幅 3mm 以下之遲滯迴圈並不飽滿，且有微小打結現象（圖 4.1a），但 1.0Hz 以上之測試結果即無此情況。其原因可能是夾具與連桿試體間之結合不夠密實，導至於低頻時致動器經油壓推動夾具與試體間產生間隙所致；邊界條件為固接時，即使擾動頻率為低頻時遲滯迴圈並無打結之現象，且振幅在 3mm 以下時遲滯迴圈均甚為飽滿。在頻率 0.5Hz，振幅 4mm 與 5mm 之遲滯迴圈則較為不飽滿，且有不對稱現象。吾人研判此乃試體與實驗機構結合後並非完全成垂直狀態，而造成施力不均所致，除了軸向力還伴隨些微扭力，導致拉壓不對稱。此外，亦不排除實驗機構與試體連接間隙（gap）未完全消除造成，這種情形在小振幅下，對遲滯迴圈飽滿度影響不大，但對大振幅 4mm 或 5mm 時影響則較大。

為了確認彈性儲存勁度 K' 、損失勁度 K'' 及損耗因子 η 與振幅 u_0 或擾動頻率 f 之關係，吾人分別繪製 K' 、 K'' 對應 u_0 ，以及 $\eta - u_0$ 關係圖（圖 4.19 ~ 圖 4.36）， $K' - f$ 和 $\eta - f$ 關係圖。結果顯示， K' 、 K'' 與 η 隨振幅變化不大，其變化主要由頻率控制，此現象由圖 4.37 至圖 4.54，

即 $\eta - f$ 之關係圖可以得知。圖 4.55 至圖 4.72 則代表 $K' - f$ 之關係圖，其圖形則類似線性關係。

選取邊界條件固接試體 (t6F485) 作一系列完整擾動頻率試驗，繪出 $\eta - f$ 關係圖，如圖 4.53 觀察由試驗結果識別出來的損耗因子 η ，其中 2.5Hz 至 3.0Hz 之間會出現類似「臨界頻率」現象，在極值兩側有對稱性，這與 tangent 週期函數的特徵很類似。實驗結果顯示其與式(2.43)所定義情況相符，茲進一步說明如下。

損耗因子 η (loss factor) 所具有的物理意義，代表對每一周期消散的能量，其值為正。以式 (2.43) 之定義而言，損耗因子 η 為相位差 δ (phase lag) 的函數，相位差則為擾動頻率 f 的函數。由擾動頻率之變化與遲滯效應的影響，可觀察到相位差會造成遲滯迴圈主軸的旋轉，且隨頻率增加遲滯迴圈有順時針轉動之趨勢，直到 3.0Hz 時產生彈性儲存勁度 K' 為負值的現象。以圖 4.73a 而言， $\tan(\phi) - \phi$ 的曲線特徵在 $\phi = n\pi/2$ ， $n = 1, 3, 5...$ ，有極值出現，這與 $\eta - f$ 關係圖之現象不謀而合。故此處之“負”勁度現象，是因為相位差引起的遲滯迴圈主軸旋轉所致，並非結構勁度損失甚至不穩定的徵兆；由此吾人將式 (2.43) 的定義在模擬遲滯迴圈時，可改寫為：

$$|\eta| = \left| \frac{K''}{K'} \right| = |\tan \delta| \quad (4.1)$$

所以，圖 4.44、圖 4.53 取絕對值後可以改為圖 4.74a、圖 4.74b，

而 $\tan(\phi) - \phi$ 曲線特徵圖 4.73a 亦可改為圖 4.73b。此外，由圖 4.74 之結果顯示在擾動頻率為 2.0Hz 以下及 4.0 ~ 6.0Hz 範圍內，不同振幅 u_0 下損耗因子 η 相對小很多，故推論 $\eta - f$ 曲線具周期性。

茲以擾動頻率 $f = 0.5\text{Hz}$ 為例，比較固接與鉸接挫屈型消能元件之最大出力；圖 4.75a 表示三種試體厚度 ($t = 4、5、6\text{mm}$)，長度分別為 (490、485、480mm) 及固接與鉸接條件最大出力，並比較 t6H485 ($t : 6\text{mm}$ ， $L : 485\text{mm}$ ，B.C. : Hinged) 與 t6F485 ($t : 6\text{mm}$ ， $L : 485\text{mm}$ ，B.C. : Fixed) 之遲滯迴圈如圖 4.76 所示。結果顯示，固接條件之最大出力及消能效果均明顯優於鉸接，因此，實際應用挫屈型消能元件時，建議採用固接。探討邊界條件對於挫屈元件最大出力和儲存勁度 K' 之影響時亦發現，無論何種邊界條件，各試體遲滯迴圈之主軸隨頻率增加之轉動趨勢均相同。

茲進一步探討固接條件下設計厚度 (t) 及長度 (L) 對元件特性之影響。試驗結果顯示，最大出力隨元件厚度及長度不同而改變。圖 4.75b 顯示，固接條件下，相同長度不同厚度之試體以 $L = 485\text{mm}$ 出力最大。圖 4.77 顯示厚度 $t = 6\text{mm}$ 時，具有最大出力；然而當 $t = 5\text{mm}$ 及 6mm 時， $L = 485\text{mm}$ 效果最好。由於元件長度會影響初始弦切角 q_0 ，此一結果顯示並非 q_0 愈小時出力愈大，此與先前彈性挫屈勁度之分析結果並不一致。

4.2 挫屈消能斜撐之耐震性能測試

耐震性能試驗 (seismic performance test) 係利用振動台模擬真實地震條件下驗證防震裝置之減震效能。本次耐震性能試驗係將阻尼器元件安裝於一座 1/2 縮尺五層樓鋼結構模型上進行測試，該鋼結構模型之平面 $2 \times 2 \text{ m}^2$ ，樓高 6.7m，重約 4.1t (圖 4.78)，相關之結構參數如表 4.20 所示。

振動感應計之安排以加速規為主，共安裝 7 個加速規 (CROSSBOW $\pm 4g$)，裝設位置包括振動臺面上、基座以及各樓板中央，用以量測各樓層之加速度反應。

以挫屈元件為核心之斜撐型阻尼器如圖 4.79 所示，每支斜撐於 H 型左上端鋼腹版及翼版裝設挫屈消能元件。其局部構造如圖 4.80 所示。

本次耐震性能測試係考慮將阻尼器裝設於結構模型兩側平行於地震運動方向之構架各樓層間，共計 10 組阻尼器，如圖 4.81 所示。阻尼器試件係將挫屈型消能元件配置於中心主體的 H 型鋼與一端接合之槽鋼中間所製作完成，阻尼器總長度為 2075mm (1F) 及 2000mm (2F ~ 5F)，極限位移為 40mm，共計使用 10 組阻尼器。

耐震性能試驗分別以 Hachinohe 與 Kobe 兩種地震作為地表擾動，並調整其最大地表加速度以進行一系列之耐震試驗。為了避免無阻尼器保護之空構架結構於試驗中受損，空構架試驗時僅採用最小的地震

強度 (PGA=0.1g) 進行測試，其餘地震強度之空構架試驗結果係依照地震強度之比例放大。加裝阻尼器時之不同強度地震模擬試驗結果則為實際量測值。

Kobe 地震

在不同地震強度下，各樓層加速度反應峰值歸納於表 4.21，結果顯示在不同地震強度下，裝設阻尼器的結構其所有樓層加速度反應皆有明顯的折減，毫無例外。五樓加速度峰值在 PGA=0.099g 時減震效益約 19%，而當增加地震強度時其減震效益仍有不錯的減震效益且有上升的趨勢。一樓加速度峰值在 PGA=0.099g 時其減震效益約為 44%，當地震強度提升到 PGA=0.576g 時，其減震效益則達到 36%。PGA=0.576g 時各樓層之加速度反應比較如圖 4.87 所示，結果顯示加裝阻尼器有顯著的減震效果。加速度反應均方根值 (root-mean-squares, RMS) 的比較結果歸納於表 4.22，其減震效益更為顯著，當 PGA=0.099g 時，頂樓均方根值之加速度折減高達 74%；當地震強度提升時，其減震效益仍達 70% 以上，且隨地震強度的增加減震效益亦有上升的趨勢。吾人將耐震性能試驗之不同 PGA 下各樓層加速度反應比較列於圖 4.82 ~ 圖 4.87。

Hachinohe 地震

在不同地震強度下，各樓層加速度反應峰值歸納於表 4.23，結果顯示在不同地震強度下，裝設阻尼器的結構其所有樓層加速度反應皆有明顯的折減，毫無例外。五樓加速度峰值在 $PGA=0.092g$ 時減震效益約 70%，而當增加地震強度時其減震效益仍有不錯的減震效益，當 $PGA=0.312g$ 時，5F 之減震效益則略降至 42%。而一樓加速度峰值在 $PGA=0.092g$ 時其減震效益約為 55%，而隨著地震強的提升其減震效益仍維持在 20 ~ 50% 左右。 $PGA=0.312g$ 時各樓層之加速度反應比較如圖 4.93 所示，結果顯示加裝阻尼器有顯著的減震效果。加速度反應均方根值 (root-mean-squares, RMS) 的比較結果歸納於表 4.24，其減震效益更為顯著，當 $PGA=0.092g$ 時，頂樓均方根值之加速度折減高達 85%；當地震強度提升時，其減震效益則維持在 70% 以上，當 $PGA=0.312g$ 時，減震效益略降至 76%，而其他樓層之減震效益亦有相同趨勢。吾人將耐震性能試驗之不同 PGA 下各樓層加速度反應比較列於圖 4.88 ~ 圖 4.93。

第五章 挫屈型消能元件之 ANSYS 分析

5.1 前言

電腦為一具有快速運算能力的計算器，因此常被設計工程師用來計算分析產品，進而達到輔助設計分析的目的。吾人可以在電腦上利用現有電腦模擬軟體，模擬結構物在受到外力影響後所產生之應力及應變情形，並且可以計算此結構物在動態方面如共振頻率或其他方面的特性。從所分析出的特性資料，吾人可以快速判斷此結構物設計之安全性或可行性，進而提升工作效率。

ANSYS 是目前在工業上常使用的電腦輔助分析套裝軟體，它能同時分析結構物受到靜力、動力、熱傳及流力等多重物理現象影響時之變化，因此常被應用在土木、航太、機械、電子封裝、微機電、醫學工程等多種領域。其運算原理乃根據有限元素法 (finite element)；利用其建模 (modeling) 的功能將模型建立好，定義使用元素特性及材料性質，並進行網格化 (mesh)，再附加一些適當的條件，就可直接利用有限元素法計算，進而了解所建立的模型之特性。所以吾人選擇以 ANSYS 套裝軟體，作為分析挫屈連桿應力及應變的工具。

5.2 ANSYS 軟體架構

ANSYS 在架構上分成前處理器 (preprocessor)、求解器 (solver) 及後處理器 (postprocessor) 等三大基本部分，另外 ANSYS 也包含最佳化設計和其它一些特殊功能的模組。當進入 ANSYS 的圖形操作介面時，即進入軟體之初始狀態，或稱為預備狀態 (begin level)；所有模組狀態都是在此狀態下獨立執行，每組模態均有其獨立指令，彼此間不能混用，因此需注意指令與模組之間的關係，尤其是以指令輸入方式進行軟體操作時，更須特別注意。

5.2.1 前處理器



ANSYS 前處理器大致可分為以下三部分：

1. 選擇適當元素、定義元素特性及材料性質。
2. 建立結構物實體模型。
3. 有限元素模型網格化。

首先第一步驟是元素的選擇，選擇完畢後，即決定模型要如何簡化與建構方式，同時也決定了解題與邊界條件之方式。

ANSYS 元素以空間的立場來分：

點 (key point) 元素，例如 mass21，它是以質量點代替物理系統中的某一部份，如此可以簡化元素使用量，但又不影響結構細節的描

述。

線 (line) 元素：包含樑 (beam) 元素、管 (pipe) 元素及連接 (link) 元素，每種元素使用假設均不同，有歐拉樑 (Euler beam) 或非對稱等不同假。

面 (area) 元素：最常採用的是薄殼 (shell) 元素，所使用理論有薄殼、厚板及薄膜理論等，利用薄殼元素建立結構模型時，必須取結構物實體體積的中間平面 (middle plane) 當成網格化使用的模型平面，所以需花費較多時間建立模型平面，但透過此法後結構即簡化，因此計算所需時間會比全部用實體元素時間簡短。

體積 (volume) 元素：可分為實體體積 (solid) 元素或以 2-D 模擬 3-D 的平面 (plane) 元素，它所探討的包含平面應力 (plane stress)、平面應變 (plane strain) 及軸對稱 (axis-symmetry) 等假設特性；使用時需注意將模型建立在 X-Y 平面上，若是軸對稱分析，則除了將模型建立在正的 X-Y 平面上，且只能在 +X 象限內並以 Y 軸為旋轉中心軸。通常採用的實體元素是 solid45、solid186 等，只要將模型建立後做適當的網格化，即可進行有限元素分析。

除了上述常用元素外，ANSYS 之元素庫還有許多以 cont 開頭的接觸元素，以 viso 為開頭的特殊材料特性元素，還有用於描述流動的流體 (fluid) 元素等，吾人可以針對分析對象選擇最適當元素，達到最

接近實際情形的分析效果。

元素選擇完畢，接著設定元素參數 (real constant)，元素參數會隨元素不同有不同意義，如樑 (beam) 元素的元素參數代表元素截面積 (area) 和慣性矩 (moment of inertial) 等資料。

參數設定完成後，要考慮材料性質 (material property)，此時要先考量材料在變形後是否進入塑性 (plasticity) 變形區而形成材料的非線性 (nonlinear) 現象；一般而言，若不確定是否存在非線性現象，初期考量以線性 (linear) 材料為主。但若再分析完畢後，於後處理器 (postprocessor) 中確認違反線性假設，則必須重新以非線性模式驗證一次。

接著，進行 ANSYS 實體模型建立；從作法上可區分為兩種，分別是從上而下 (top-down) 以及由下而上 (bottom-up)。一般而言，從上而下法必須先建立基礎幾何單元，如圓柱、四方體等，再將這些基礎單元透過布林運算 (boolean operation) 技巧組合起來；布林運算包含加 (add)、減 (subtract)、交 (intersect)、分解 (divide)、粘接 (glue)、搭接 (overlap) 等功能，可依需求使用；從上而下法普遍使用在較規則形狀結構物的建立。至於由下而上法則是先建立結構物上的重要關鍵點 (key point)，再將點連成線，線再連成面，而後面再合成一個體積，最後運用布林運算完成實體模型；此法一般應用在於比較複雜的

結構物建立。

最後一步是將實體模型網格化 (meshing)，此技巧可區分為自由網格 (free mesh) 跟規則網格 (mapped mesh) 兩種方法。自由網格法對於實體模型限制要求較少，可以利用 ANSYS 內建的自動網格產生器 (mesh generator) 進行，使用前僅需輸入網格大小、密度及型式，或是指定分割為幾等分；經確認後，實體模型即可轉換為有限元素模型。然而，規則網格法卻有較多條件限制，其幾何體積必須符合一定的要求，否則無法格點化，因此需花費較多時間將實體模型作細部分割，但是規則網格法的優點為計算結果較自由網格法嚴謹、準確。

有限元素模型之產生，除了上述由實體模型轉換，還可透過直接定義關鍵點位置，再由點連成線，最後組合成有限元素模型的方式建立；當有限元素模型產生後，前處理器部分亦完成。

5.2.2 求解器

在 ANSYS 軟體中，求解器 (solver) 的功能，乃將上節之前處理器 (preprocessor) 產生之有限元素模型，於此處進行邊界條件設定及施加外力加載並進行分析。

ANSYS 求解器大致分成以下四部分：

1. 確認分析方式及解法選項。
2. 設定邊界條件之拘束。
3. 設定外力或變位的邊界條件。
4. 設定輸出、入控制與求解。

首先決定結構分析中分析的種類，由 ANSYS 內建設定，可以選擇下述七種方式：

1. 靜態分析 (static)：用於分析靜態結構受力後的變形與應力、應變，靜力分析包含線性及非線性分析，而非線性則牽涉到塑性、應變硬化、大變形、大應變等性質。
2. 模態分析 (modal)：用來求得結構物的自然頻率 (natural frequency) 及模態。
3. 簡諧分析 (harmonic)：用來計算結構物在隨時間正弦變化的載重作用下影響

4. 暫態分析 (transient)：模擬結構物隨時間受力後，應力、應變及位移隨時間變化的情形。
5. 譜分析 (spectrum)：是模態分析的應用擴展，用於計算由反應譜或 PSD 輸入引起的應力、應變。
6. 子結構分析 (substructure)：對於重複幾何結構模型可將重複部分，透過複製稱成結構其他部分，節省空間。
7. 挫屈分析 (Eigen buckling)：用於計算挫屈加載和確定挫屈模態，ANSYS 可進行線性和非線性的挫屈分析。

ANSYS 的加載 (loads) 包含邊界條件和有限元素模型內部或外部的作用力，在不同學科當中，加載的涵義也不盡相同，在結構分析 (structural) 中的加載為位移、力、壓力、溫度和重力。

其邊界條件區分為以下六類：

1. 自由度約束 (DOF constraint)：將某自由度用已知值固定，在結構分析中約束被指定為位移邊界條件。
2. 力 (force)：為施加於有限元素模型節點的加載，在結構分析中被指定為力或彎矩。
3. 表面加載 (surface load)：表示施加於某個表面的分佈加載，在結構分析中為壓力。
4. 體積加載 (body force)：表示施加於結構內部負載或溫度場。

5. 慣性加載 (inertia load)：由物體的慣性引起的載重，如重力加速度、角加速度等。
6. 耦合場加載 (coupled field loads)：為上述加載的特殊情況。

外力的邊界條件設定完成後，即可進行求解；有限元素法的求解其實就是在解一個龐大的矩陣，而矩陣的計算就是 solver 的工作，線性靜態問題僅需解一次矩陣，但若遭遇非線性或是大變形問題，求解次數就有可能達到上百甚至上千次，為了使用方便，ANSYS 提供多種不同求解有限元素方程方式如下：

1. 直接解法 (frontal direct solution)
2. 稀疏矩陣法 (sparse direct solution)
3. 雅可比共軛梯度法 (Jacobi conjugate gradient)
4. 條件共軛梯度法 (preconditioned conjugate gradient)
5. 自動疊代法 (automatic iterative solution)

上述設定完成後即可求解，求解之結果會輸出到一結果檔，若有新的邊界條件也可繼續設定並進行求解，新的結果會附加在原來檔案中，當所有求解動作完成後，求解器即完成其任務。

5.3 挫屈連桿之 ANSYS 非線性模擬分析

ANSYS 的使用有兩個模式，一是交談模式 (interactive mode)，另一是非交談模式 (batch mode)。交談模式乃進入 ANSYS 後，逐一下達指令完成分析工作，內容包括建立模型、檢視模型、修改模型、儲存檔案、列印圖形及分析結果之獲得等。反之，如果分析的問題需很長時間，可將分析問題的所有指令，利用任何文書編輯軟體製作成文字檔，透過非交談模式進行分析工作。本節將利用交談模式敘述方法，建立吾人欲分析挫屈連桿之有限元素模型，並進行靜態載重分析。

首先定義元素特性以及材料性質，進入 ANSYS 前處理器後，選取選單中 solid45 實體元素作為基本分析元素，如 (圖 5.1)，solid45 用於模擬 3-D 實體結構，元素由八個節點組合而成，每個節點具有 X、Y、Z 位移方向之自由度 (圖 5.2)。元素具有塑性、潛變、膨脹、應力強化，大變形和大應變之特性。其假設與限制為不允許零體積之元素，所產生節點依序依 (圖 5.2) 而定或平面 IJKL 與 MNOP 互換，並且不允許扭曲造成兩塊分離體積，此點常由於節點連接錯誤產生，元素為八個點，但角柱及角錐元素亦可接受，如圖 (5.3) 所示。

接著輸入連桿之材料性質，由於試驗試體為鋼材 (steel) 製造，選取清單材料性質部分 (material props) 定義結構分析 (圖 5.4) 選項之

鋼材線性部分，設定材料彈性模數 (Young's modulus) 及柏松比 (poisson ratio)，並將材料屬性設置為等向性 (isotropic) 的線彈性材料如 (圖 5.5)，再定義非線性性質如 (圖 5.6) 所示。

定義完材料特性後開始進行實體模型的建立，吾人以挫屈連桿型號 t4H490 為範例，將實體模型的建模過程完整敘述一遍，其他連桿型號只要將連桿厚度及長度等關鍵尺寸修改即可。首先，進入前處理器建模 (modeling) 選項，選擇產生 (create) 中建立體積 (volume)，由於連桿試體乃類似三個局部拋物線組成的物體，吾人選則 partial cylinder 選項 (圖 5.7) 中自訂尺寸功能，輸入型號 t4H490 關鍵點位置 (圖 5.8)，可以得到左半邊連桿模型 (圖 5.9)，接著移動工作平面到最右端 (圖 5.10)，同樣輸入右半邊關鍵點位置，再將工作平面 (work plane) 移到畫面中間完成連桿三個主要部份模型 (圖 5.11)，將畫面轉成 3-D 形式檢查連桿是否對稱 (圖 5.12)；檢查完畢後再三段中還留有空隙，吾人此時將工作平面移到左邊段模型的右端點 (圖 5.13) 建立一尺寸適當的矩形塊 (圖 5.14) 填滿空隙部份，同樣在右邊也建立相同矩形塊填滿右側空隙，轉換畫面為 2-D 形式，檢查兩矩形塊有無填滿 (圖 5.15)；為了清除連桿邊多餘的矩形塊，選擇應用選單中工作平面裡的 Align WP with 功能 (圖 5.16) 將工作平面移到所欲清除矩形上點選三個關鍵點可使座標沿吾人欲修正方向走 (圖 5.17)，並選擇分割

面，但 ANSYS 的分割 (divide) 功能僅適用於 X-Y 平面，所以吾人必須手動調整分割面對齊欲分割處 (圖 5.18)，分割完成後點選清除 (delete) 功能點擊多餘矩形 (圖 5.19)，清除後如圖 (5.20)；檢視矩形與連桿交接處發現不平整尖角如 (圖 5.21)，此時採用 ANSYS 中 operate 布林運算的搭接 (overlap) 功能潤化尖角 (圖 5.22)，再利用清除 (delete) 功能將多餘地方清除完成試體建立 (圖 5.23)。

最後進行網格劃分 (meshing) 生成有限元素模型，選擇 meshing 選項中元素大小控制 (size controls) 的 manual size，再選其中 Global size (圖 5.24) 自訂吾人所希望元素分割大小，採用規則網格法 (mapped mesh) 劃分網格 (圖 5.25)，即可完成有限元素模型製作 (圖 5.26)。

吾人將 ANSYS 操作流程表列出於 (表 5.1)。

5.4 模擬挫屈消能元件之非線性應力分析

本節探討挫屈消能元件型號 t6F490 邊界條件固接下，模擬元件受靜態加載之位移 1mm ~ 5mm (分成五次加載，逐次增加 1mm 位移)。

5.4.1 模擬元件軸向受力之應力分佈

首先建立元件之結構分析模型，此乃一組成對之挫屈連桿，進行網格劃分後即可進行靜態之位移增量加載，分別施予元件模型左端位移為零，而右端施予 1mm ~ 5mm 軸向位移。執行 ANSYS 計算後 (Current LS)，分別繪出元件模型各階段端點位移 (1mm ~ 5mm) 之變形圖 (如圖 5.27)，並用色階表現其應力分佈情況 (von Mises stress) (如圖 5.28)。圖 5.27 之結果顯示，元件模型受軸向壓力前、後之變位圖，其中，白色虛線與藍色部分，分別表示試體變形前、後狀況。由圖 5.28 之一系列應力分佈圖顯示，試體兩端 $\frac{1}{4}$ 處反曲點之應力分佈情形相對於中央以及邊緣處顯得極小，而試體中央處應力最大，此與預期之受力分佈情況一致。

5.4.2 比較元件切削前、後軸向受力應力分佈

接著，進行挫屈型消能元件型號 t6F490 固接條件，切削前、後之應力分佈比較，首先吾人設計元件之切削模式，依據未切削軸向受壓

5mm 之應力分佈，自元件兩反曲點處向其中央切 10mm，再以 80 度放射角，朝左右向外延伸作切削（圖 5.29）；將切削前之元件受軸向壓力位移 1mm ~ 5mm 應力分佈，調整為依降伏應力 345MPa 為基準，定為紅色（圖 5.30），對照切削後之元件進行軸向施壓 1mm ~ 5mm，觀察其應力分佈（圖 5.31）達應力 345MPa 降伏區域確實有擴大的跡象，再比較切削前、後元件底部應力分佈，清楚顯示達降伏之範圍更廣（圖 5.32），此與吾人預期切削後應力之分佈，提升至全斷面降伏設想相符，且其最大應力有上升的現象。未來可作為鋼板最佳切削模式之依據。



第六章 結論與建議

本文主要探討挫屈連桿之力學行為，文中完成彈性挫屈勁度之理論推導，並進行一系列之元件測試與性能測試（振動台測試）。元件測試旨在瞭解挫屈連桿之遲滯消能行為，並得知相關設計參數與擾動頻率之關係；挫屈消能斜撐之振動台耐震性能測試則在驗證其防震性能。茲根據本研究之結果歸納討論與建議如下：

1. 元件測試之結果顯示，軸力與軸向變形之遲滯迴圈關係呈一橢圓形，顯示挫屈連桿具備阻尼器消能之特性。當測試頻率達 1.0Hz 以上時，挫屈連桿之遲滯迴圈甚為飽滿，且其消能面積有隨頻率上升而增加的趨勢。
2. 本系列試驗中當邊界條件為固接，振幅在 3mm 以下時遲滯迴圈均較為飽滿，而在頻率 0.5Hz 振幅 4mm 與 5mm 之遲滯迴圈則較為不飽滿，且有不對稱現象，其原因可能是測試構架之精度不佳導致在測試過程中除了軸力外，伴隨扭力所致。
3. 固接與鉸接之挫屈連桿元件測試結果顯示，二者之遲滯迴圈均十分飽滿，惟固接條件之最大出力及消能面積大於鉸接條件之測試結果。實際應用時建議採用固接條件。
4. 耐震性能測試結果顯示，結構裝設挫屈消能斜撐可有效降低各樓

層之加速度峰值與均方根振動量，說明挫屈消能斜撐優越之防震性能。

5. 未來可根據元件測試所得之結果建立挫屈連桿之相關尺寸及出力之設計準則，俾便應用於實務結構防震之設計。此外，可配合挫屈連桿之應力分佈進行適當之切削，使其可達全面降伏的狀態，以進一步提升挫屈連桿之消能能力。
6. 元件測試所得之遲滯迴圈可嘗試利用系統識別的技術求得其勁度與阻尼之數學模式 ($F_D = Ku + C\dot{u}^\alpha$)。若可求得上述之參數，則吾人將可於有限元素分析軟體 (SAP2000、ETABS) 中模擬挫屈消能斜撐元件，並進行真實結構安裝挫屈消能斜撐之動力歷時分析，俾便評估其防震性能。
7. 本文所討論之挫屈消能元件相關特性與最大出力值有關，尚未論及元件內部應變及應力分佈變化。未來可考慮利用試驗黏貼之應變規量測應變值並反推該位置應力值，並透過 ANSYS 軟體進行動力分析，驗證該位置之應力、應變值，以找尋挫屈消能元件之最佳切削 (cutting) 模式。

參考文獻

- 【1】 J. Winterflood, D. Blair, and B. Slagmolen (2002), “High performance vibration isolation using springs in euler column buckling mode,” Physics Letters A, 300:122-130, 2002.
- 【2】 L.N. Virgin, R.B. Davis (2003), “Letter to the Editor Vibration isolation using buckled struts,” Journal of Sound and Vibration, (260), pp.965-973.
- 【3】 E.J. Chin, K.T. Lee, J. Winterflood, J. Jacob, D.G. Blair and L. Ju, “Techniques for reducing the resonant frequency of Euler spring vibration isolations, ” Classical and Quantum Gravity 21(2004), pp. 959-963.
- 【4】 Z.P. Bazant, L. Cedolin, Stability of Structures, Oxford University Press, Oxford, 1991.
- 【5】 J.M.T. Thompson, G.W. Hunt, Elastic Instability Phenomena, Wiley, New York, 1984.
- 【6】 J. Winterflood, T.A. Barber, and D.G. Blair, “Using Euler buckling spring for vibration isolation ,” Classical and Quantum Gravity 19(2002), pp. 1639-1645.
- 【7】 R.H. Plaut, J.E. Sidbury, and L.N. Virgin, “Analysis of buckled and pre-bent fixed-end columns used as vibration isolators, ” Journal of Sound and Vibration, v 283, n 3-5, May 20, 2005, pp. 1216-1228.

- 【8】 J.-C. Ji, and C.H. Hansen, “Non-linear response of a post-buckled beam subjected to a harmonic axial excitation, ” Journal of Sound and Vibration, v 237, n 2, Oct, 2000, pp. 303-318.
- 【9】 P. Bonello, M.J. Brennan, and S.J. Elliott, “Vibration control using an adaptive tuned vibration absorber with a variable curvature stiffness element, ” Smart Materials and Structures, v 14, n 5, Oct 1, 2005, pp. 1055-1065.
- 【10】 林科良(2006) “,挫屈連桿樓板減振系統之初步研究, ” ,交通大學土木工程學系碩士論文(指導教授：王彥博)。
- 【11】 James.M.Gere , Mechanics of Materials , Thomson ,Canada ,2006.



表 3.1 挫屈型消能元件試體規格

鉸接條件	$L=490mm$	$L=485mm$	$L=480mm$
q_0 : 初始弦切角(rad)	0.34748	0.42618	0.49208
κ_0 : 初始曲率	0.0028	0.0034	0.0039
厚度 : 4mm	t4H490	t4H485	t4H480
厚度 : 5mm	t5H490	t5H485	t5H480
厚度 : 6mm	t6H490	t6H485	t6H480

固接條件	$L=490mm$	$L=485mm$	$L=480mm$
q_0 : 初始弦切角(rad)	0.34748	0.42618	0.49208
κ_0 : 初始曲率	0.0028	0.0034	0.0039
厚度 : 4mm	t4F490	t4F485	t4F480
厚度 : 5mm	t5F490	t5F485	t5F480
厚度 : 6mm	t6F490	t6F485	t6F480

表 3.2 試驗規劃表

振幅 擾動頻率	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
0.5Hz	☆	☆	☆	☆	☆
1.0Hz	☆	☆	☆	☆	☆
1.5Hz	☆	☆	☆	☆	☆
2.0Hz	☆	☆	☆	☆	☆
2.5Hz	☆	☆	☆	☆	☆
3.0Hz	☆	☆	☆	☆	☆
5.0Hz	☆	☆	☆
7.0Hz	☆	☆	☆
10.0Hz	☆

表 4.1 t4H490 實驗 K' 、 K'' 、 η

型號：t4H490 振動頻率 0.5Hz					
振幅 係數	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
K'	5.85	4.72	4.34	4.15	4.05
K''	0.7	0.32	0.58	0.73	0.84
η	0.12	0.07	0.14	0.17	0.21

型號：tH490 振動頻率 1.0Hz					
振幅 係數	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
K'	4.87	4.08	3.71	3.53	3.41
K''	1.67	1.6	1.74	1.83	1.89
η	0.34	0.39	0.47	0.52	0.55

型號：t4H490 振動頻率 1.5Hz					
振幅 係數	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
K'	4.1	3.16	2.8	2.62	2.51
K''	3.07	2.57	2.53	2.54	2.58
η	0.75	0.81	0.9	0.97	1.03

型號：t4H490 振動頻率 2.0Hz					
振幅 係數	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
K'	2.94	2.11	1.8	1.64	1.56
K''	3.81	3.09	2.95	2.91	2.9
η	1.3	1.46	1.64	1.77	1.86

型號：t4H490 振動頻率 2.5Hz					
振幅 係數	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
K'	1.77	1.13	0.87	0.75	0.69
K''	4.05	3.22	3	2.93	2.92
η	2.29	2.85	3.47	3.92	4.2

型號：t4H490 振動頻率 3.0Hz					
振幅 係數	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
K'	-0.78	-0.41	-0.34	-0.31	-0.31
K''	3.82	3	2.78	2.66	2.6
η	-4.88	-7.31	-8.22	-8.46	-8.33

表 4.2 t4H485 實驗 K' 、 K'' 、 η

型號：t4H485 振動頻率 0.5Hz					
振幅 係數	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
K'	6.82	5.66	5.30	5.15	5.06
K''	0.62	0.36	0.76	0.95	1.08
η	0.09	0.06	0.14	0.19	0.21

型號：tH485 振動頻率 1.0Hz					
振幅 係數	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
K'	6.22	5.02	4.57	4.32	4.22
K''	1.91	2.00	2.26	2.43	2.56
η	0.31	0.40	0.49	0.56	0.61

型號：t4H485 振動頻率 1.5Hz					
振幅 係數	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
K'	5.15	3.87	3.41	3.19	3.07
K''	3.68	3.17	3.18	3.27	3.33
η	0.71	0.82	0.93	1.02	1.09

型號：t4H485 振動頻率 2.0Hz					
振幅 係數	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
K'	3.74	2.58	2.18	1.98	1.88
K''	4.73	3.83	3.69	3.68	3.70
η	1.26	1.48	1.69	1.86	1.97

型號：t4H485 振動頻率 2.5Hz					
振幅 係數	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
K'	2.33	1.38	1.03	0.89	0.82
K''	4.92	3.97	3.75	3.69	3.70
η	2.11	2.87	3.64	4.13	4.53

型號：t4H485 振動頻率 3.0Hz					
振幅 係數	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
K'	-1.04	-0.50	-0.41	-0.40	-0.41
K''	4.87	3.76	3.45	3.37	3.29
η	-4.69	-7.56	-8.50	-8.44	-8.01

表 4.3 t4H480 實驗 K' 、 K'' 、 η

型號：t4H480 振動頻率 0.5Hz					
振幅 係數	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
K'	6.72	5.47	5.00	4.81	4.70
K''	0.88	0.15	0.61	0.81	0.94
η	0.13	0.03	0.12	0.17	0.20

型號：t4H480 振動頻率 1.0Hz					
振幅 係數	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
K'	5.92	4.71	4.27	4.06	3.95
K''	1.47	1.67	1.93	2.08	2.19
η	0.25	0.35	0.45	0.51	0.55

型號：t4H480 振動頻率 1.5Hz					
振幅 係數	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
K'	4.84	3.65	3.23	3.01	2.90
K''	3.37	2.88	2.91	2.95	3.01
η	0.70	0.79	0.90	0.98	1.04

型號：t4H480 振動頻率 2.0Hz					
振幅 係數	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
K'	3.53	2.44	2.08	1.88	1.78
K''	4.32	3.50	3.39	3.37	3.38
η	1.22	1.44	1.63	1.79	1.89

型號：t4H480 振動頻率 2.5Hz					
振幅 係數	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
K'	2.16	1.34	1.01	0.87	0.79
K''	4.58	3.62	3.43	3.36	3.34
η	2.13	2.71	3.39	3.84	4.20

型號：t4H480 振動頻率 3.0Hz					
振幅 係數	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
K'	-0.97	-0.48	-0.37	-0.37	-0.36
K''	4.56	3.54	3.20	3.10	3.03
η	-4.72	-7.39	-8.54	-8.41	-8.42

表 4.4 t5H490 實驗 K' 、 K'' 、 η

型號：t5H490 振動頻率 0.5Hz					
振幅 係數	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
K'	11.51	9.73	8.84	8.39	8.12
K''	1.45	0.13	0.79	1.13	1.32
η	0.13	0.01	0.09	0.13	0.16

型號：t5H490 振動頻率 1.0Hz					
振幅 係數	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
K'	10.80	8.44	7.63	7.18	6.92
K''	2.53	2.83	3.25	3.46	3.58
η	0.23	0.34	0.43	0.48	0.52

型號：t5H490 振動頻率 1.5Hz					
振幅 係數	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
K'	8.74	6.60	5.79	5.42	5.17
K''	5.89	5.00	4.94	4.99	5.03
η	0.67	0.76	0.85	0.92	0.97

型號：t5H490 振動頻率 2.0Hz					
振幅 係數	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
K'	6.35	4.48	3.81	3.48	3.29
K''	7.79	6.29	5.97	5.86	5.82
η	1.23	1.41	1.57	1.68	1.77

型號：t5H490 振動頻率 2.5Hz					
振幅 係數	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
K'	3.92	2.43	1.91	1.68	1.54
K''	8.17	6.48	6.06	5.88	5.78
η	2.08	2.66	3.18	3.50	3.74

型號：t5H490 振動頻率 3.0Hz					
振幅 係數	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
K'	-1.70	-0.87	-0.69	-0.65	-0.63
K''	8.18	6.33	5.75	5.47	5.35
η	-4.81	-7.28	-8.36	-8.42	-8.46

表 4.5 t5H485 實驗 K' 、 K'' 、 η

型號：t5H485 振動頻率 0.5Hz					
振幅 係數	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
K'	13.36	10.71	9.73	9.21	8.91
K''	2.07	0.15	0.88	1.24	1.44
η	0.16	0.01	0.09	0.13	0.16

型號：t5H485 振動頻率 1.0Hz					
振幅 係數	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
K'	11.93	9.31	8.38	7.88	7.61
K''	2.60	3.06	3.51	3.75	3.90
η	0.22	0.33	0.42	0.48	0.51

型號：t5H485 振動頻率 1.5Hz					
振幅 係數	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
K'	9.73	7.35	6.42	5.98	5.70
K''	6.40	5.46	5.46	5.50	5.54
η	0.66	0.74	0.85	0.92	0.97

型號：t5H485 振動頻率 2.0Hz					
振幅 係數	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
K'	7.23	5.03	4.27	3.88	3.68
K''	8.51	6.85	6.51	6.40	6.34
η	1.18	1.36	1.52	1.65	1.72

型號：t5H485 振動頻率 2.5Hz					
振幅 係數	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
K'	4.54	2.81	2.17	1.93	1.76
K''	9.13	7.22	6.71	6.51	6.41
η	2.01	2.57	3.09	3.37	3.64

型號：t5H485 振動頻率 3.0Hz					
振幅 係數	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
K'	-2.03	-0.99	-0.77	-0.71	-0.70
K''	9.03	6.97	6.31	6.05	5.88
η	-4.45	-7.03	-8.14	-8.48	-8.41

表 4.6 t5H480 實驗 K' 、 K'' 、 η

型號：t5F480 振動頻率 0.5Hz					
振幅 係數	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
K'	11.74	9.39	8.60	8.14	7.91
K''	1.63	0.18	0.87	1.18	1.35
η	0.14	0.02	0.10	0.14	0.17

型號：t5H480 振動頻率 1.0Hz					
振幅 係數	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
K'	10.50	8.21	7.41	6.92	6.69
K''	2.63	2.94	3.40	3.63	3.77
η	0.25	0.36	0.46	0.52	0.56

型號：t5H480 振動頻率 1.5Hz					
振幅 係數	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
K'	8.52	6.28	5.55	5.20	4.99
K''	6.00	5.04	5.04	5.04	5.08
η	0.70	0.80	0.91	0.97	1.02

型號：t5H480 振動頻率 2.0Hz					
振幅 係數	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
K'	6.25	4.30	3.64	3.33	3.17
K''	7.82	6.25	5.92	5.81	5.74
η	1.25	1.45	1.63	1.74	1.81

型號：t5H480 振動頻率 2.5Hz					
振幅 係數	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
K'	3.83	2.34	1.82	1.59	1.45
K''	8.25	6.53	6.06	5.87	5.76
η	2.16	2.79	3.33	3.70	3.98

型號：t5H480 振動頻率 3.0Hz					
振幅 係數	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
K'	-1.61	-0.83	-0.68	-0.63	-0.63
K''	8.29	6.29	5.72	5.48	5.33
η	-5.14	-7.58	-8.43	-8.67	-8.46

表 4.7 t6H490 實驗 K' 、 K'' 、 η

型號：t6H490 振動頻率 0.5Hz					
振幅 係數	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
K'	17.73	14.68	13.55	13.01	...
K''	2.44	0.79	1.89	2.43	...
η	0.14	0.05	0.14	0.19	...

型號：t6H490 振動頻率 1.0Hz					
振幅 係數	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
K'	15.55	12.62	11.59	11.02	10.71
K''	3.88	4.75	5.40	5.80	6.03
η	0.25	0.38	0.47	0.53	0.56

型號：t6H490 振動頻率 1.5Hz					
振幅 係數	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
K'	12.69	9.78	8.73	8.21	7.91
K''	8.73	7.80	7.89	8.09	8.19
η	0.69	0.80	0.90	0.98	1.04

型號：t6H490 振動頻率 2.0Hz					
振幅 係數	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
K'	9.20	6.54	5.63	5.12	4.89
K''	11.52	9.65	9.38	9.33	9.33
η	1.25	1.48	1.67	1.82	1.91

型號：t6H490 振動頻率 2.5Hz					
振幅 係數	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
K'	5.57	3.45	2.69	2.34	2.13
K''	12.22	10.06	9.56	9.41	9.31
η	2.19	2.91	3.56	4.02	4.38

型號：t6H490 振動頻率 3.0Hz					
振幅 係數	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
K'	-2.29	-1.19	-1.02	-1.01	-1.00
K''	12.04	9.58	8.94	8.63	8.50
η	-5.26	-8.04	-8.79	-8.57	-8.47

表 4.8 t6H485 實驗 K' 、 K'' 、 η

型號：t6H485 振動頻率 0.5Hz					
振幅 係數	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
K'	20.22	15.91	14.44	13.76	13.44
K''	3.34	0.71	0.84	1.77	2.41
η	0.17	0.04	0.06	0.13	0.18

型號：t6H485 振動頻率 1.0Hz					
振幅 係數	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
K'	17.53	13.82	12.46	11.79	11.42
K''	3.91	4.31	5.19	5.71	6.05
η	0.22	0.31	0.42	0.48	0.53

型號：t6H485 振動頻率 1.5Hz					
振幅 係數	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
K'	14.36	10.88	9.55	8.94	8.55
K''	9.32	7.86	7.99	8.19	8.37
η	0.65	0.72	0.84	0.92	0.98

型號：t6H485 振動頻率 2.0Hz					
振幅 係數	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
K'	10.60	7.48	6.34	5.79	5.49
K''	12.41	10.07	9.69	9.65	9.67
η	1.17	1.35	1.53	1.67	1.76

型號：t6H485 振動頻率 2.5Hz					
振幅 係數	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
K'	6.74	4.27	3.32	2.88	2.59
K''	13.25	10.70	10.04	9.84	9.76
η	1.97	2.51	3.02	3.41	3.77

型號：t6H485 振動頻率 3.0Hz					
振幅 係數	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
K'	-3.21	-1.63	-1.18	-1.08	-1.06
K''	13.24	10.58	9.48	9.17	9.06
η	-4.13	-6.50	-8.07	-8.51	-8.53

表 4.9 t6H480 實驗 K' 、 K'' 、 η

型號：t6H480 振動頻率 0.5Hz					
振幅 係數	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
K'	19.53	16.11	14.66	13.95	13.60
K''	3.43	1.12	0.68	1.83	2.46
η	0.18	0.07	0.05	0.13	0.18

型號：t6H480 振動頻率 1.0Hz					
振幅 係數	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
K'	17.44	13.84	12.59	11.94	11.56
K''	3.55	4.26	5.07	5.54	5.83
η	0.20	0.31	0.40	0.46	0.50

型號：t6H480 振動頻率 1.5Hz					
振幅 係數	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
K'	14.22	10.88	9.63	9.06	8.67
K''	9.32	8.22	8.32	8.55	8.71
η	0.66	0.76	0.86	0.94	1.01

型號：t6H480 振動頻率 2.0Hz					
振幅 係數	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
K'	10.60	7.50	6.36	5.81	5.55
K''	12.65	10.33	9.97	9.92	9.93
η	1.19	1.38	1.57	1.71	1.79

型號：t6H480 振動頻率 2.5Hz					
振幅 係數	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
K'	6.79	4.19	3.28	2.85	2.56
K''	13.57	10.84	10.25	10.06	9.95
η	2.00	2.59	3.13	3.53	3.88

型號：t6H480 振動頻率 3.0Hz					
振幅 係數	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
K'	-3.22	-1.55	-1.20	-1.11	-1.07
K''	13.36	10.56	9.63	9.33	9.15
η	-4.15	-6.81	-8.01	-8.38	-8.53

表 4.10 t4F490 實驗 K' 、 K'' 、 η

型號：t4F490 振動頻率 0.5Hz					
振幅 係數	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
K'	48.9	50.94	53.46	55.17	54.89
K''	14.8	14.1	14.26	19.78	24.03
η	0.3	0.28	0.27	0.36	0.44

型號：t4F490 振動頻率 1.0Hz					
振幅 係數	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
K'	37.56	38.78	40.23	41.86	43.94
K''	24.48	25.06	25.2	24.86	25.32
η	0.65	0.65	0.63	0.59	0.58

型號：t4F490 振動頻率 1.5Hz					
振幅 係數	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
K'	27.18	28.02	29.22	30.54	31.78
K''	30.8	32.44	33.43	33.73	34.13
η	1.13	1.16	1.14	1.1	1.07

型號：t4F490 振動頻率 2.0Hz					
振幅 係數	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
K'	16.55	16.3	17.54	18.96	19.92
K''	33.6	35.56	36.62	23.58	38.68
η	2.03	2.18	2.09	1.24	1.94

型號：t4F490 振動頻率 2.5Hz					
振幅 係數	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
K'	6.24	6.89	7.36	9.18	11.81
K''	33.93	36.36	37.75	38.55	40.01
η	5.44	5.28	5.13	4.2	3.39

型號：t4F490 振動頻率 3.0Hz					
振幅 係數	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
K'	-3.61	-3.95	-4.69	-5.82	-6.86
K''	28.51	30.78	32.86	34.39	35.56
η	-7.89	-7.79	-7	-5.91	-5.18

表 4.11 t4F485 實驗 K' 、 K'' 、 η

型號：t4F485 振動頻率 0.5Hz					
振幅 係數	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
K'	43.93	44.64	46.86	48.55	48.75
K''	13.43	12.91	10.78	14.47	18.31
η	0.31	0.29	0.23	0.30	0.38

型號：t4F485 振動頻率 1.0Hz					
振幅 係數	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
K'	34.28	35.86	36.99	38.04	39.59
K''	22.06	23.09	23.12	23.15	23.00
η	0.64	0.64	0.63	0.61	0.58

型號：t4F485 振動頻率 1.5Hz					
振幅 係數	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
K'	24.84	25.76	26.84	27.78	28.79
K''	28.40	30.05	30.94	31.39	31.71
η	1.14	1.17	1.15	1.13	1.10

型號：t4F485 振動頻率 2.0Hz					
振幅 係數	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
K'	14.52	15.58	16.28	17.41	18.23
K''	30.24	32.39	33.54	34.43	35.28
η	2.08	2.08	2.06	1.98	1.94

型號：t4F485 振動頻率 2.5Hz					
振幅 係數	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
K'	6.52	6.44	6.79	7.89	9.11
K''	29.76	31.86	33.63	34.15	34.87
η	4.56	4.95	4.95	4.33	3.83

型號：t4F485 振動頻率 3.0Hz					
振幅 係數	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
K'	-3.48	-3.94	-4.20	-4.83	-6.09
K''	26.91	29.09	30.41	31.85	32.47
η	-7.73	-7.37	-7.25	-6.59	-5.33

表 4.12 t4F480 實驗 K' 、 K'' 、 η

型號：t4F480 振動頻率 0.5Hz					
振幅 係數	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
K'	20.99	20.03	19.93	20.24	20.71
K''	7.10	6.21	6.09	6.07	6.07
η	0.34	0.31	0.31	0.30	0.29

型號：t4F480 振動頻率 1.0Hz					
振幅 係數	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
K'	17.32	16.50	16.57	16.87	17.18
K''	12.30	11.57	11.32	11.39	11.46
η	0.71	0.70	0.68	0.68	0.67

型號：t4F480 振動頻率 1.5Hz					
振幅 係數	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
K'	12.68	12.07	12.00	12.19	12.45
K''	15.81	14.58	14.48	14.69	14.97
η	1.25	1.21	1.21	1.20	1.20

型號：t4F480 振動頻率 2.0Hz					
振幅 係數	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
K'	7.69	7.04	6.95	7.18	7.40
K''	17.20	15.95	15.83	16.15	16.44
η	2.24	2.27	2.28	2.25	2.22

型號：t4F480 振動頻率 2.5Hz					
振幅 係數	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
K'	3.01	2.73	2.54	2.82	2.81
K''	16.50	15.23	15.39	15.73	16.03
η	5.49	5.58	6.06	5.57	5.71

型號：t4F480 振動頻率 3.0Hz					
振幅 係數	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
K'	-2.15	-2.02	-1.96	-1.99	-2.06
K''	14.75	13.49	13.53	13.90	14.49
η	-6.86	-6.66	-6.92	-6.97	-7.04

表 4.13 t5F490 實驗 K' 、 K'' 、 η

型號：t5F490 振動頻率 0.5Hz					
振幅 係數	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
K'	50.31	51.74	52.01	51.83	51.24
K''	16.57	14.63	14.01	13.17	10.53
η	0.33	0.28	0.27	0.25	0.21

型號：t5F490 振動頻率 1.0Hz					
振幅 係數	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
K'	42.68	43.62	43.34	43.13	43.29
K''	26.35	27.03	26.52	25.75	24.70
η	0.62	0.62	0.61	0.60	0.57

型號：t5F490 振動頻率 1.5Hz					
振幅 係數	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
K'	31.08	31.90	31.86	32.00	32.27
K''	34.63	35.60	35.54	35.07	34.23
η	1.11	1.12	1.12	1.10	1.06

型號：t5F490 振動頻率 2.0Hz					
振幅 係數	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
K'	18.42	19.41	19.72	20.17	20.54
K''	37.43	38.61	38.87	38.83	38.39
η	2.03	1.99	1.97	1.93	1.87

型號：t5F490 振動頻率 2.5Hz					
振幅 係數	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
K'	7.57	7.86	8.10	9.14	10.14
K''	37.58	38.64	39.56	39.15	38.79
η	4.97	4.92	4.88	4.28	3.83

型號：t5F490 振動頻率 3.0Hz					
振幅 係數	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
K'	-4.22	-4.38	-4.77	-4.92	-5.02
K''	33.47	34.97	35.74	36.13	36.26
η	-7.92	-7.98	-7.49	-7.35	-7.22

表 4.14 t5F485 實驗 K' 、 K'' 、 η

型號：t5F485 振動頻率 0.5Hz					
振幅 係數	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
K'	68.97	70.37	69.10	67.02	65.75
K''	23.37	21.83	19.97	13.65	21.19
η	0.34	0.31	0.29	0.20	0.32

型號：t5F485 振動頻率 1.0Hz					
振幅 係數	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
K'	53.81	54.25	54.07	54.26	54.53
K''	37.49	36.46	34.51	33.29	30.80
η	0.70	0.67	0.64	0.61	0.56

型號：t5F485 振動頻率 1.5Hz					
振幅 係數	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
K'	37.84	38.67	38.89	39.46	40.13
K''	44.56	45.23	44.60	43.81	42.63
η	1.18	1.17	1.15	1.11	1.06

型號：t5F485 振動頻率 2.0Hz					
振幅 係數	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
K'	22.61	22.49	23.86	25.11	25.83
K''	49.01	49.39	49.84	49.67	48.83
η	2.17	2.20	2.09	1.98	1.89

型號：t5F485 振動頻率 2.5Hz					
振幅 係數	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
K'	8.28	9.50	9.57	11.23	12.28
K''	47.23	48.15	50.35	49.84	49.08
η	5.71	5.07	5.26	4.44	4.00

型號：t5F485 振動頻率 3.0Hz					
振幅 係數	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
K'	-5.56	-5.32	-5.71	-6.09	-7.24
K''	42.46	43.57	44.42	45.72	46.37
η	-7.64	-8.20	-7.78	-7.51	-6.40

表 4.15 t5F480 實驗 K' 、 K'' 、 η

型號：t5F480 振動頻率 0.5Hz					
振幅 係數	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
K'	37.08	34.71	35.89	36.28	36.21
K''	13.07	11.32	10.38	9.86	9.35
η	0.35	0.33	0.29	0.27	0.26

型號：t5F480 振動頻率 1.0Hz					
振幅 係數	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
K'	24.47	28.14	29.38	29.77	30.25
K''	16.05	17.97	18.70	19.07	19.03
η	0.66	0.64	0.64	0.64	0.63

型號：t5F480 振動頻率 1.5Hz					
振幅 係數	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
K'	17.81	20.21	21.30	21.93	22.35
K''	21.28	23.38	24.32	24.90	24.84
η	1.19	1.16	1.14	1.14	1.11

型號：t5F480 振動頻率 2.0Hz					
振幅 係數	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
K'	11.47	11.92	12.70	13.41	13.90
K''	23.37	26.12	27.17	27.79	28.09
η	2.04	2.19	2.14	2.07	2.02

型號：t5F480 振動頻率 2.5Hz					
振幅 係數	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
K'	4.81	4.86	4.97	5.16	5.68
K''	22.83	25.82	28.02	28.55	28.48
η	4.74	5.31	5.63	5.53	5.02

型號：t5F480 振動頻率 3.0Hz					
振幅 係數	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
K'	-2.73	-2.94	-3.18	-3.23	-3.48
K''	21.01	23.57	24.80	25.24	25.96
η	-7.68	-8.02	-7.80	-7.81	-7.46

表 4.16 t6F490 實驗 K' 、 K'' 、 η

型號：t6F490 振動頻率 0.5Hz					
振幅 係數	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
K'	66.31	67.94	68.44	68.11	66.83
K''	18.20	19.58	19.99	19.35	17.74
η	0.27	0.29	0.29	0.28	0.27

型號：t6F490 振動頻率 1.0Hz					
振幅 係數	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
K'	56.74	56.16	56.36	56.12	55.93
K''	37.62	36.36	35.75	35.28	34.28
η	0.66	0.65	0.63	0.63	0.61

型號：t6F490 振動頻率 1.5Hz					
振幅 係數	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
K'	41.73	40.65	40.84	41.14	41.13
K''	46.79	46.72	46.86	46.38	45.54
η	1.12	1.15	1.15	1.13	1.11

型號：t6F490 振動頻率 2.0Hz					
振幅 係數	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
K'	24.73	24.28	24.24	25.01	25.42
K''	50.89	51.32	51.55	51.35	50.61
η	2.06	2.11	2.13	2.05	1.99

型號：t6F490 振動頻率 2.5Hz					
振幅 係數	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
K'	10.36	10.17	9.96	10.56	11.15
K''	49.68	50.79	50.99	50.87	50.24
η	4.80	4.99	5.12	4.82	4.51

型號：t6F490 振動頻率 3.0Hz					
振幅 係數	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
K'	-5.76	-5.46	-5.61	-5.80	-5.72
K''	43.85	45.06	45.74	45.94	45.80
η	-7.61	-8.25	-8.15	-7.93	-8.01

表 4.17 t6F485 實驗 K' 、 K'' 、 η

型號：t6F485 振動頻率 0.5Hz					
振幅 係數	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
K'	100.4	97.06	95.70	93.19	89.60
K''	27.78	26.35	23.85	20.13	19.78
η	0.28	0.27	0.25	0.22	0.22

型號：t6F485 振動頻率 1.0Hz					
振幅 係數	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
K'	85.81	81.04	79.86	78.54	76.61
K''	52.71	49.16	45.90	41.17	35.91
η	0.61	0.61	0.57	0.52	0.47

型號：t6F485 振動頻率 1.5Hz					
振幅 係數	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
K'	61.25	58.78	58.82	58.99	58.74
K''	65.72	64.47	61.74	57.87	52.84
η	1.07	1.10	1.05	0.98	0.90

型號：t6F485 振動頻率 2.0Hz					
振幅 係數	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
K'	34.47	35.07	36.87	39.32	39.64
K''	68.79	69.81	68.44	65.07	60.76
η	1.99	1.99	1.85	1.65	1.53

型號：t6F485 振動頻率 2.5Hz					
振幅 係數	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
K'	15.55	15.49	16.20	18.87	21.08
K''	66.53	68.52	67.58	65.14	61.71
η	4.28	4.42	4.17	3.45	2.93

型號：t6F485 振動頻率 3.0Hz					
振幅 係數	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
K'	-7.43	-7.14	-7.25	-7.49	-8.26
K''	59.86	60.87	61.28	60.00	58.39
η	-8.06	-8.52	-8.46	-8.01	-7.07

表 4.18 t6F480 實驗 K' 、 K'' 、 η

型號：t6F480 振動頻率 0.5Hz					
振幅 係數	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
K'	48.53	54.81	57.63	58.83	59.86
K''	18.11	17.04	16.85	17.06	17.24
η	0.37	0.31	0.29	0.29	0.29

型號：t6F480 振動頻率 1.0Hz					
振幅 係數	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
K'	39.57	44.52	46.99	47.91	49.22
K''	28.01	29.11	30.68	31.78	32.83
η	0.71	0.65	0.65	0.66	0.67

型號：t6F480 振動頻率 1.5Hz					
振幅 係數	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
K'	28.50	31.41	33.16	34.34	35.07
K''	33.31	36.80	39.18	40.57	41.60
η	1.17	1.17	1.18	1.18	1.18

型號：t6F480 振動頻率 2.0Hz					
振幅 係數	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
K'	16.13	18.25	19.58	20.79	21.27
K''	35.01	40.30	42.80	44.50	45.62
η	2.17	2.21	2.19	2.14	2.14

型號：t6F480 振動頻率 2.5Hz					
振幅 係數	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
K'	7.60	6.03	6.81	7.43	8.90
K''	32.76	39.89	43.10	44.78	44.18
η	4.31	6.62	6.33	6.03	4.96

型號：t6F480 振動頻率 3.0Hz					
振幅 係數	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
K'	-4.54	-4.68	-5.01	-5.32	-5.50
K''	30.22	35.12	37.68	39.33	40.39
η	-6.65	-7.51	-7.52	-7.39	-7.34

表 4.19 不同邊界條件各試體及振幅之最大出力

<i>Fixed</i>							
厚度	振幅		1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
	試體長度						
<i>t=6 mm</i>	L=490 mm		70.18	143.14	215.70	288.77	356.64
	L=485 mm		108.95	202.65	300.92	388.36	468.47
	L=480 mm		52.87	117.52	182.95	248.23	316.35
<i>t=5 mm</i>	L=490 mm		52.71	108.73	163.20	216.54	269.18
	L=485 mm		73.98	149.62	219.30	282.01	346.64
	L=480 mm		39.74	74.40	114.48	154.92	193.78
<i>t=4 mm</i>	L=490 mm		51.41	107.90	170.69	236.83	289.86
	L=485 mm		45.91	94.05	147.99	206.86	260.11
	L=480 mm		22.65	43.11	64.27	86.35	109.86

<i>Hinged</i>							
厚度	振幅		1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
	試體長度						
<i>t=6 mm</i>	L=490 mm		19.25	31.05	42.75	54.84	...
	L=485 mm		21.42	33.39	45.50	58.21	70.88
	L=480 mm		21.09	33.86	46.64	59.40	72.52
<i>t=5 mm</i>	L=490 mm		12.81	20.59	28.20	35.61	43.03
	L=485 mm		14.30	22.74	30.77	39.09	46.74
	L=480 mm		12.94	20.31	27.48	34.60	41.79
<i>t=4 mm</i>	L=490 mm		6.85	10.34	14.11	18.16	21.72
	L=485 mm		7.61	12.32	17.11	22.01	27.04
	L=480 mm		8.03	11.91	16.20	20.82	24.93

單位：kgf

表 4.20 五層樓模型結構細部尺寸

Length (m)	2
Width (m)	2
Height of 2~5 floors (m)	1.3
Height of 1 st floor (m)	1.5
m_5 ($kg - sec^2/m$)	82.28
m_4 ($kg - sec^2/m$)	84.75
m_3 ($kg - sec^2/m$)	84.75
m_2 ($kg - sec^2/m$)	84.75
m_1 ($kg - sec^2/m$)	85.13
Cross section of the column ($m m$)	100×50×5×7
Cross section of the beam ($m m$)	100×50×5×7
Cross-sectional area of the column (m^2)	0.0011
Cross-sectional area of the beam (m^2)	0.0011

表 4.21 加速度峰值比較 (Kobe Earthquake)

Input = Kobe Earthquake

PGA=0.099g				PGA=0.176g			
Floor	w/o damper	w/ damper	reduction(%)	Floor	w/o damper	w/ damper	reduction(%)
5F	0.30	0.25	19	5F	0.55	0.40	26
4F	0.21	0.20	6	4F	0.38	0.30	21
3F	0.21	0.16	23	3F	0.37	0.24	34
2F	0.24	0.12	50	2F	0.43	0.24	44
1F	0.18	0.10	44	1F	0.32	0.17	46
PGA=0.323g				PGA=0.332g			
Floor	w/o damper	w/ damper	reduction(%)	Floor	w/o damper	w/ damper	reduction(%)
5F	1.00	0.39	61	5F	1.03	0.54	48
4F	0.70	0.39	45	4F	0.72	0.56	22
3F	0.67	0.29	57	3F	0.69	0.38	44
2F	0.79	0.28	64	2F	0.81	0.33	59
1F	0.59	0.25	57	1F	0.60	0.34	44
PGA=0.436g				PGA=0.576g			
Floor	w/o damper	w/ damper	reduction(%)	Floor	w/o damper	w/ damper	reduction(%)
5F	1.35	0.74	45	5F	1.78	1.17	34
4F	0.95	0.65	31	4F	1.25	1.03	18
3F	0.91	0.45	50	3F	1.20	0.81	32
2F	1.07	0.42	61	2F	1.41	0.65	54
1F	0.79	0.39	50	1F	1.05	0.67	36

表 4.22 樓層加速度均方根值比較 (Kobe Earthquake)

Input = Kobe Earthquake

PGA=0.099g				PGA=0.176g			
Floor	w/o damper	w/ damper	reduction(%)	Floor	w/o damper	w/ damper	reduction(%)
5F	0.10	0.03	74	5F	0.18	0.04	76
4F	0.08	0.02	70	4F	0.14	0.04	71
3F	0.07	0.02	73	3F	0.13	0.03	74
2F	0.05	0.02	68	2F	0.09	0.03	69
1F	0.03	0.01	61	1F	0.05	0.02	62
PGA=0.323g				PGA=0.332g			
Floor	w/o damper	w/ damper	reduction(%)	Floor	w/o damper	w/ damper	reduction(%)
5F	0.32	0.06	82	5F	0.33	0.07	78
4F	0.26	0.06	79	4F	0.27	0.07	73
3F	0.23	0.04	81	3F	0.24	0.06	75
2F	0.17	0.04	77	2F	0.17	0.05	71
1F	0.10	0.03	72	1F	0.10	0.03	65
PGA=0.436g				PGA=0.576g			
Floor	w/o damper	w/ damper	reduction(%)	Floor	w/o damper	w/ damper	reduction(%)
5F	0.43	0.09	80	5F	0.57	0.11	80
4F	0.35	0.09	75	4F	0.46	0.11	76
3F	0.31	0.07	78	3F	0.41	0.08	80
2F	0.22	0.06	75	2F	0.30	0.07	77
1F	0.13	0.04	69	1F	0.17	0.05	72

表 4.23 加速度峰值比較 (Hachinohe Earthquake)

Input = Hachinohe Earthquake

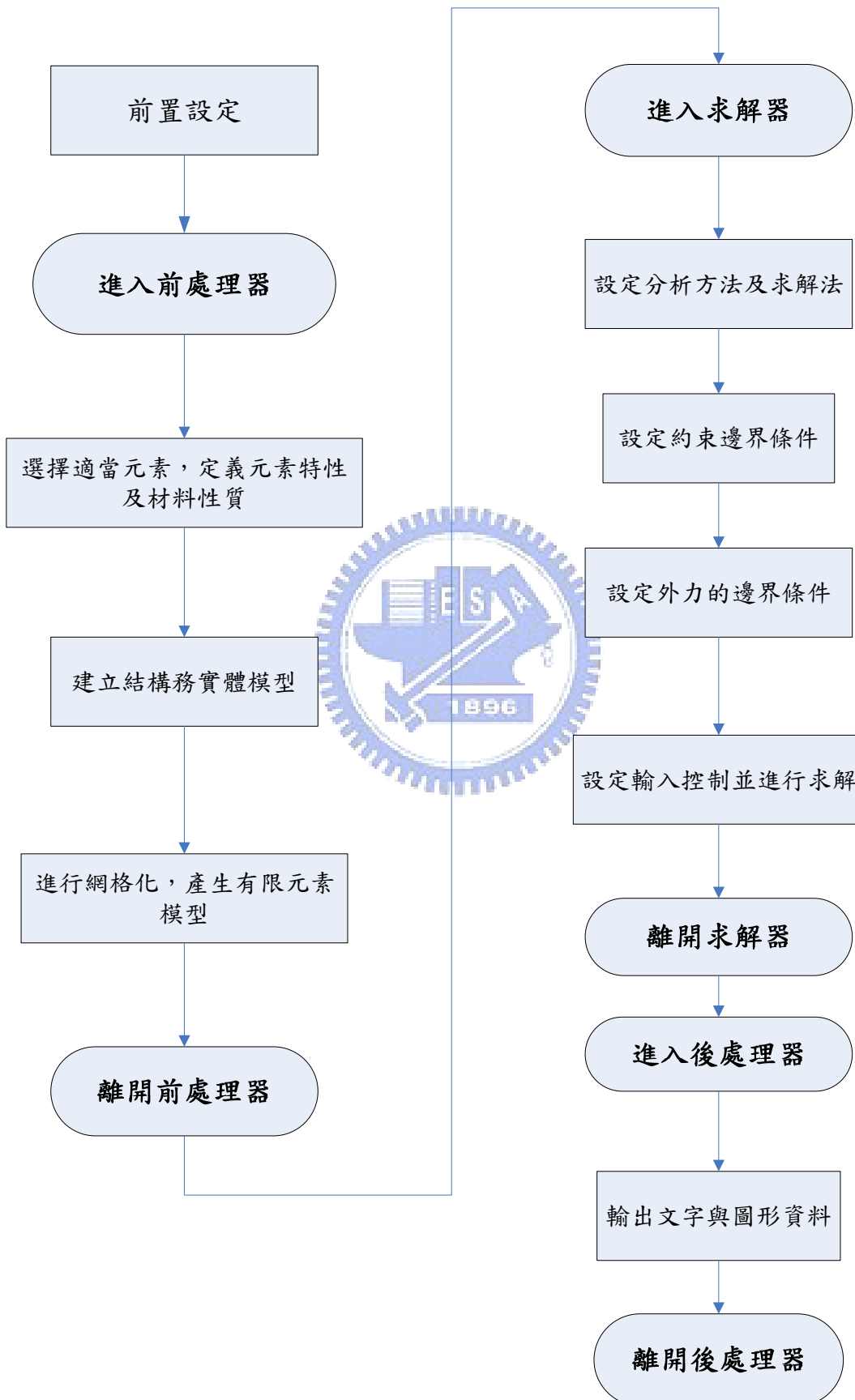
PGA=0.092g				PGA=0.121g			
Floor	w/o damper	w/ damper	reduction(%)	Floor	w/o damper	w/ damper	reduction(%)
5F	0.32	0.10	70	5F	0.42	0.16	61
4F	0.22	0.08	63	4F	0.29	0.14	52
3F	0.20	0.07	64	3F	0.26	0.11	58
2F	0.22	0.07	69	2F	0.29	0.12	60
1F	0.16	0.07	55	1F	0.22	0.10	54
PGA=0.172g				PGA=0.173g			
Floor	w/o damper	w/ damper	reduction(%)	Floor	w/o damper	w/ damper	reduction(%)
5F	0.60	0.22	63	5F	0.60	0.32	47
4F	0.42	0.20	52	4F	0.42	0.28	34
3F	0.37	0.20	46	3F	0.37	0.20	46
2F	0.41	0.17	59	2F	0.41	0.24	43
1F	0.31	0.15	51	1F	0.31	0.22	28
PGA=0.207g				PGA=0.312g			
Floor	w/o damper	w/ damper	reduction(%)	Floor	w/o damper	w/ damper	reduction(%)
5F	0.72	0.45	37	5F	1.08	0.63	42
4F	0.50	0.45	10	4F	0.76	0.60	20
3F	0.44	0.30	31	3F	0.67	0.39	41
2F	0.49	0.28	43	2F	0.74	0.36	51
1F	0.37	0.29	22	1F	0.56	0.38	32

表 4.24 樓層加速度均方根值比較 (Hachinohe Earthquake)

Input = Hachinohe Earthquake

PGA=0.092g				PGA=0.121g			
Floor	w/o damper	w/ damper	reduction(%)	Floor	w/o damper	w/ damper	reduction(%)
5F	0.12	0.02	85	5F	0.15	0.03	81
4F	0.10	0.02	83	4F	0.13	0.03	77
3F	0.09	0.01	88	3F	0.12	0.02	81
2F	0.07	0.01	87	2F	0.09	0.02	80
1F	0.05	0.01	89	1F	0.06	0.01	79
PGA=0.172g				PGA=0.173g			
Floor	w/o damper	w/ damper	reduction(%)	Floor	w/o damper	w/ damper	reduction(%)
5F	0.22	0.05	78	5F	0.22	0.06	73
4F	0.18	0.05	74	4F	0.18	0.06	68
3F	0.17	0.04	78	3F	0.17	0.05	72
2F	0.13	0.03	76	2F	0.13	0.04	69
1F	0.09	0.02	74	1F	0.09	0.03	65
PGA=0.207g				PGA=0.312g			
Floor	w/o damper	w/ damper	reduction(%)	Floor	w/o damper	w/ damper	reduction(%)
5F	0.26	0.08	70	5F	0.40	0.10	76
4F	0.22	0.08	64	4F	0.33	0.10	71
3F	0.20	0.06	69	3F	0.30	0.08	75
2F	0.16	0.06	65	2F	0.24	0.07	72
1F	0.10	0.04	59	1F	0.16	0.05	67

表 5.1 ANSYS操作流程表



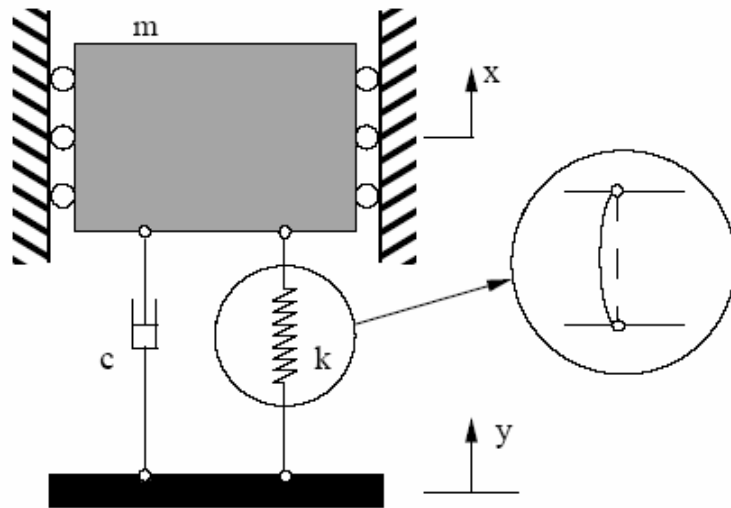


圖 1.1 挫屈連桿之減振應用【2】

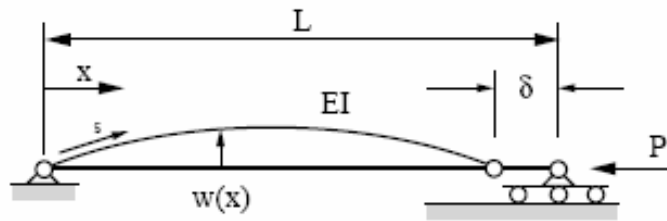


圖 1.2 挫屈連桿之變形示意圖【2】

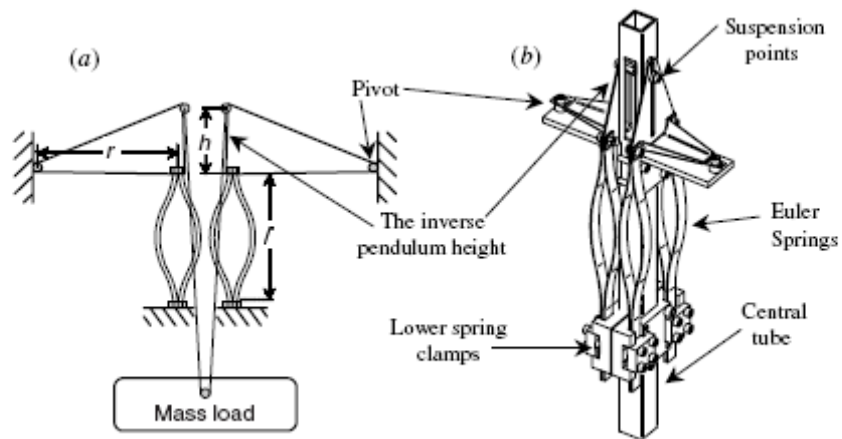


圖 1.3 Euler spring vertical isolation stage【3】

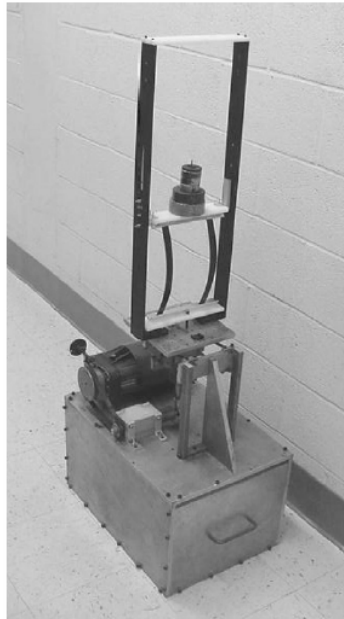


圖 1.4 Virgin 等人實驗裝置照片【2】

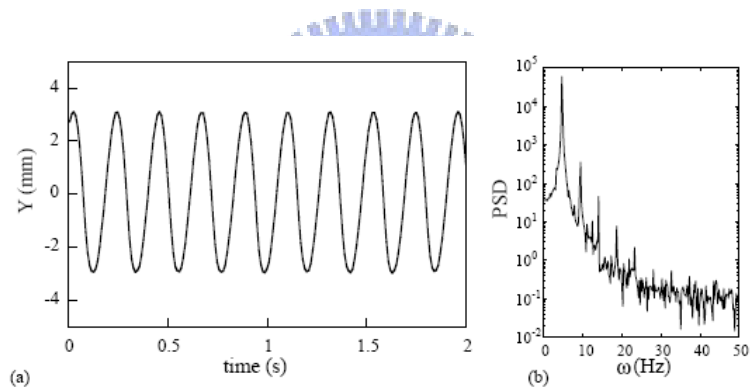


圖 1.5 Virgin 等人實驗結果之 1【2】

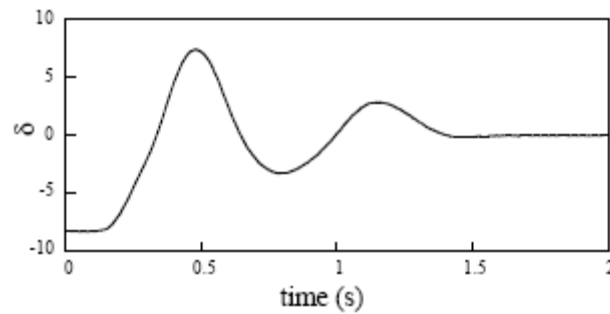


圖 1.6 Virgin 等人實驗結果之 2【2】

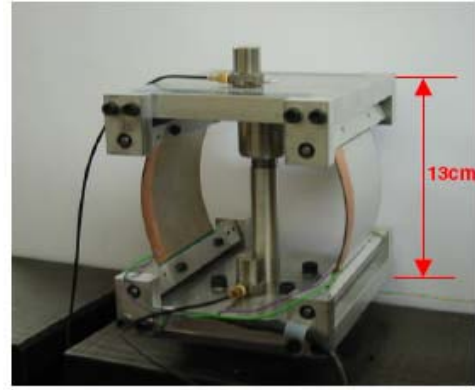
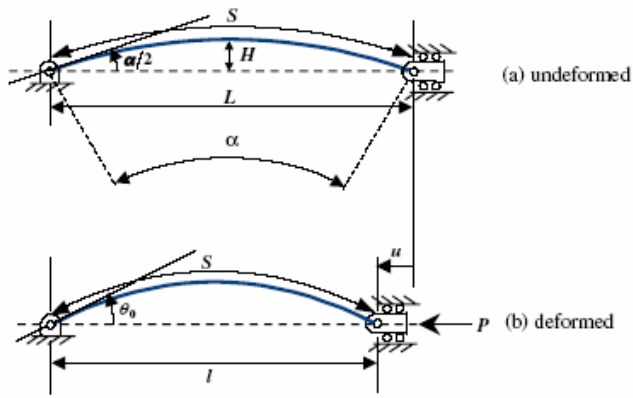


圖 1.7 可調式挫屈連桿之試驗構架【9】



圖 1.8 挫屈連桿 (buckled struts) 元件【10】

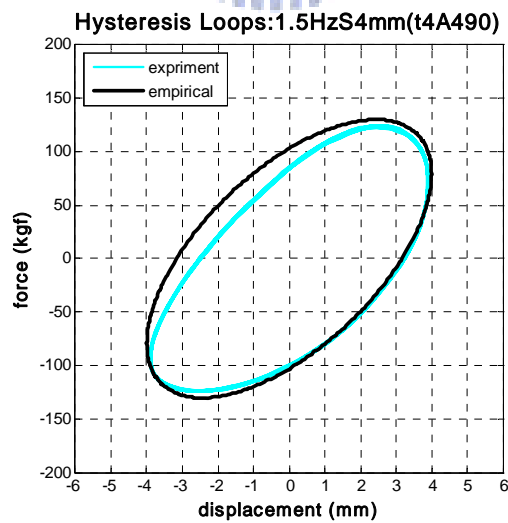


圖 1.9 挫屈連桿試驗結果與預測之比對【10】

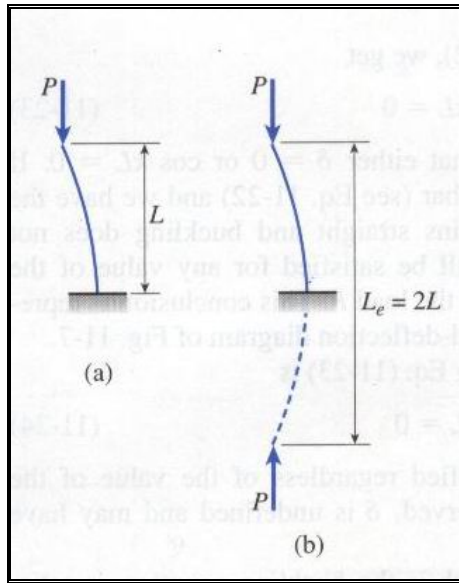


圖 2.1 底端固接，頂端自由柱之有效長度 L_e 。【11】

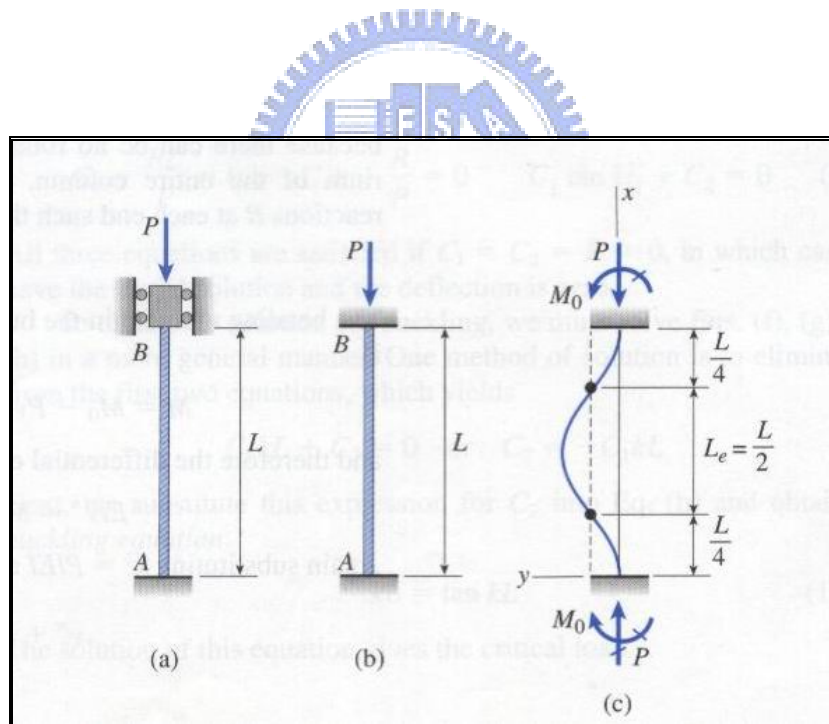


圖 2.2 兩端固接柱之有效長度 L_e 。【11】

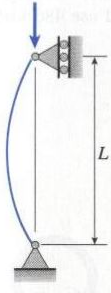
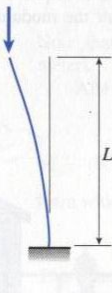
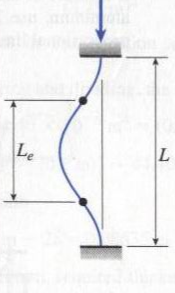
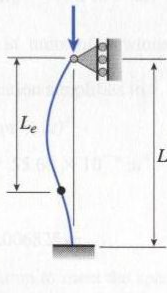
(a) Pinned-pinned column	(b) Fixed-free column	(c) Fixed-fixed column	(d) Fixed-pinned column
$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L^2}$	$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{4L^2}$	$P_{cr} = \frac{4\pi^2 EI}{L^2}$	$P_{cr} = \frac{2.046 \pi^2 EI}{L^2}$
			
$L_e = L$	$L_e = 2L$	$L_e = 0.5L$	$L_e = 0.699L$
$K = 1$	$K = 2$	$K = 0.5$	$K = 0.699$

圖 2.3 柱挫屈強度與邊界條件之關係【11】



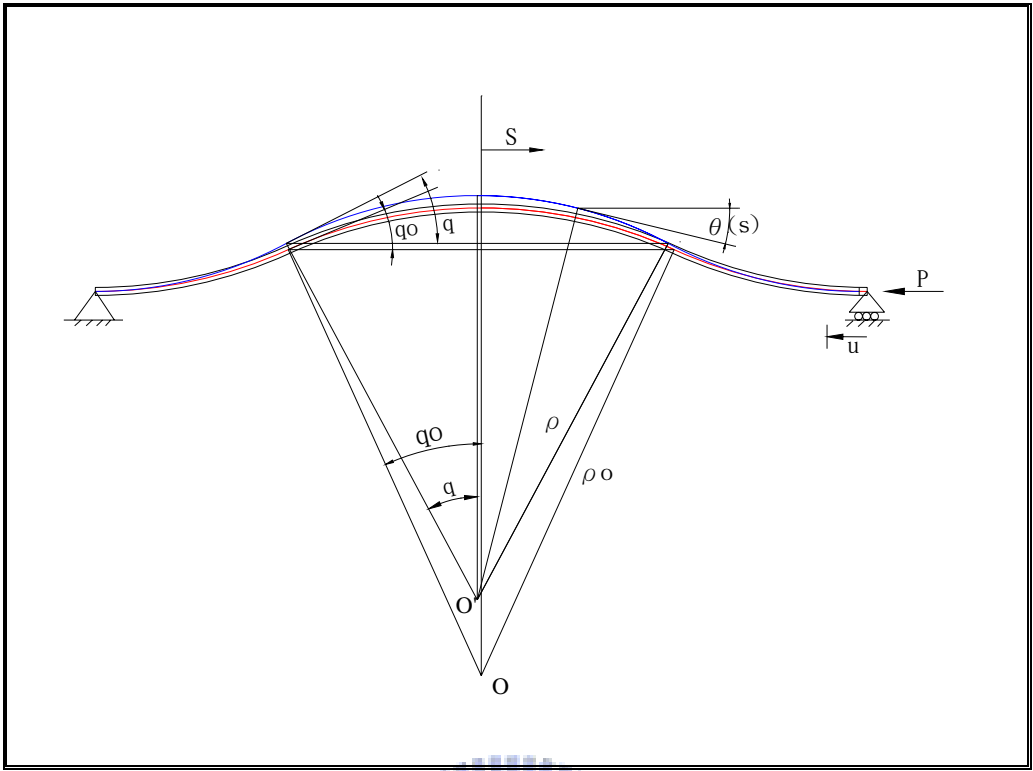


圖 2.4 鉸接挫屈連桿之變形示意圖

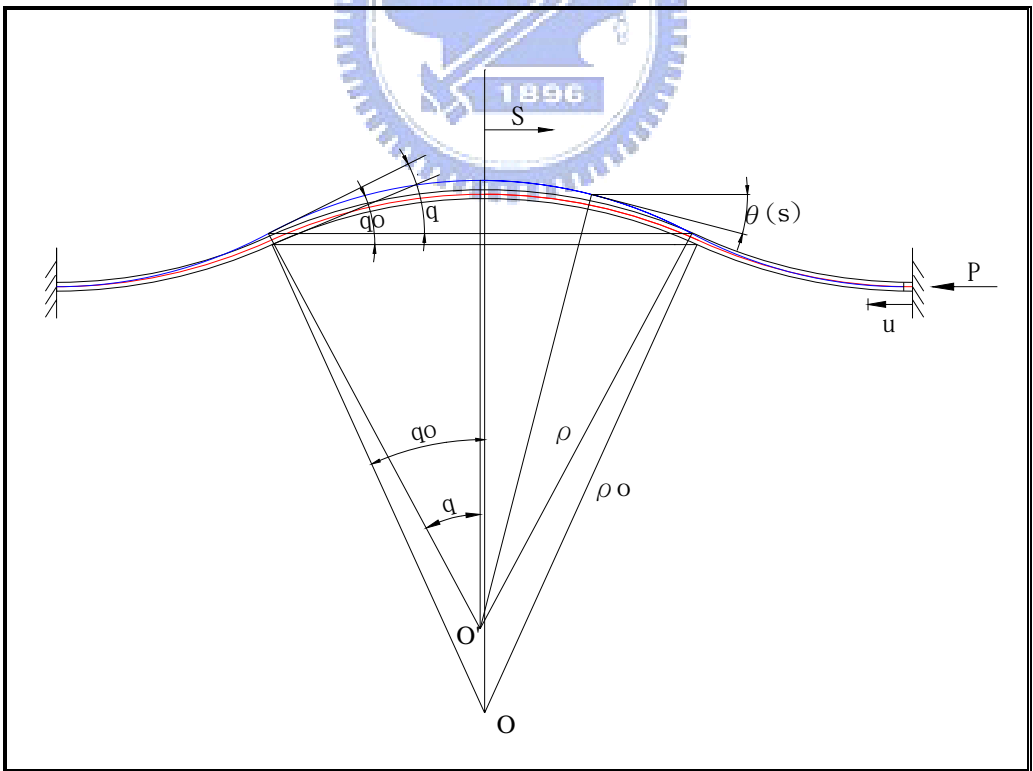


圖 2.5 固接挫屈連桿之變形示意圖

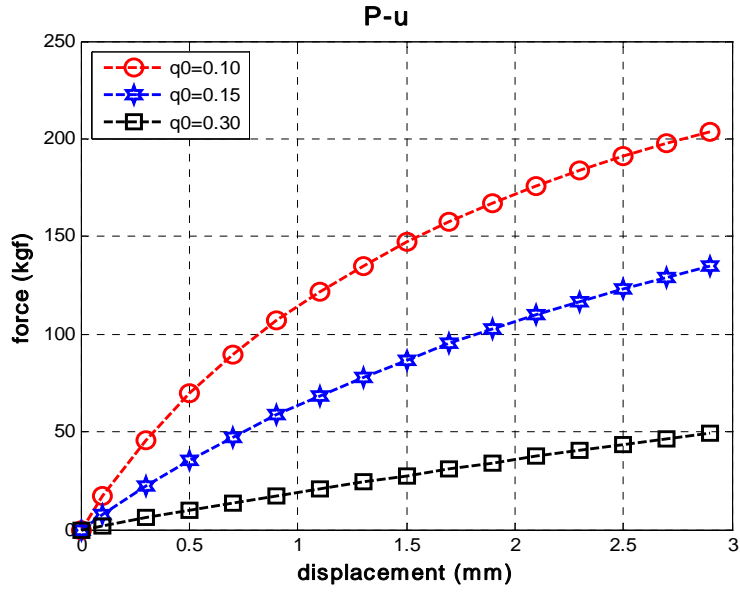


圖 2.6 鉸接條件下不同初始端點弦切角 q_0 之彈性挫屈勁度曲線

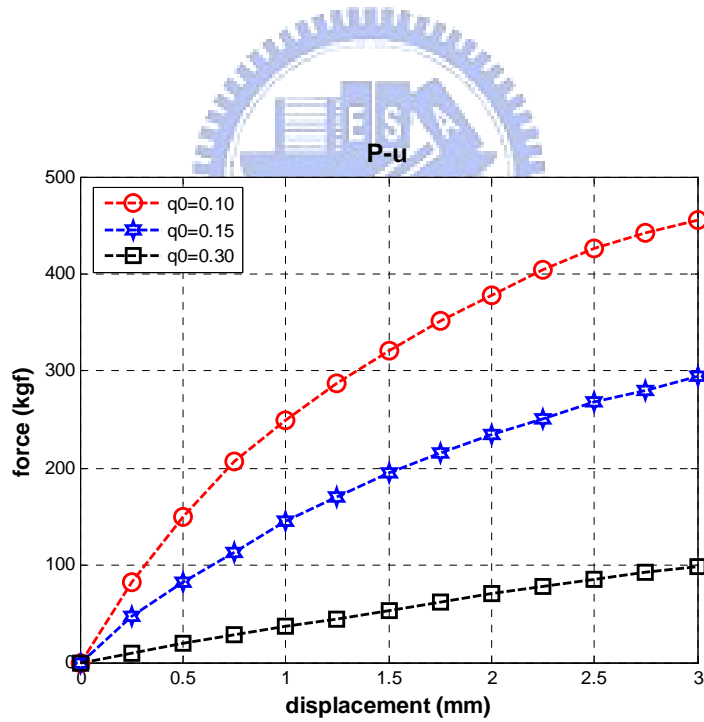


圖 2.7 固接條件下不同初始端點弦切角 q_0 之彈性挫屈勁度曲線

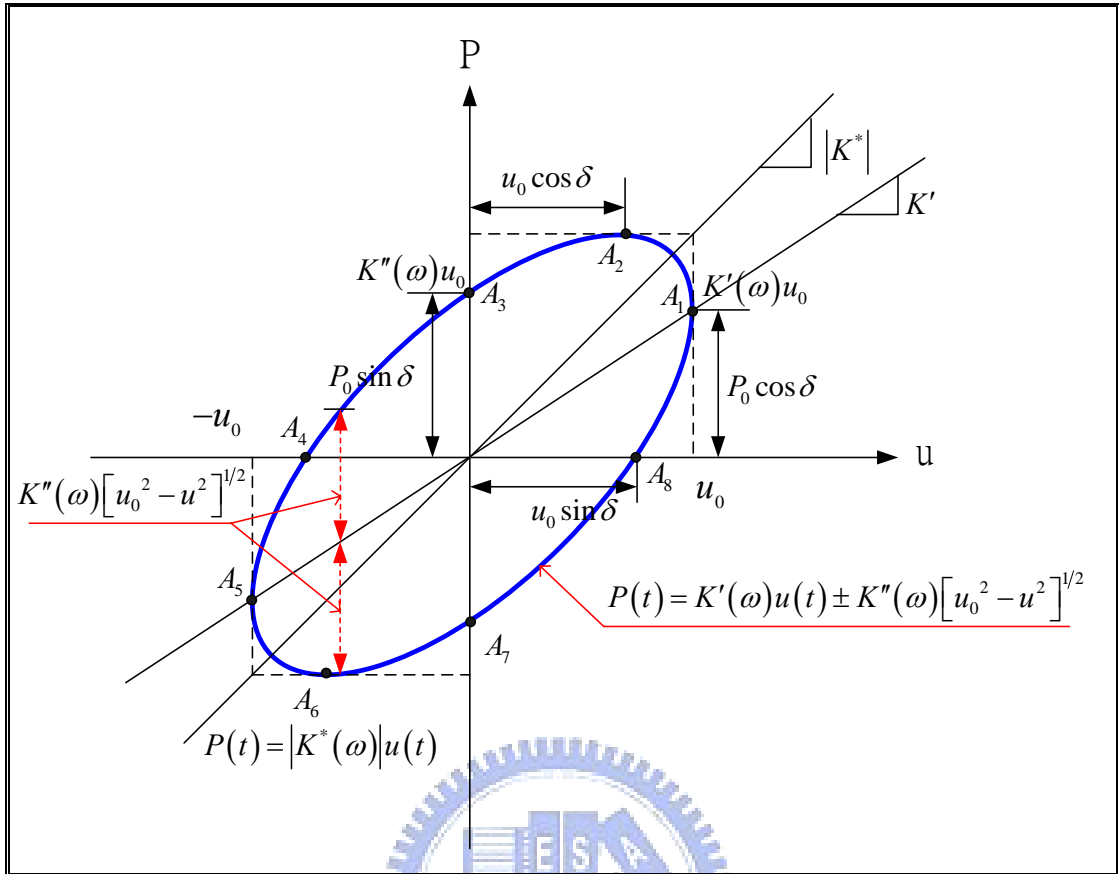


圖 2.8 橢圓形遲滯迴圈之幾何關係

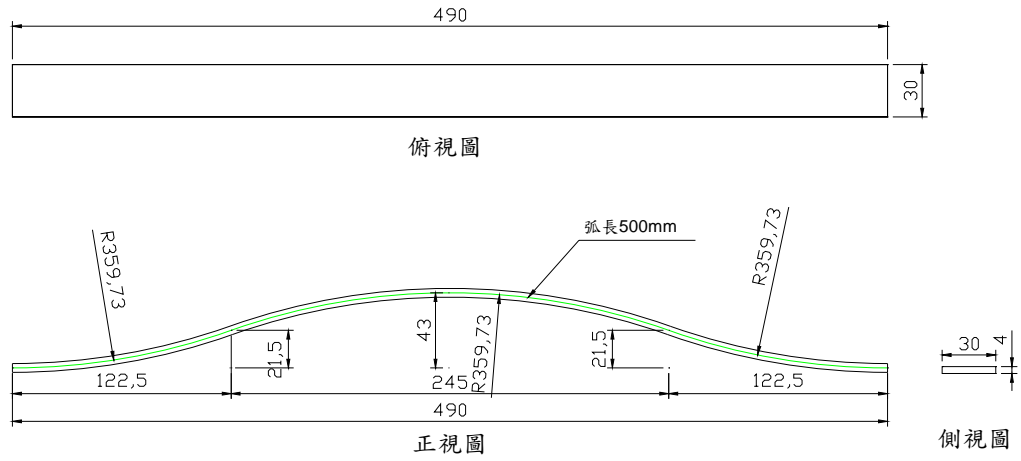


圖 3.1a t4H490 試體之設計詳圖 (單位：mm)

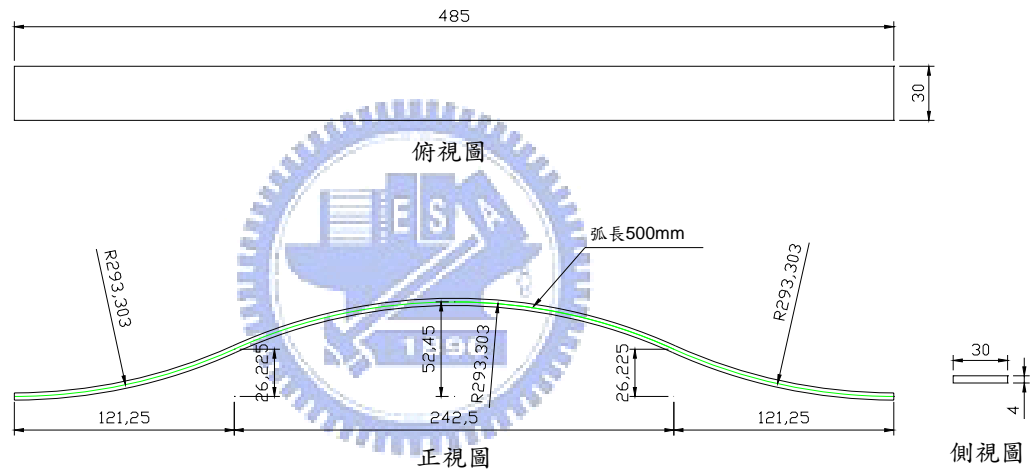


圖 3.1b t4H485 試體之設計詳圖 (單位：mm)

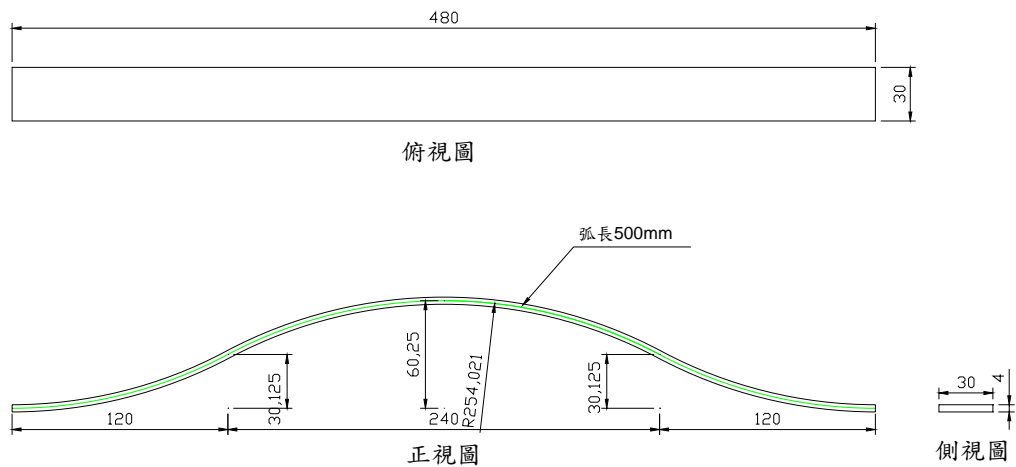


圖 3.1c t4H480 試體之設計詳圖 (單位：mm)

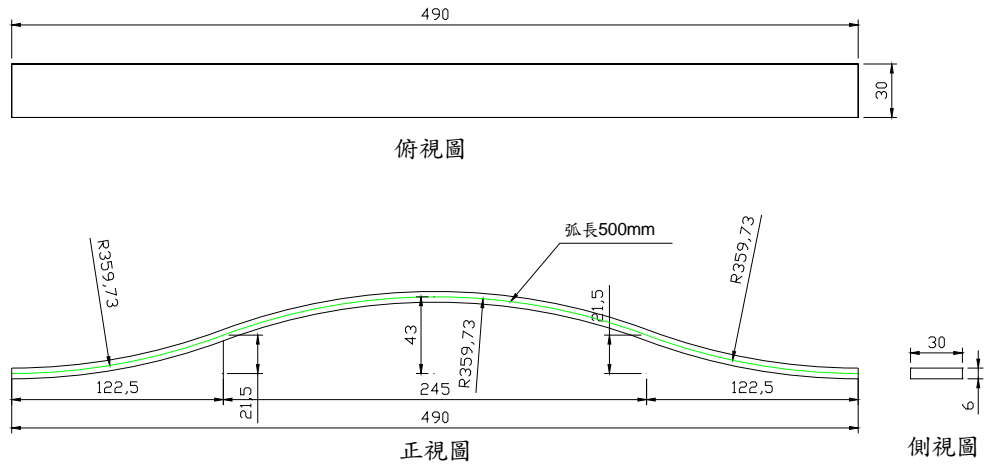


圖 3.3a t6H490 試體之設計詳圖 (單位：mm)

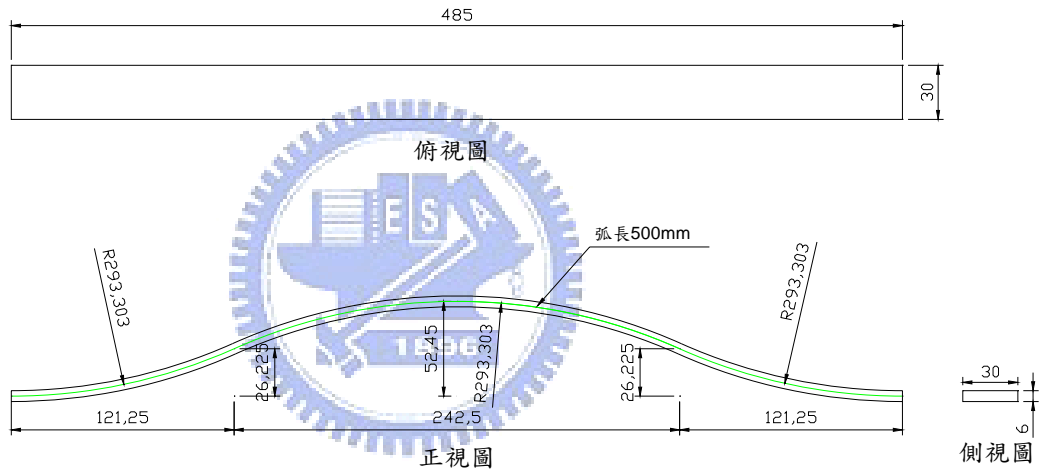


圖 3.3b t6H485 試體之設計詳圖 (單位：mm)

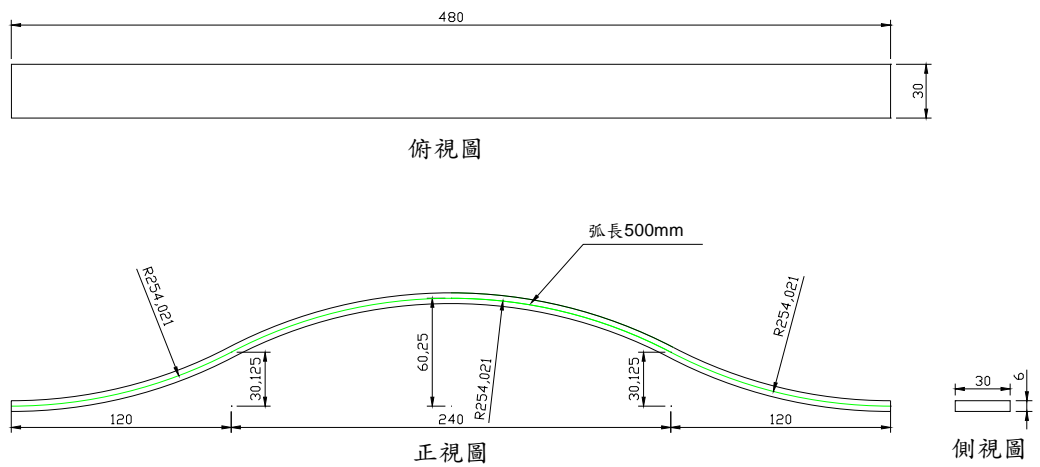


圖 3.3c t6H480 試體之設計詳圖 (單位：mm)

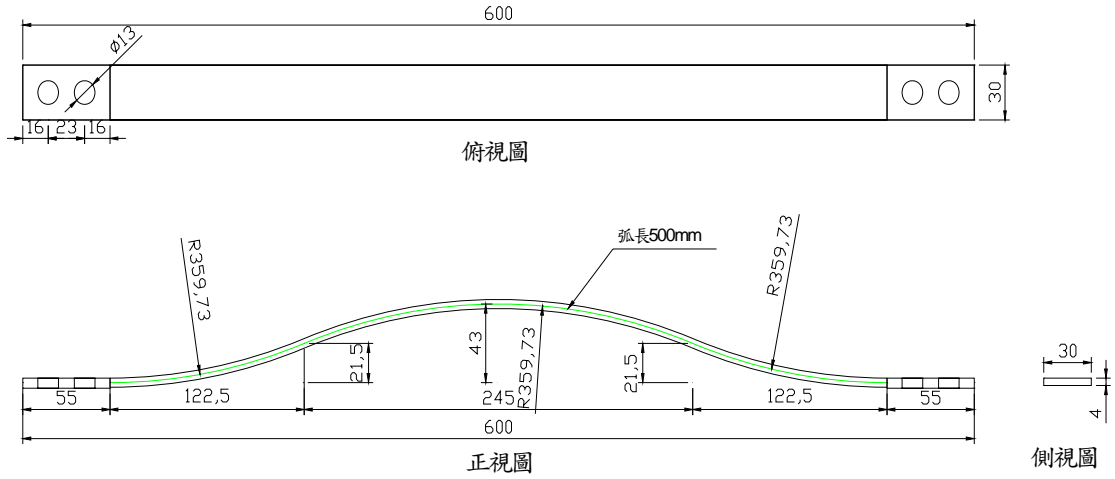


圖 3.4a t4F490 試體之設計詳圖 (單位：mm)

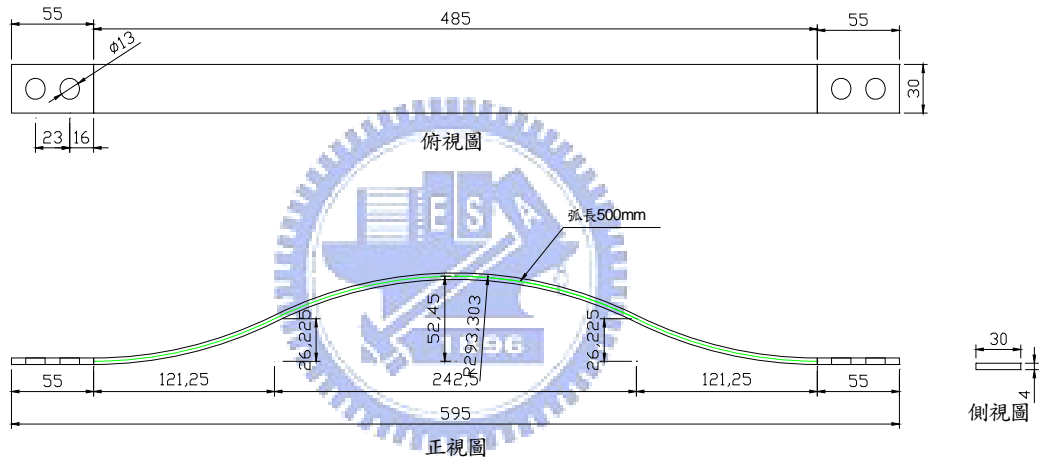


圖 3.4b t4F485 試體之設計詳圖 (單位：mm)

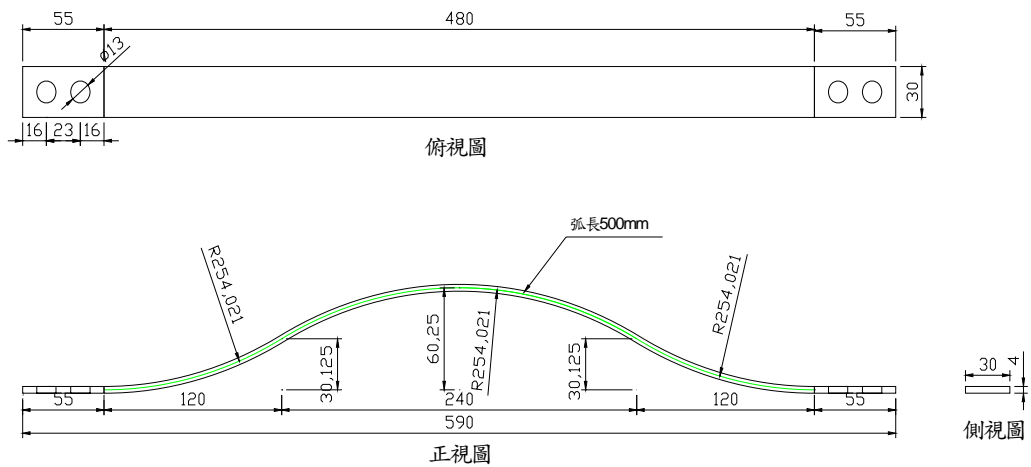


圖 3.4c t4F480 試體之設計詳圖 (單位：mm)

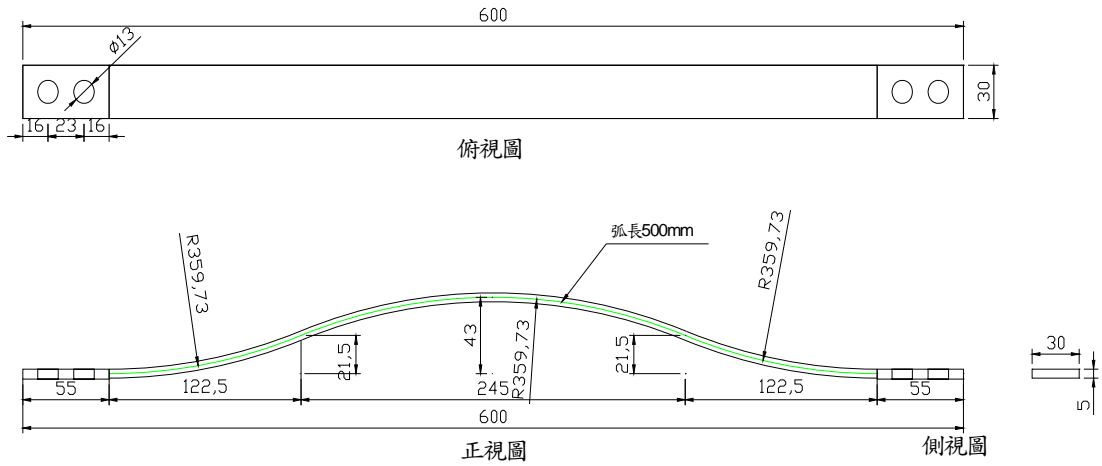


圖 3.5a t5F490 試體之設計詳圖 (單位: mm)

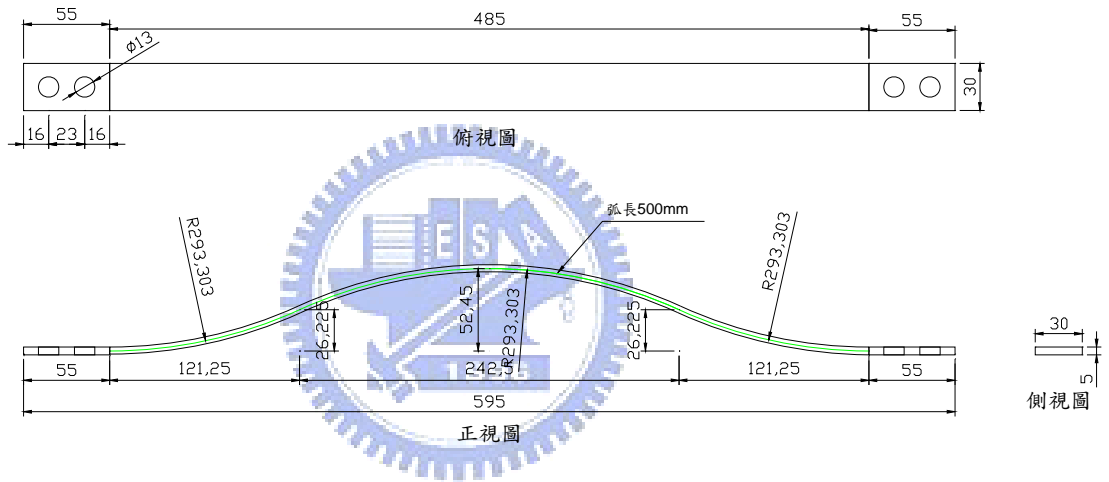


圖 3.5b t5F485 試體之設計詳圖 (單位: mm)

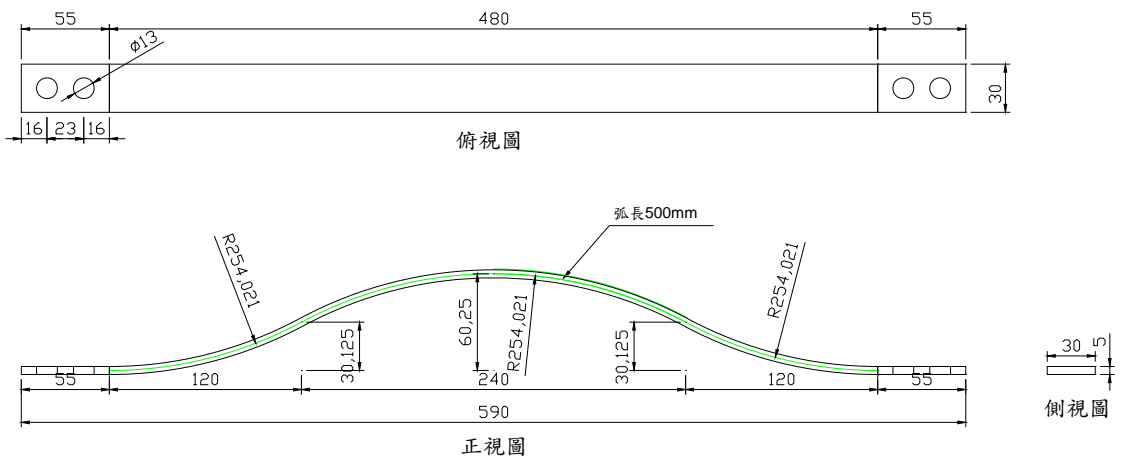


圖 3.5c t5F480 試體之設計詳圖 (單位: mm)

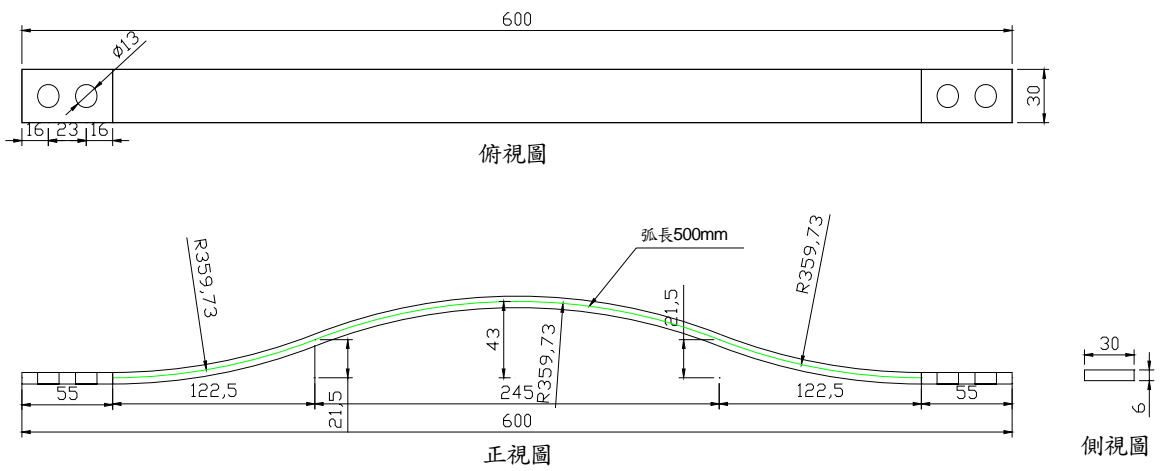


圖 3.6a t6F490 試體之設計詳圖 (單位：mm)

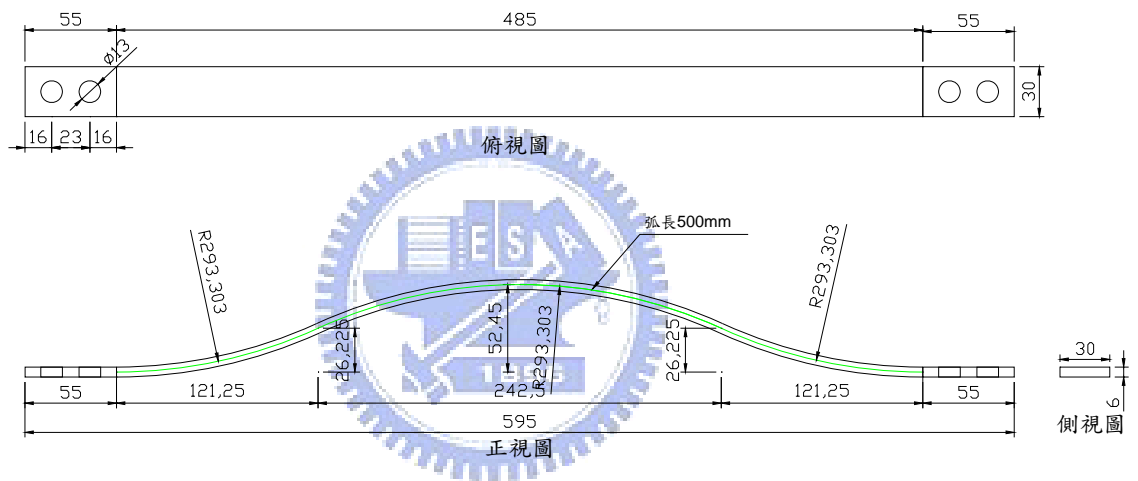


圖 3.6b t6F485 試體之設計詳圖 (單位：mm)

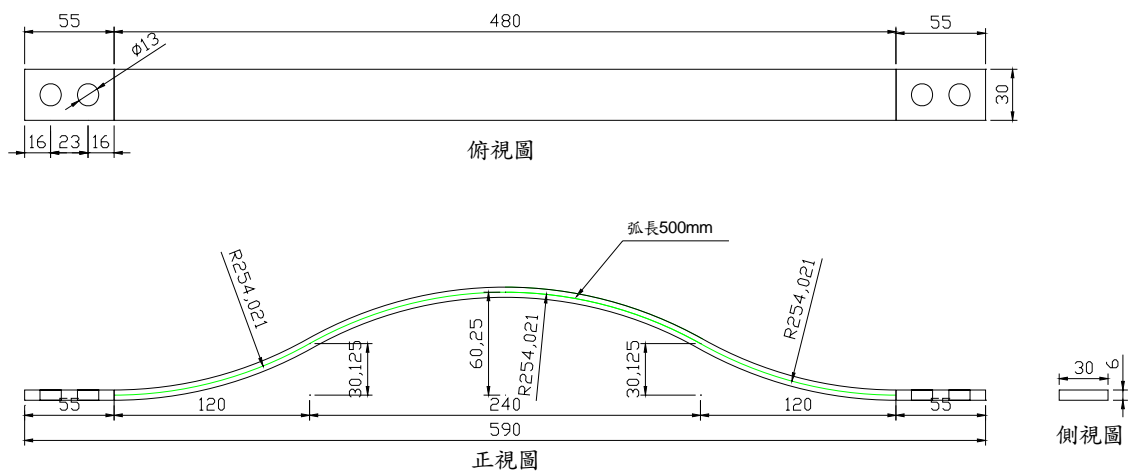


圖 3.6c t6F480 試體之設計詳圖 (單位：mm)

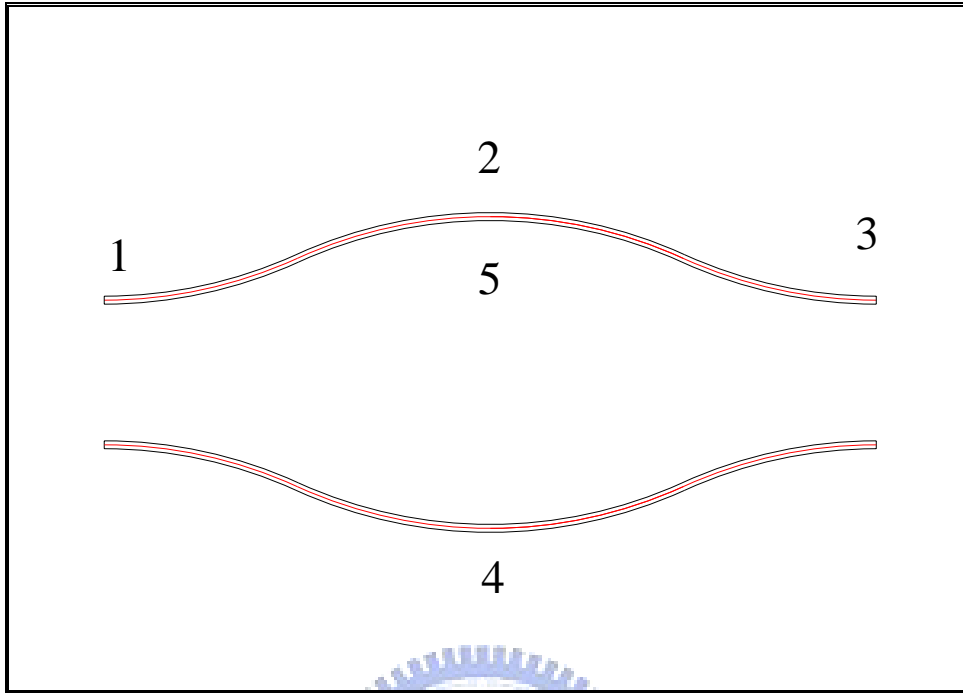


圖 3.7 應變計黏貼位置編號



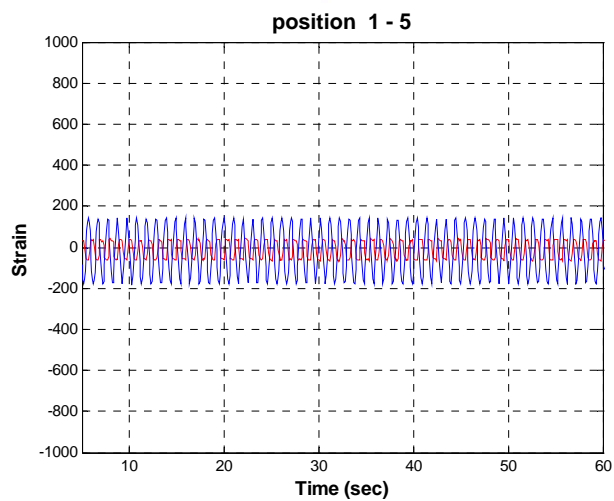
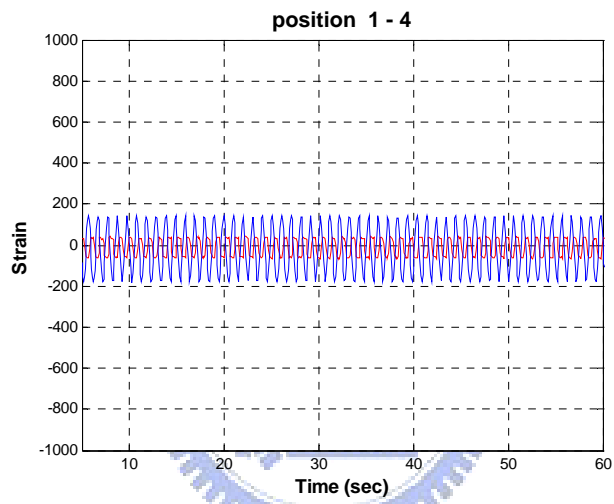
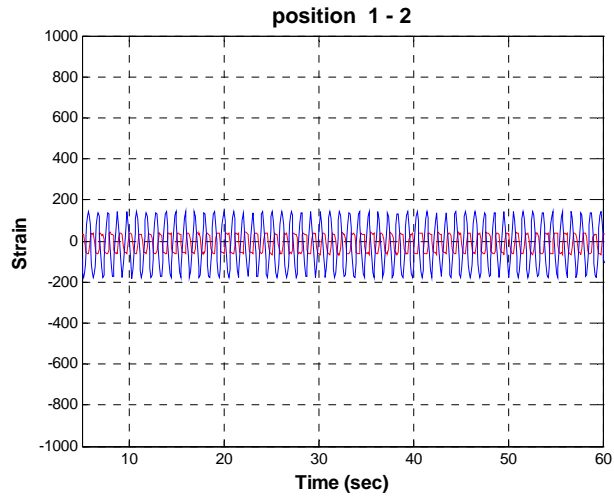


圖 3.8 三個應變計黏貼位置擾動頻率 1.0Hz 振幅 1mm 應變量

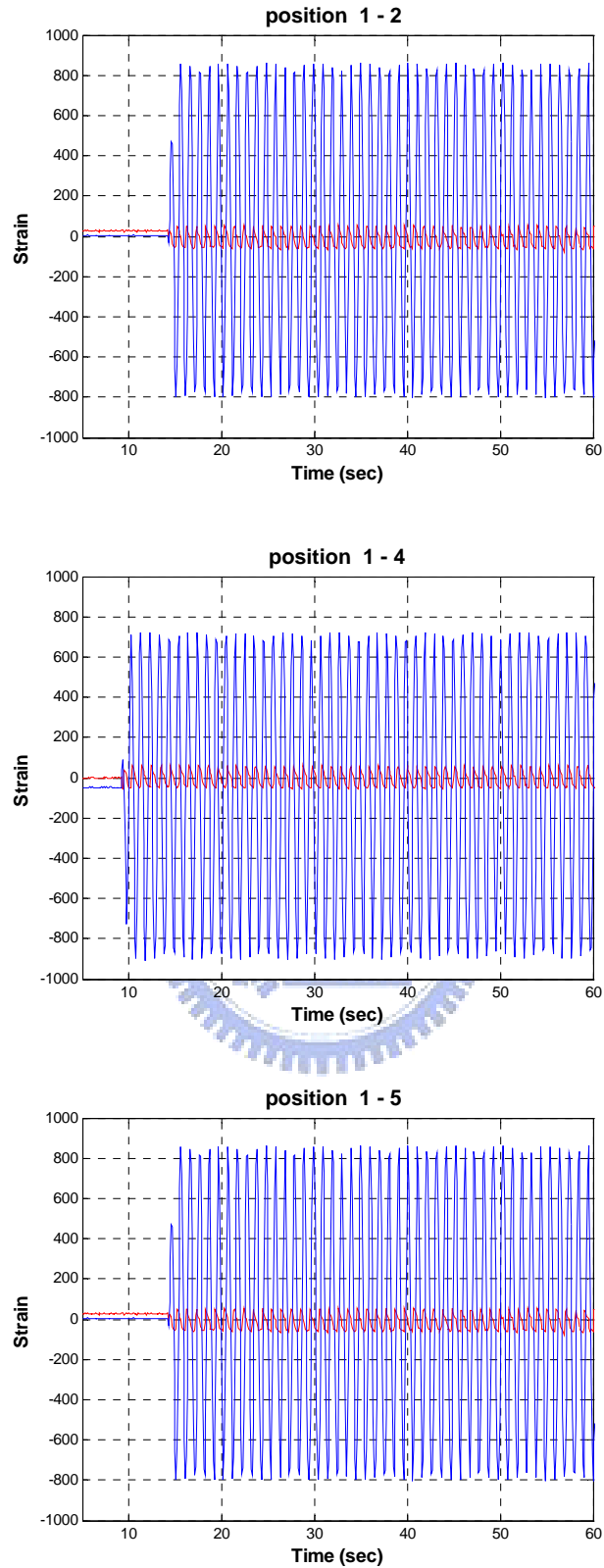


圖 3.9 三種應變計黏貼位置擾動頻率 1.0Hz 振幅 3mm 應變量

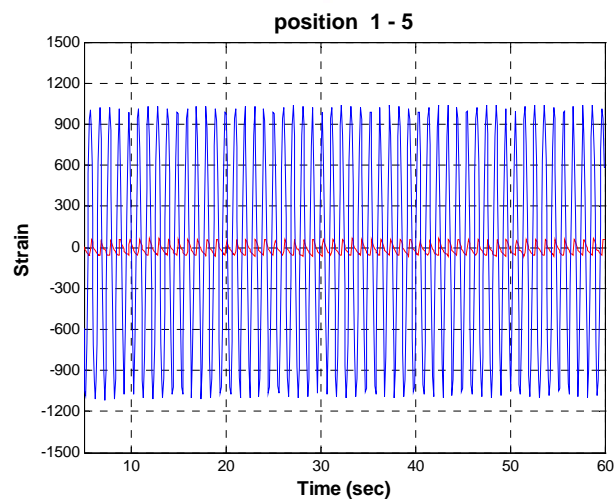
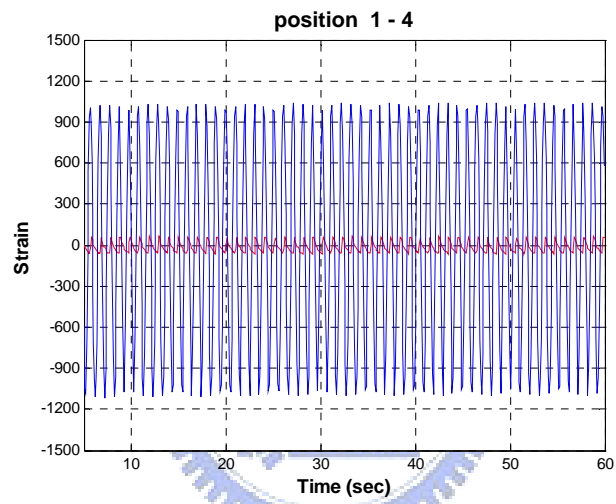
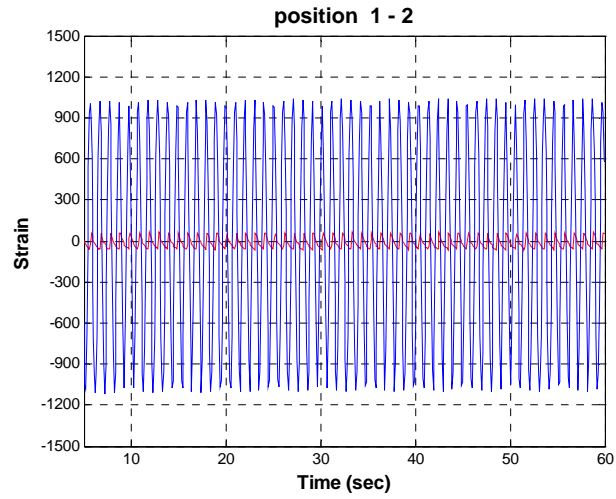


圖 3.10 三種應變計黏貼位置擾動頻率 1.0Hz 振幅 5mm 應變量

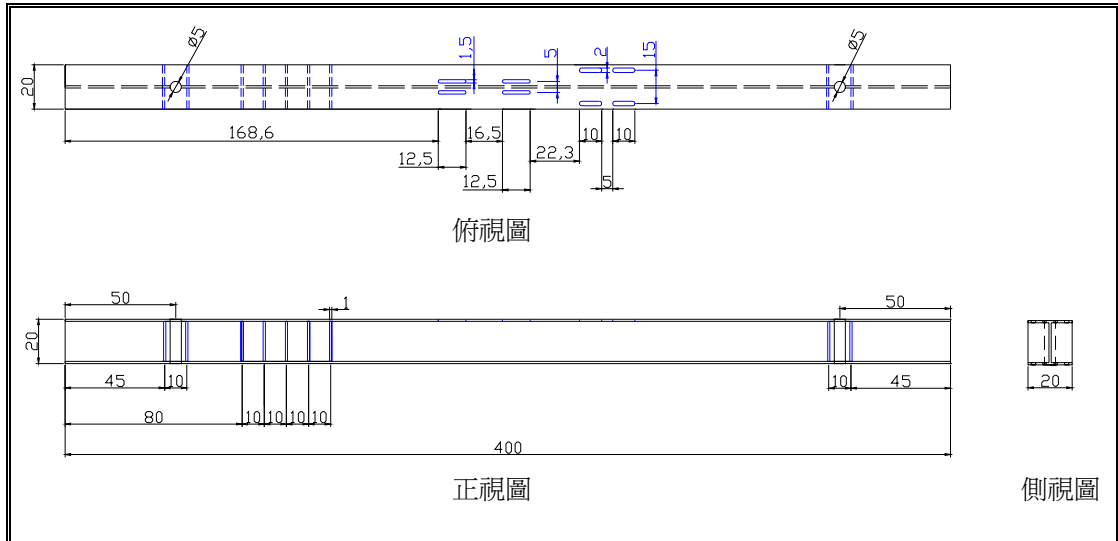


圖 3.11 測試構架底座設計詳圖 (單位：mm)

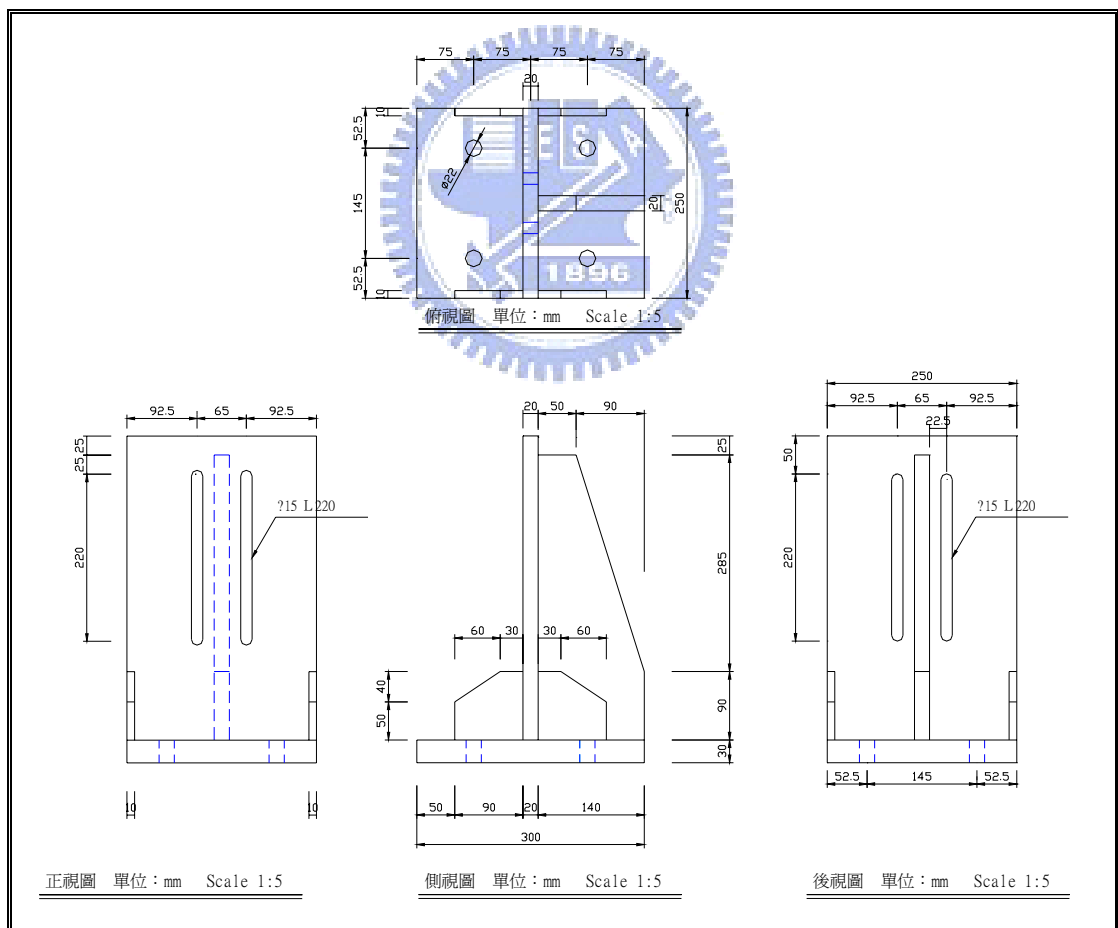


圖 3.12 測試構架反力座尺寸詳圖

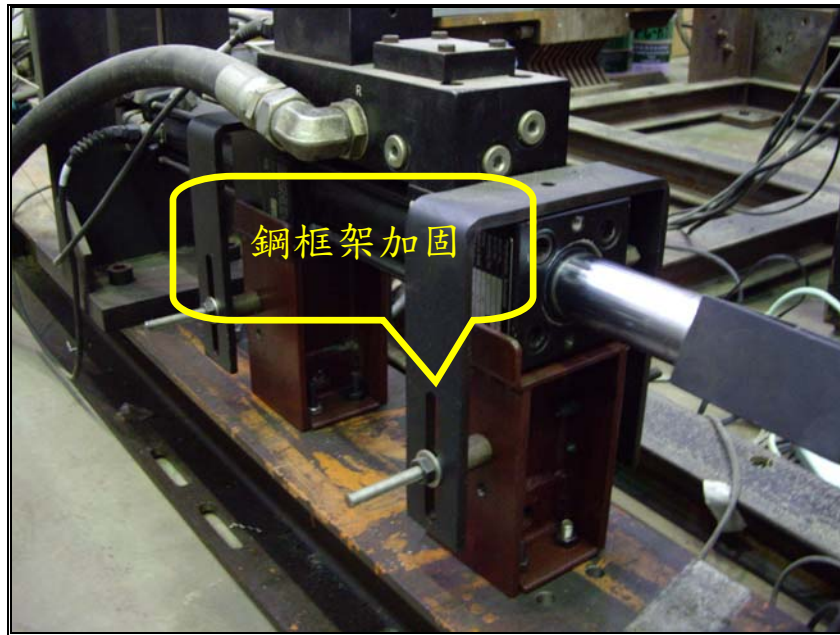


圖 3.13 1.5t 致動器以鋼框架加固

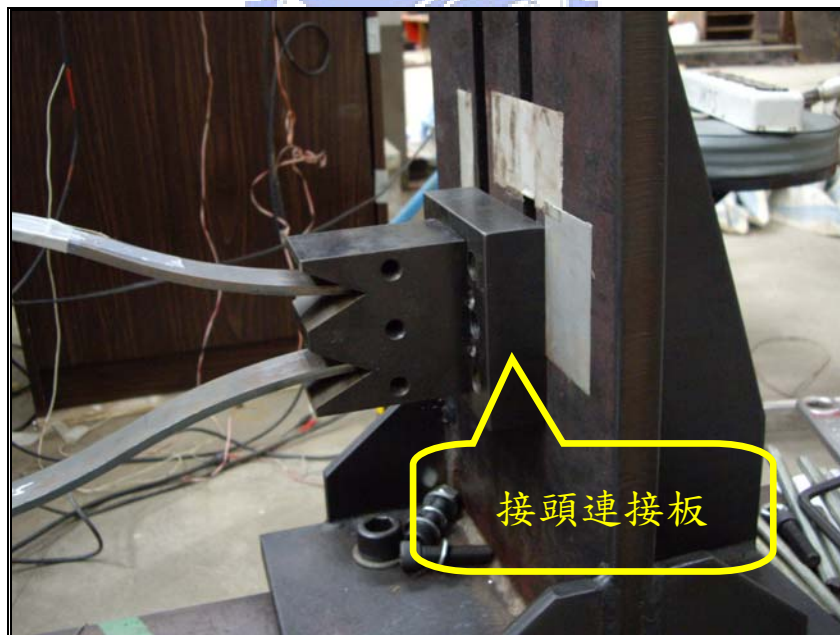


圖 3.14 接頭連接板

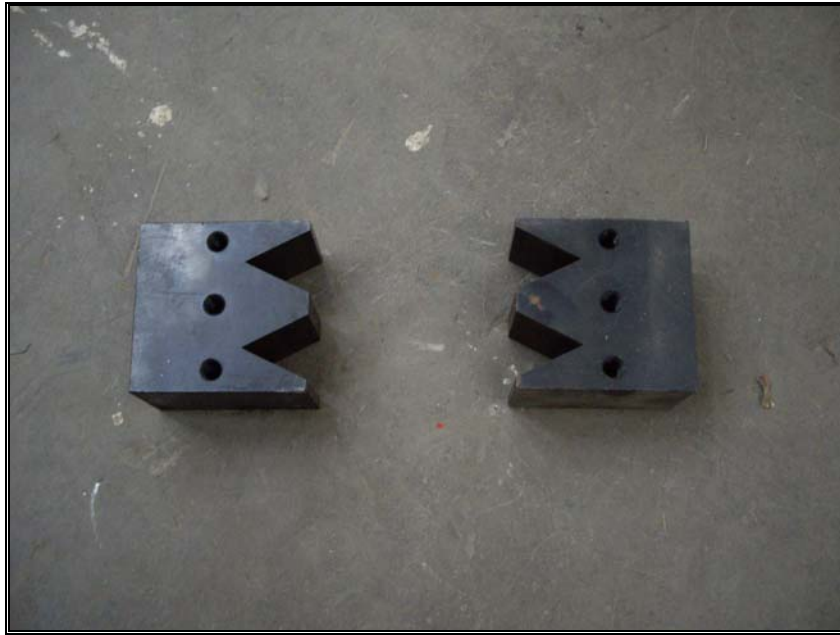


圖 3.15a 鉸接頭元件



圖 3.15b 固接頭元件

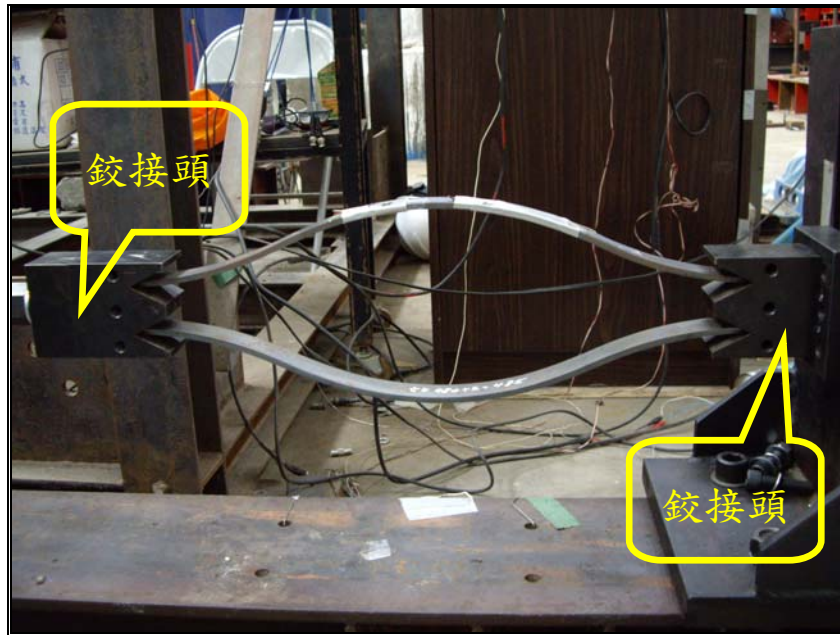


圖 3.16a 挫屈連桿試體安裝鉸接

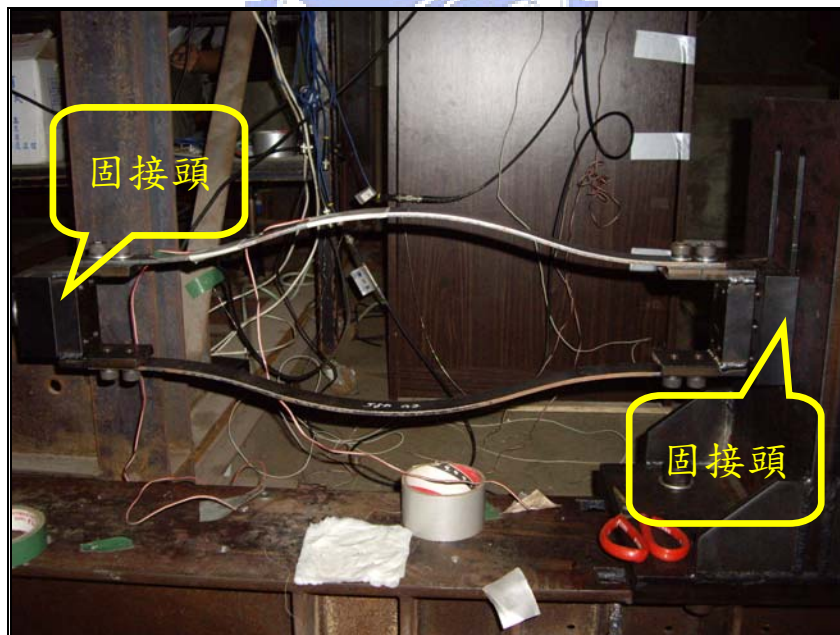


圖 3.16b 挫屈連桿試體安裝固接頭

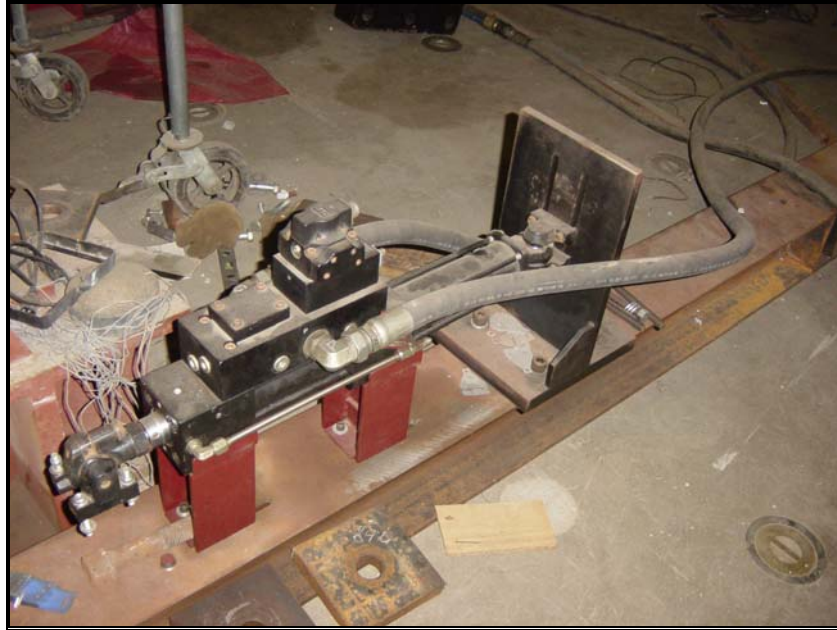


圖 3.17 1.5t 油壓致動器



圖 3.18 MTS 407 控制器

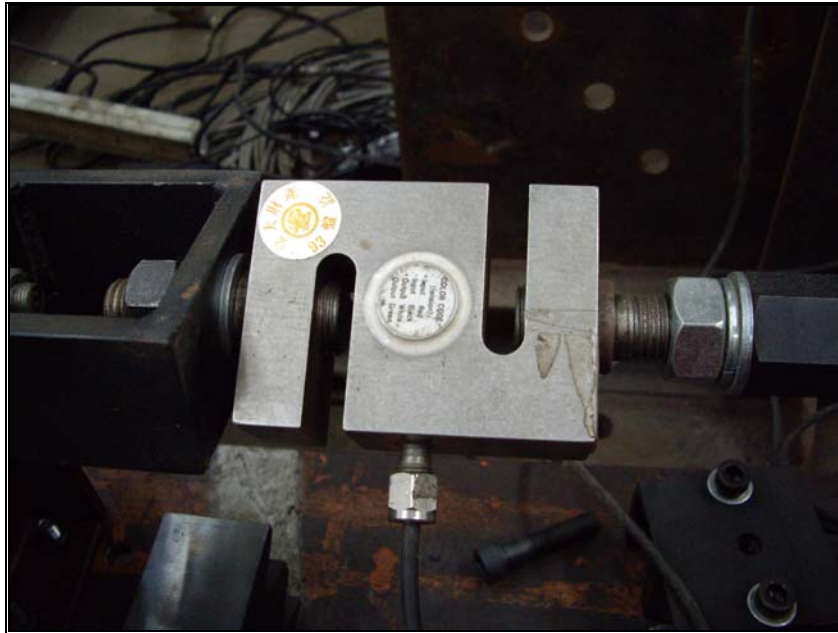


圖 3.19 力規 (Load Cell) (出力大小：5ton)

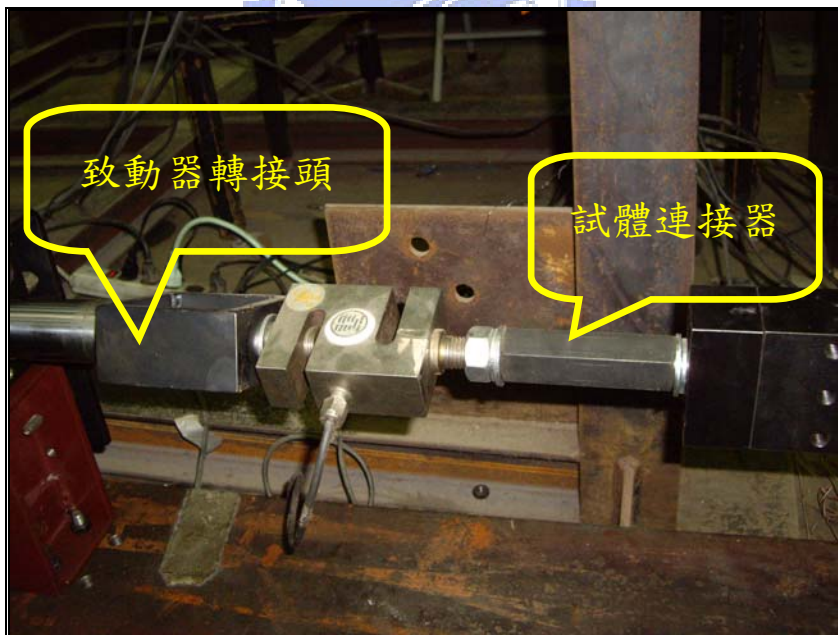


圖 3.20 致動器轉接頭與試體連接器

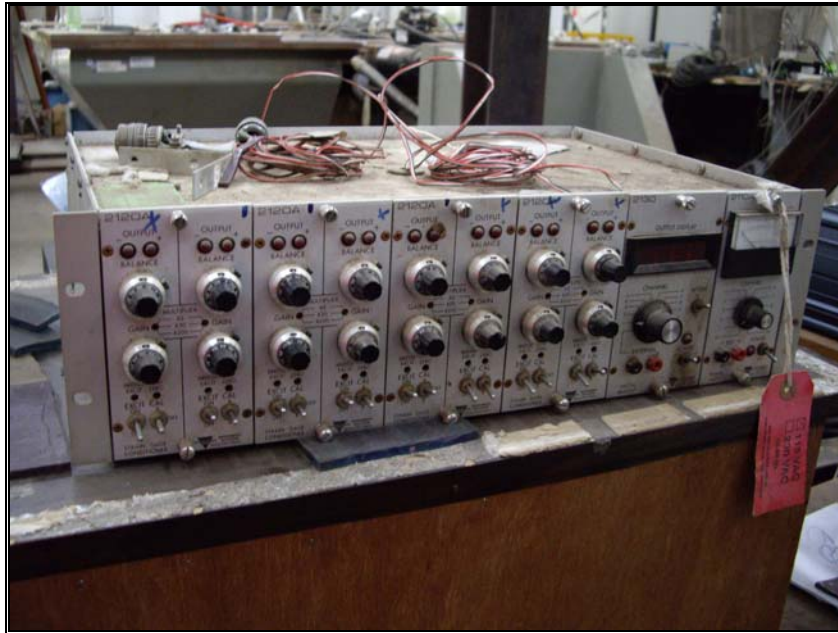


圖 3.21 訊號調節放大器



圖 3.22 IMC 資料擷取系統



圖 3.23 Famos 訊號顯示與分析軟體

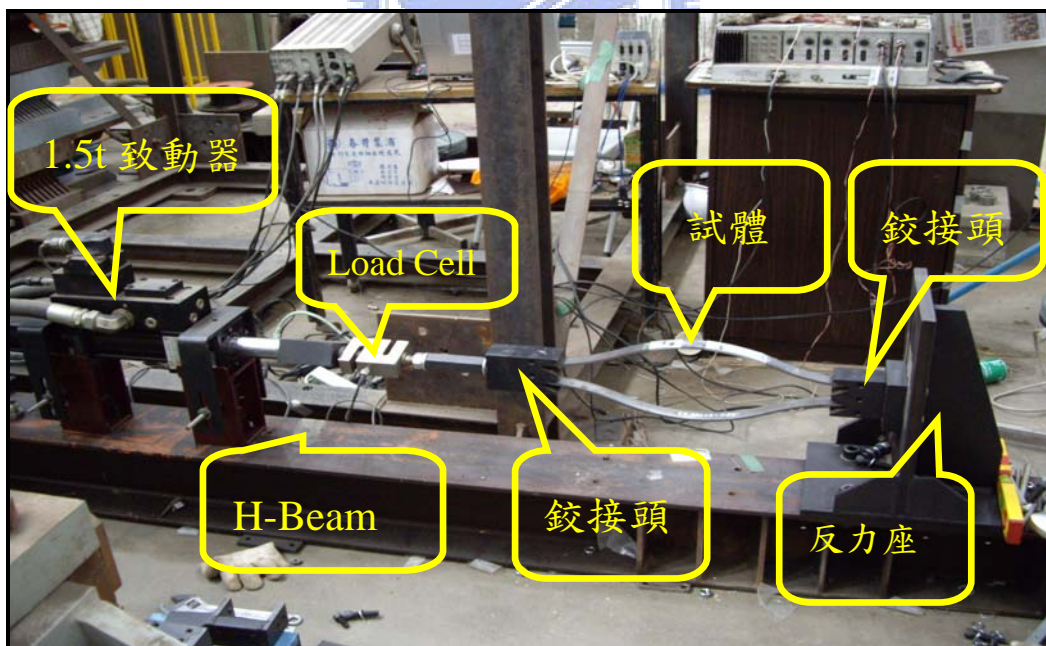


圖 3.24 挫屈連桿之安裝（鉸接試體）

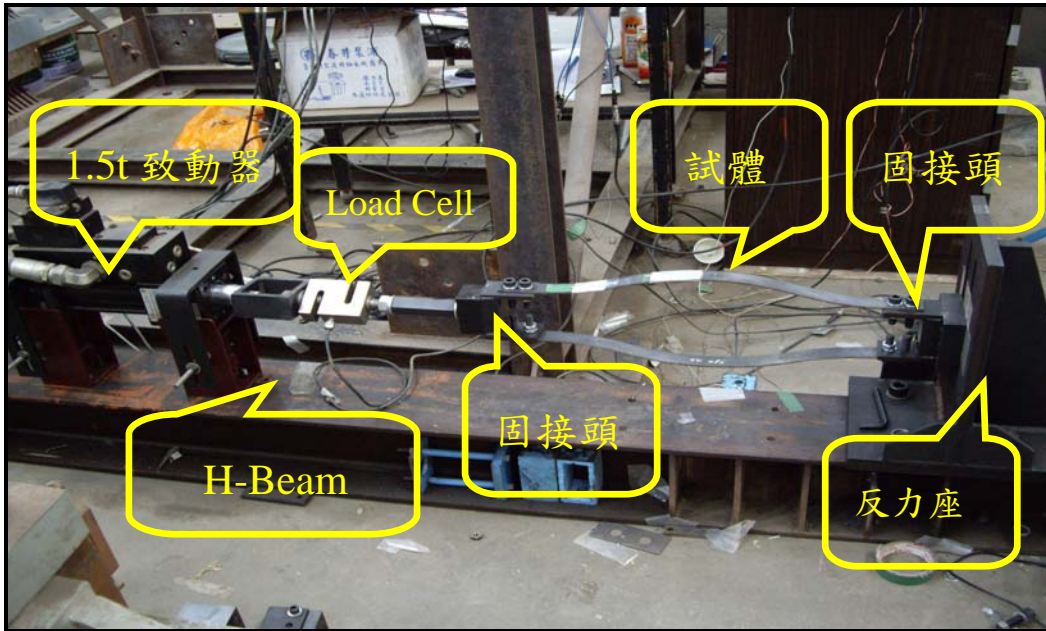


圖 3.25 挫屈連桿之安裝 (固接試體)



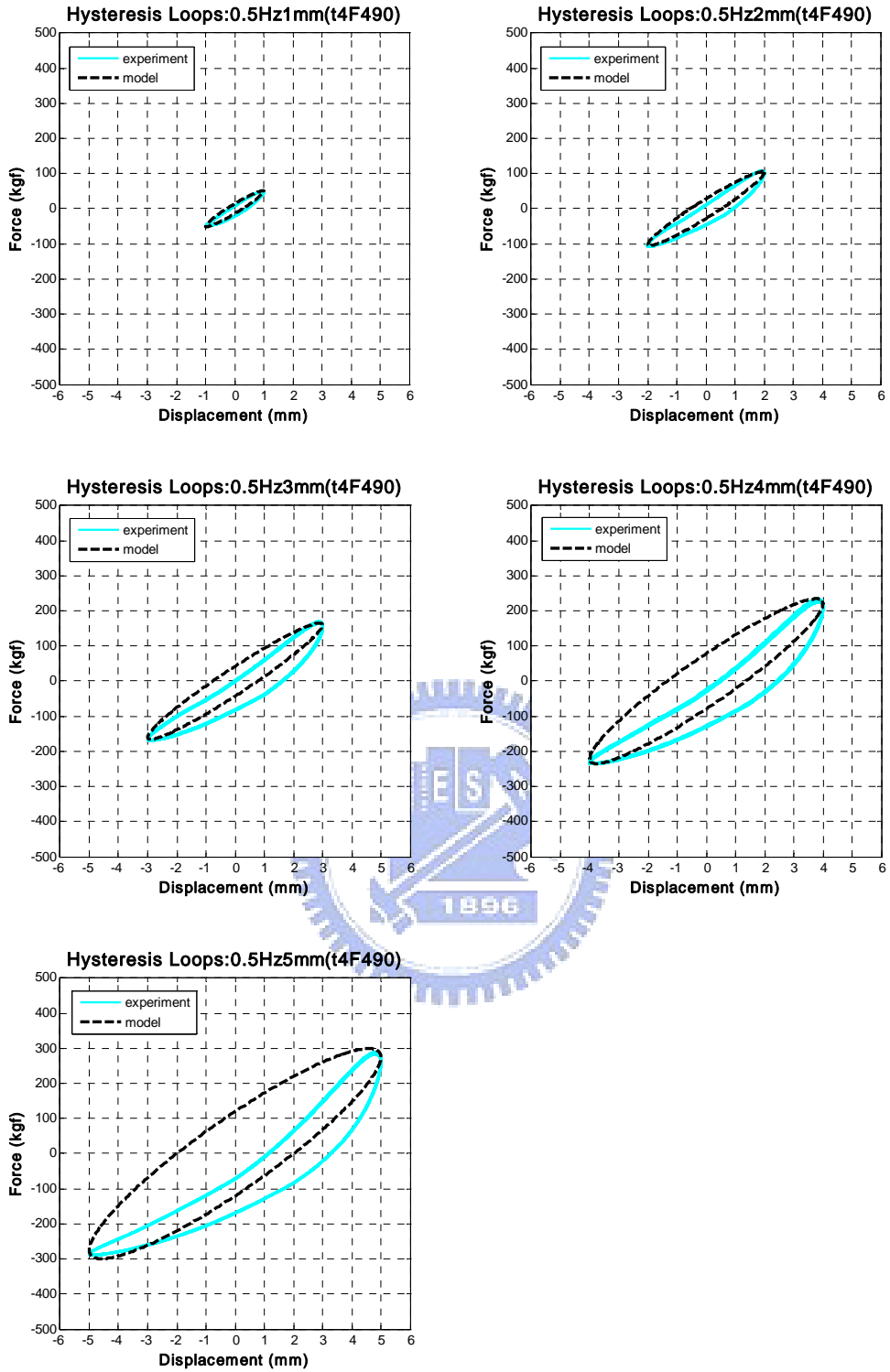


圖 4.1a t4H490 試體擾動頻率 0.5Hz 各振幅之遲滯迴圈

(Thickness : 4mm , Length : 490mm , B.C. : Hinged)

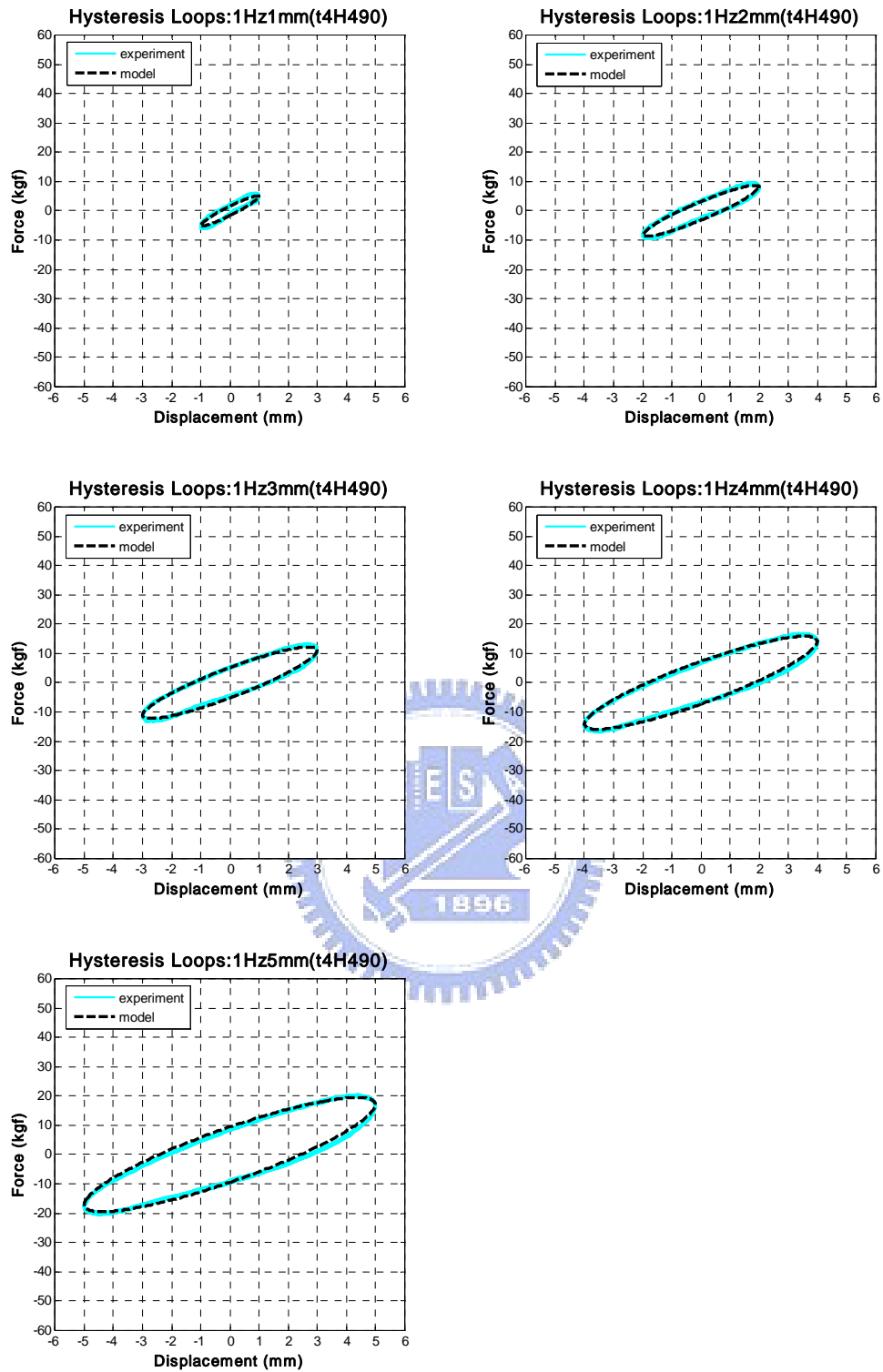


圖 4.1b t4H490 試體擾動頻率 1.0Hz 各振幅之遲滯迴圈

(Thickness : 4mm , Length : 490mm , B.C. : Hinged)

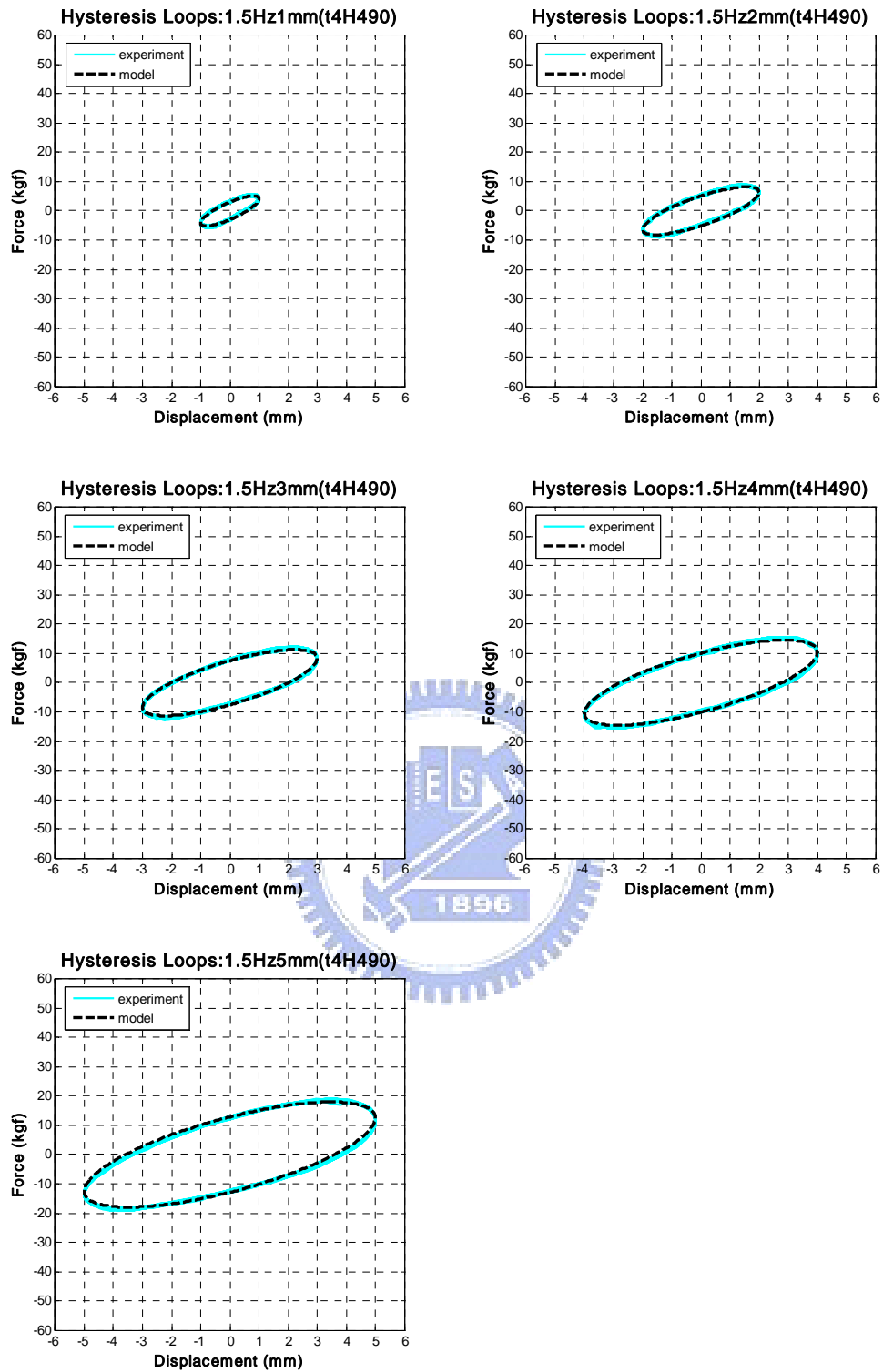


圖 4.1c t4H490 試體擾動頻率 1.5Hz 各振幅之遲滯迴圈

(Thickness : 4mm , Length : 490mm , B.C. : Hinged)

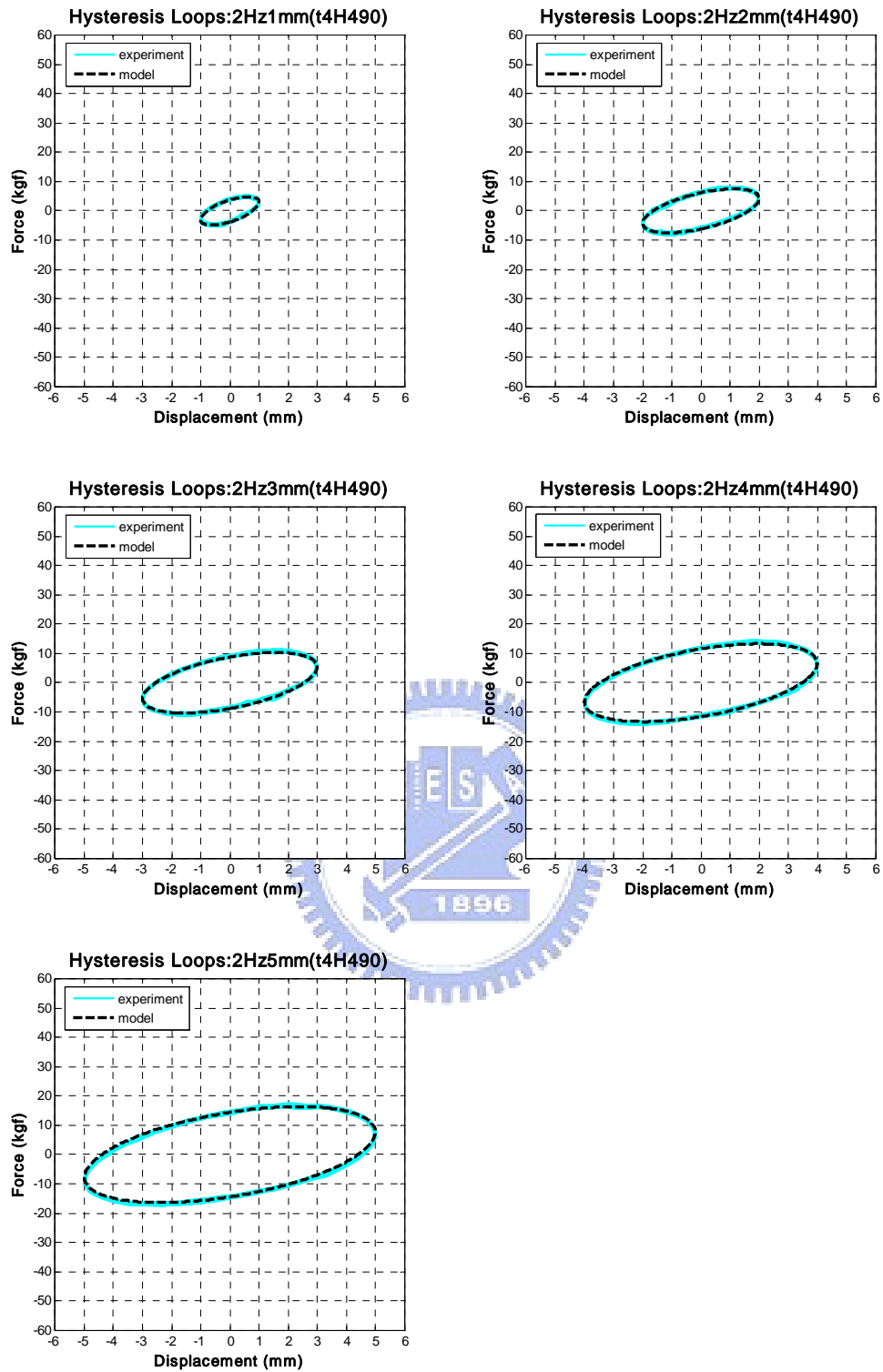


圖 4.1d t4H490 試體擾動頻率 2.0Hz 各振幅之遲滯迴圈

(Thickness : 4mm , Length : 490mm , B.C. : Hinged)

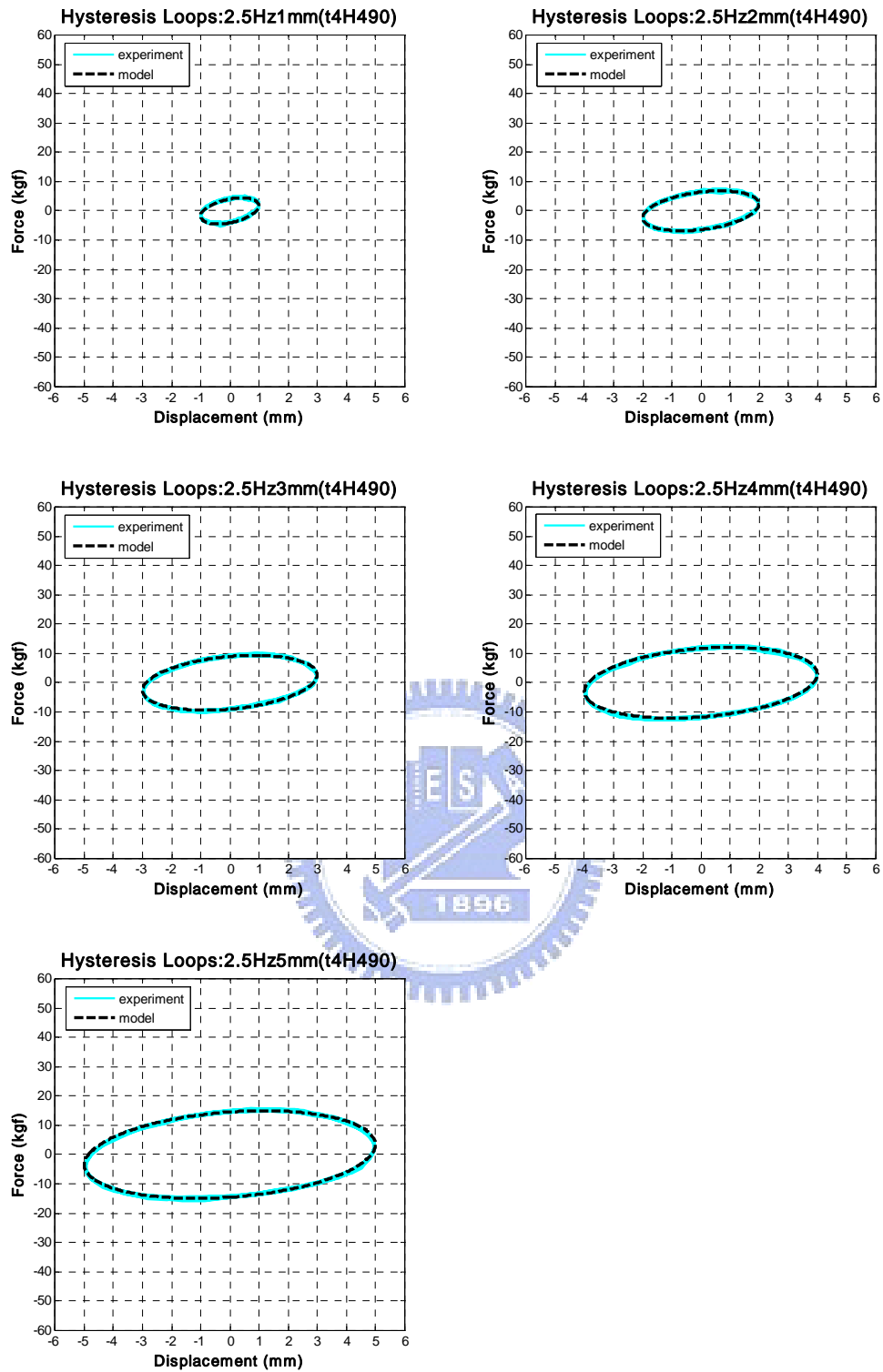


圖 4.1e t4H490 試體擾動頻率 2.5Hz 各振幅之遲滯迴圈

(Thickness : 4mm , Length : 490mm , B.C. : Hinged)

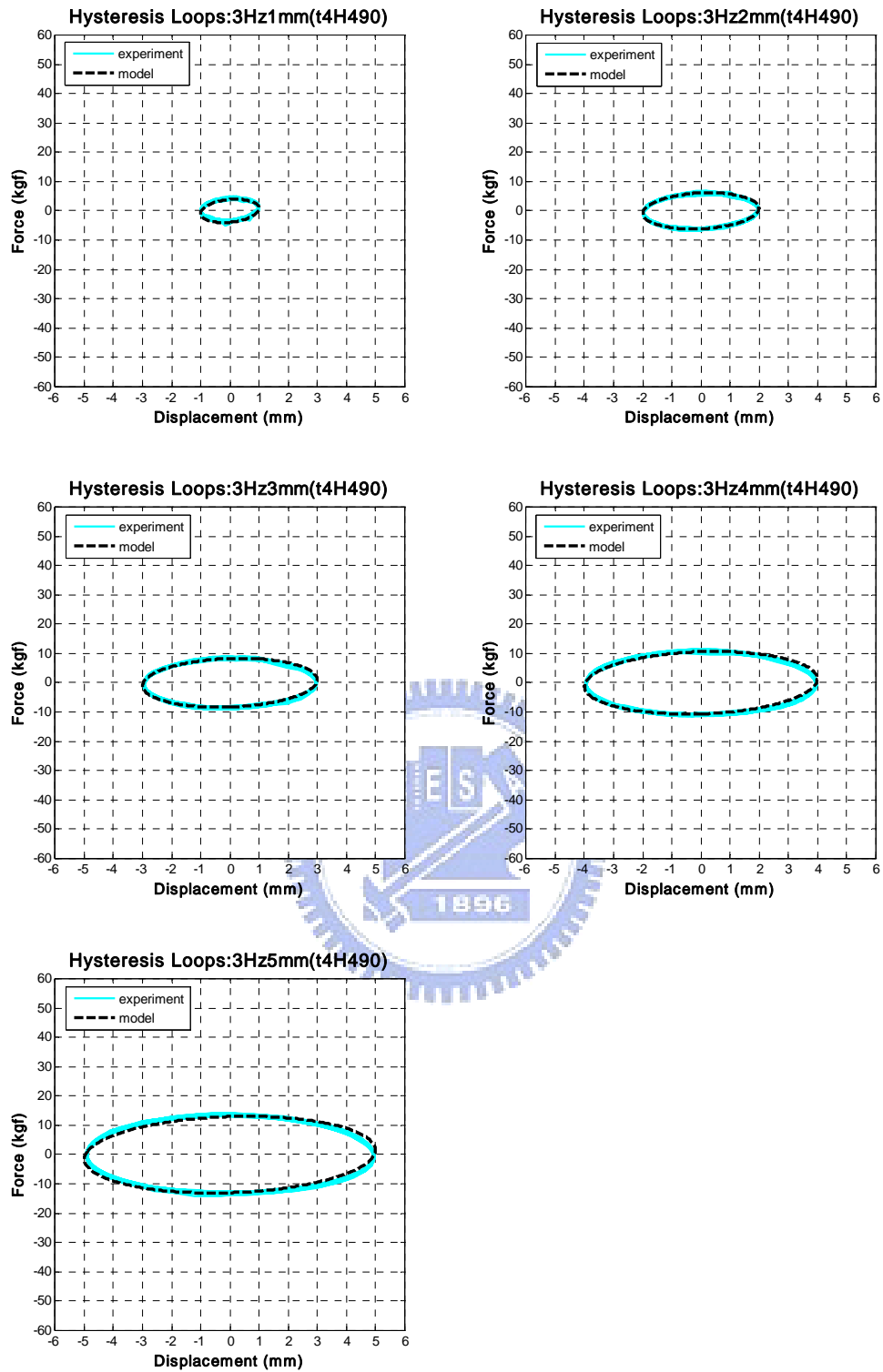


圖 4.1f t4H490 試體擾動頻率 3.0Hz 各振幅之遲滯迴圈

(Thickness : 4mm , Length : 490mm , B.C. : Hinged)

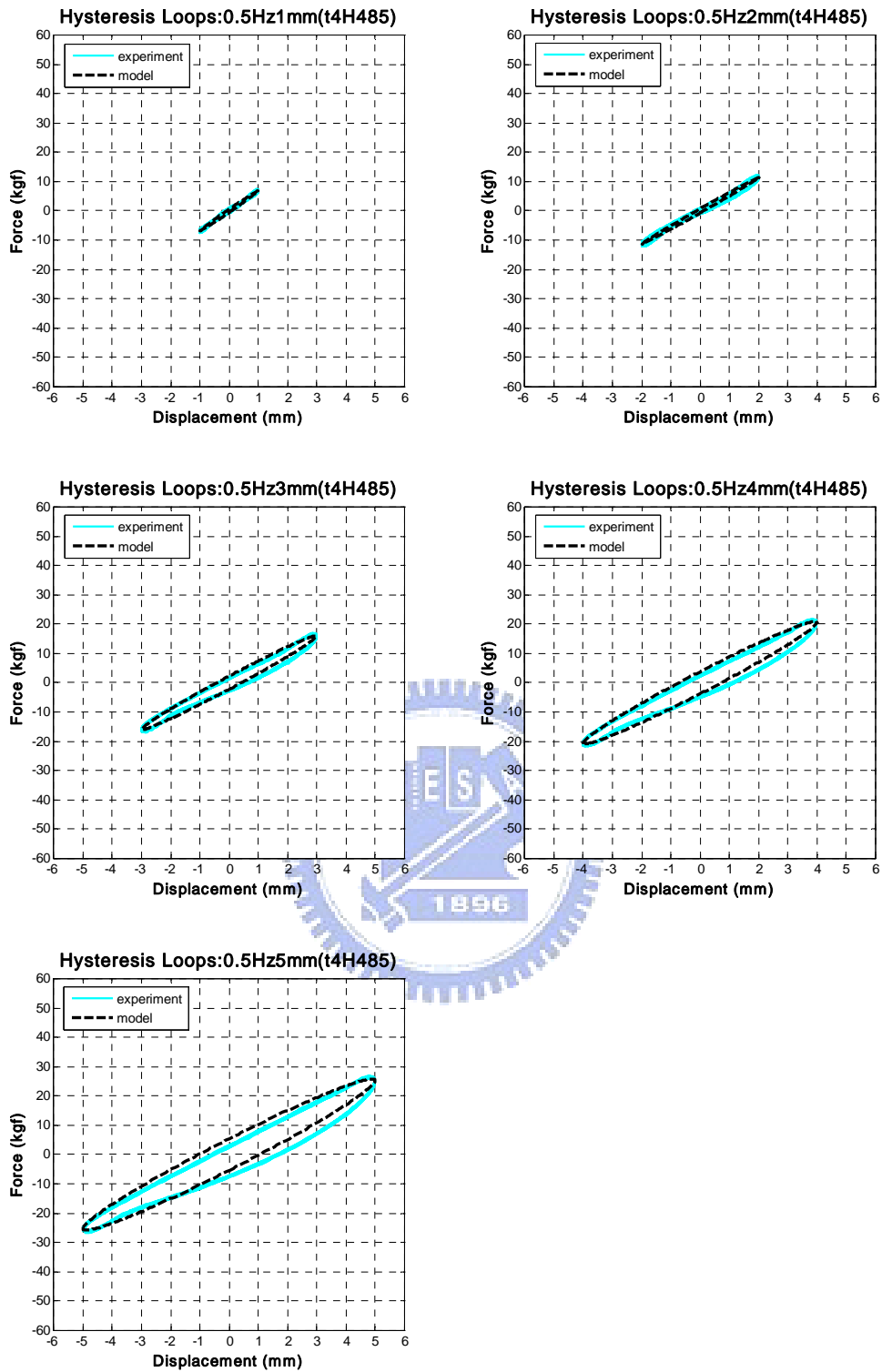


圖 4.2a t4H485 試體擾動頻率 0.5Hz 各振幅之遲滯迴圈

(Thickness : 4mm , Length : 485mm , B.C. : Hinged)

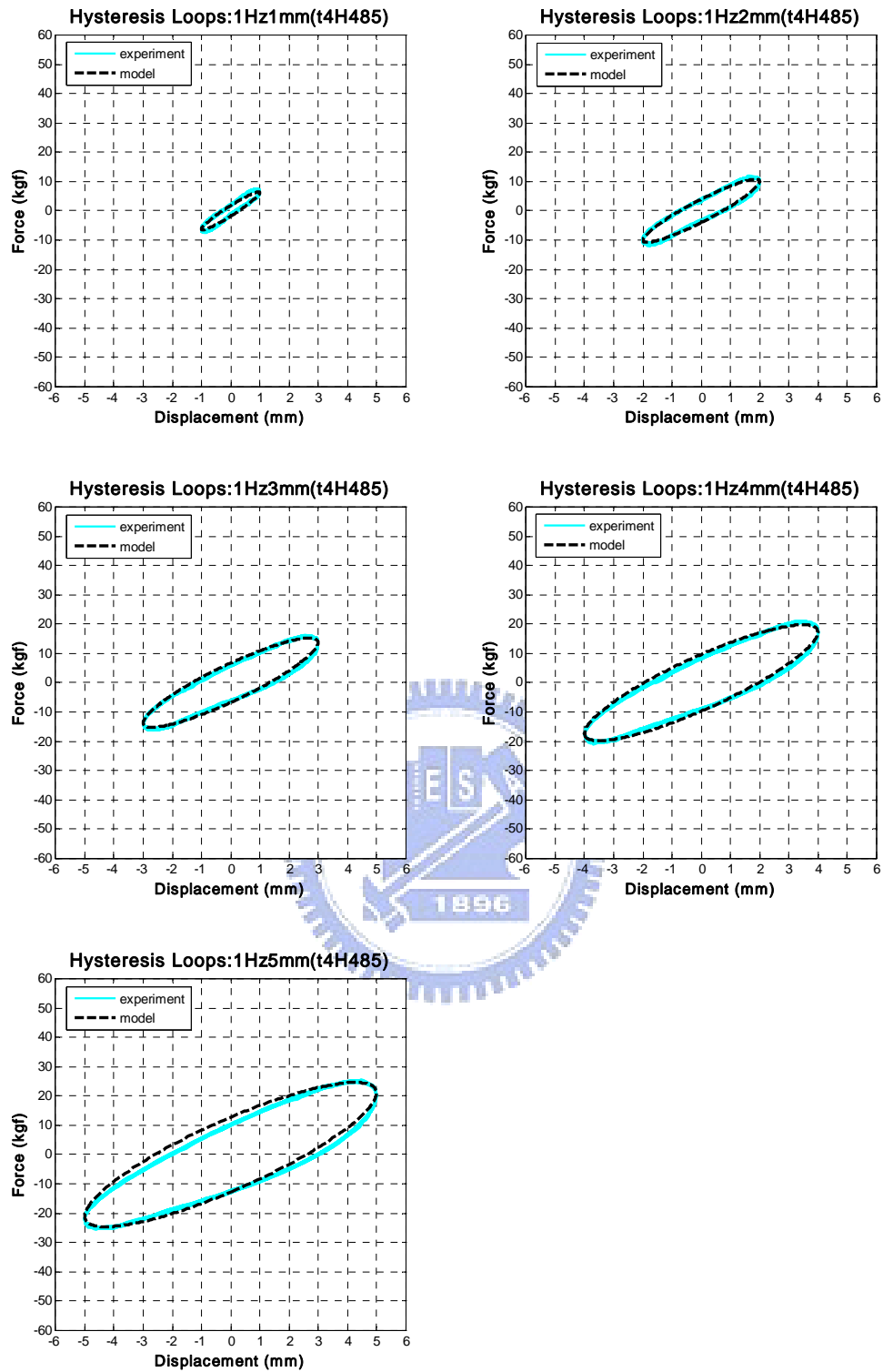


圖 4.2b t4H485 試體擾動頻率 1.0Hz 各振幅之遲滯迴圈

(Thickness : 4mm , Length : 485mm , B.C. : Hinged)

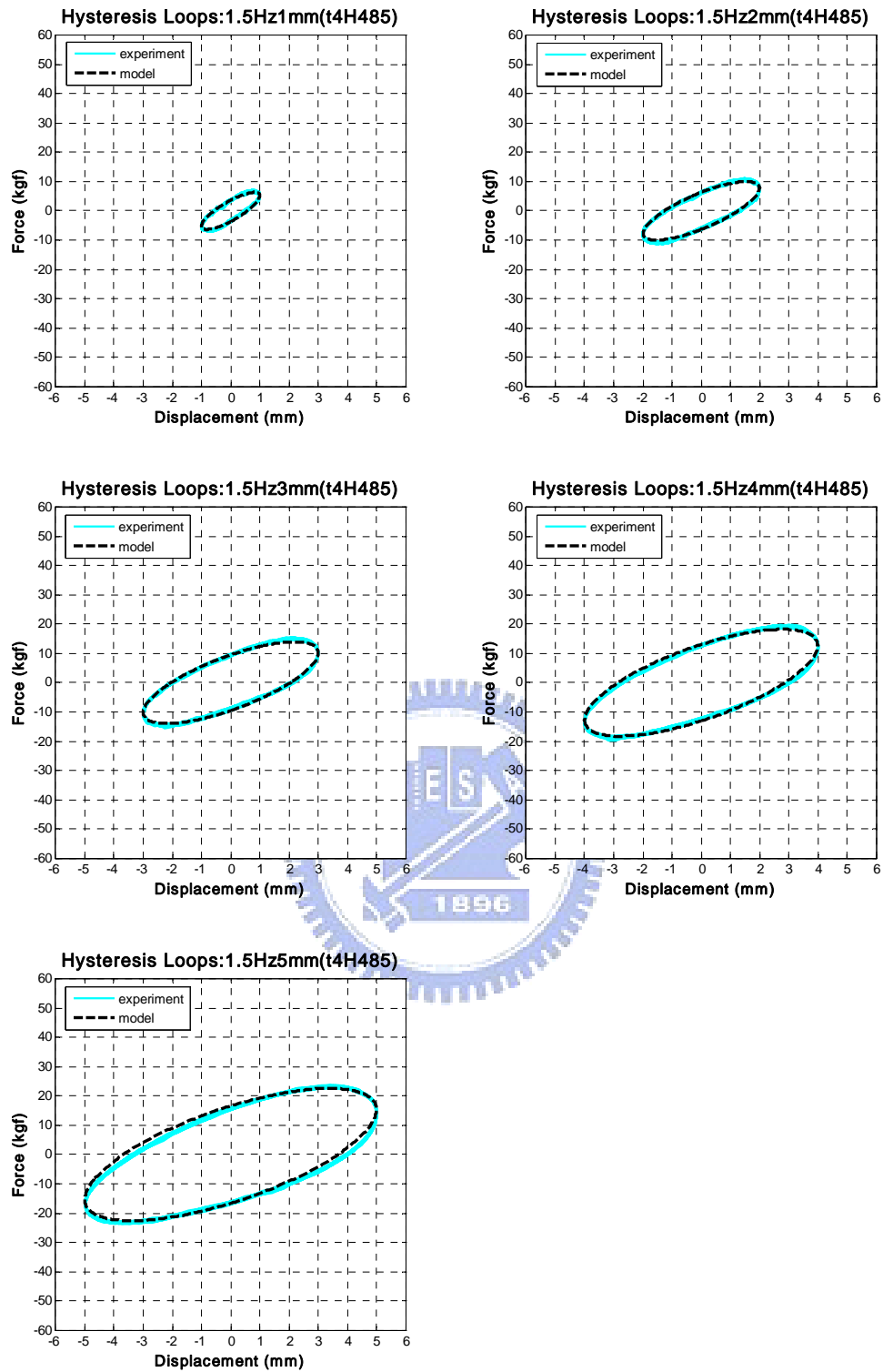


圖 4.2c t4H485 試體擾動頻率 1.5Hz 各振幅之遲滯迴圈

(Thickness : 4mm , Length : 485mm , B.C. : Hinged)

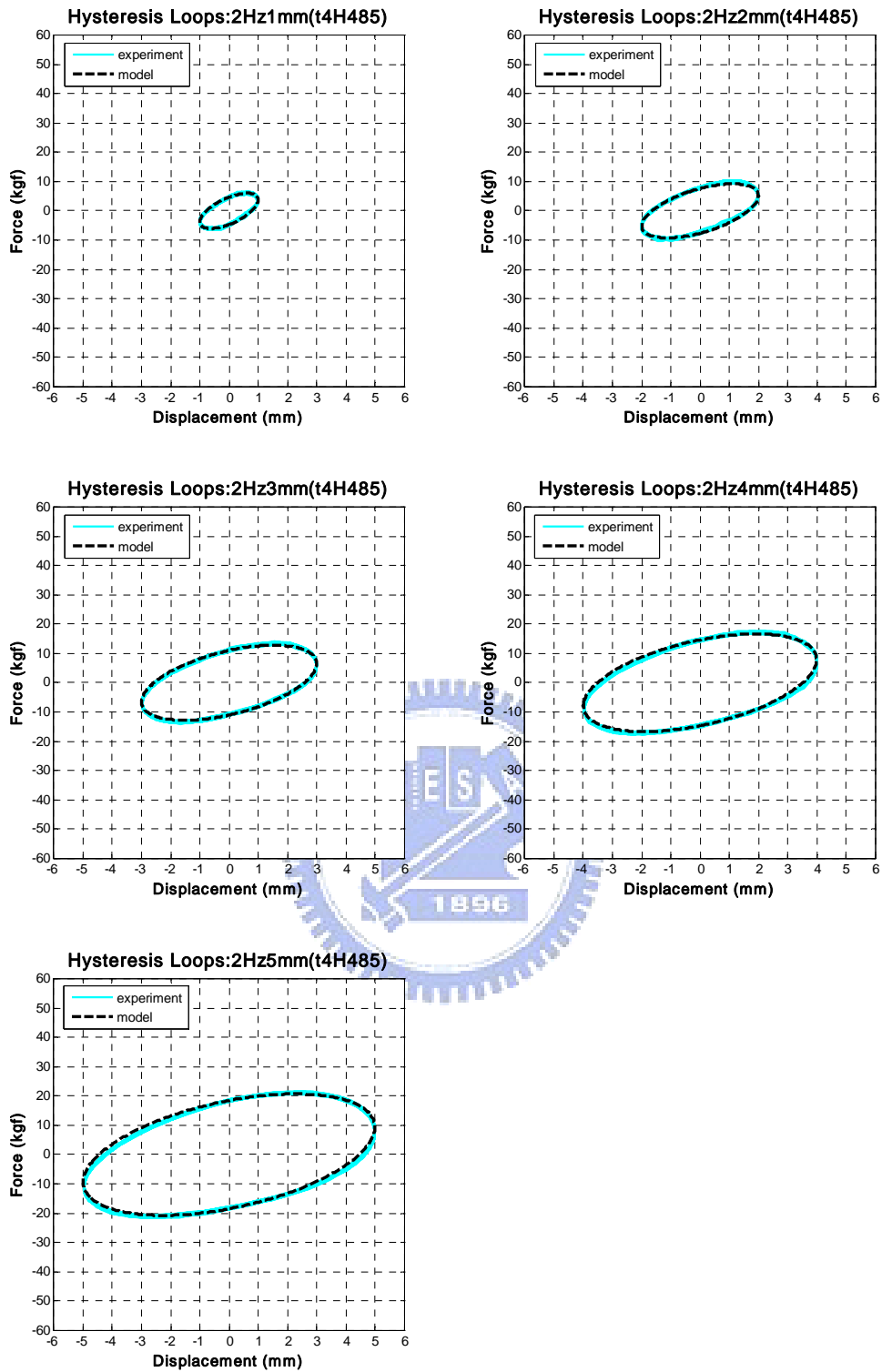


圖 4.2d t4H485 試體擾動頻率 2.0Hz 各振幅之遲滯迴圈

(Thickness : 4mm , Length : 485mm , B.C. : Hinged)

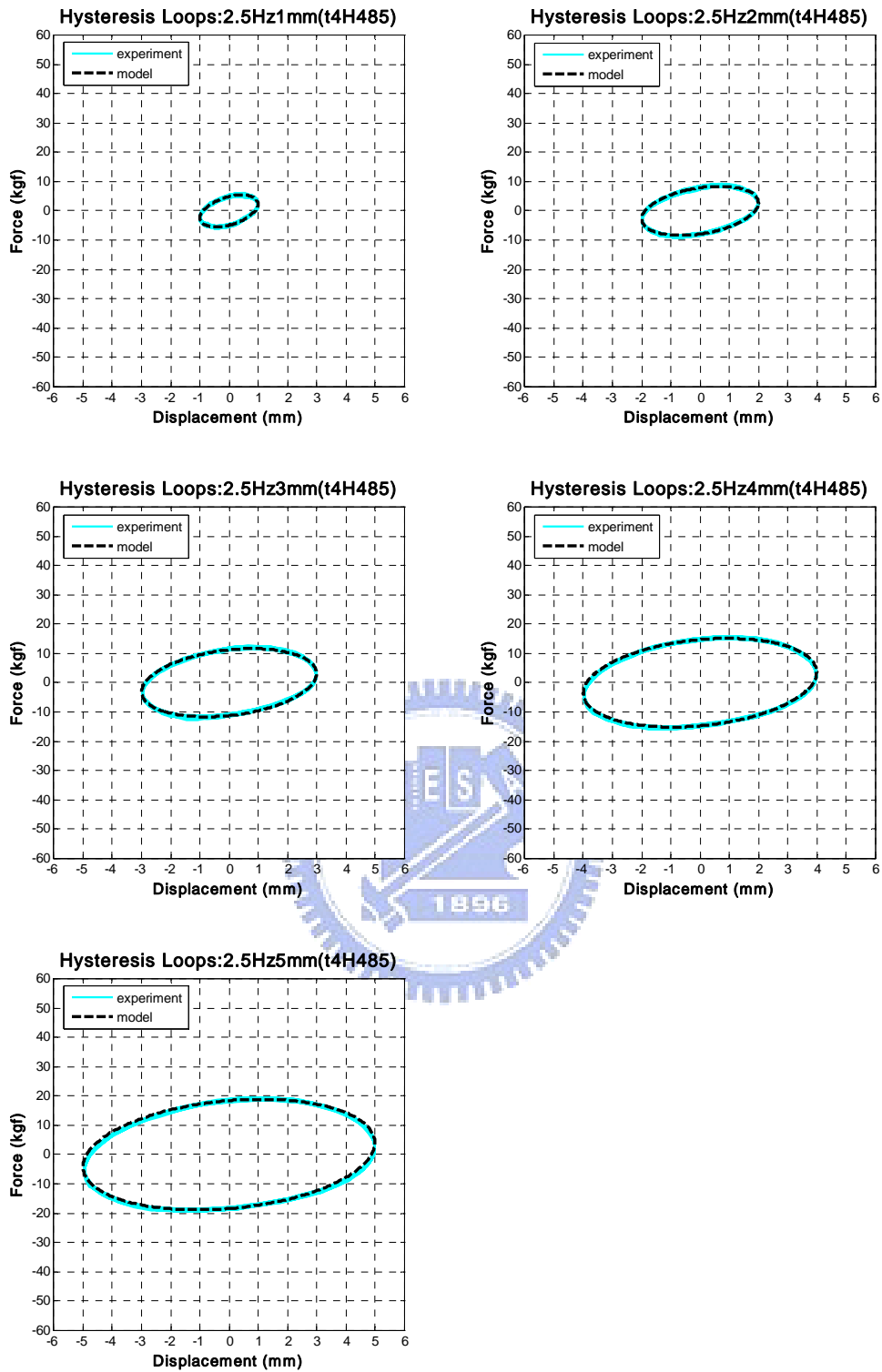


圖 4.2e t4H485 試體擾動頻率 2.5Hz 各振幅之遲滯迴圈

(Thickness : 4mm , Length : 485mm , B.C. : Hinged)

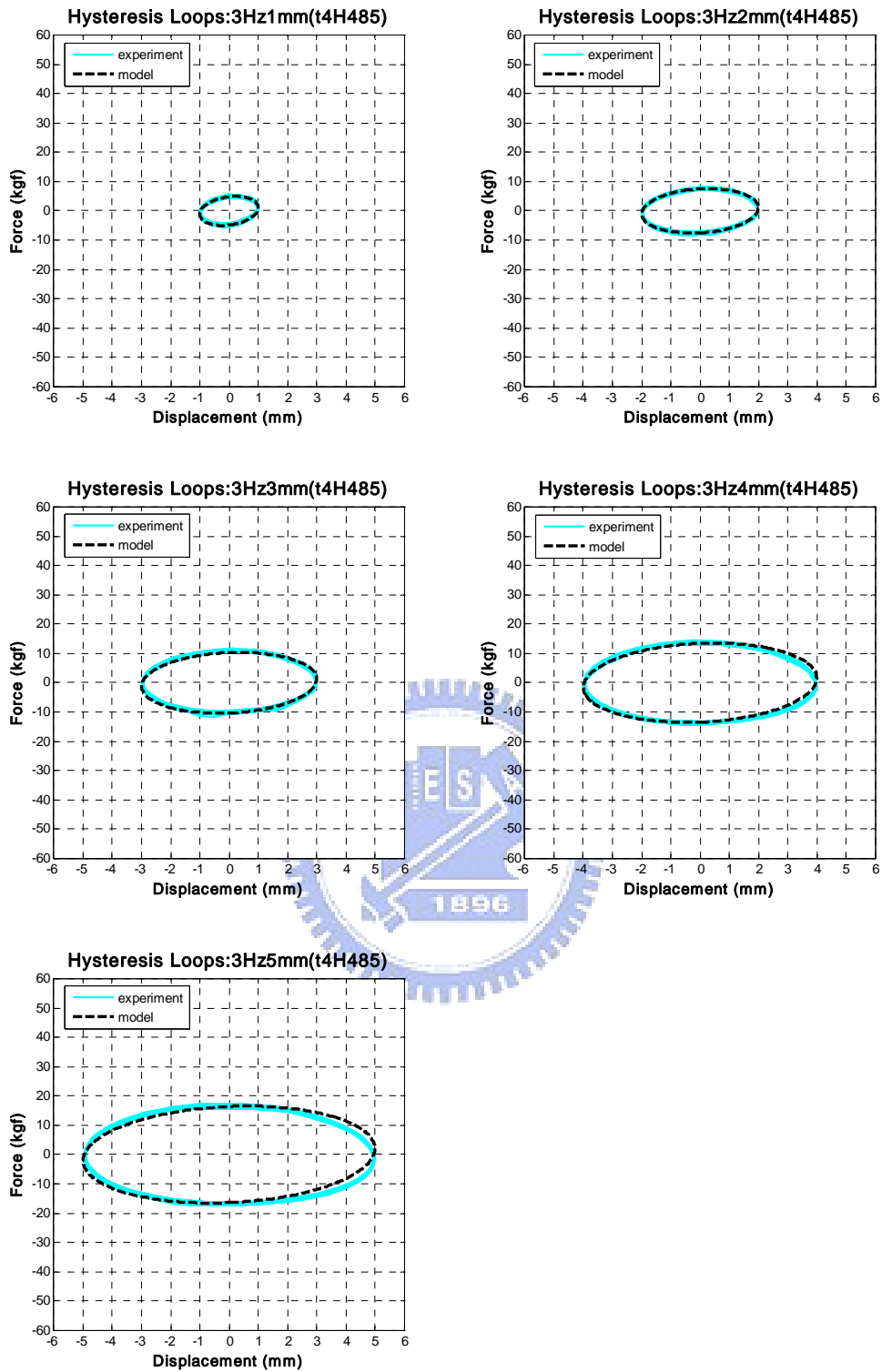


圖 4.2f t4H485 試體擾動頻率 3.0Hz 各振幅之遲滯迴圈

(Thickness : 4mm , Length : 485mm , B.C. : Hinged)

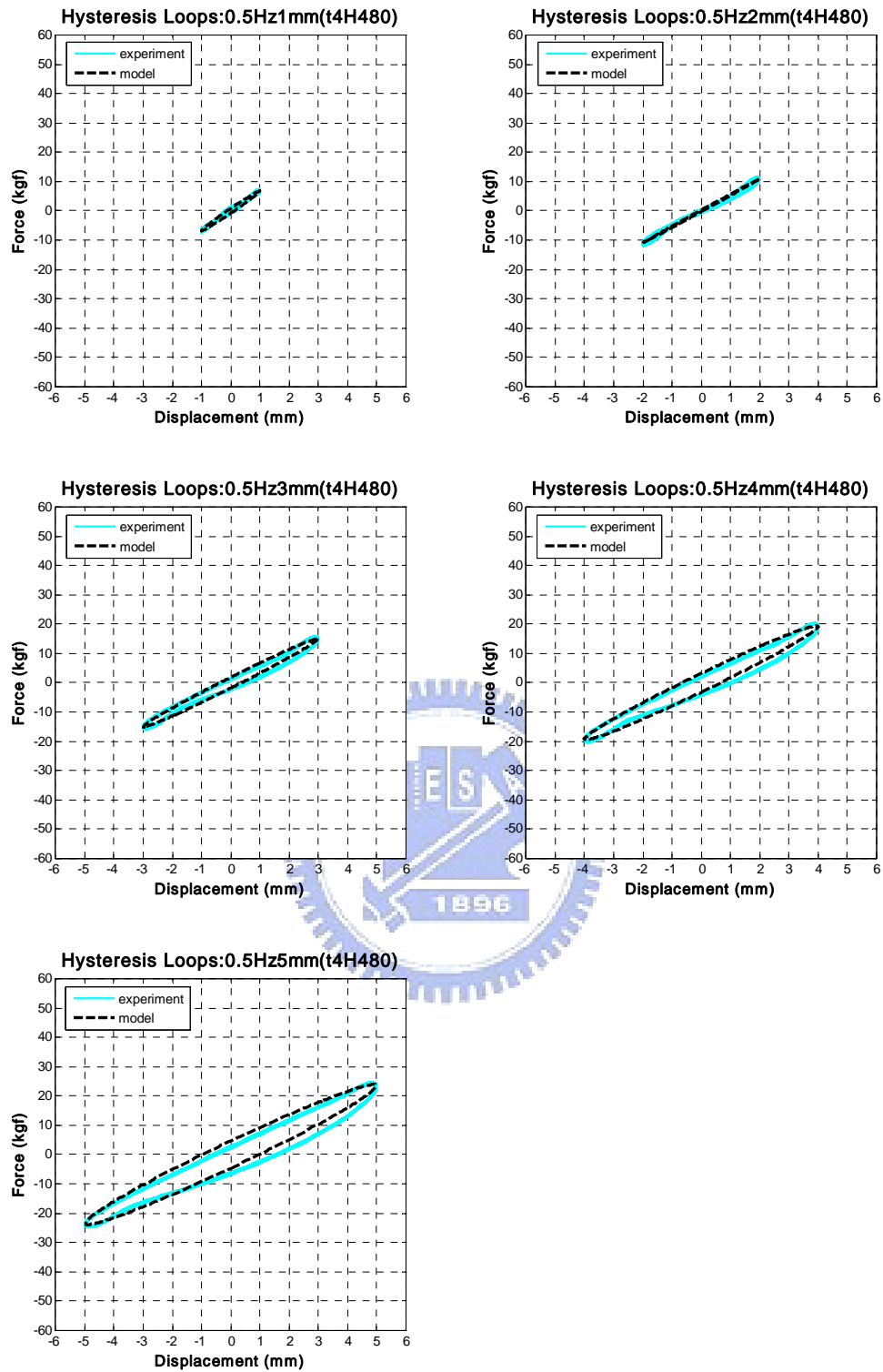


圖 4.3a t4H480 試體擾動頻率 0.5Hz 各振幅之遲滯迴圈

(Thickness : 4mm , Length : 480mm , B.C. : Hinged)

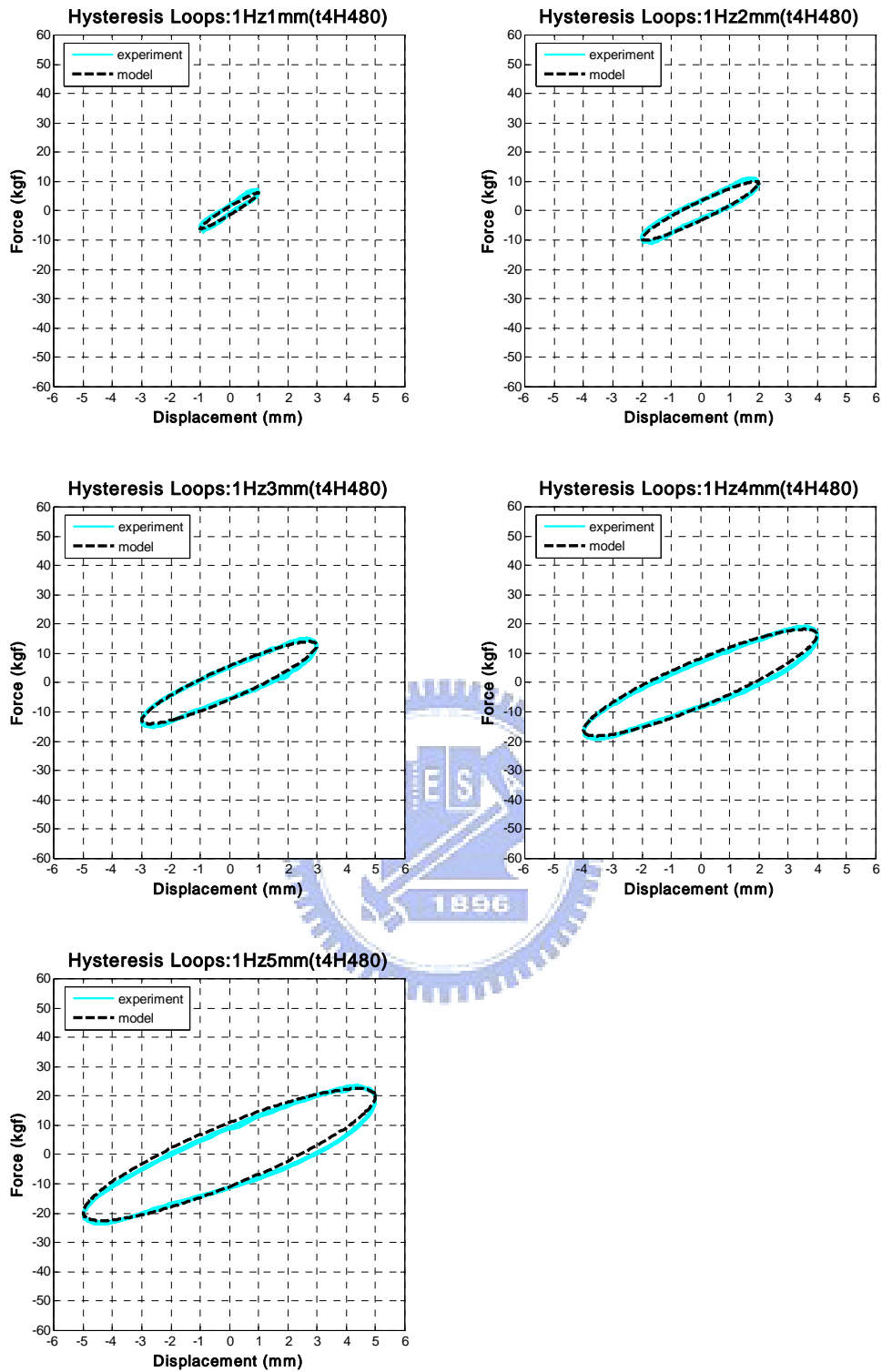


圖 4.3b t4H480 試體擾動頻率 1.0Hz 各振幅之遲滯迴圈

(Thickness : 4mm , Length : 480mm , B.C. : Hinged)

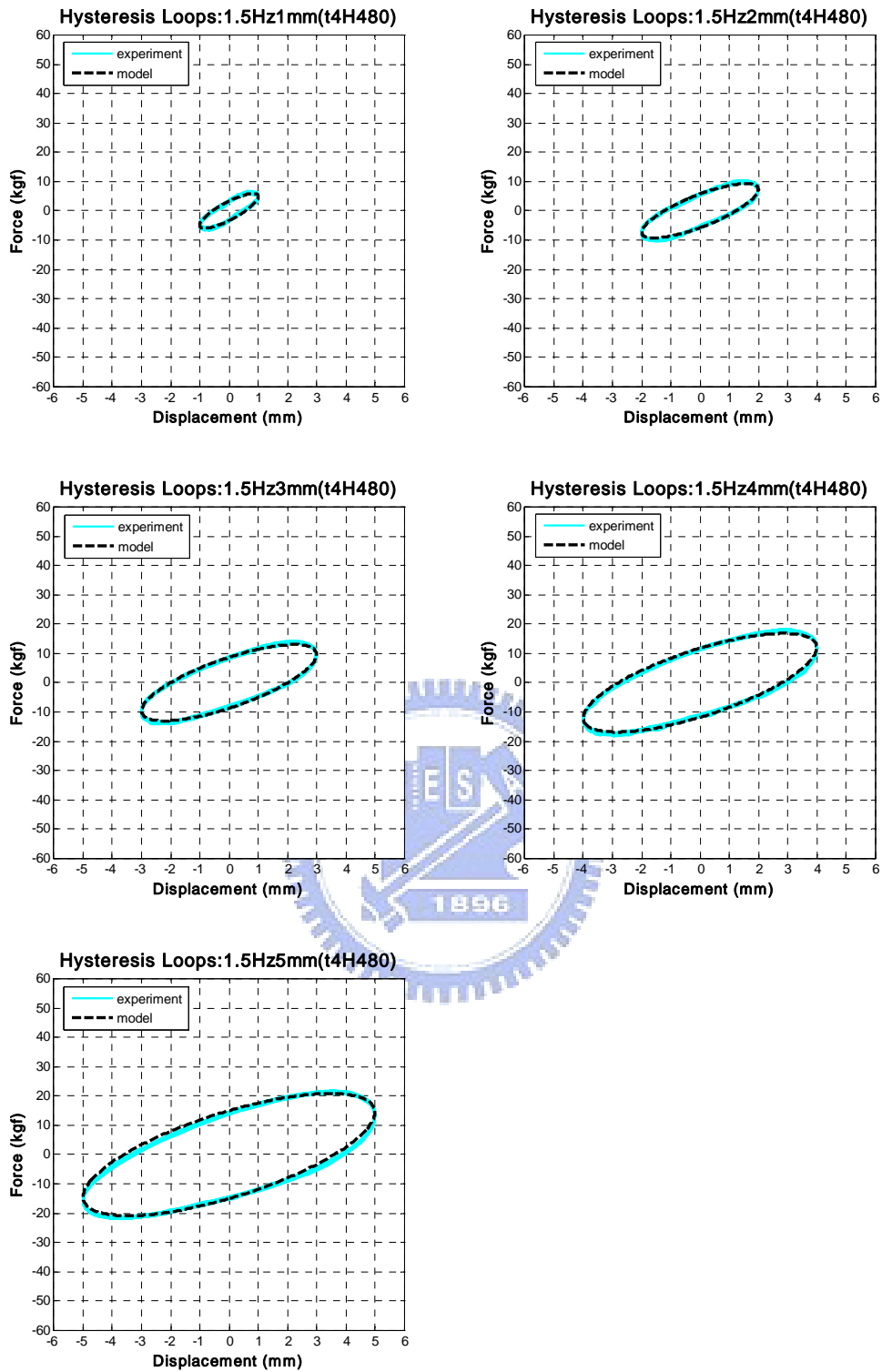


圖 4.3c t4H480 試體擾動頻率 1.5Hz 各振幅之遲滯迴圈

(Thickness : 4mm , Length : 480mm , B.C. : Hinged)

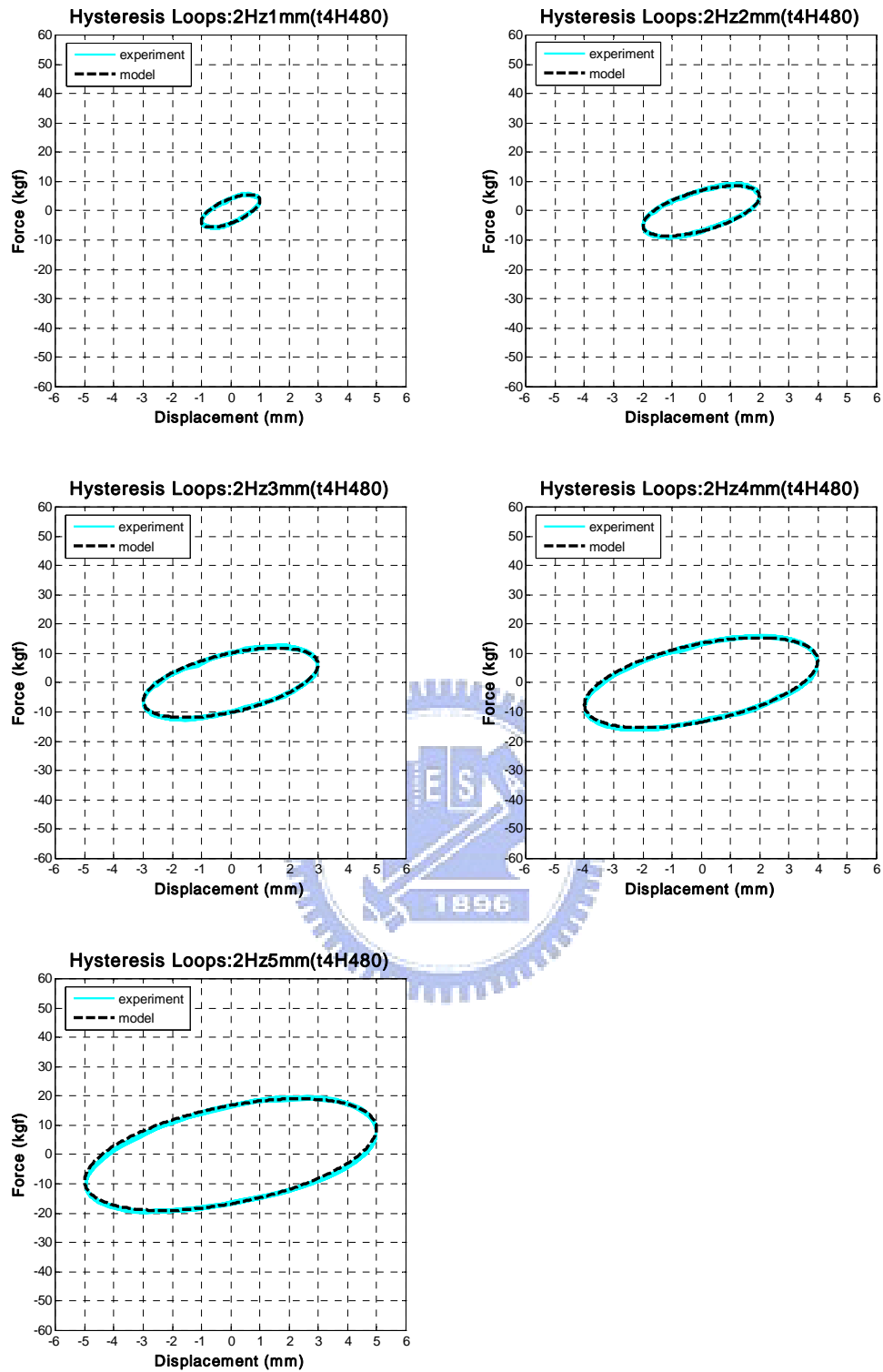


圖 4.3d t4H480 試體擾動頻率 2.0Hz 各振幅之遲滯迴圈

(Thickness : 4mm , Length : 480mm , B.C. : Hinged)

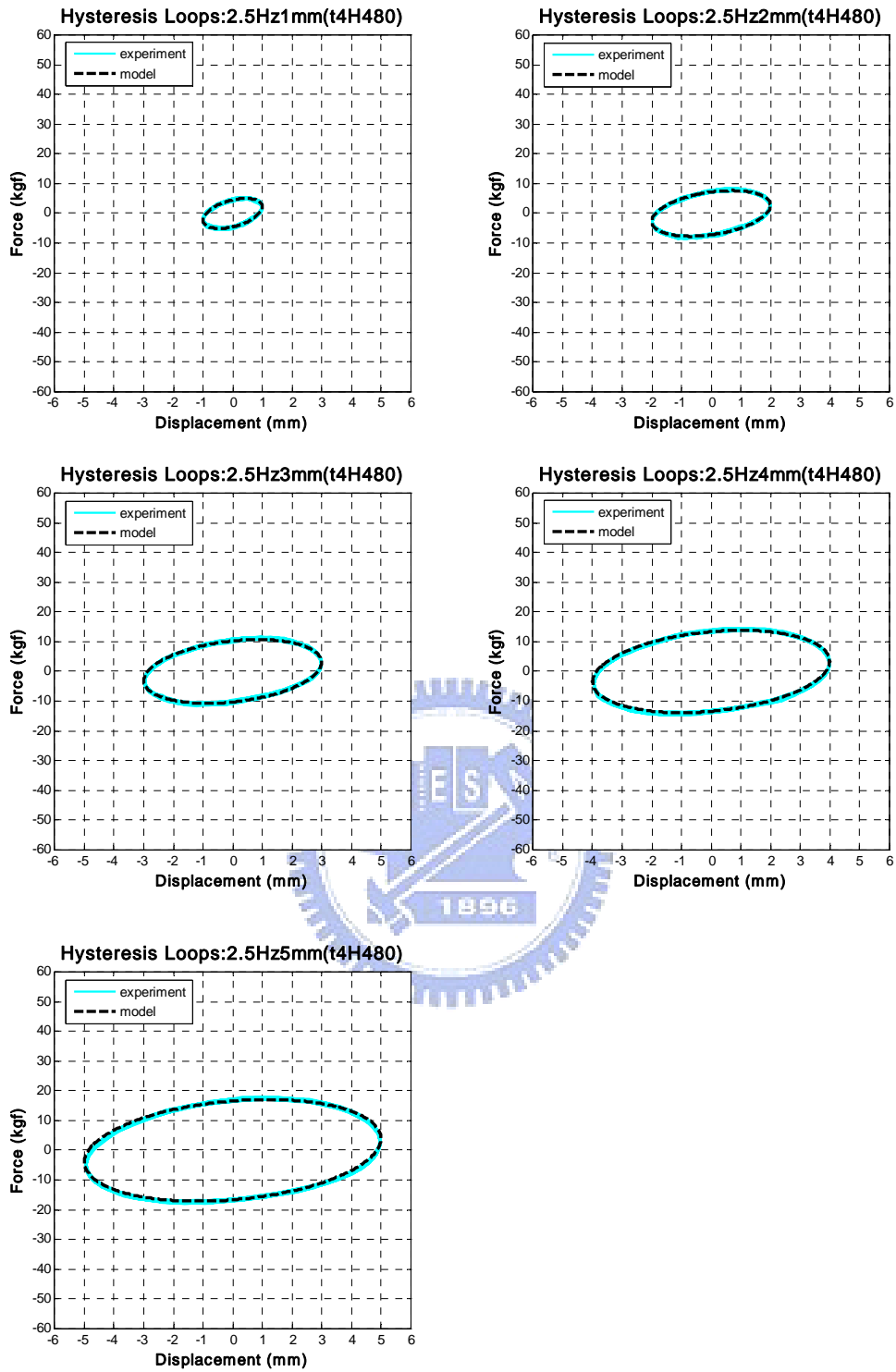


圖 4.3e t4H480 試體擾動頻率 2.5Hz 各振幅之遲滯迴圈

(Thickness : 4mm , Length : 480mm , B.C. : Hinged)

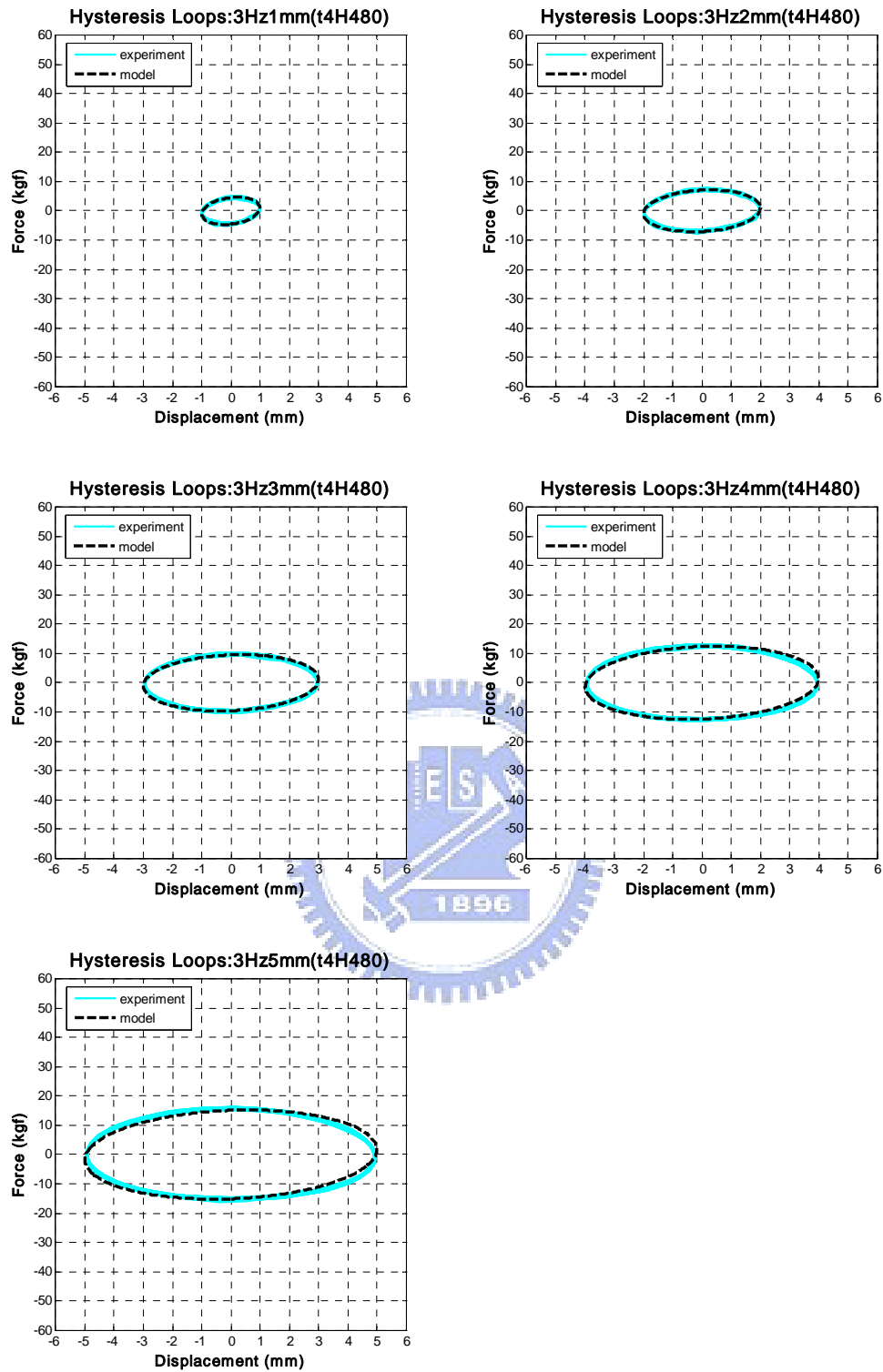


圖 4.3f t4H480 試體擾動頻率 3.0Hz 各振幅之遲滯迴圈

(Thickness : 4mm , Length : 480mm , B.C. : Hinged)

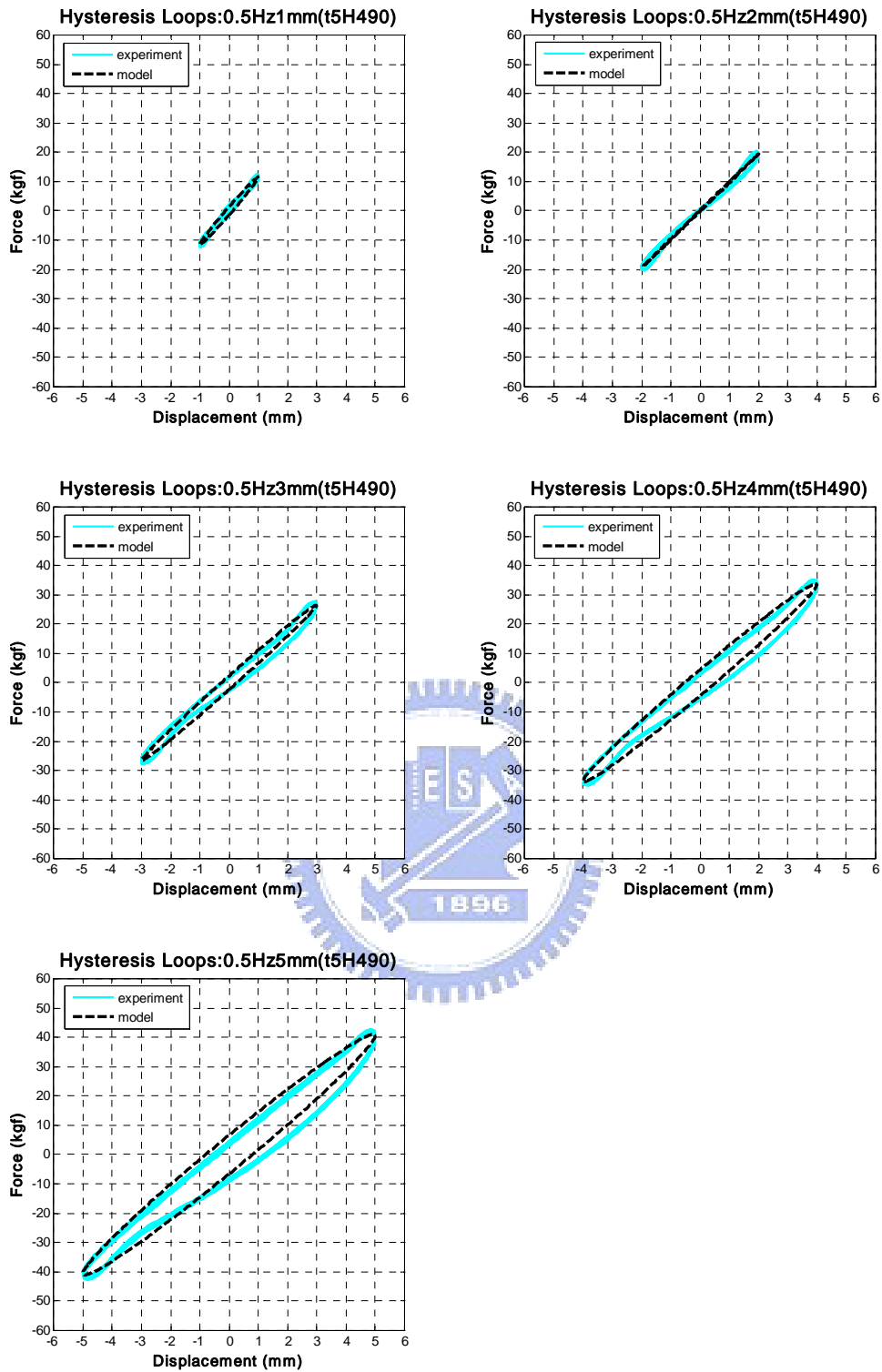


圖 4.4a t5H490 試體擾動頻率 0.5Hz 各振幅之遲滯迴圈

(Thickness : 5mm , Length : 490mm , B.C. : Hinged)

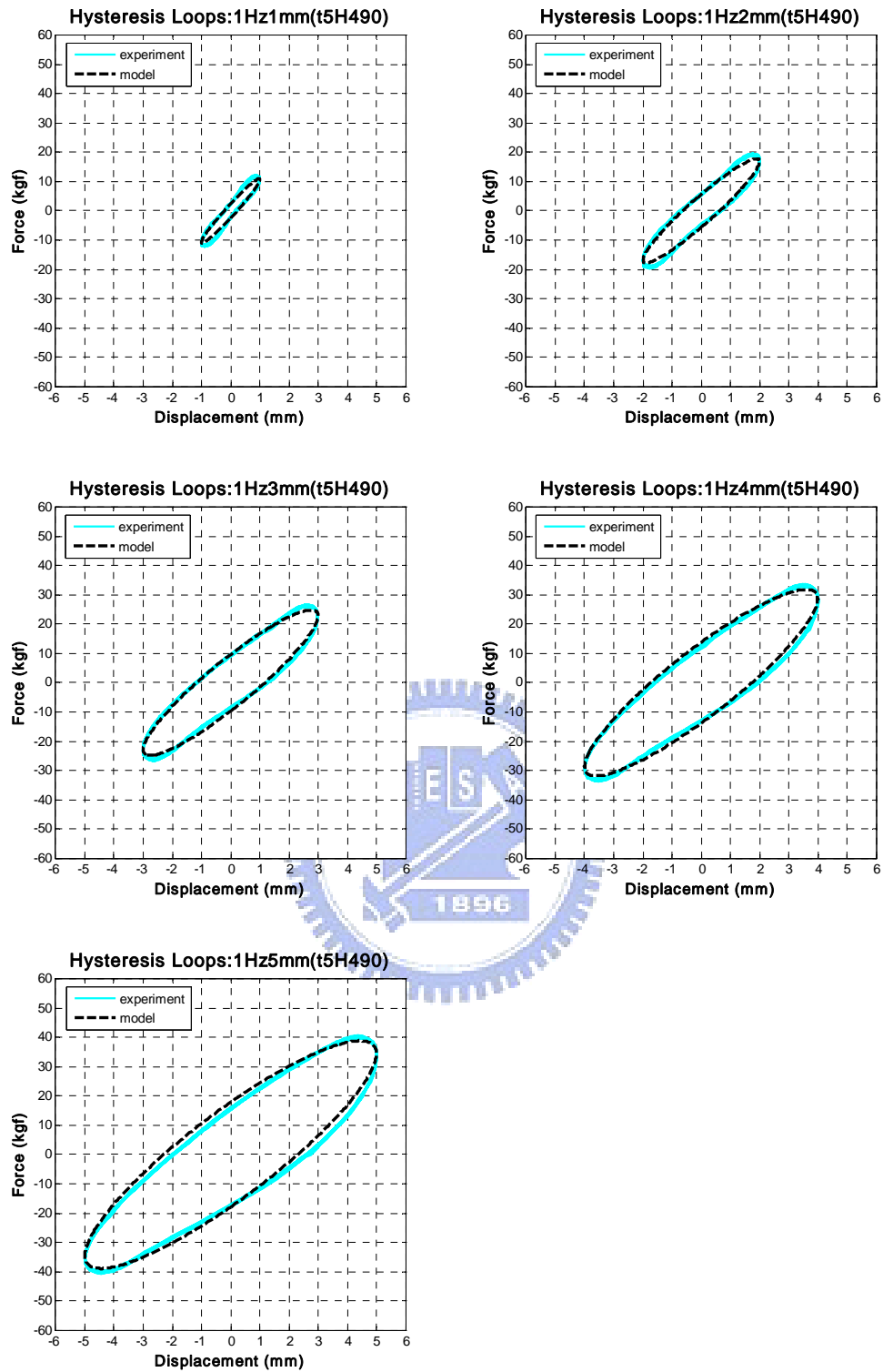


圖 4.4b t5H490 試體擾動頻率 1.0Hz 各振幅之遲滯迴圈

(Thickness : 5mm , Length : 490mm , B.C. : Hinged)

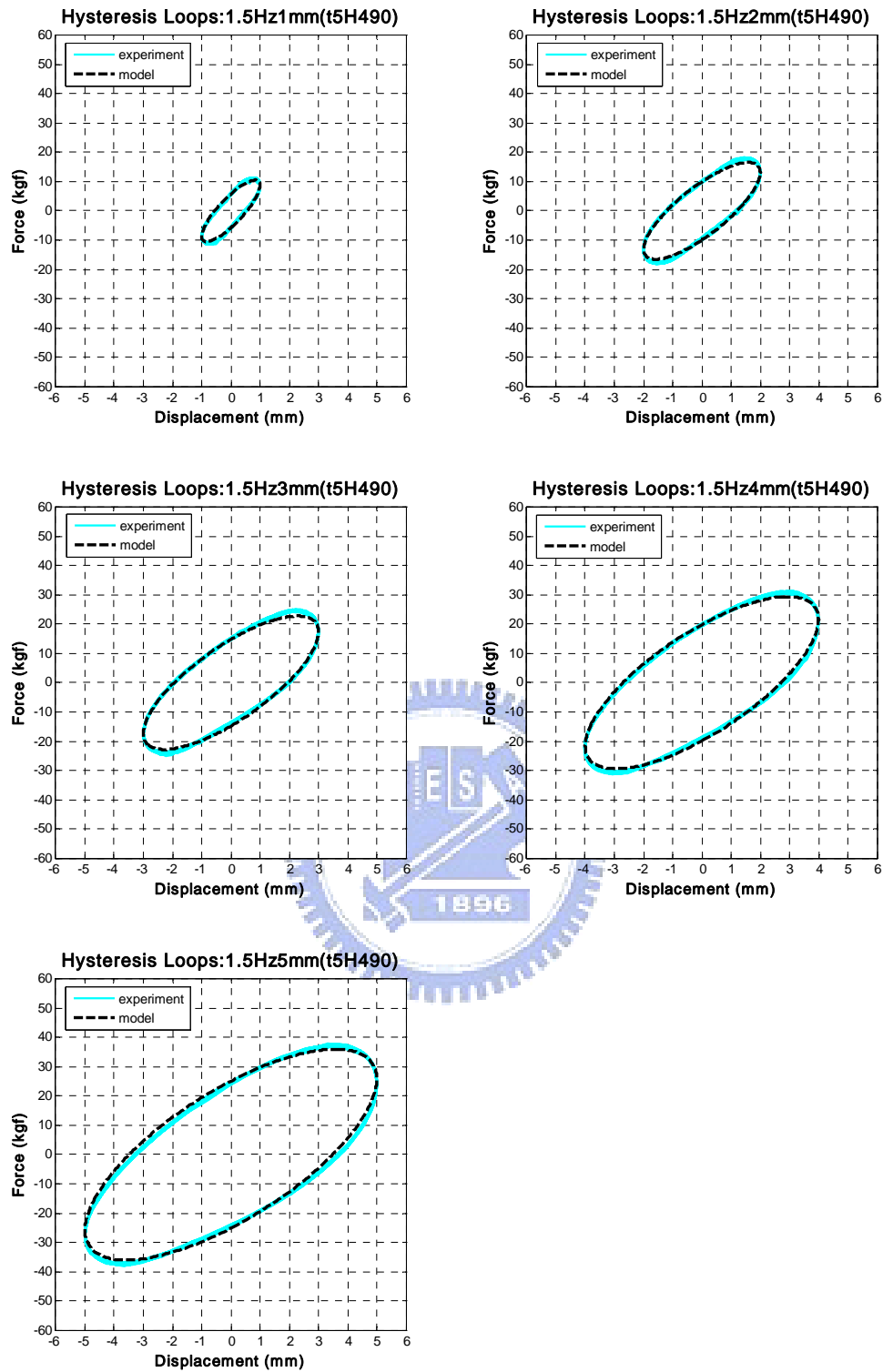


圖 4.4c t5H490 試體擾動頻率 1.5Hz 各振幅之遲滯迴圈

(Thickness : 5mm , Length : 490mm , B.C. : Hinged)

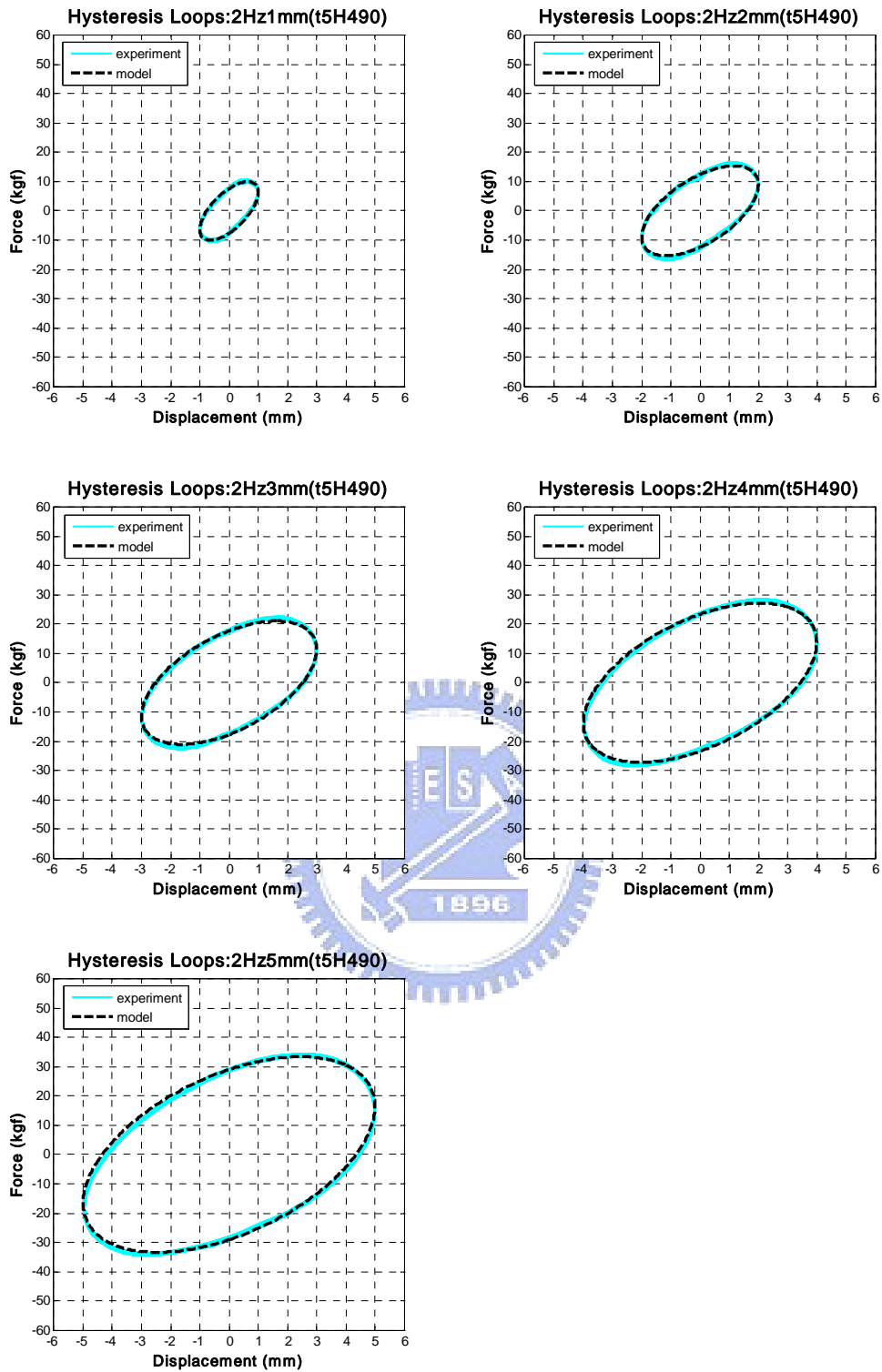


圖 4.4d t5H490 試體擾動頻率 2.0Hz 各振幅之遲滯迴圈

(Thickness : 5mm , Length : 490mm , B.C. : Hinged)

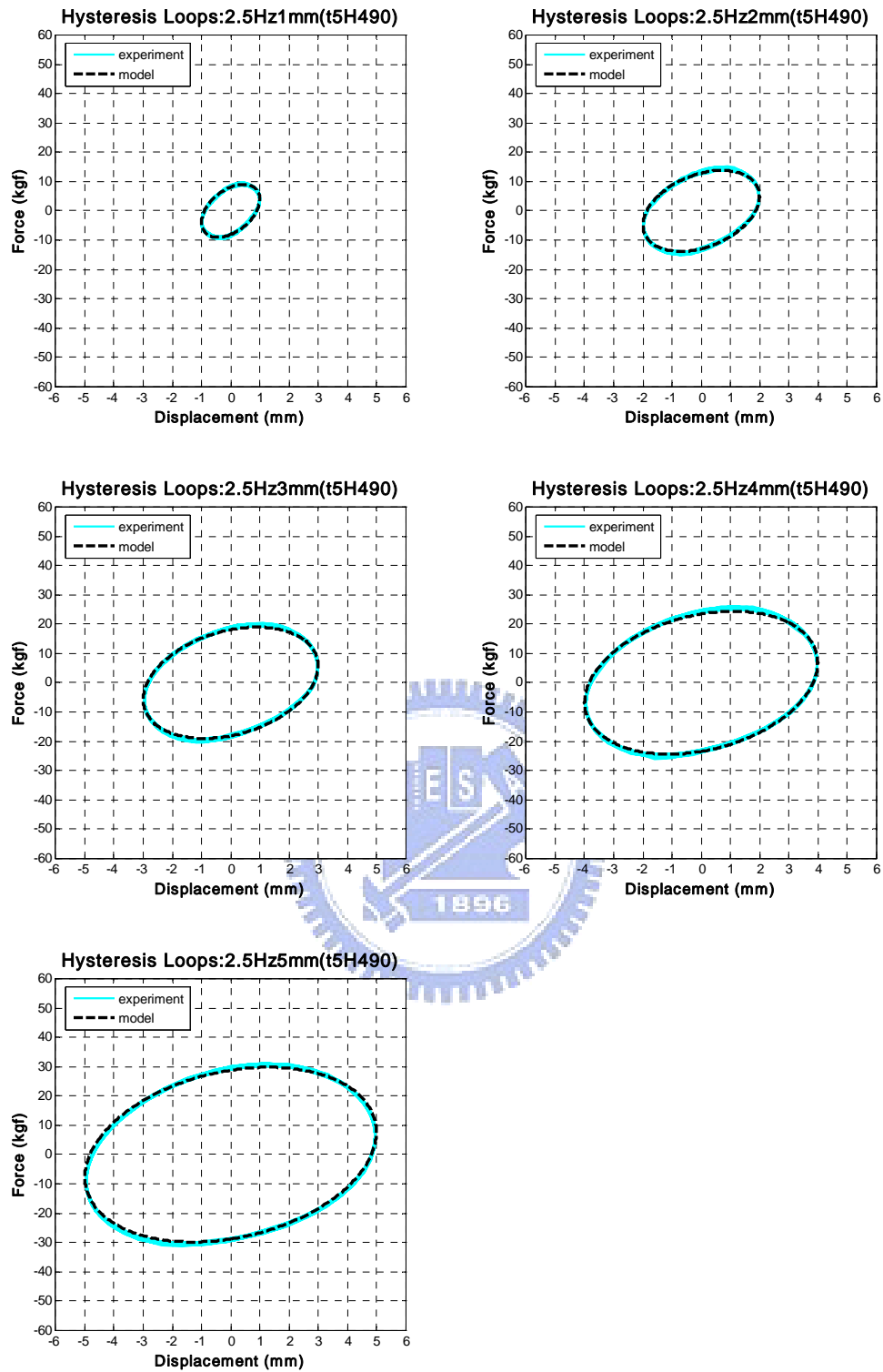


圖 4.4e t5H490 試體擾動頻率 2.5Hz 各振幅之遲滯迴圈

(Thickness : 5mm , Length : 490mm , B.C. : Hinged)

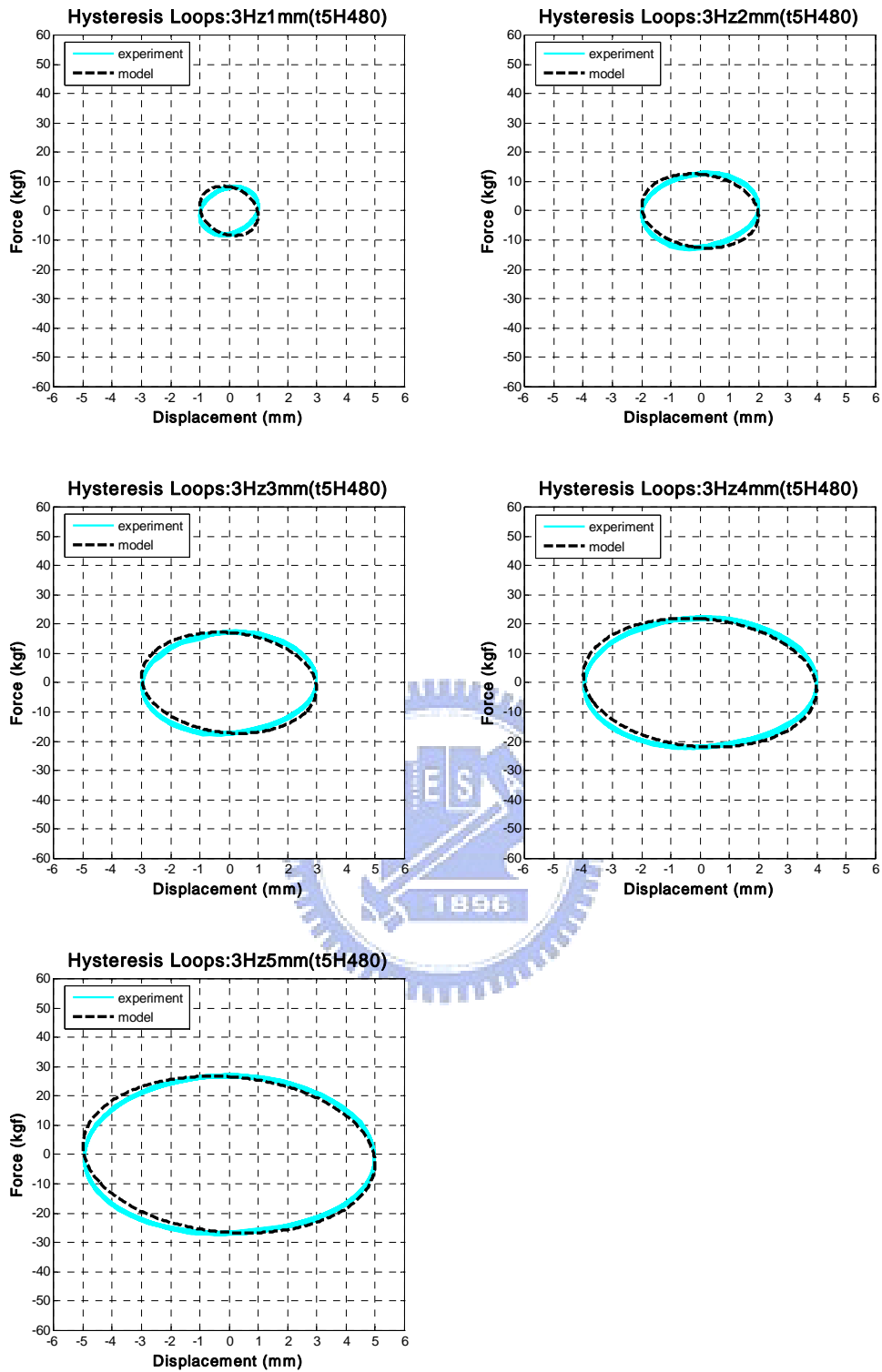


圖 4.4f t5H490 試體擾動頻率 3.0Hz 各振幅之遲滯迴圈

(Thickness : 5mm , Length : 490mm , B.C. : Hinged)

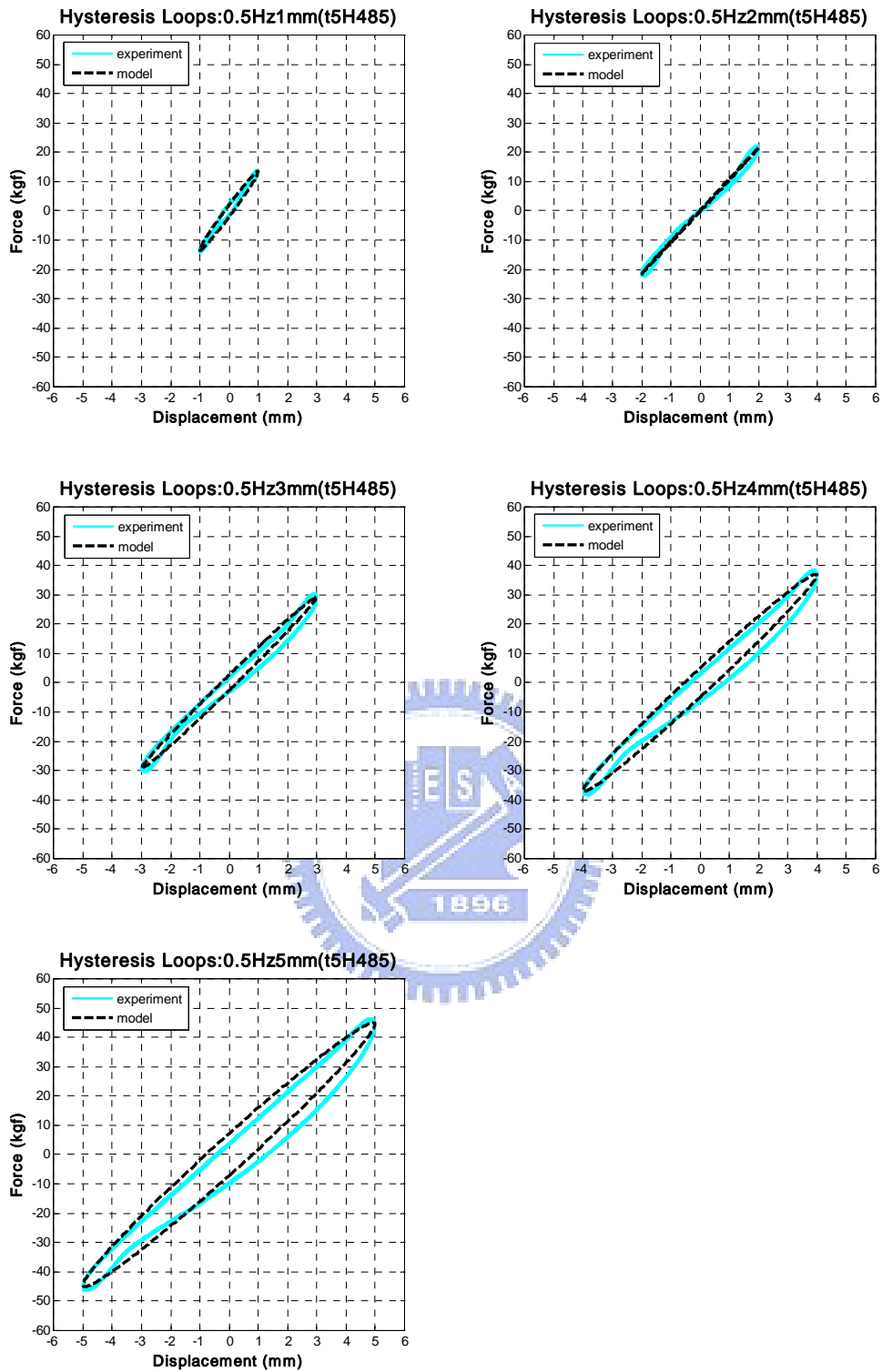


圖 4.5a t5H485 試體擾動頻率 0.5Hz 各振幅之遲滯迴圈

(Thickness : 5mm , Length : 485mm , B.C. : Hinged)

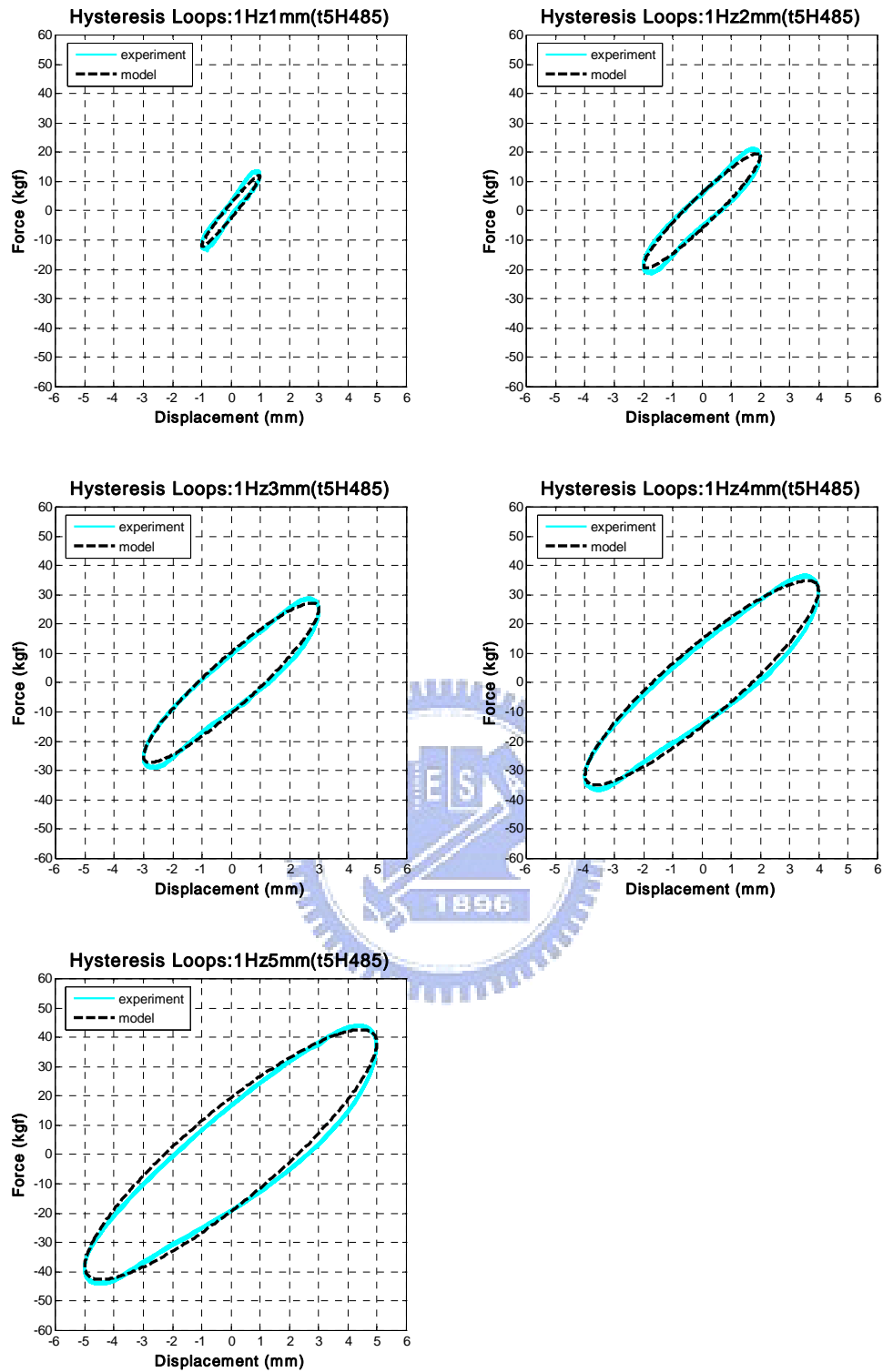


圖 4.5b t5H485 試體擾動頻率 1.0Hz 各振幅之遲滯迴圈

(Thickness : 5mm , Length : 485mm , B.C. : Hinged)

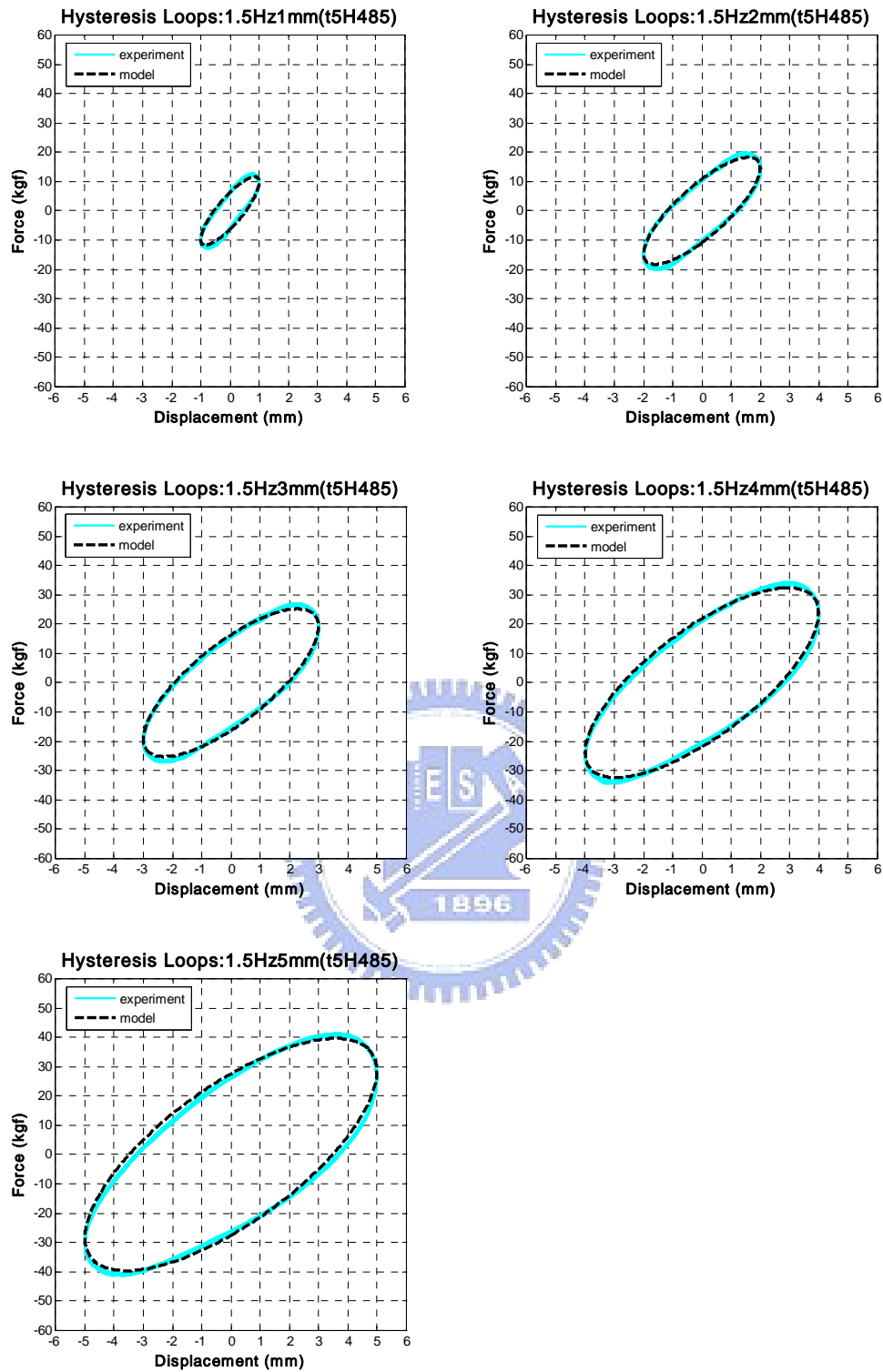


圖 4.5c t5H485 試體擾動頻率 1.5Hz 各振幅之遲滯迴圈

(Thickness : 5mm , Length : 485mm , B.C. : Hinged)

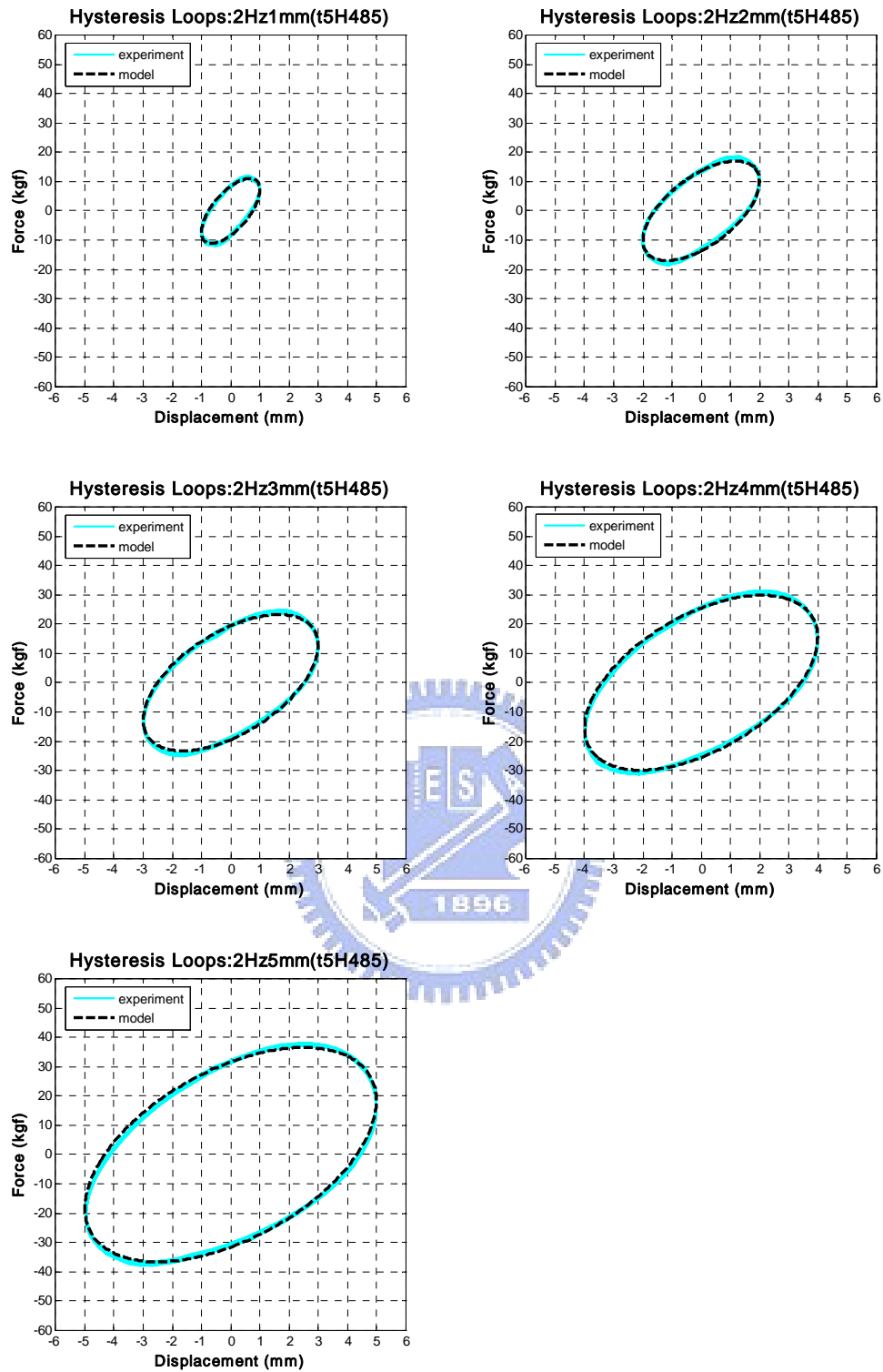


圖 4.5d t5H485 試體擾動頻率 2.0Hz 各振幅之遲滯迴圈

(Thickness : 5mm , Length : 485mm , B.C. : Hinged)

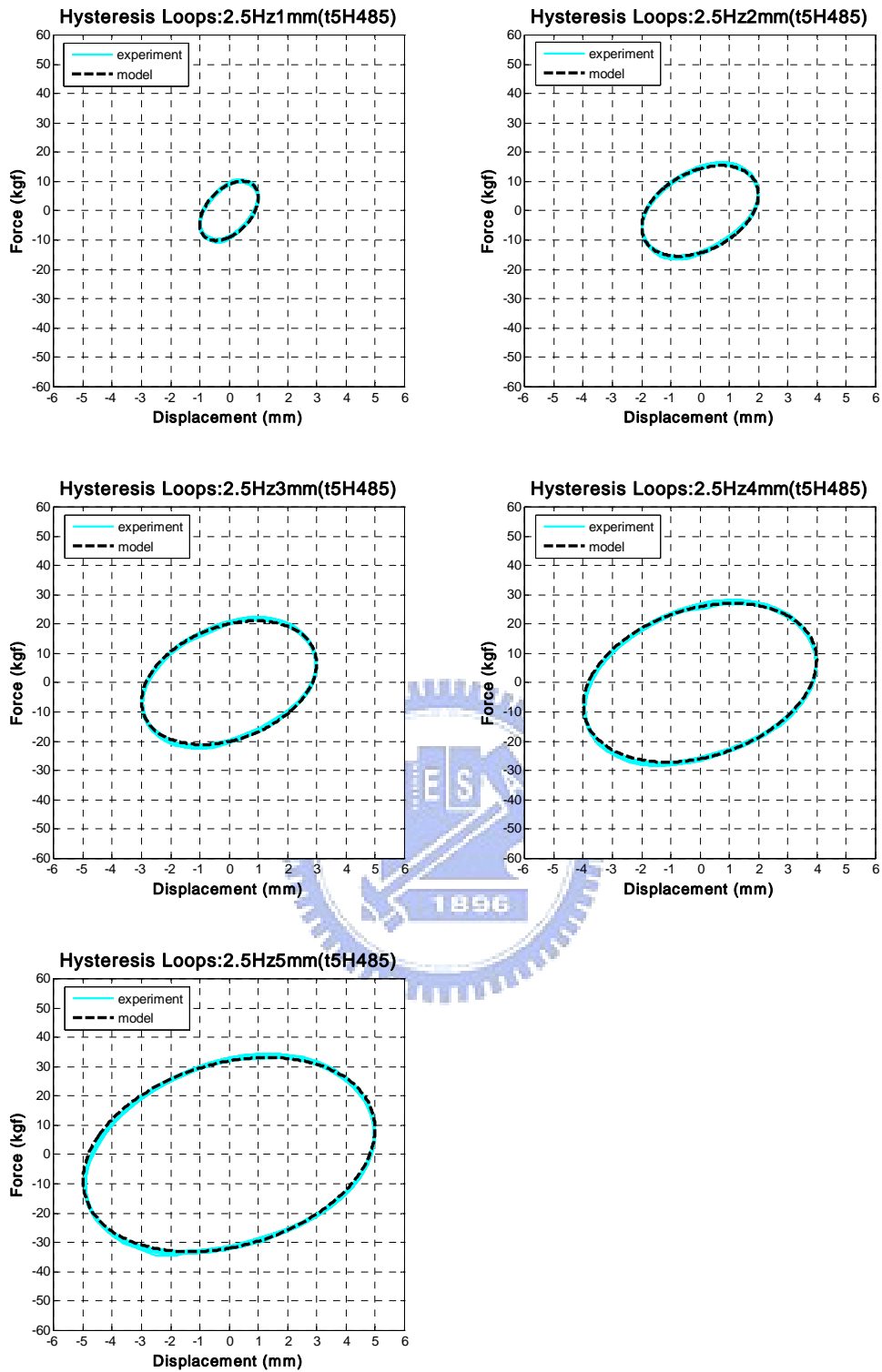


圖 4.5e t5H485 試體擾動頻率 2.5Hz 各振幅之遲滯迴圈

(Thickness : 5mm , Length : 485mm , B.C. : Hinged)

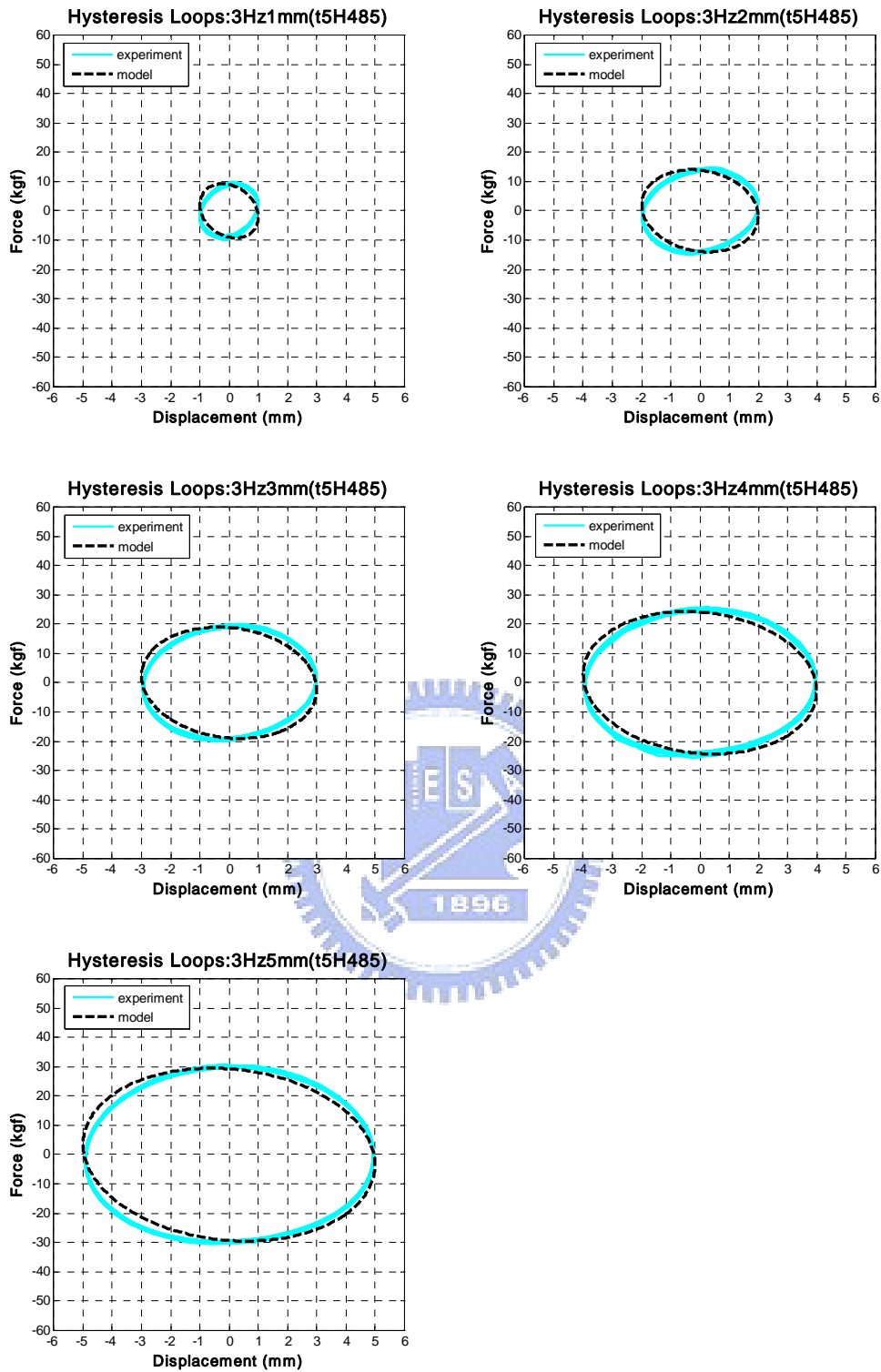


圖 4.5f t5H485 試體擾動頻率 3.0Hz 各振幅之遲滯迴圈

(Thickness : 5mm , Length : 485mm , B.C. : Hinged)

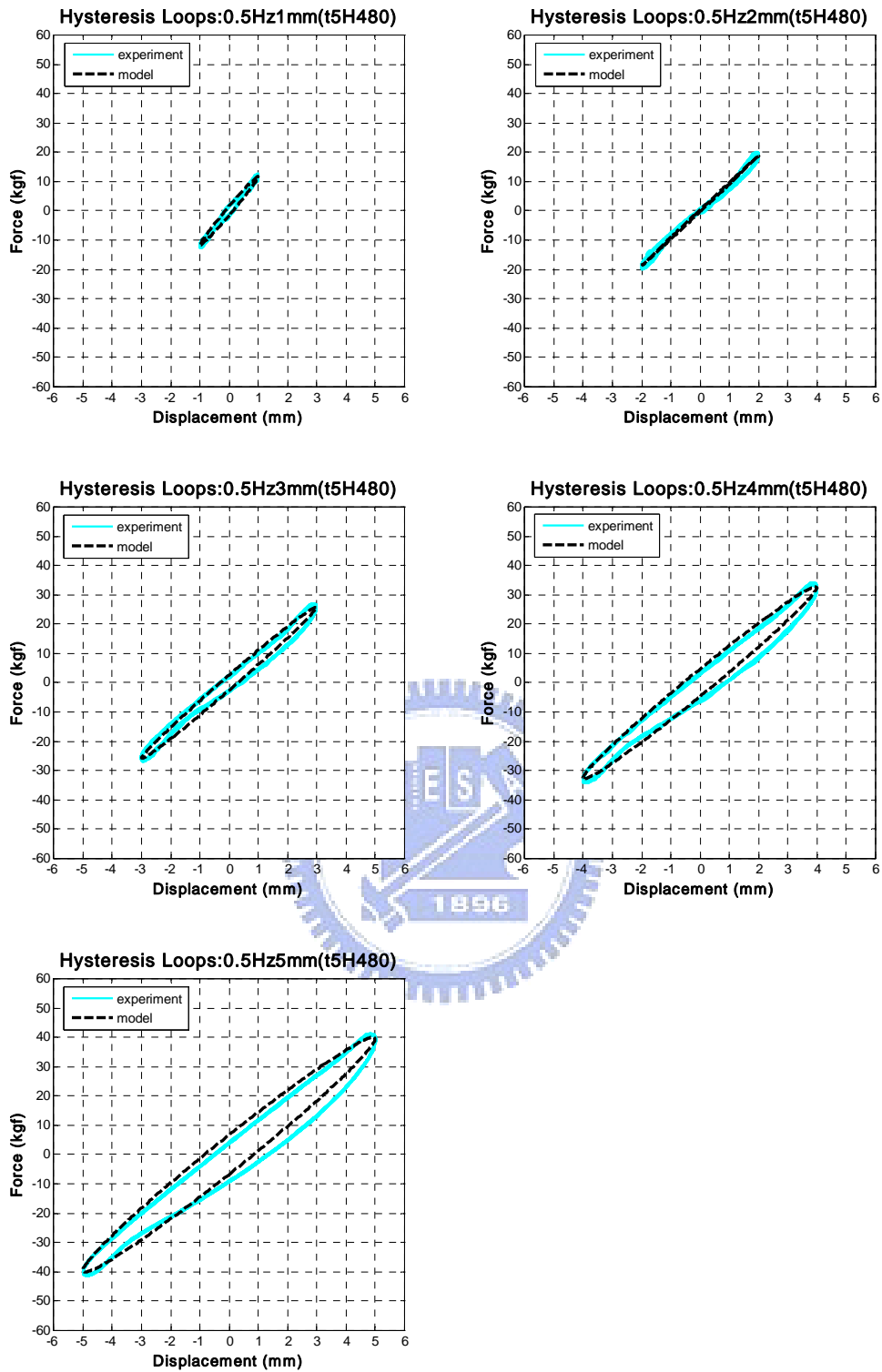


圖 4.6a t5H480 試體擾動頻率 0.5Hz 各振幅之遲滯迴圈

(Thickness : 5mm , Length : 480mm , B.C. : Hinged)

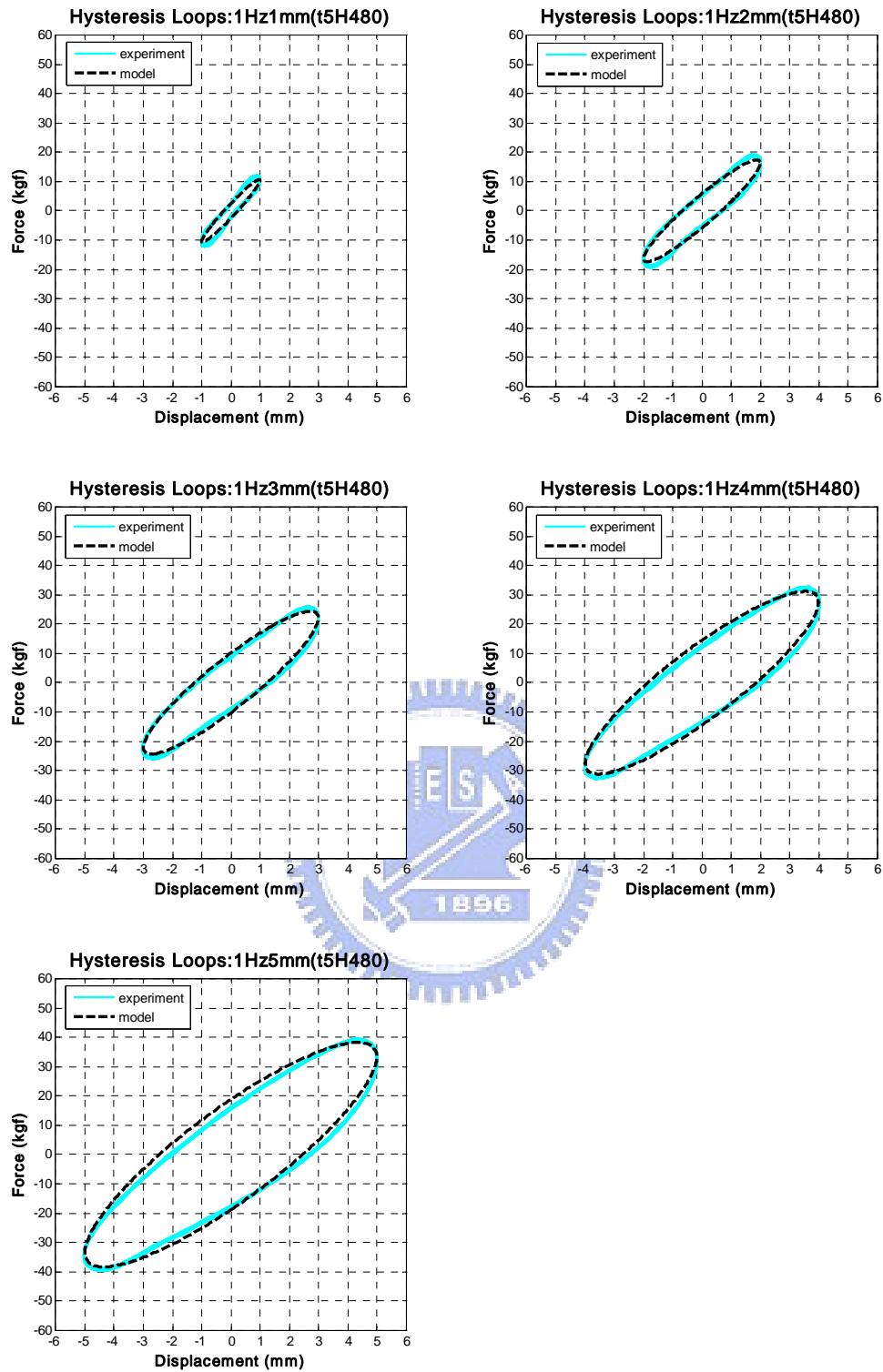


圖 4.6b t5H480 試體擾動頻率 1.0Hz 各振幅之遲滯迴圈

(Thickness : 5mm , Length : 480mm , B.C. : Hinged)

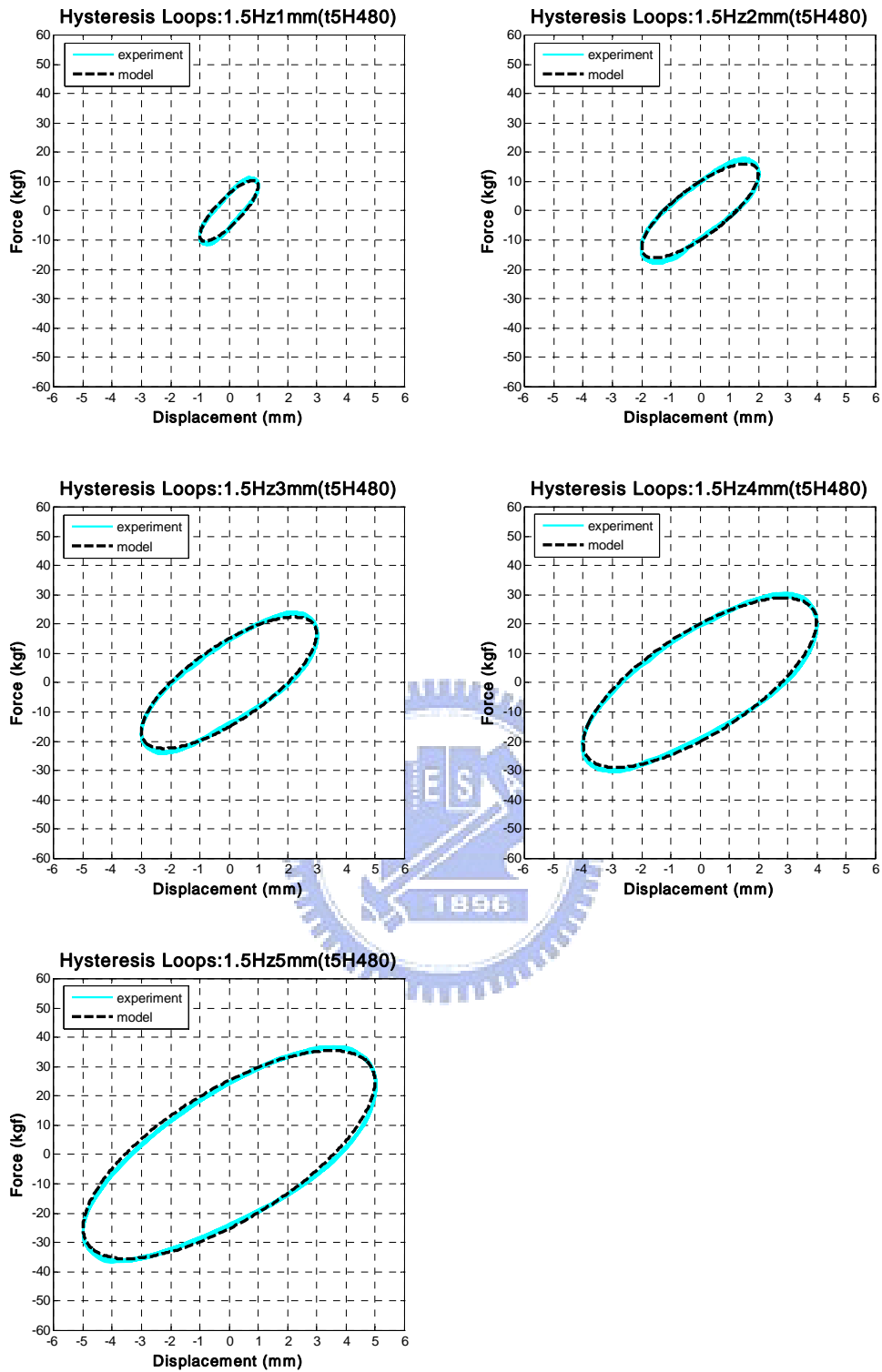


圖 4.6c t5H480 試體擾動頻率 1.5Hz 各振幅之遲滯迴圈

(Thickness : 5mm , Length : 480mm , B.C. : Hinged)

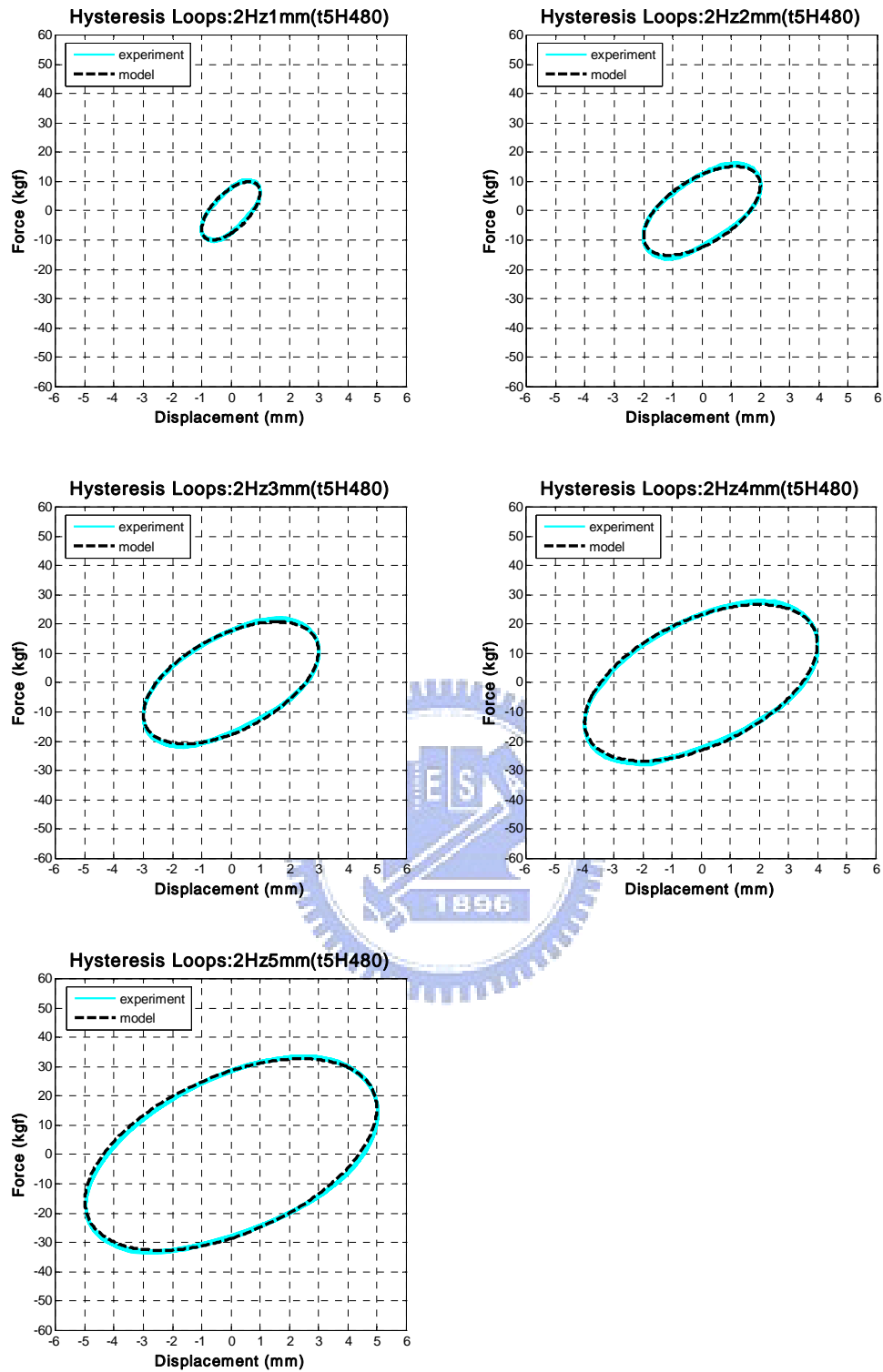


圖 4.6d t5H480 試體擾動頻率 2.0Hz 各振幅之遲滯迴圈

(Thickness : 5mm , Length : 480mm , B.C. : Hinged)

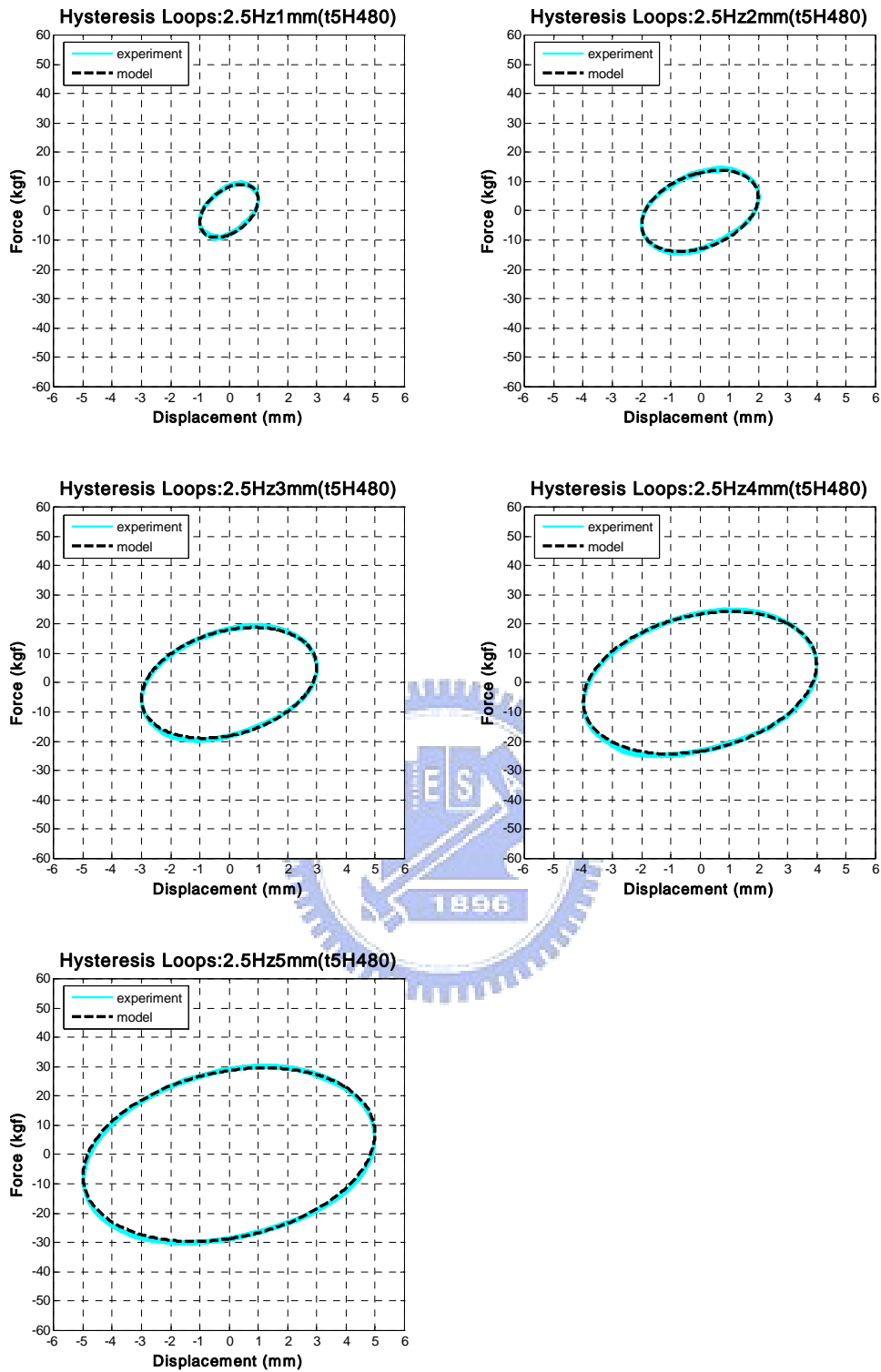


圖 4.6e t5H480 試體擾動頻率 2.5Hz 各振幅之遲滯迴圈

(Thickness : 5mm , Length : 480mm , B.C. : Hinged)

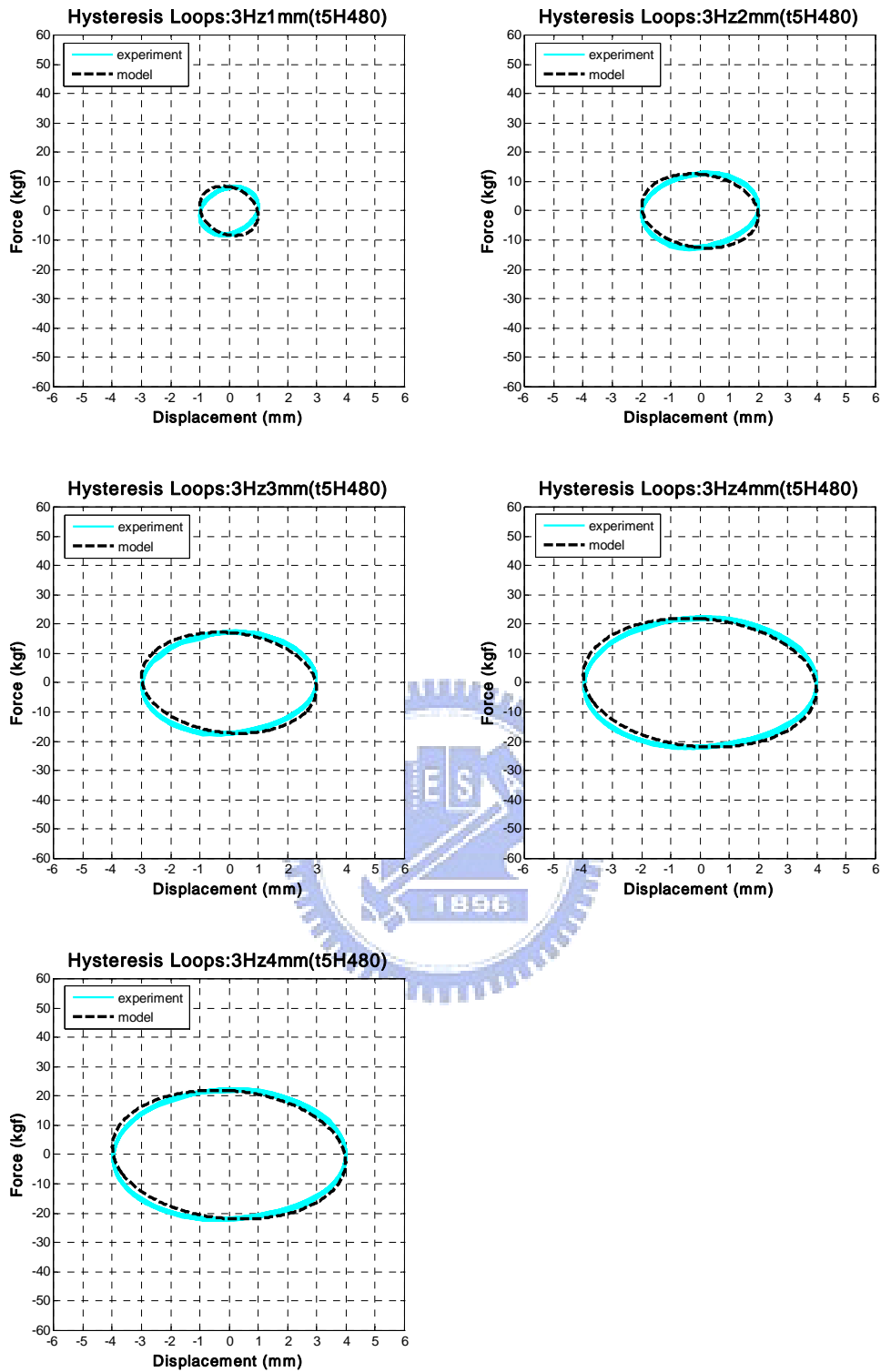


圖 4.6f t5H480 試體擾動頻率 3.0Hz 各振幅之遲滯迴圈

(Thickness : 5mm , Length : 480mm , B.C. : Hinged)

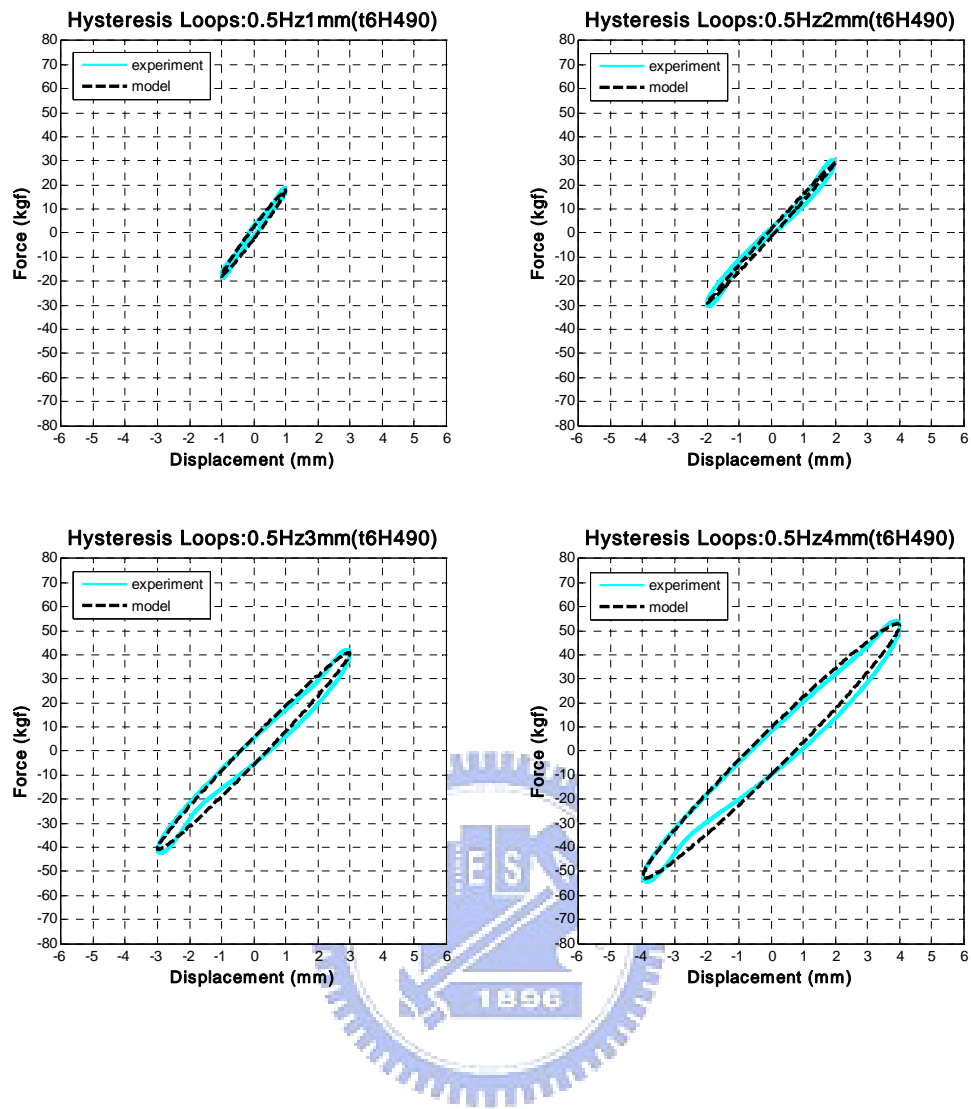


圖 4.7a t6H490 試體擾動頻率 0.5Hz 各振幅之遲滯迴圈

(Thickness : 6mm , Length : 490mm , B.C. : Hinged)

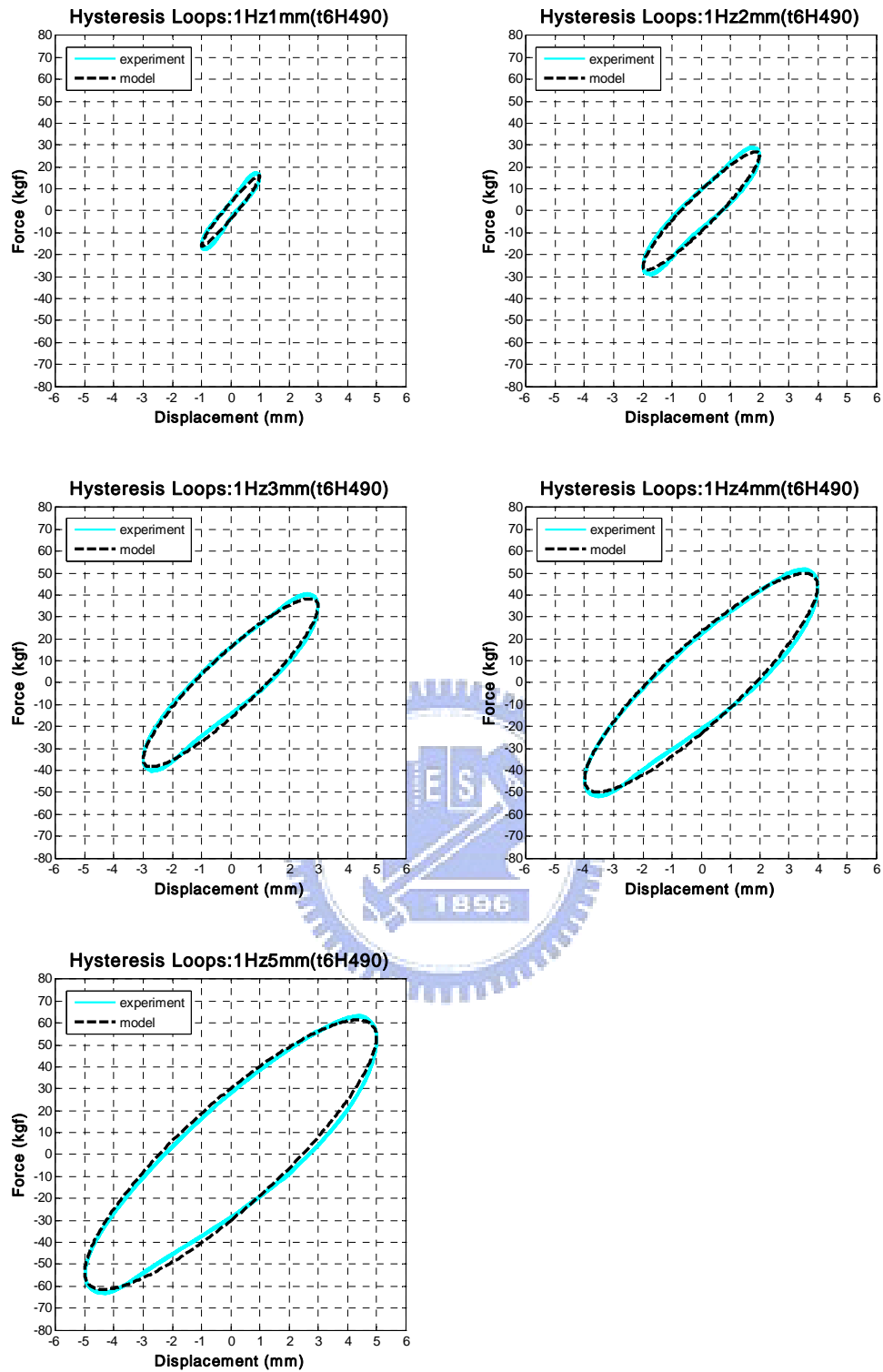


圖 4.7b t6H490 試體擾動頻率 1.0Hz 各振幅之遲滯迴圈

(Thickness : 6mm , Length : 490mm , B.C. : Hinged)

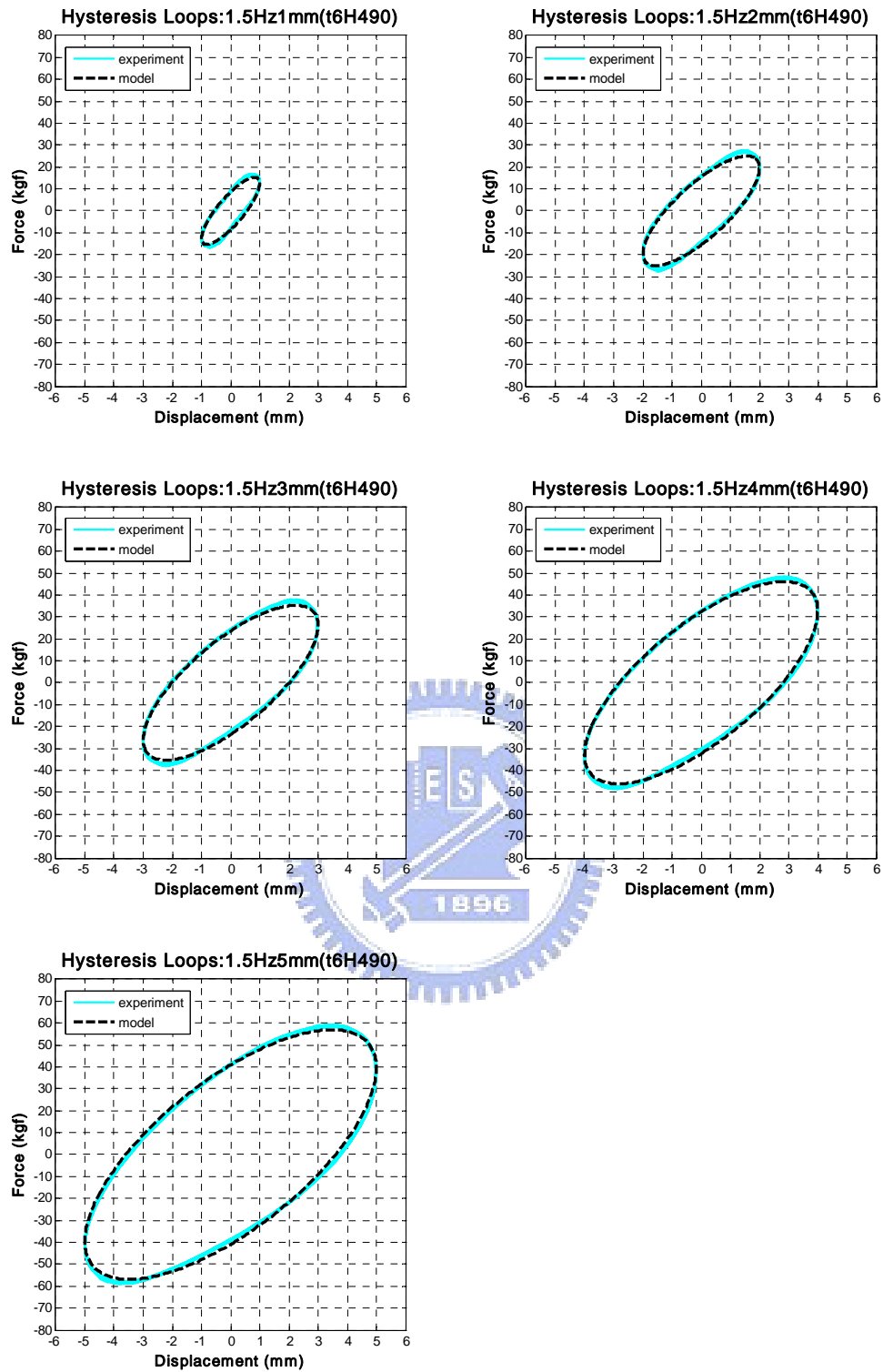


圖 4.7c t6H490 試體擾動頻率 1.5Hz 各振幅之遲滯迴圈

(Thickness : 6mm , Length : 490mm , B.C. : Hinged)

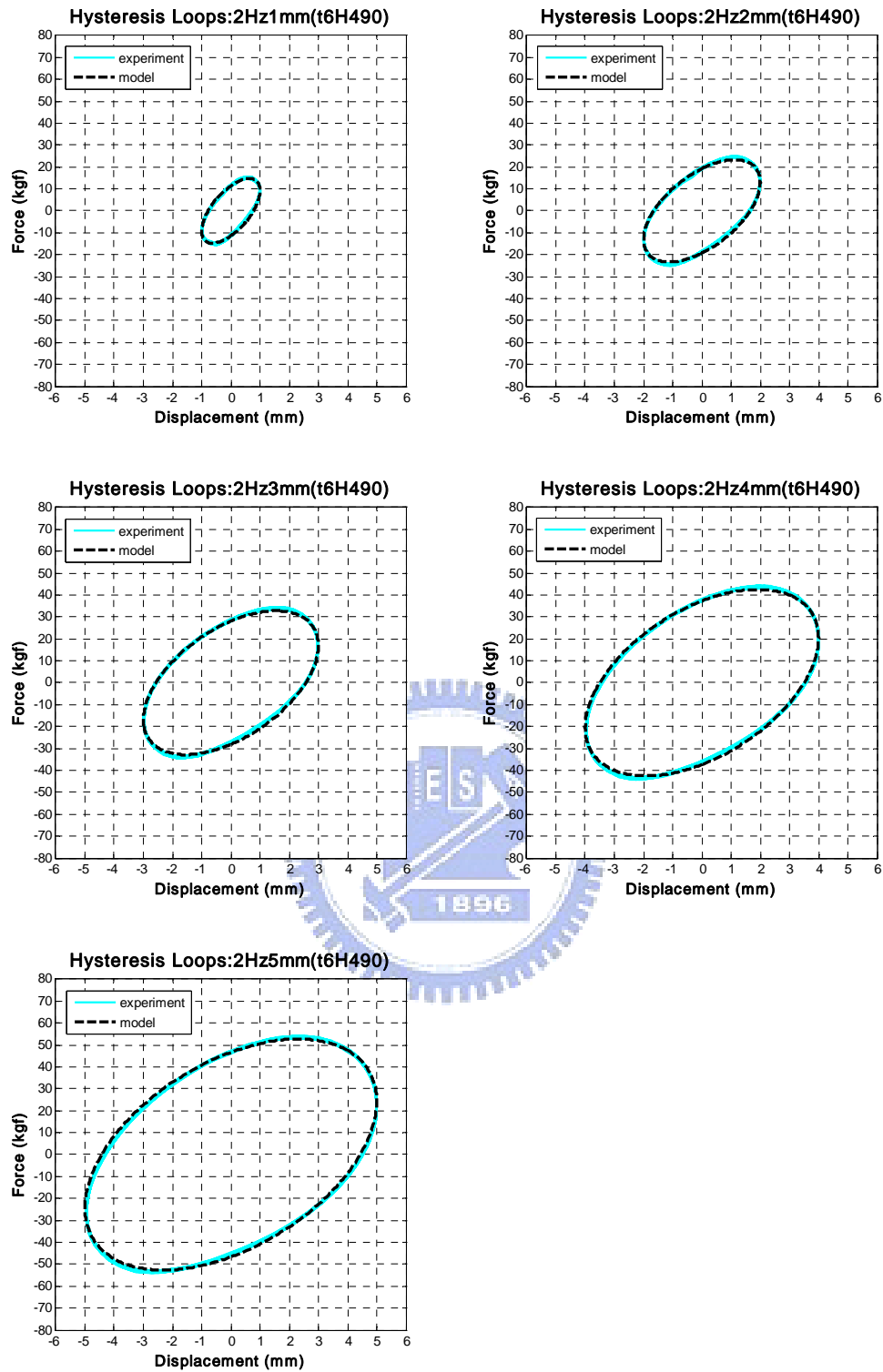


圖 4.7d t6H490 試體擾動頻率 2.0Hz 各振幅之遲滯迴圈

(Thickness : 6mm , Length : 490mm , B.C. : Hinged)

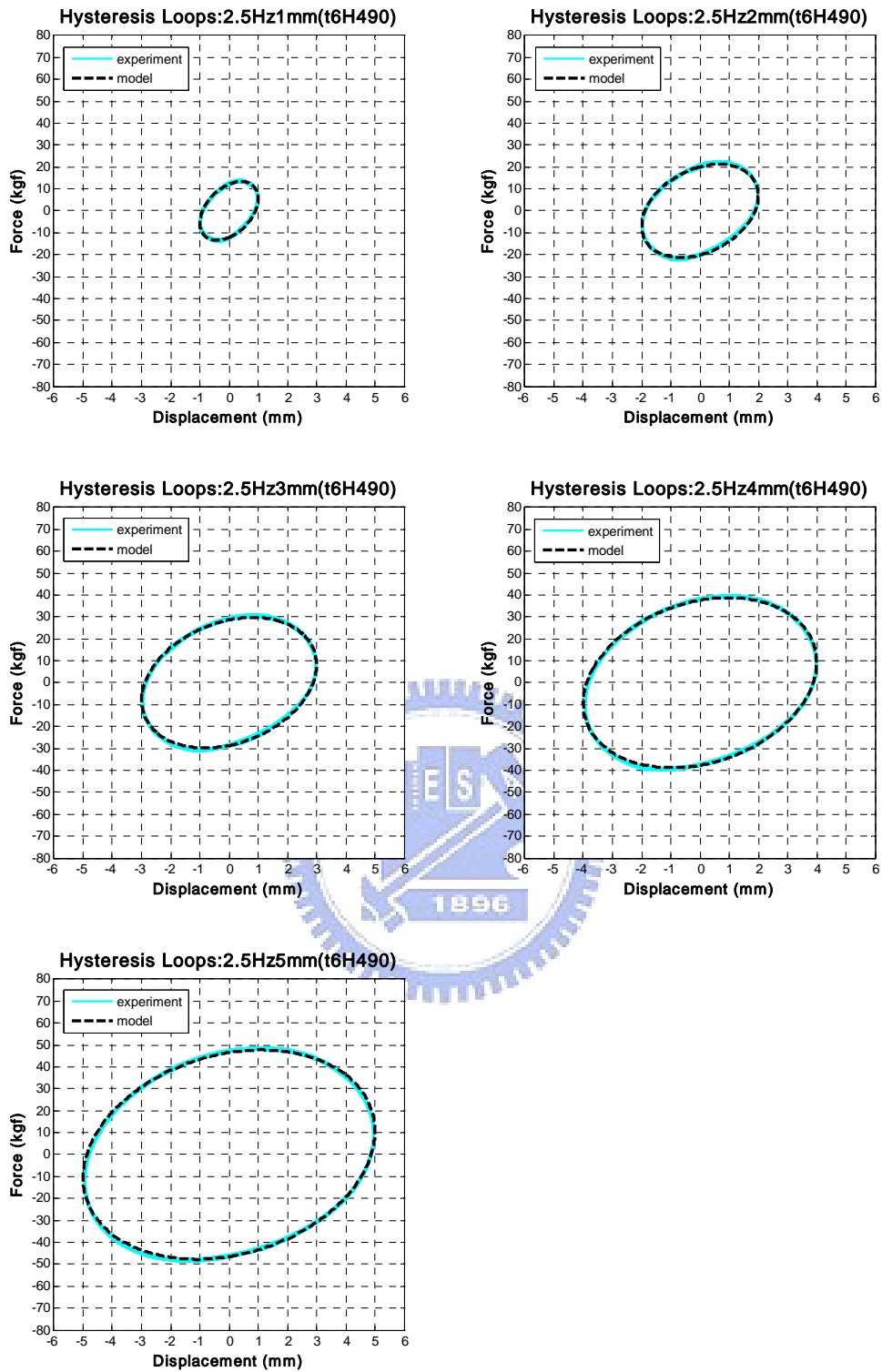


圖 4.7e t6H490 試體擾動頻率 2.5Hz 各振幅之遲滯迴圈

(Thickness : 6mm , Length : 490mm , B.C. : Hinged)

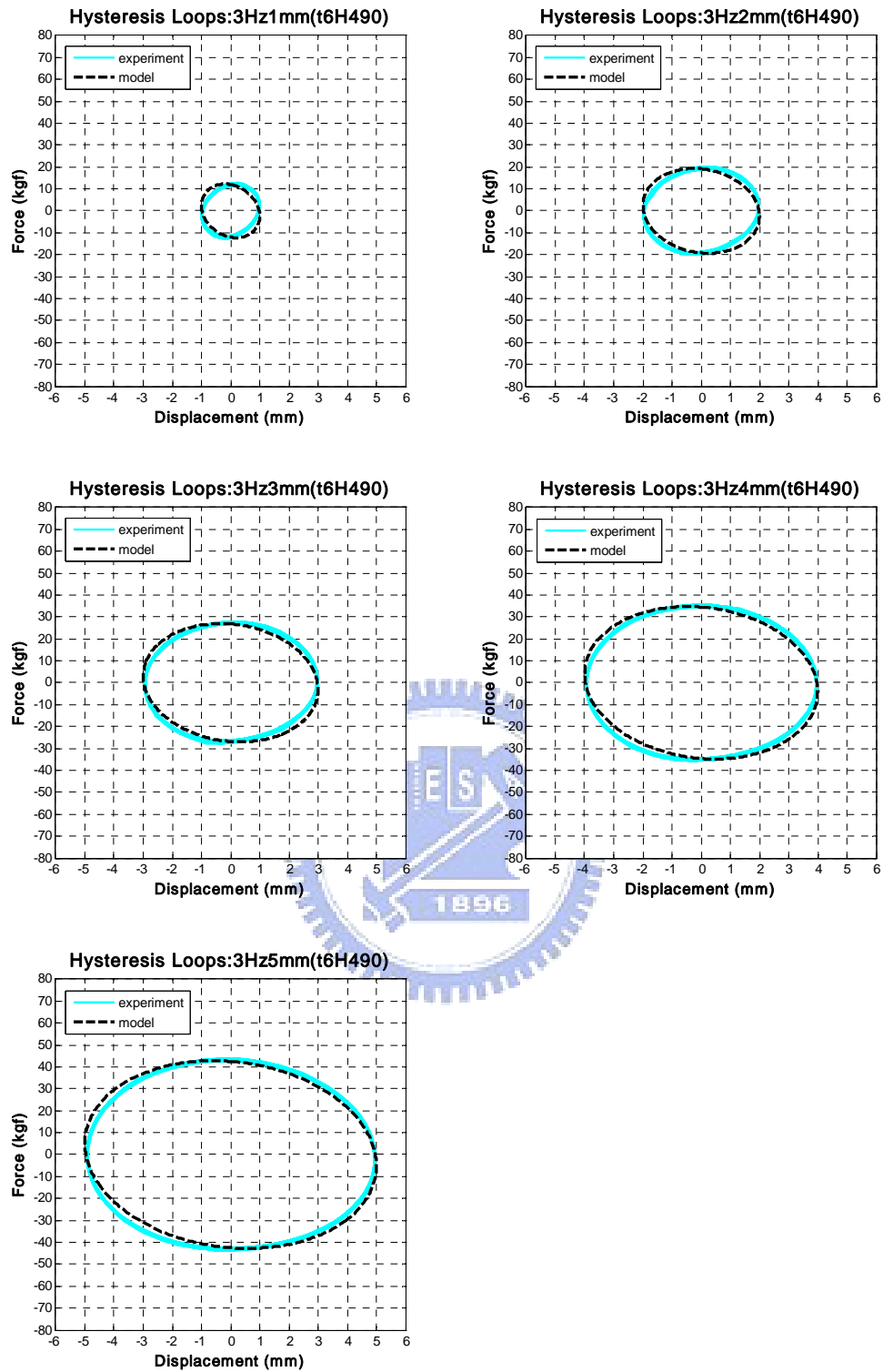


圖 4.7f t6H490 試體擾動頻率 3.0Hz 各振幅之遲滯迴圈

(Thickness : 6mm , Length : 490mm , B.C. : Hinged)

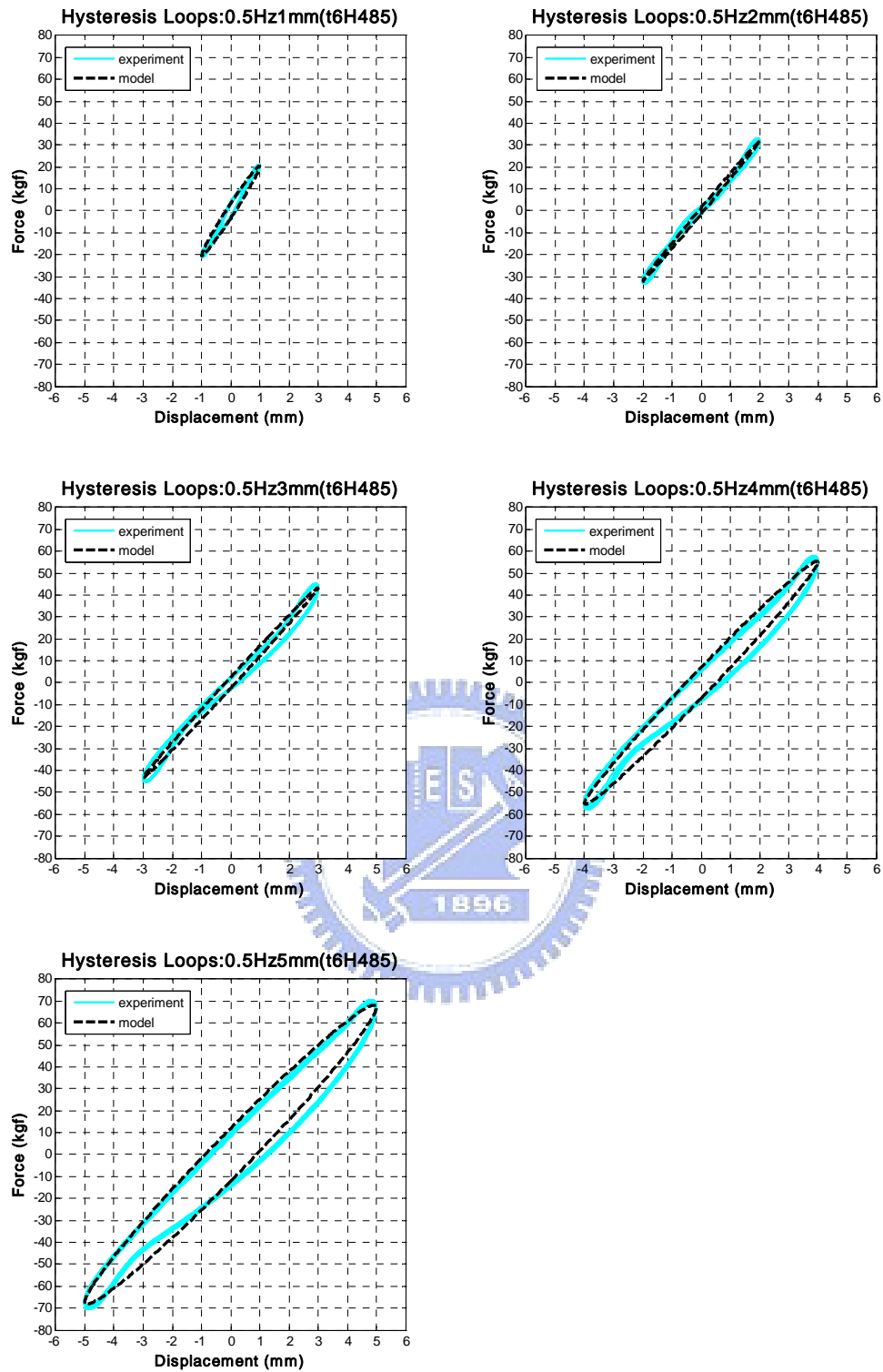


圖 4.8a t6H485 試體擾動頻率 0.5Hz 各振幅之遲滯迴圈

(Thickness : 6mm , Length : 485mm , B.C. : Hinged)

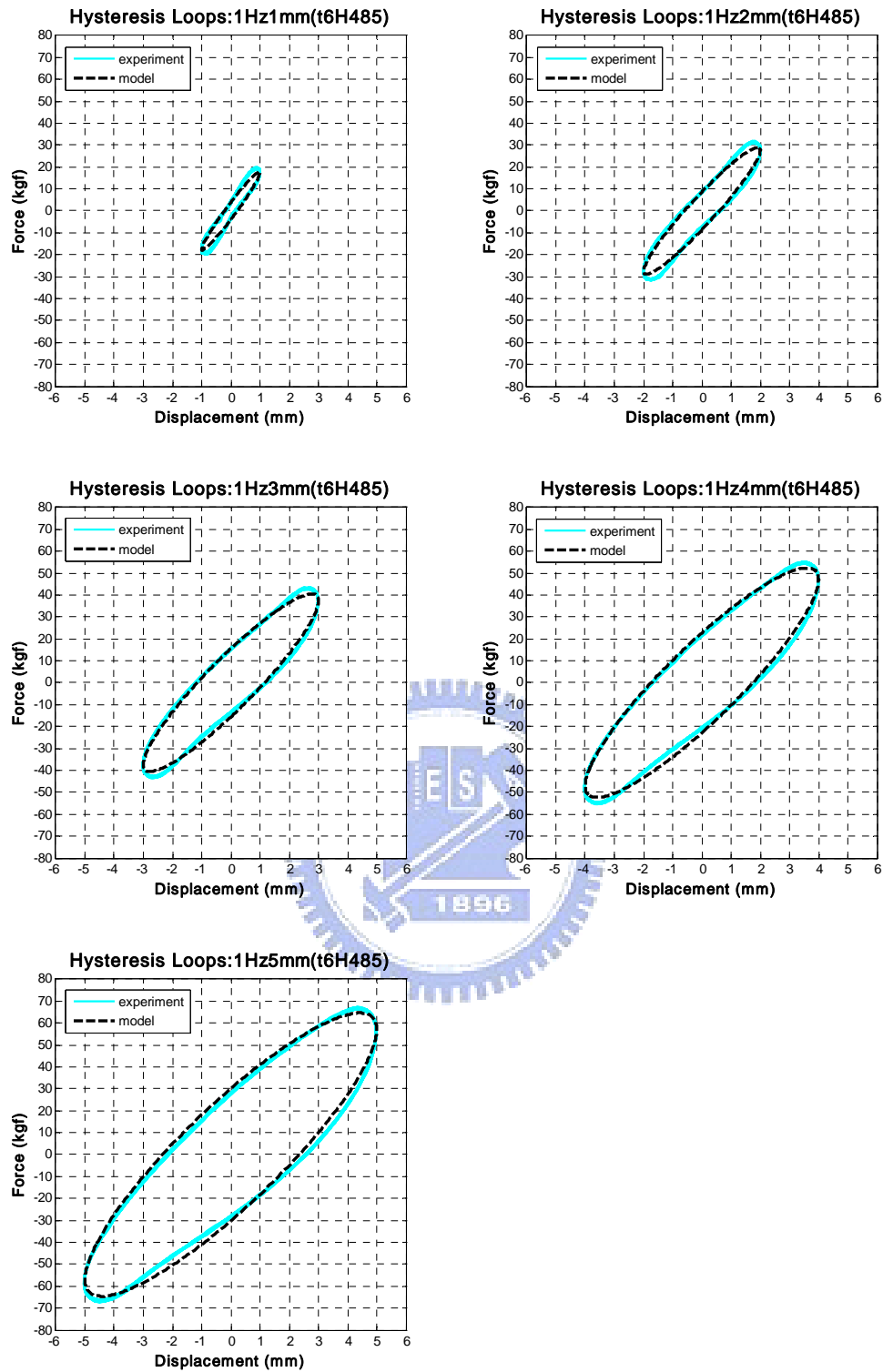


圖 4.8b t6H485 試體擾動頻率 1.0Hz 各振幅之遲滯迴圈

(Thickness : 6mm , Length : 485mm , B.C. : Hinged)

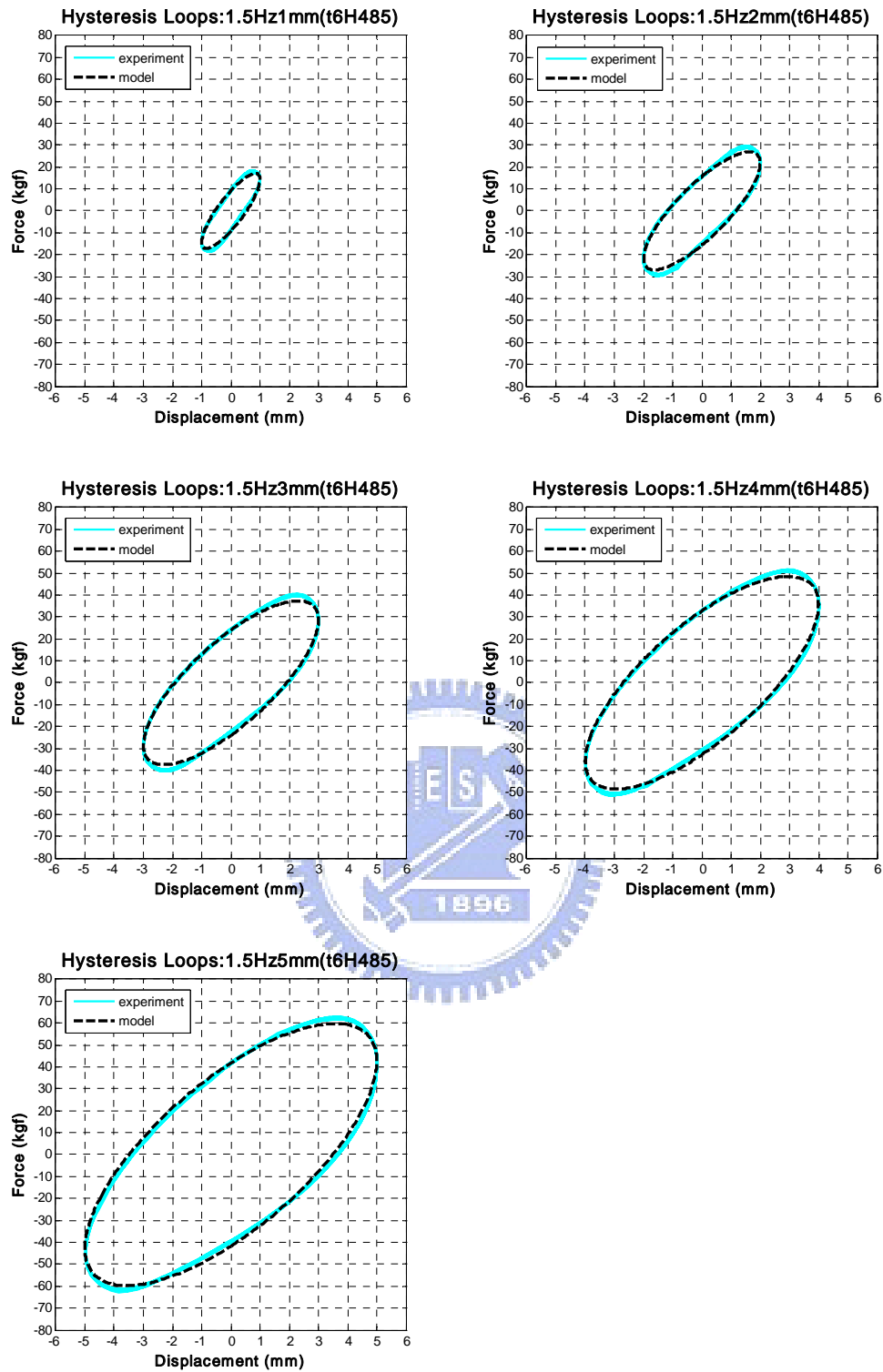


圖 4.8c t6H485 試體擾動頻率 1.5Hz 各振幅之遲滯迴圈

(Thickness : 6mm , Length : 485mm , B.C. : Hinged)

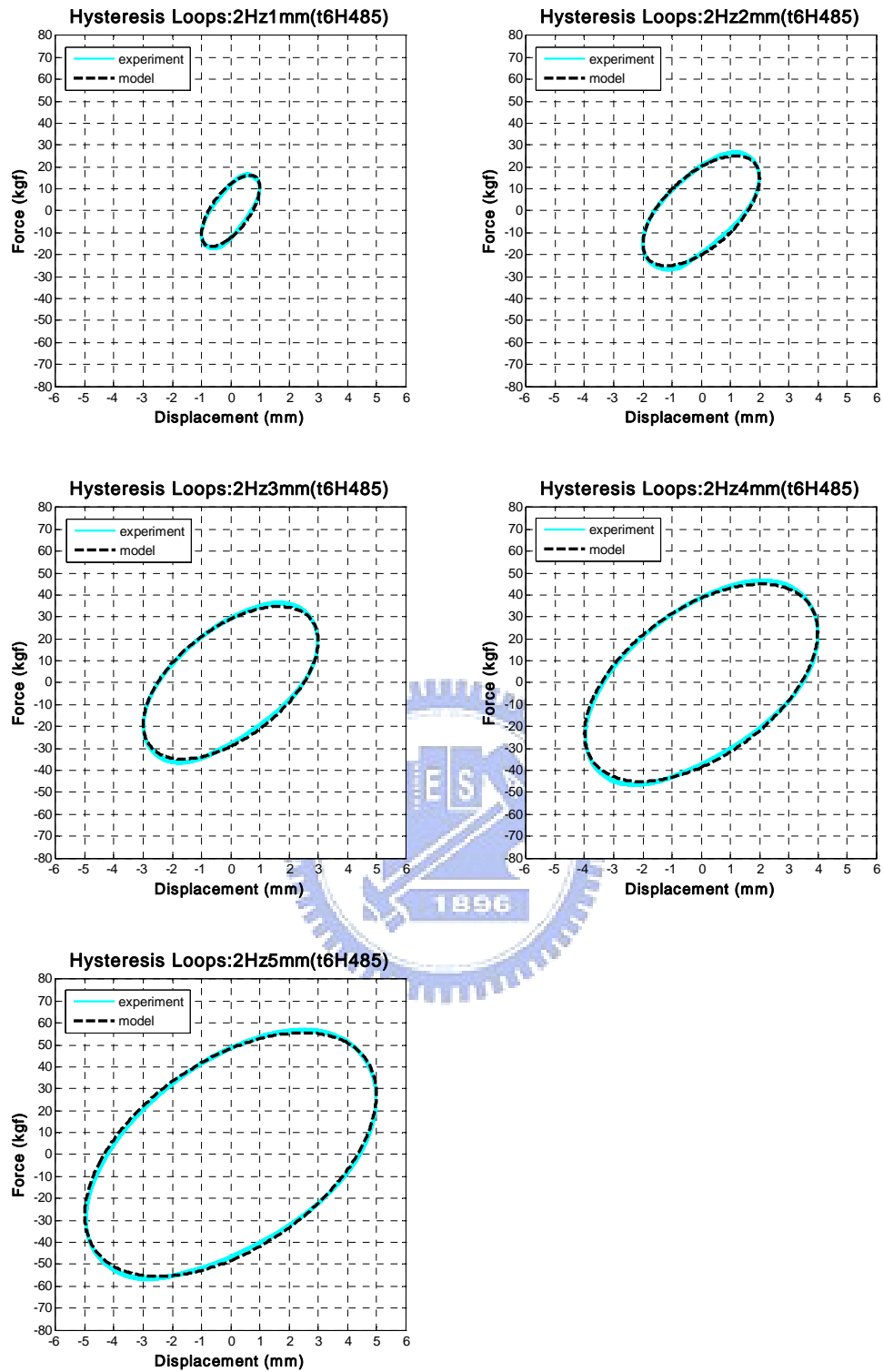


圖 4.8d t6H485 試體擾動頻率 2.0Hz 各振幅之遲滯迴圈

(Thickness : 6mm , Length : 485mm , B.C. : Hinged)

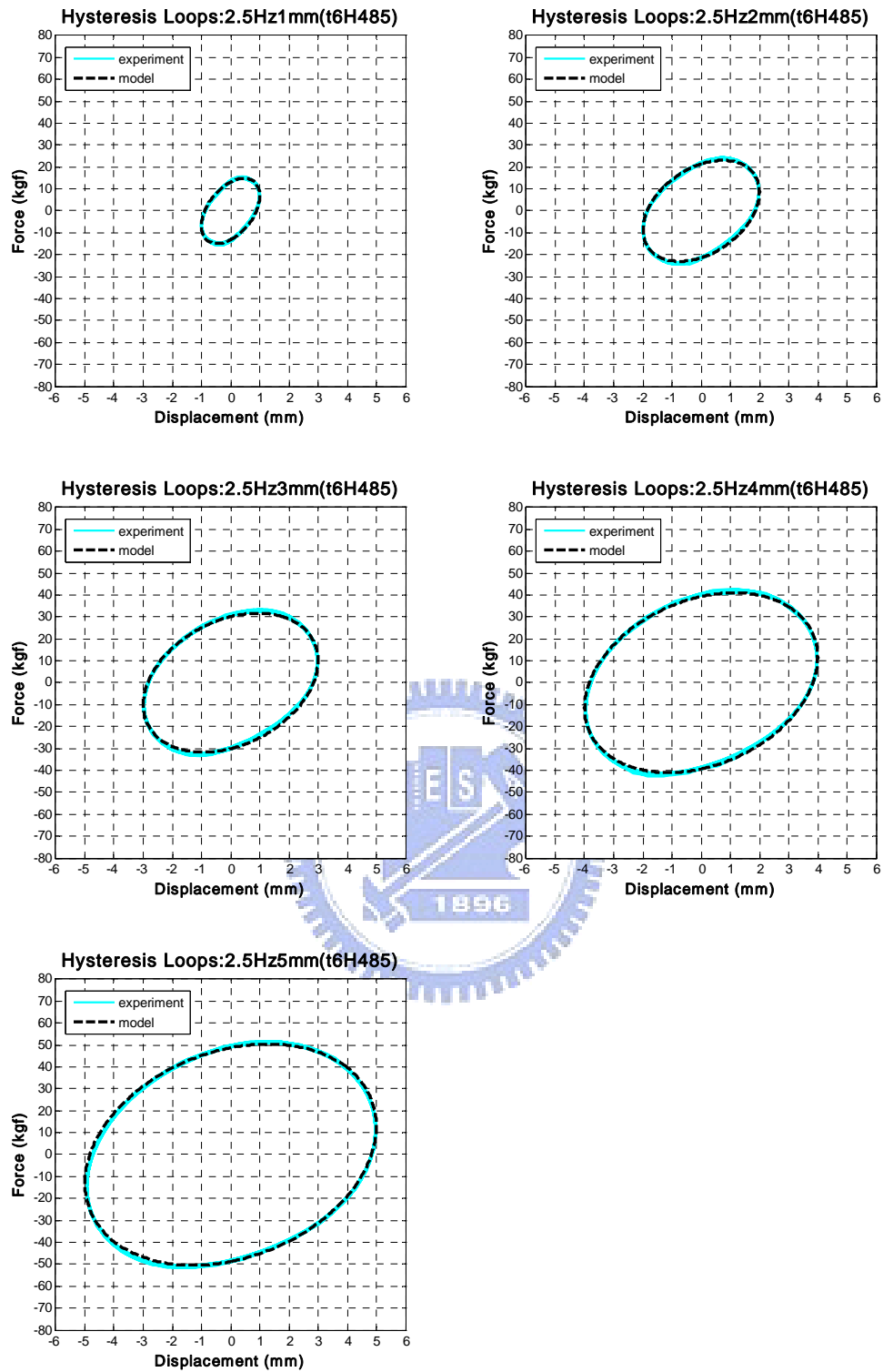


圖 4.8e t6H485 試體擾動頻率 2.5Hz 各振幅之遲滯迴圈

(Thickness : 6mm , Length : 485mm , B.C. : Hinged)

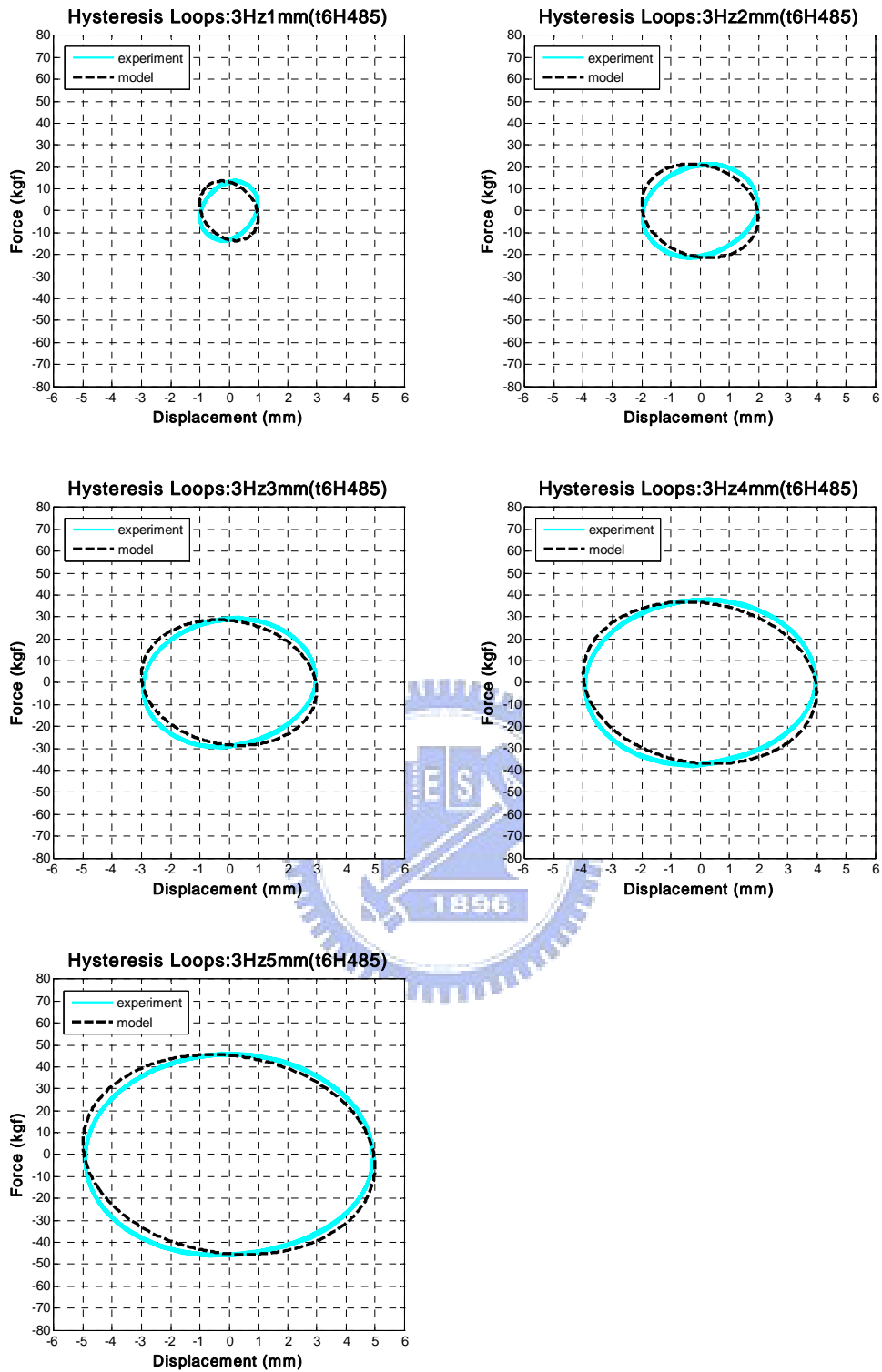


圖 4.8f t6H485 試體擾動頻率 3.0Hz 各振幅之遲滯迴圈

(Thickness : 6mm , Length : 485mm , B.C. : Hinged)

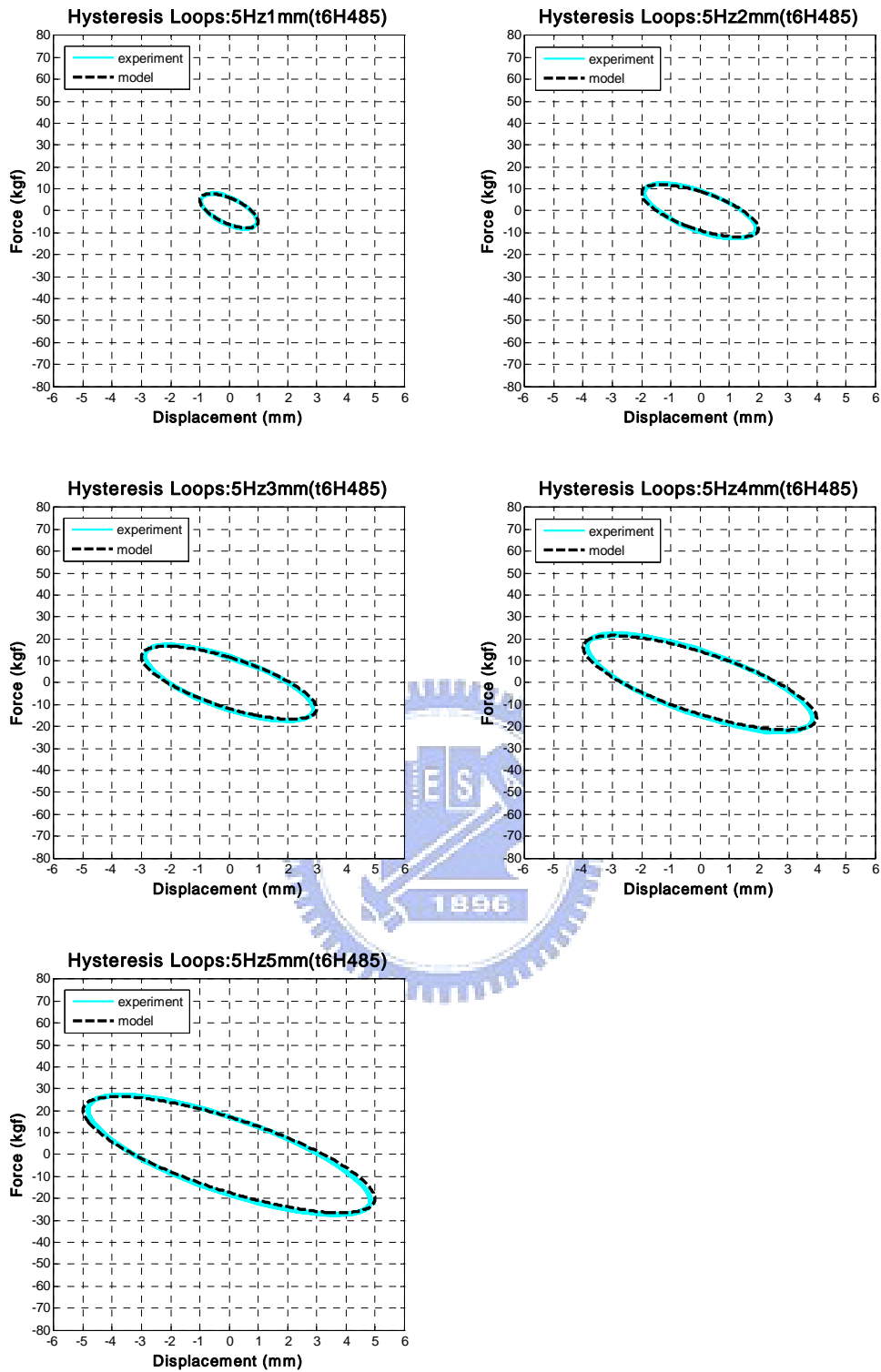


圖 4.8g t6H485 試體擾動頻率 5.0Hz 各振幅之遲滯迴圈

(Thickness : 6mm , Length : 485mm , B.C. : Hinged)

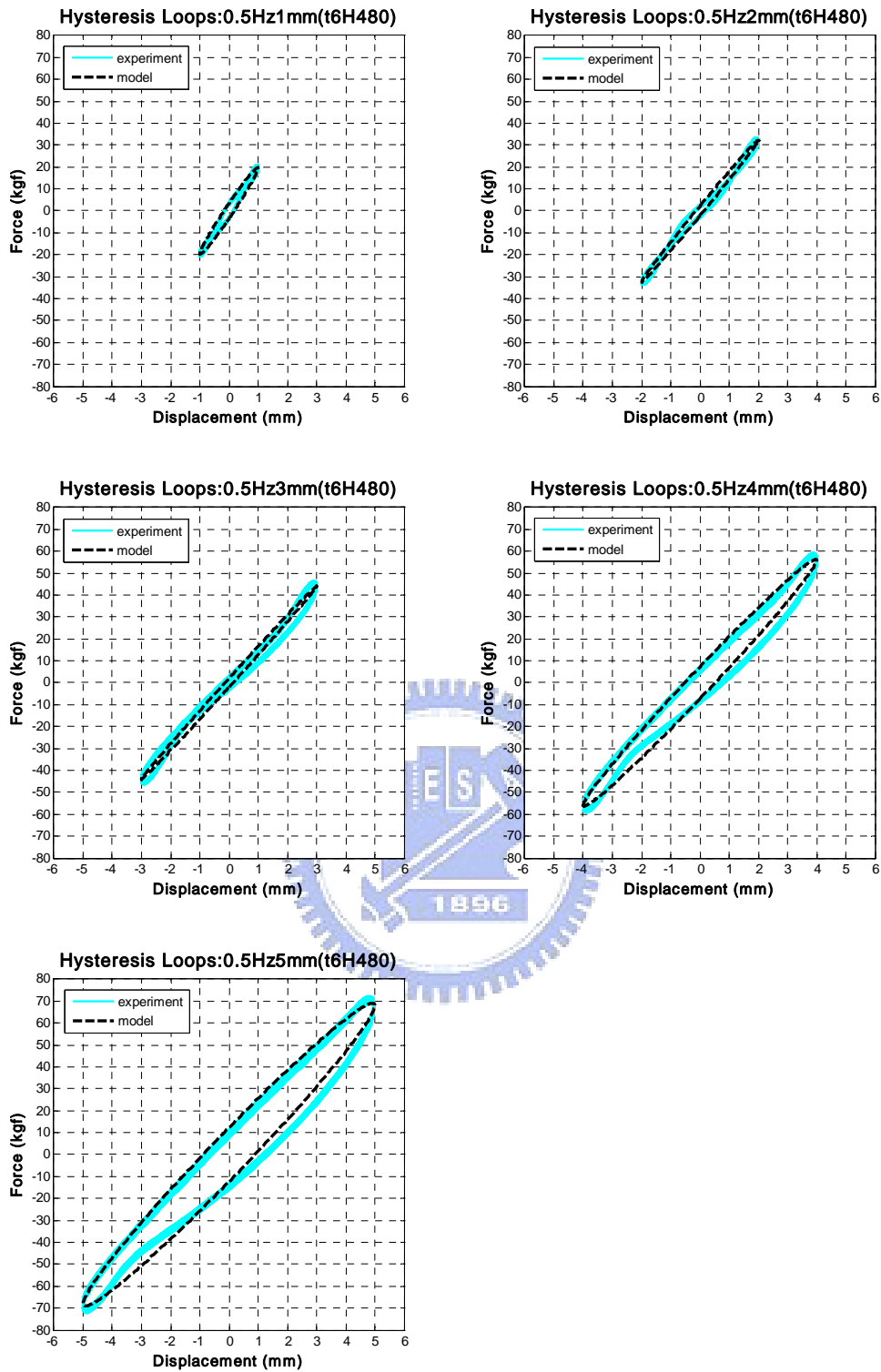


圖 4.9a t6H480 試體擾動頻率 0.5Hz 各振幅之遲滯迴圈

(Thickness : 6mm , Length : 480mm , B.C. : Hinged)

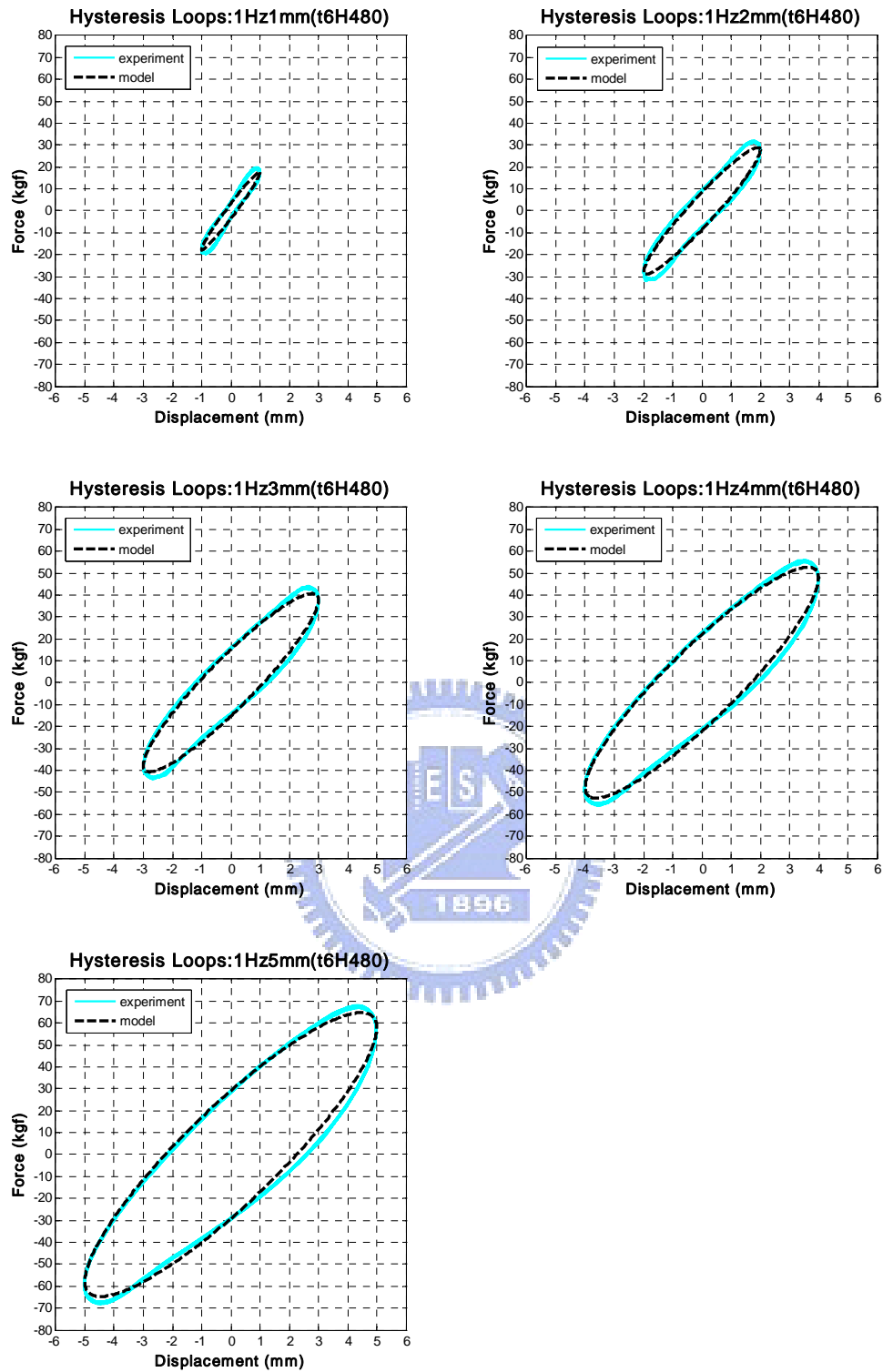


圖 4.9b t6H480 試體擾動頻率 1.0Hz 各振幅之遲滯迴圈

(Thickness : 6mm , Length : 480mm , B.C. : Hinged)

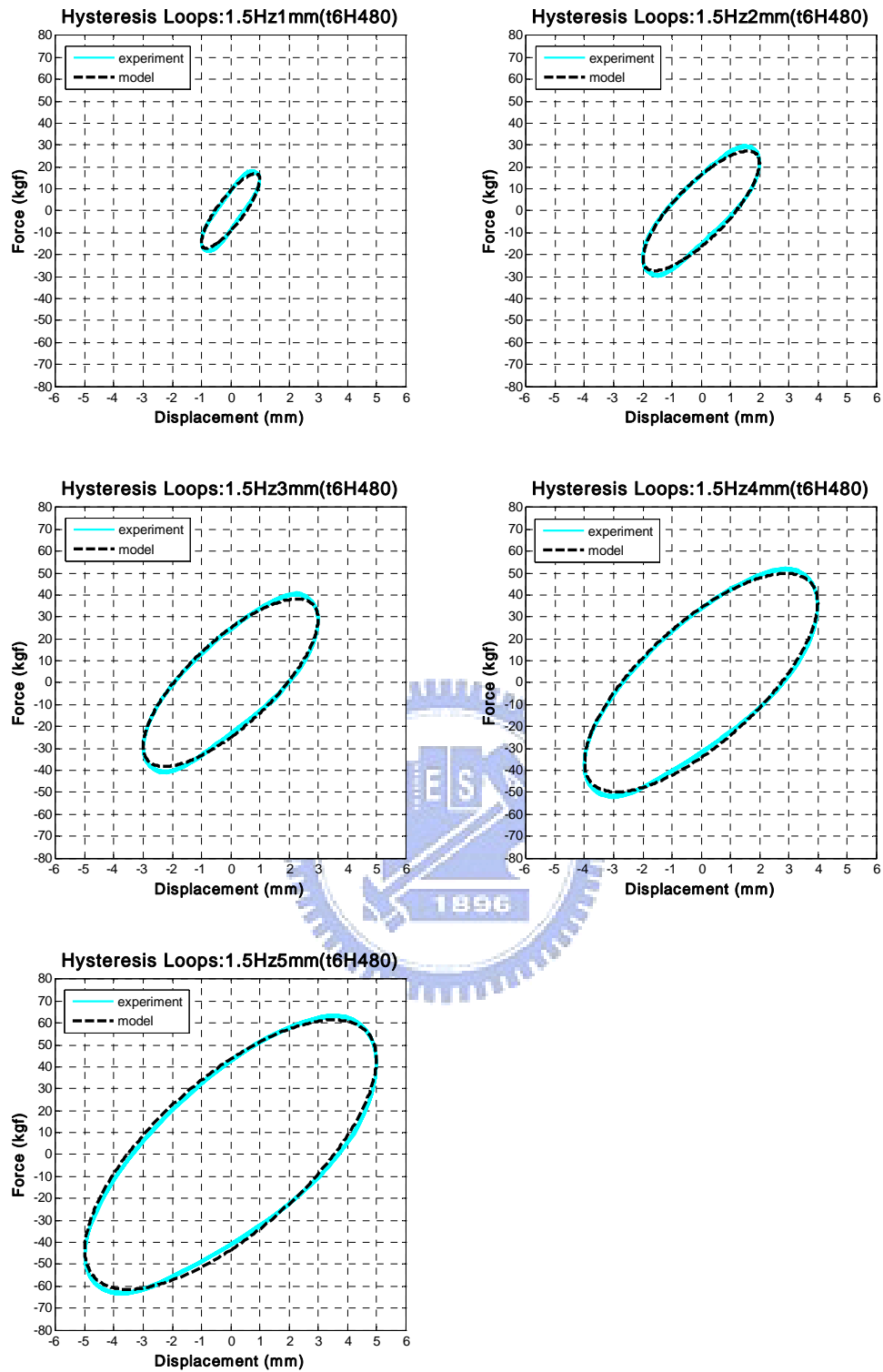


圖 4.9c t6H480 試體擾動頻率 1.5Hz 各振幅之遲滯迴圈

(Thickness : 6mm , Length : 480mm , B.C. : Hinged)

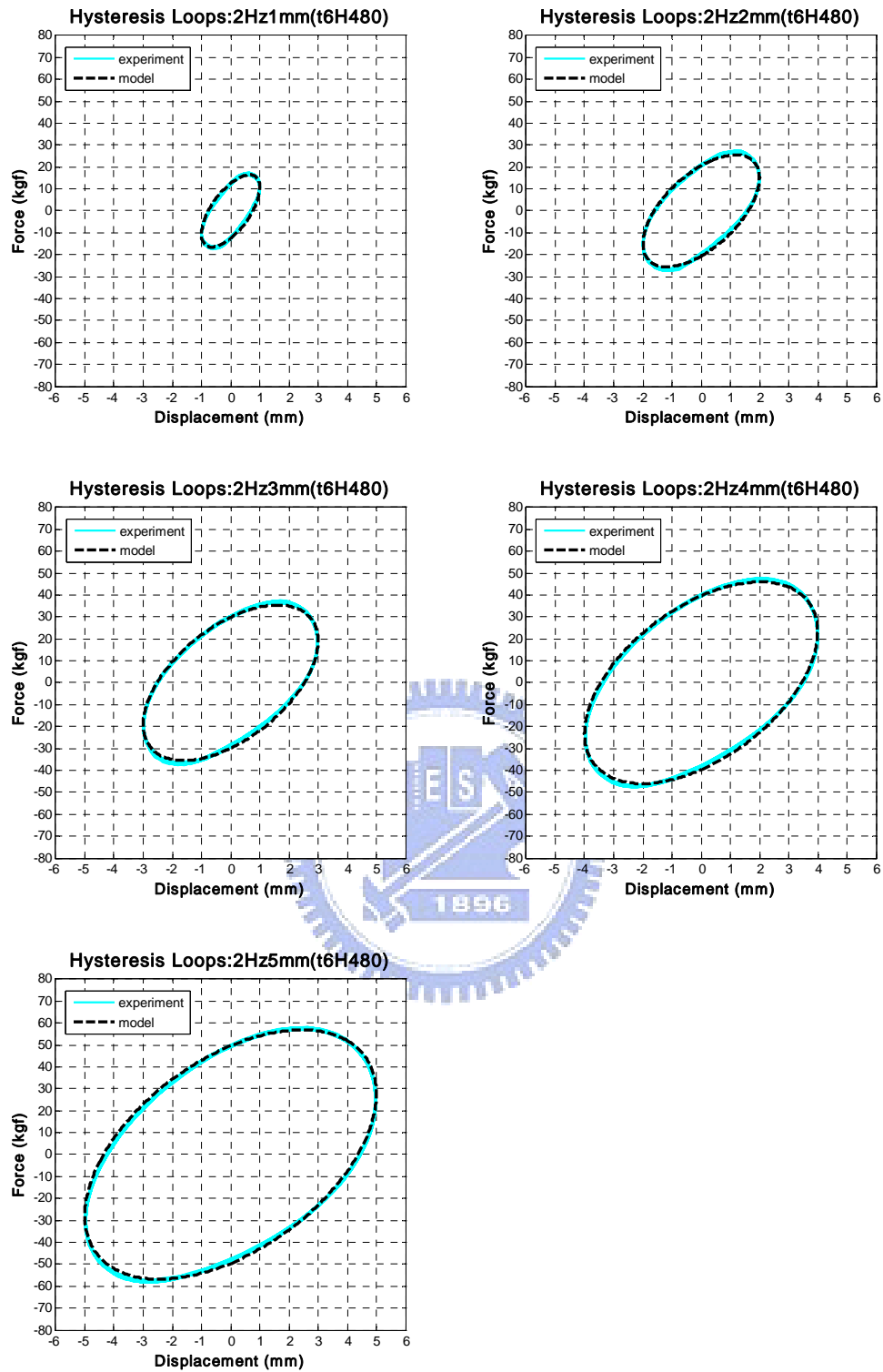


圖 4.9d t6H480 試體擾動頻率 2.0Hz 各振幅之遲滯迴圈

(Thickness : 6mm , Length : 480mm , B.C. : Hinged)

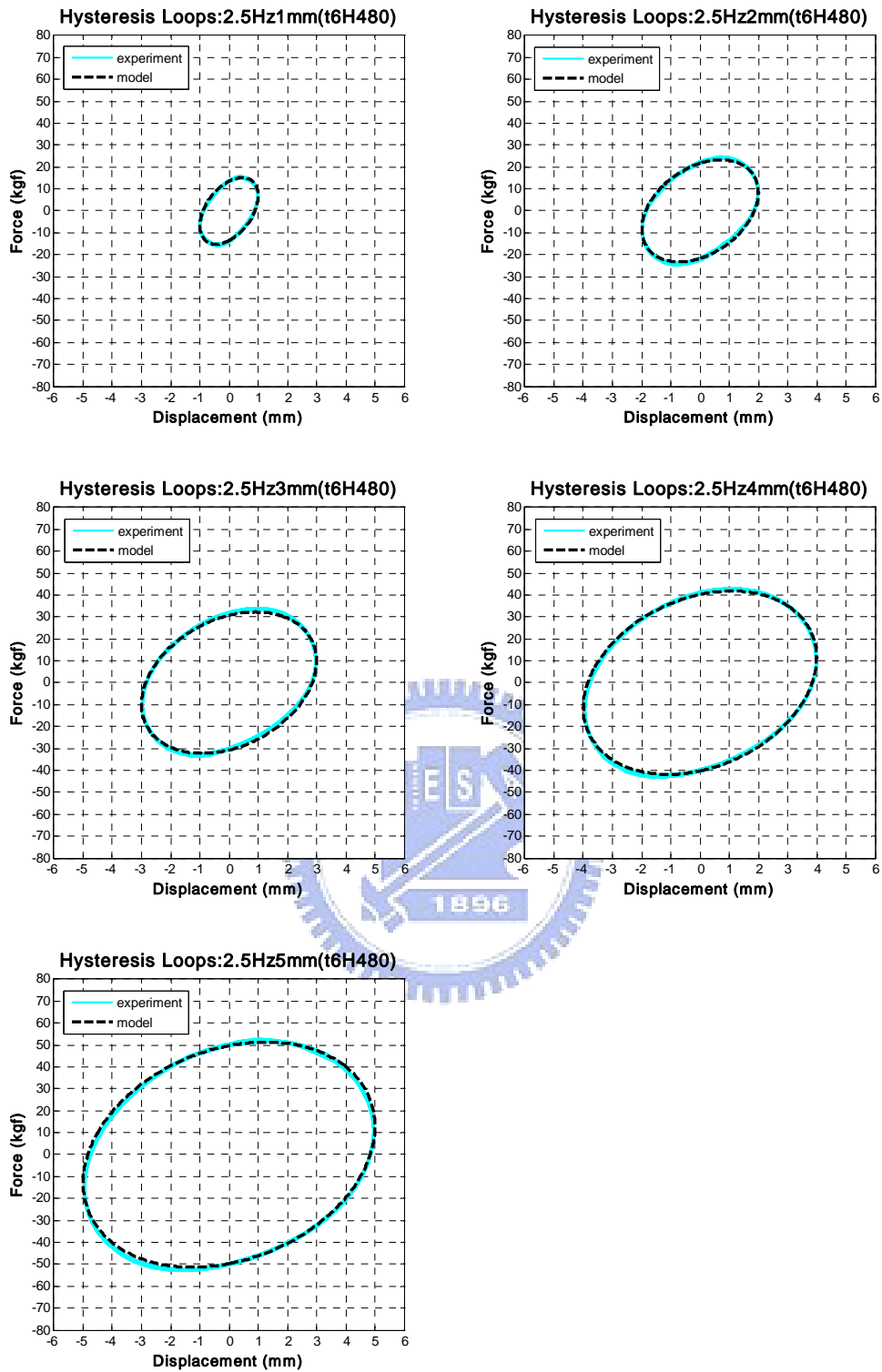


圖 4.9e t6H480 試體擾動頻率 2.5Hz 各振幅之遲滯迴圈

(Thickness : 6mm , Length : 480mm , B.C. : Hinged)

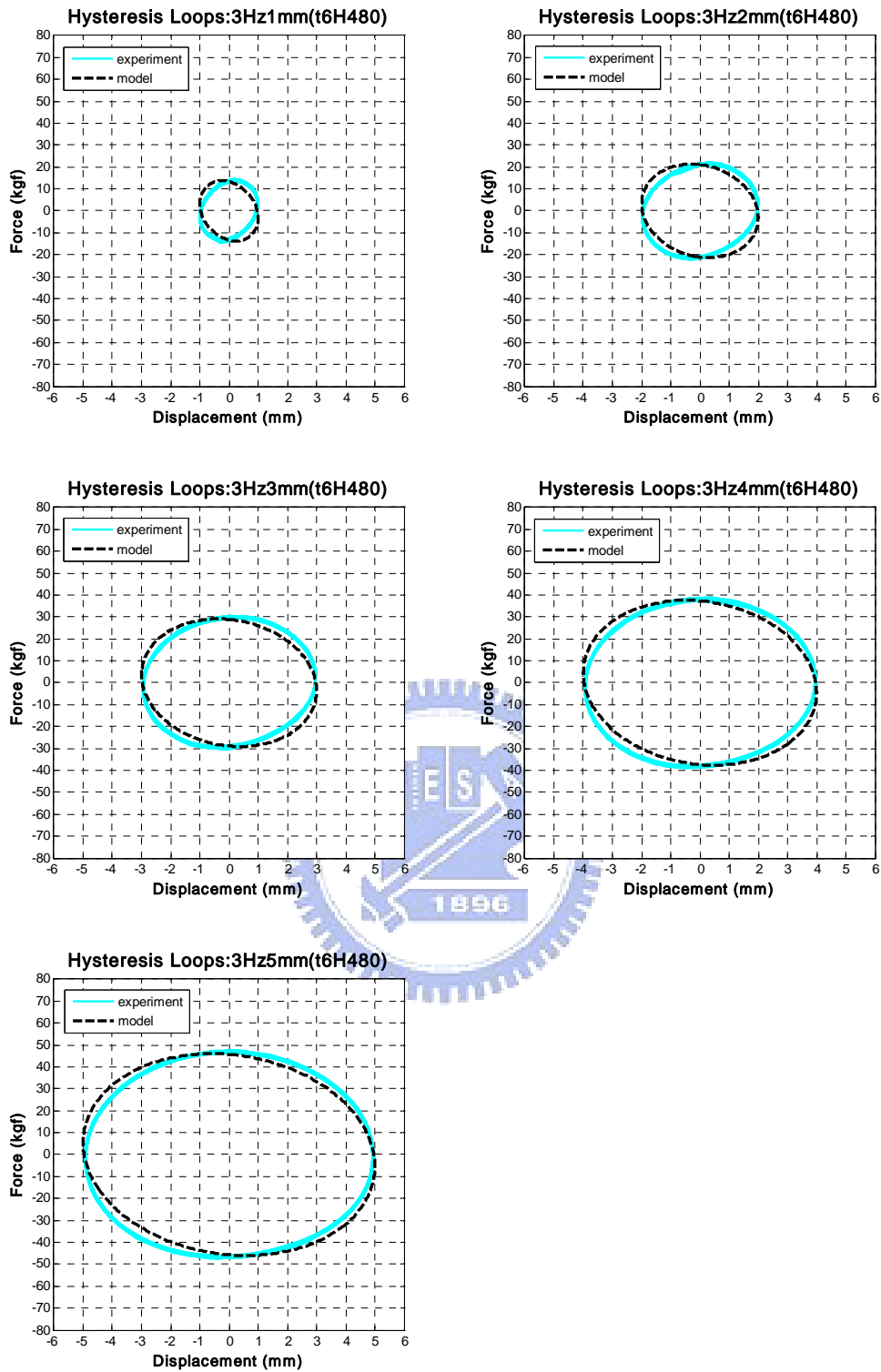


圖 4.9f t6H480 試體擾動頻率 3.0Hz 各振幅之遲滯迴圈

(Thickness : 6mm , Length : 480mm , B.C. : Hinged)

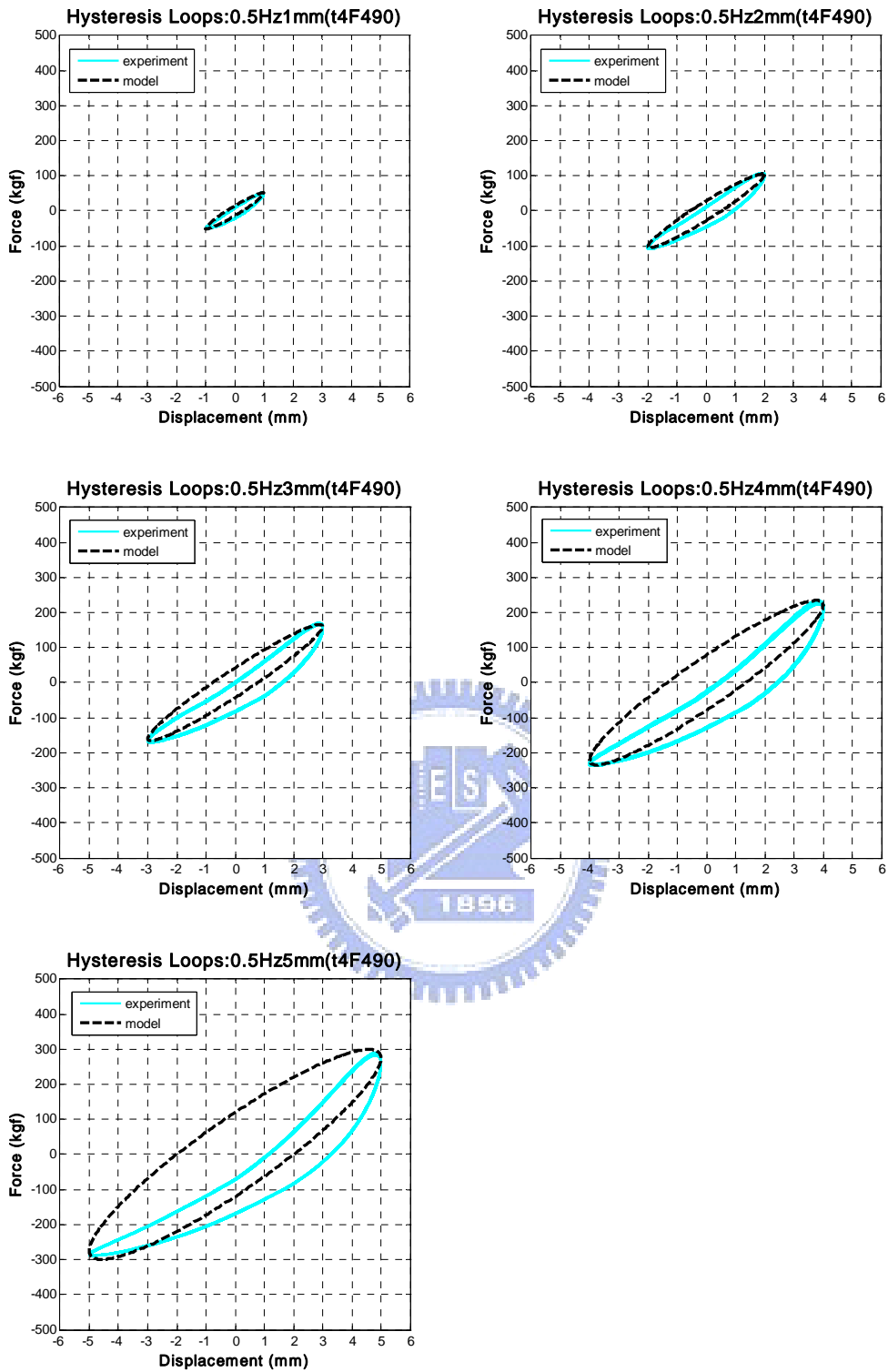


圖 4.10a t4F490 試體擾動頻率 0.5Hz 各振幅之遲滯迴圈

(Thickness : 4mm , Length : 490mm , B. C. : Fixed)

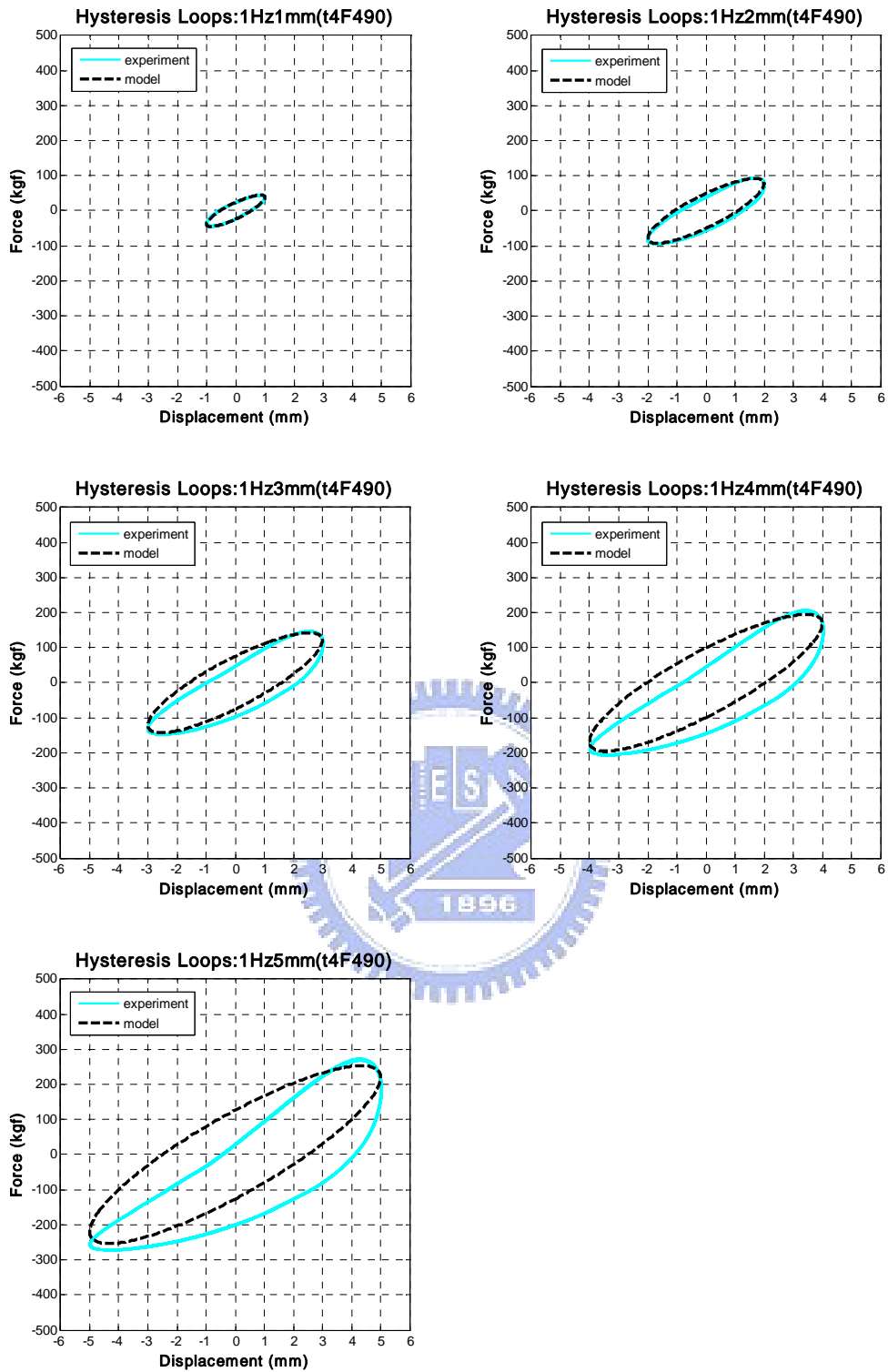


圖 4.10b t4F490 試體擾動頻率 1.0Hz 各振幅之遲滯迴圈

(Thickness : 4mm , Length : 490mm , B. C. : Fixed)

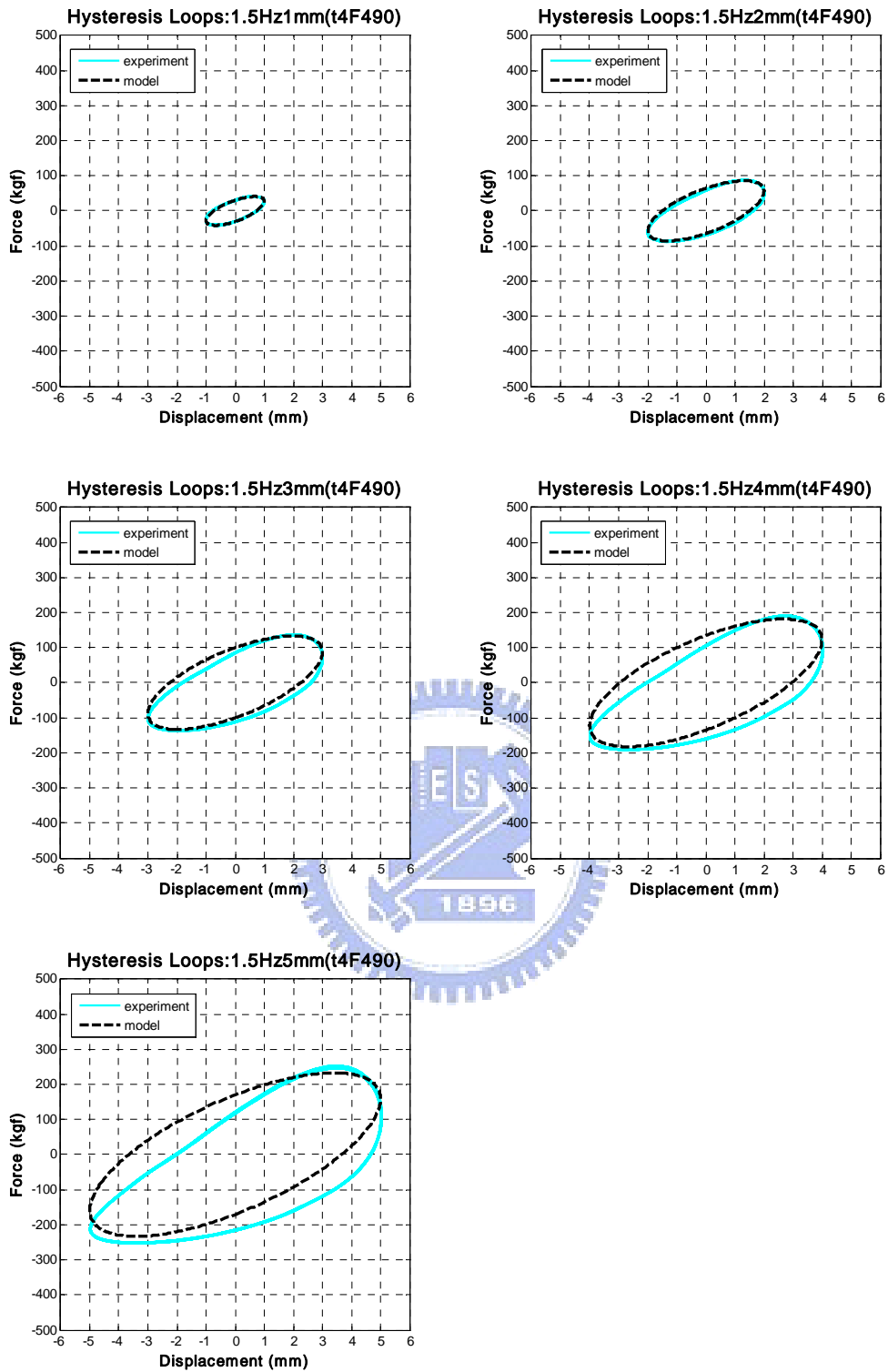


圖 4.10c t4F490 試體擾動頻率 1.5Hz 各振幅之遲滯迴圈

(Thickness : 4mm , Length : 490mm , B. C. : Fixed)

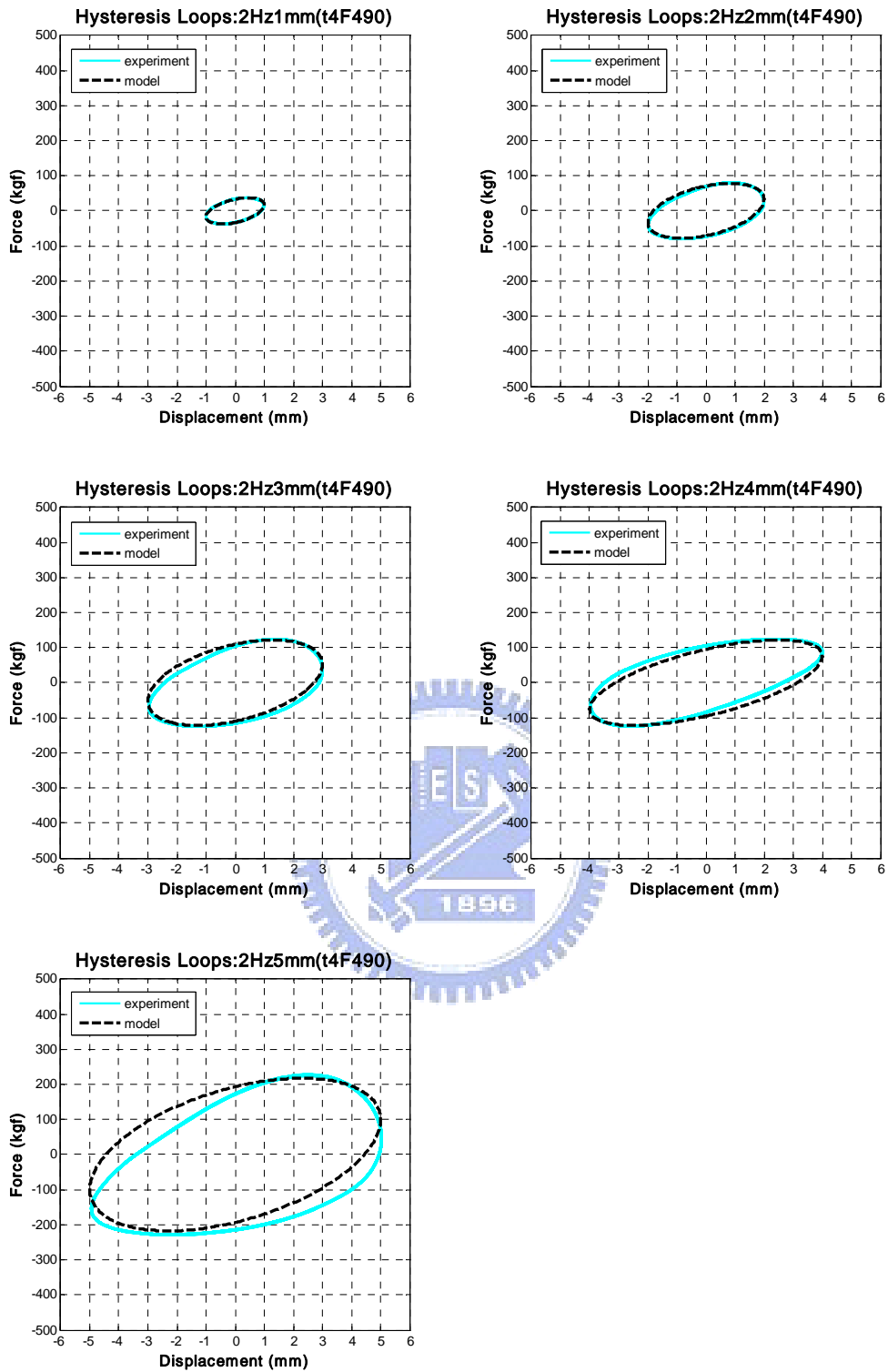


圖 4.10d t4F490 試體擾動頻率 2.0Hz 各振幅之遲滯迴圈

(Thickness : 4mm , Length : 490mm , B. C. : Fixed)

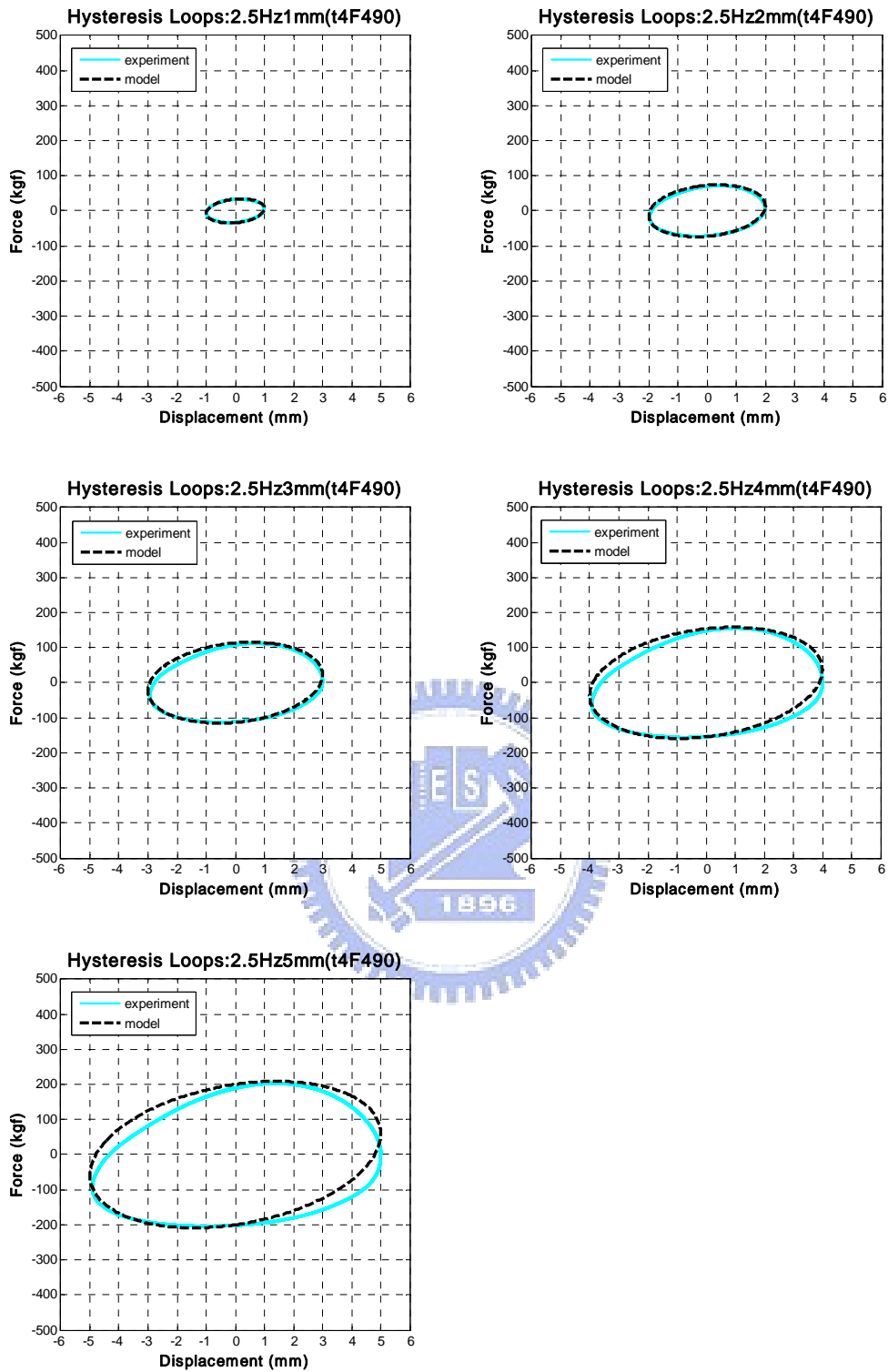


圖 4.10e t4F490 試體擾動頻率 2.5Hz 各振幅之遲滯迴圈

(Thickness : 4mm , Length : 490mm , B. C. : Fixed)

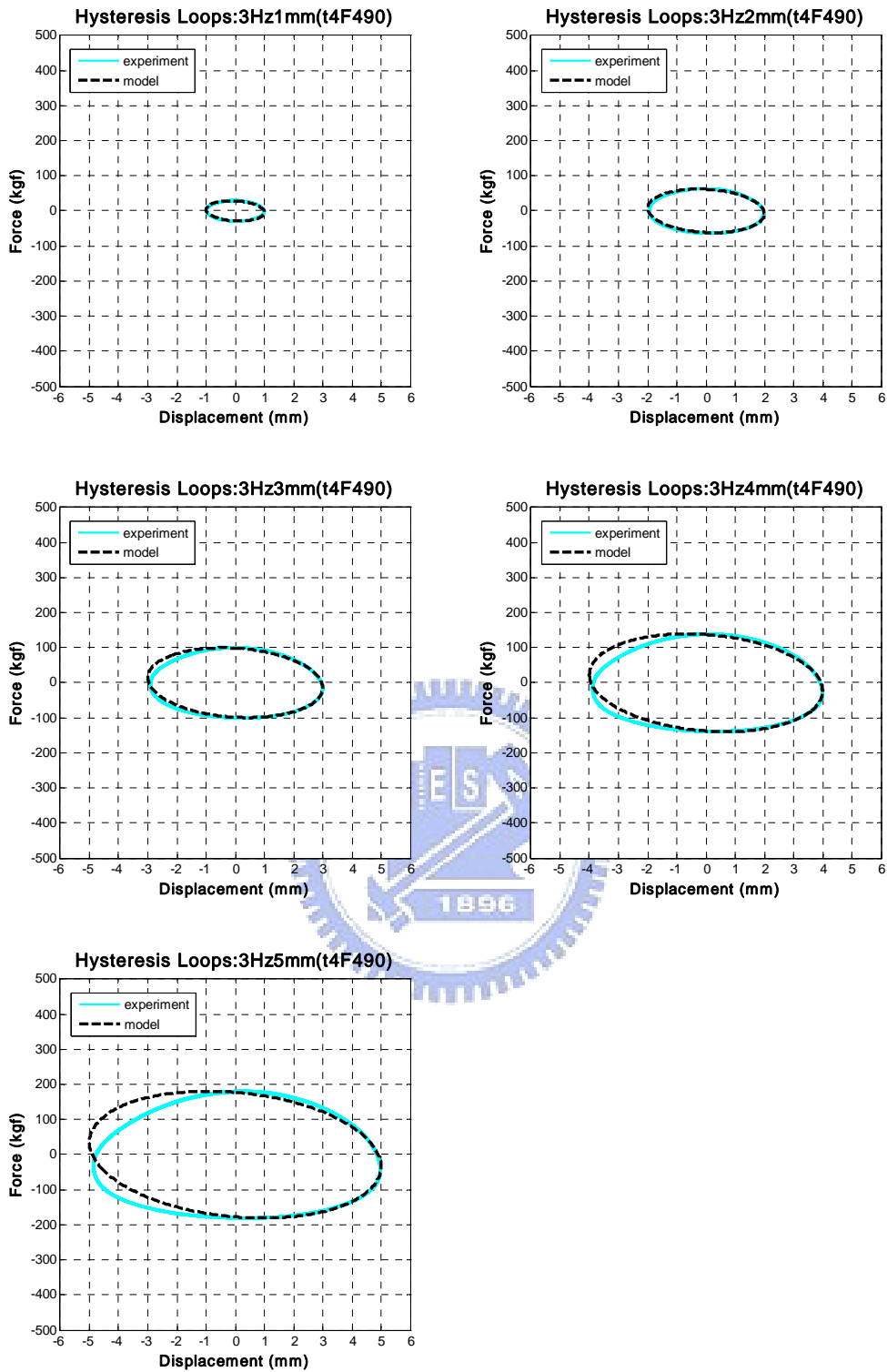


圖 4.10f t4F490 試體擾動頻率 3.0Hz 各振幅之遲滯迴圈

(Thickness : 4mm , Length : 490mm , B. C. : Fixed)

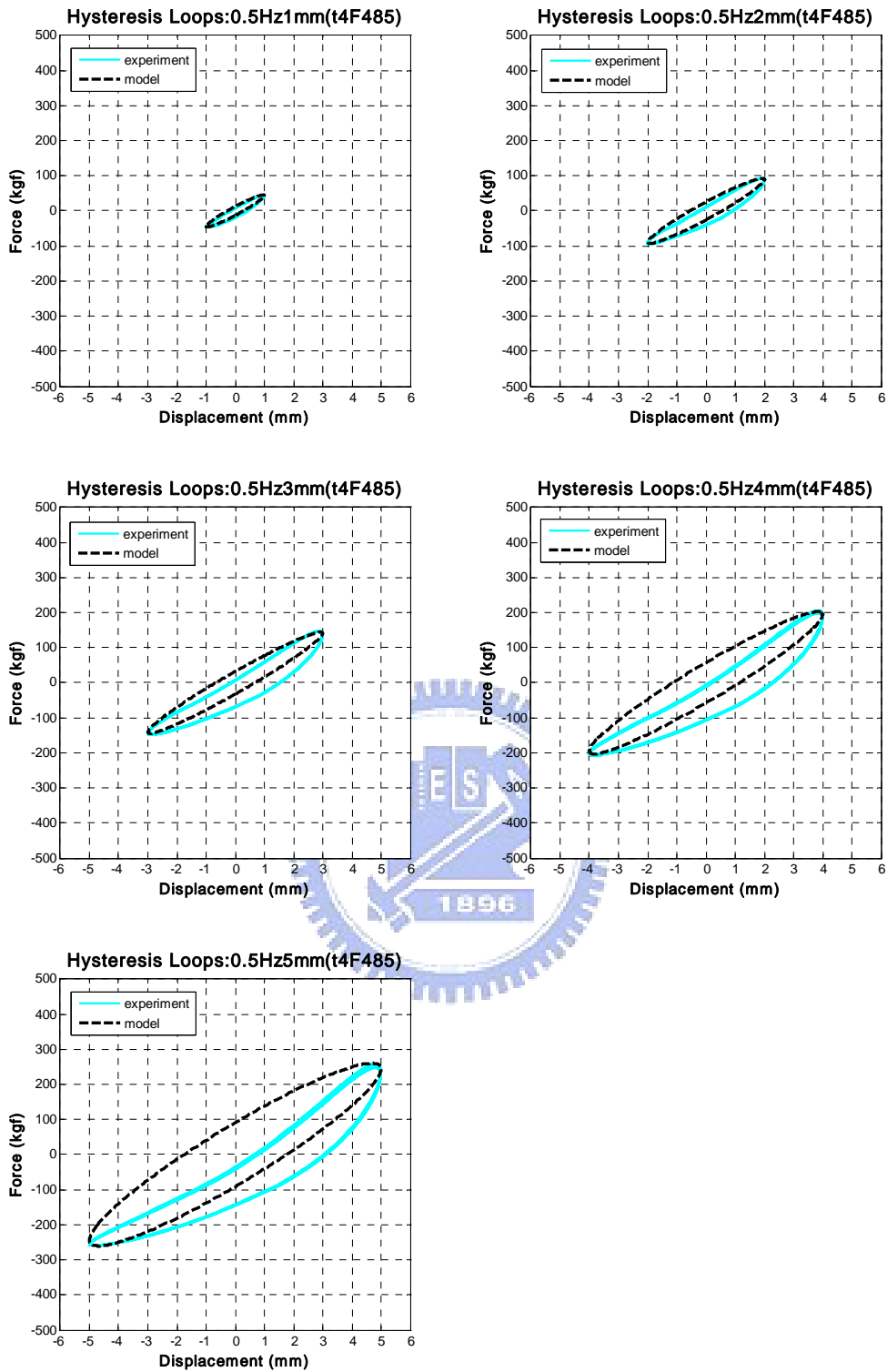


圖 4.11a t4F485 試體擾動頻率 0.5Hz 各振幅之遲滯迴圈

(Thickness : 4mm , Length : 485mm , B. C. : Fixed)

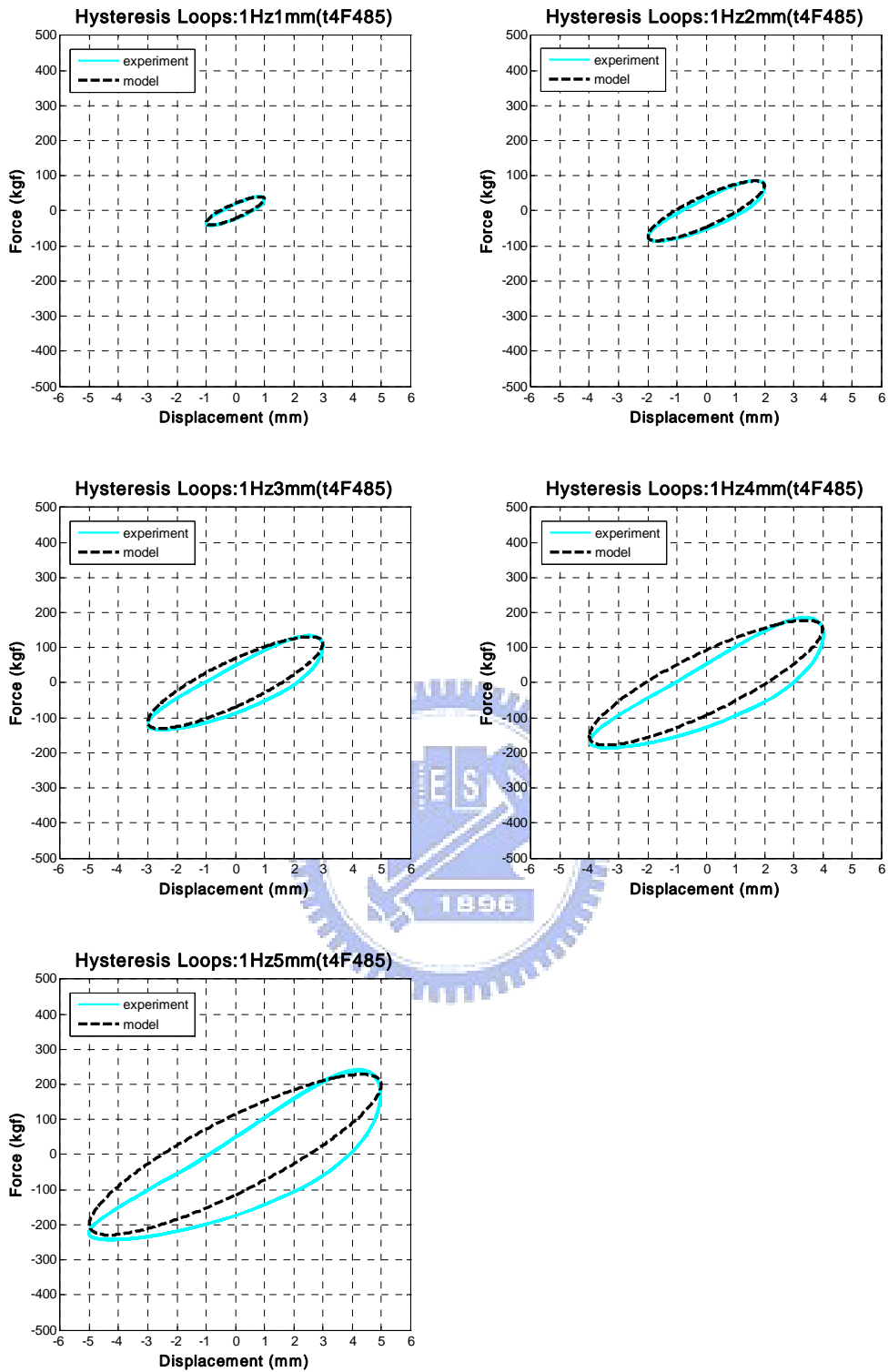


圖 4.11b t4F485 試體擾動頻率 1.0Hz 各振幅之遲滯迴圈

(Thickness : 4mm , Length : 485mm , B. C. : Fixed)

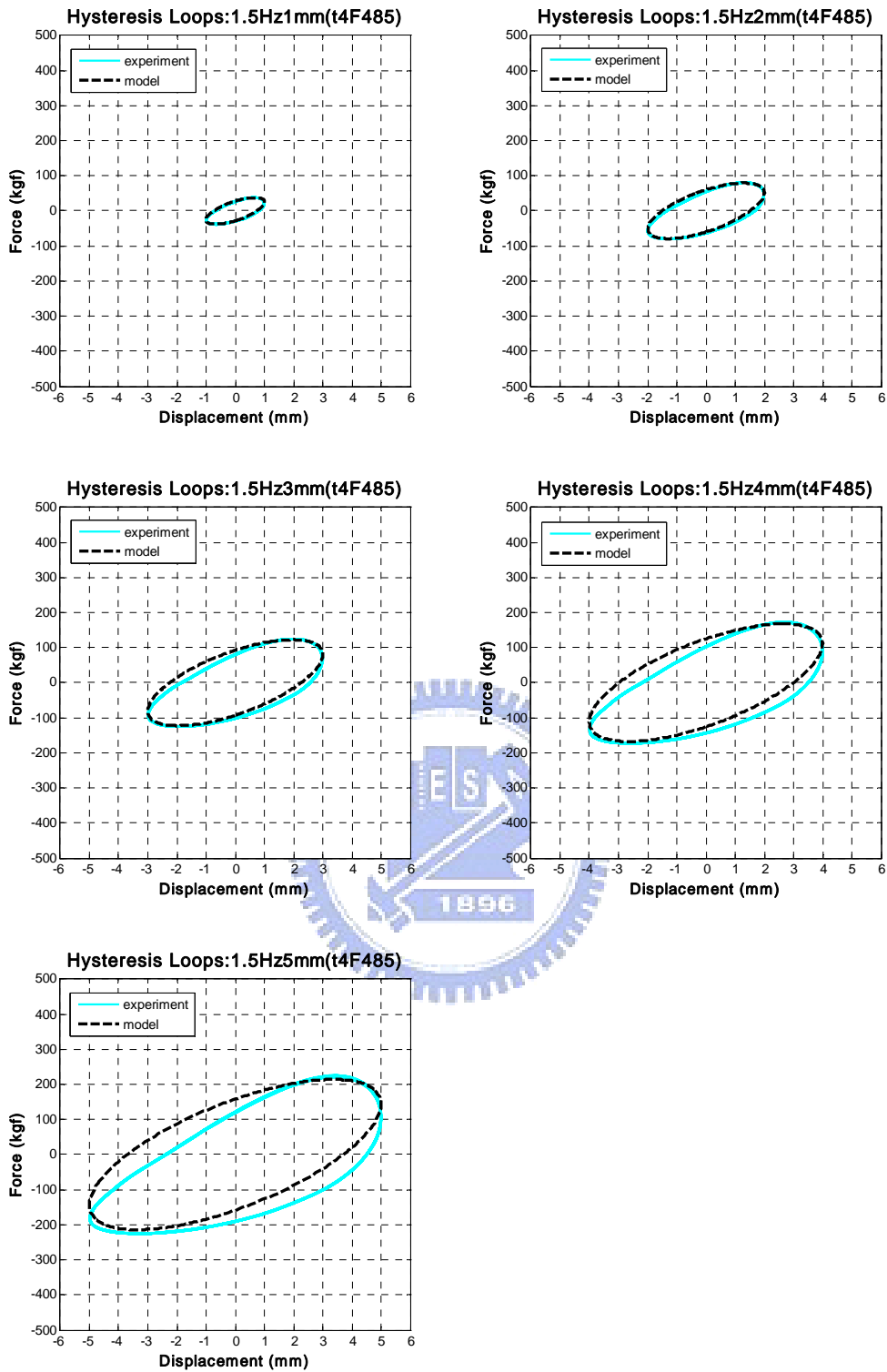


圖 4.11c t4F485 試體擾動頻率 1.5Hz 各振幅之遲滯迴圈

(Thickness : 4mm , Length : 485mm , B. C. : Fixed)

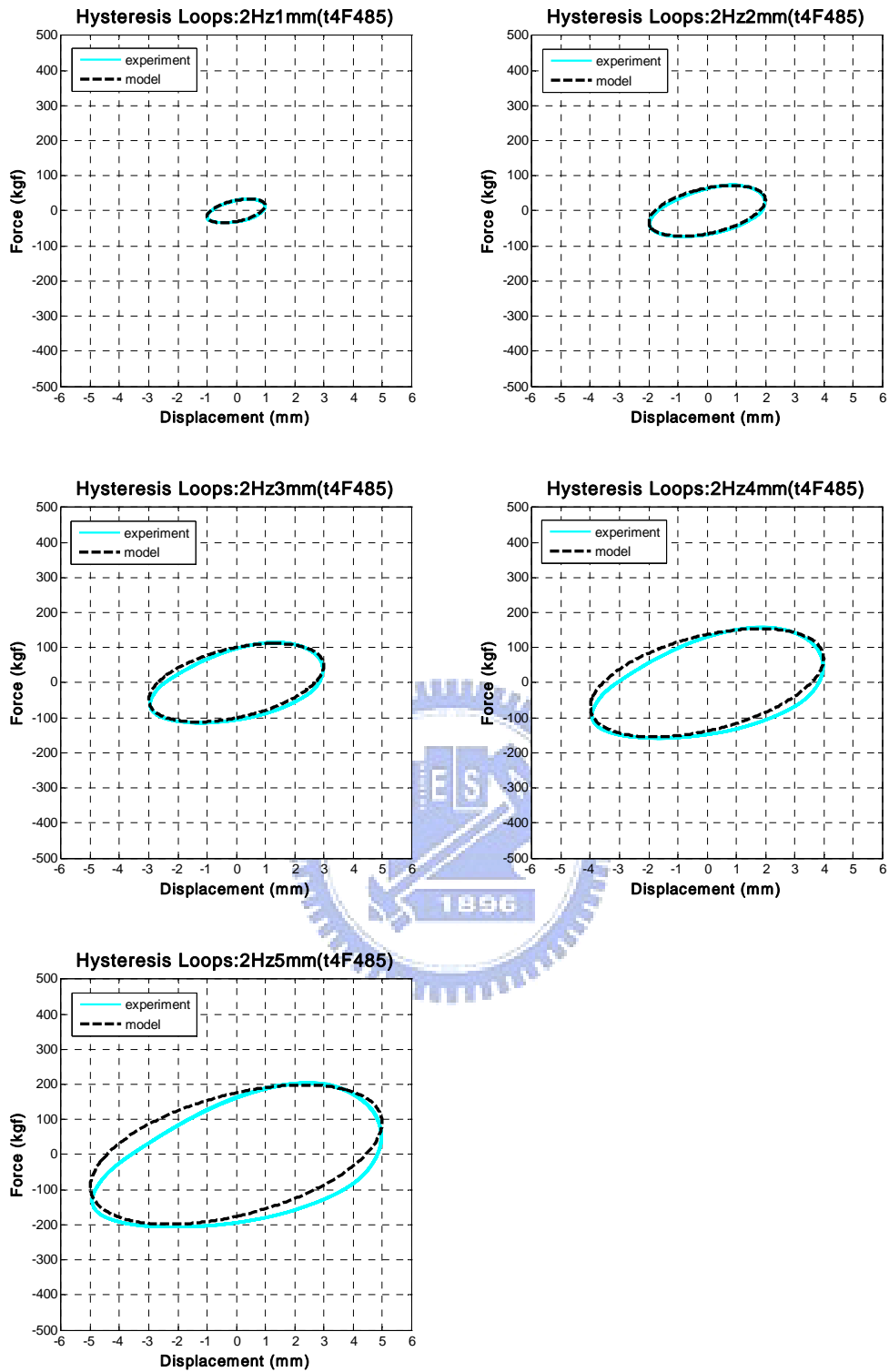


圖 4.11d t4F485 試體擾動頻率 2.0Hz 各振幅之遲滯迴圈

(Thickness : 4mm , Length : 485mm , B. C. : Fixed)

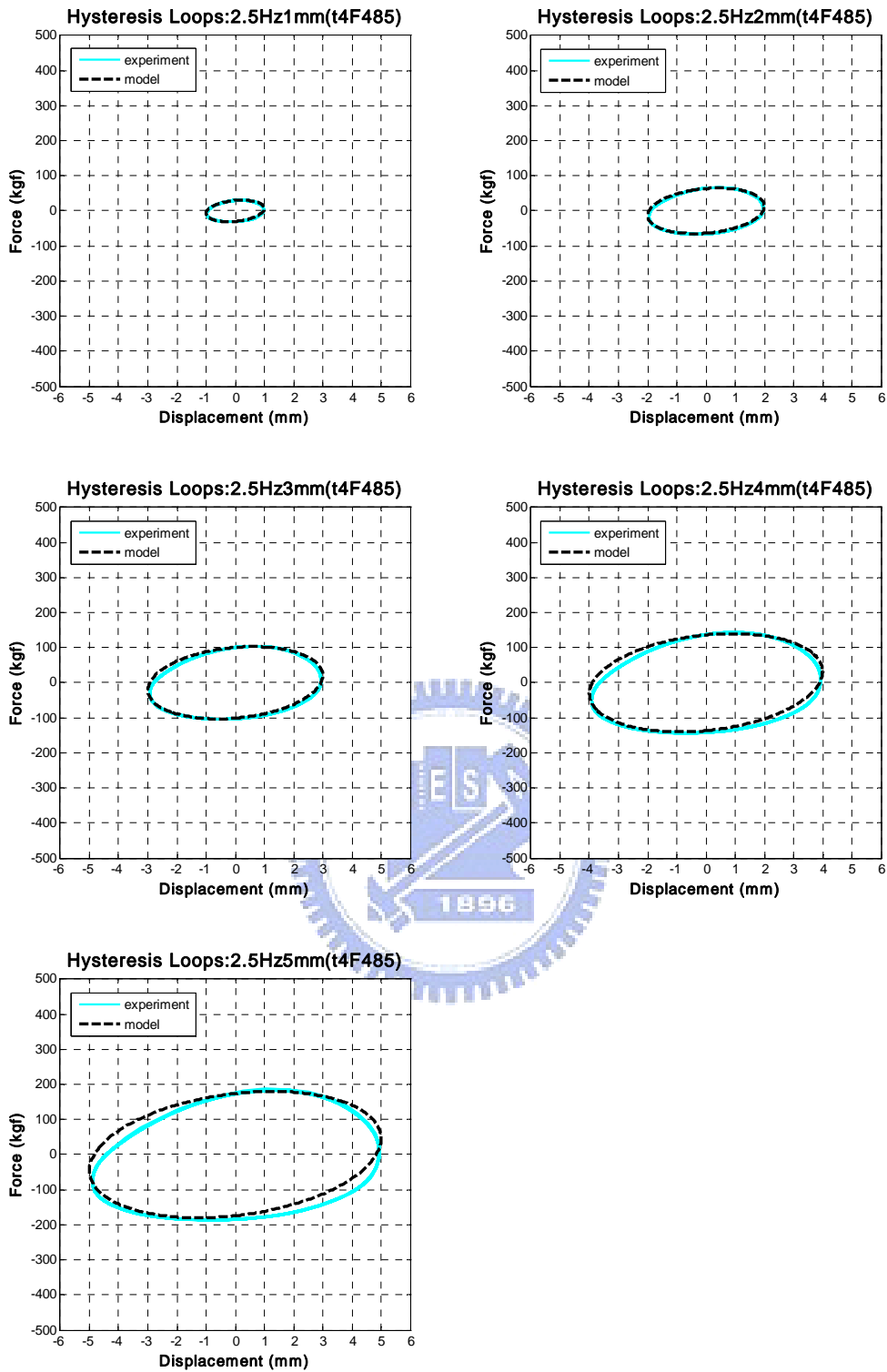


圖 4.11e t4F485 試體擾動頻率 2.5Hz 各振幅之遲滯迴圈

(Thickness : 4mm , Length : 485mm , B. C. : Fixed)

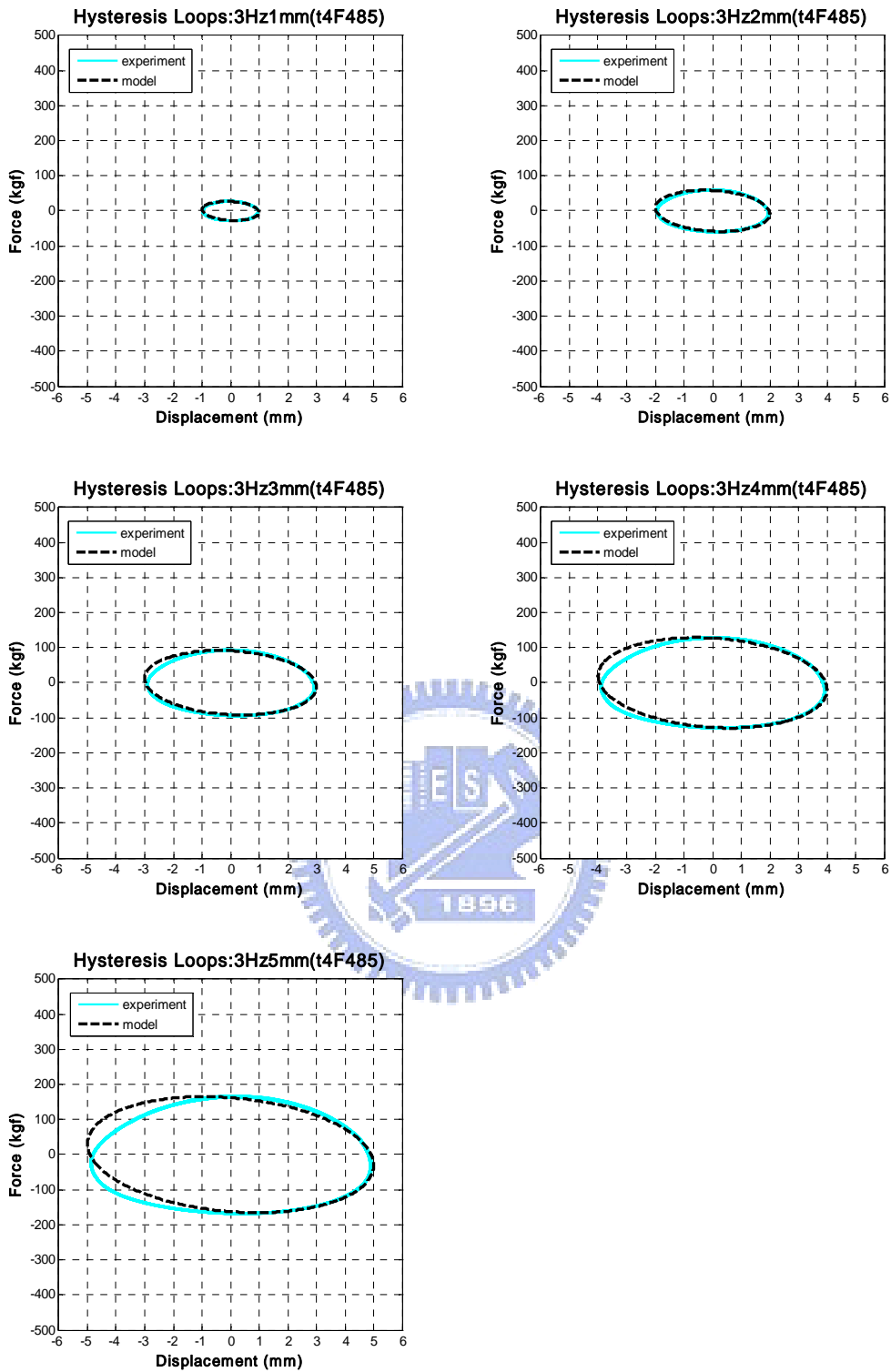


圖 4.11f t4F485 試體擾動頻率 3.0Hz 各振幅之遲滯迴圈

(Thickness : 4mm , Length : 485mm , B. C. : Fixed)

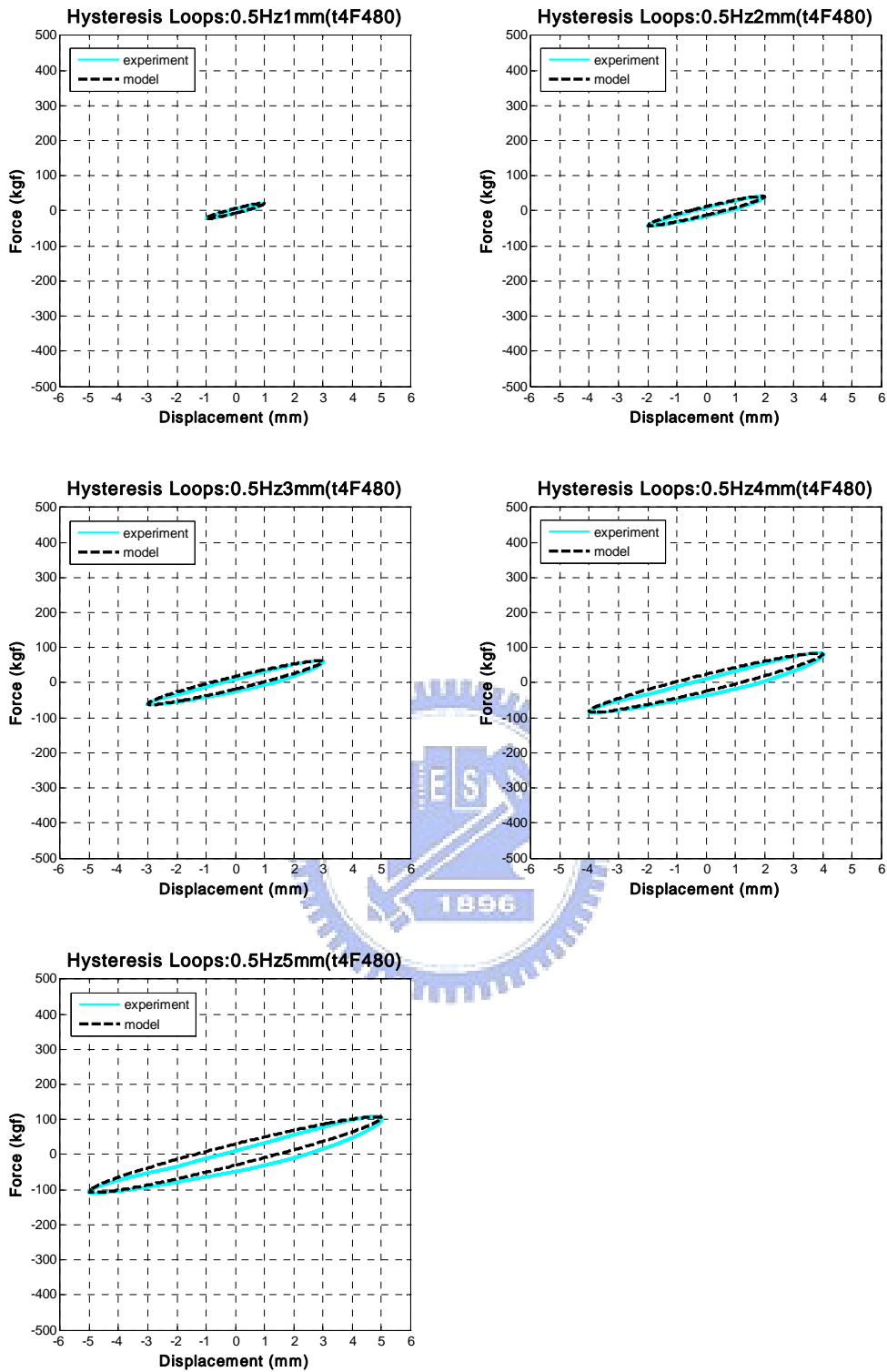


圖 4.12a t4F480 試體擾動頻率 0.5Hz 各振幅之遲滯迴圈

(Thickness : 4mm , Length : 480mm , B. C. : Fixed)

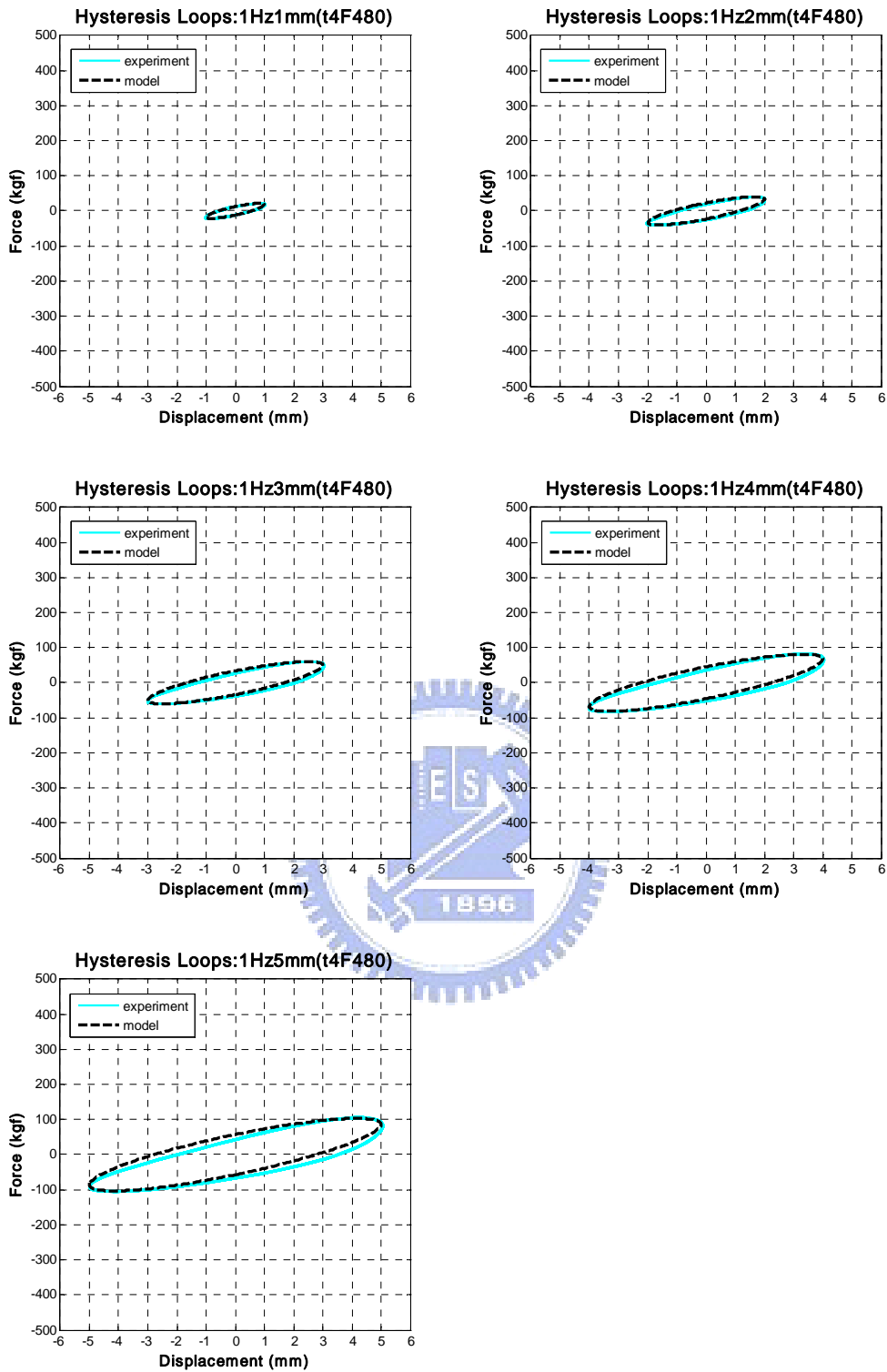


圖 4.12b t4F480 試體擾動頻率 1.0Hz 各振幅之遲滯迴圈

(Thickness : 4mm , Length : 480mm , B. C. : Fixed)

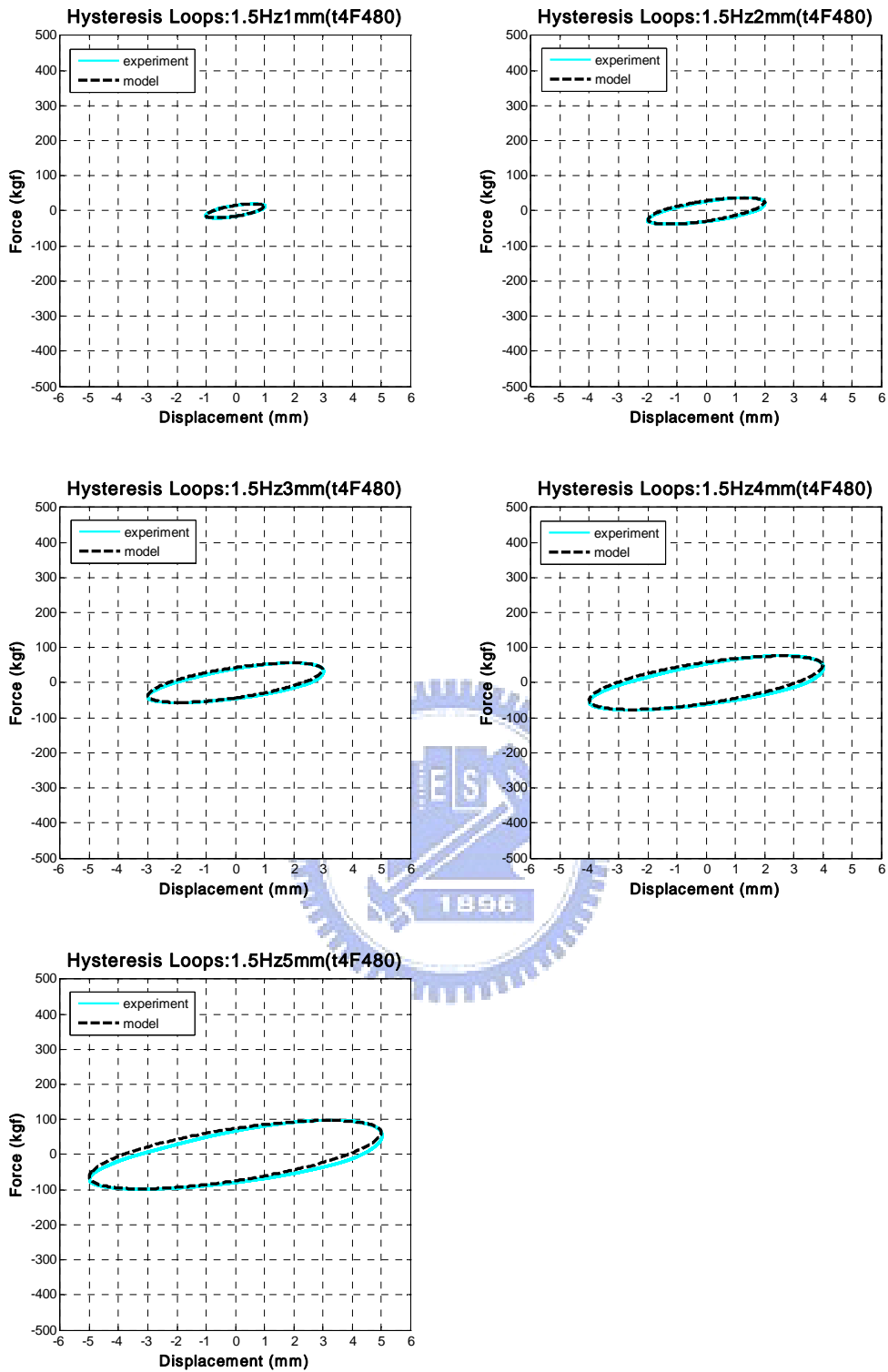


圖 4.12c t4F480 試體擾動頻率 1.5Hz 各振幅之遲滯迴圈

(Thickness : 4mm , Length : 480mm , B. C. : Fixed)

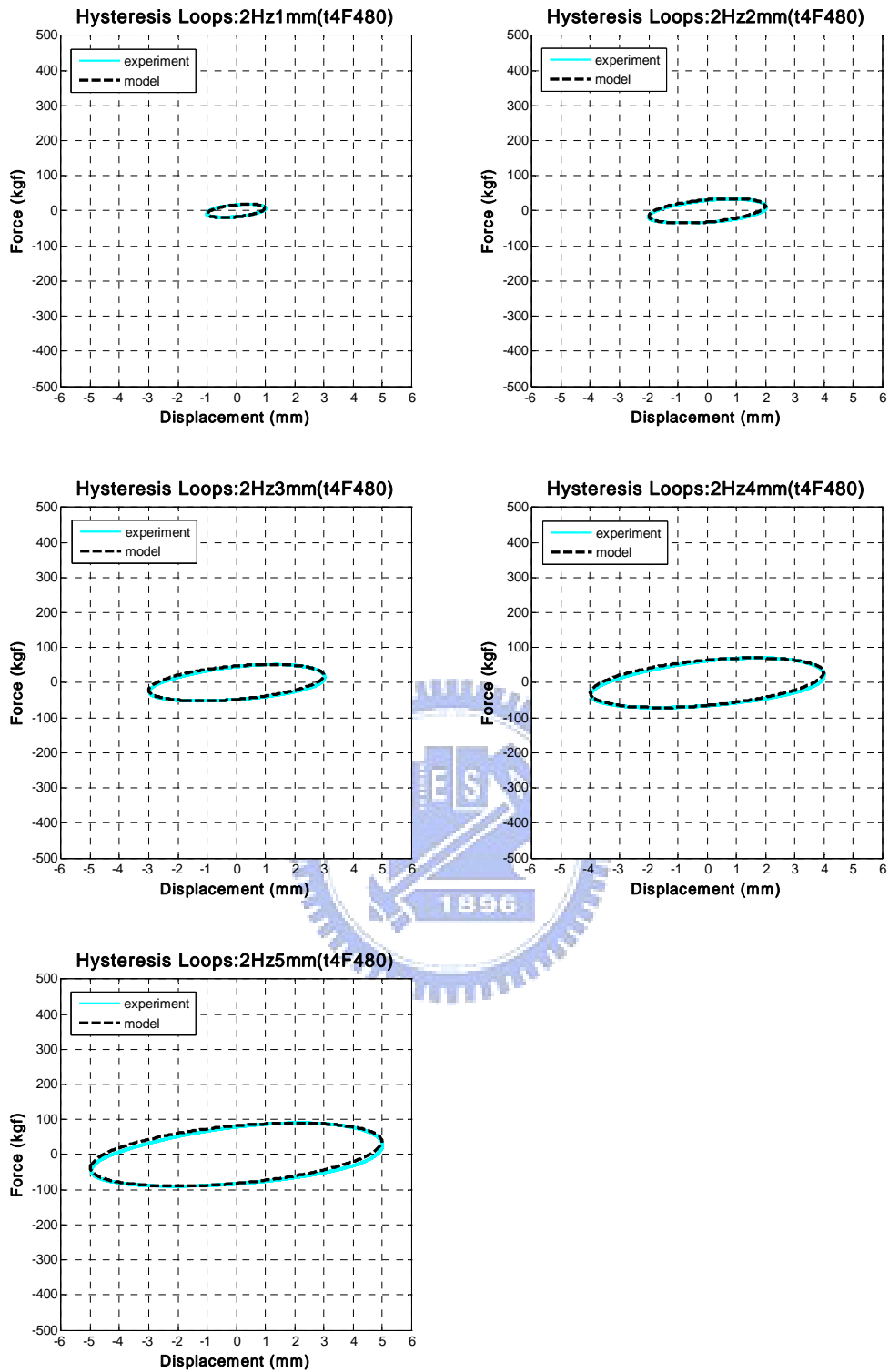


圖 4.12d t4F480 試體擾動頻率 2.0Hz 各振幅之遲滯迴圈

(Thickness : 4mm , Length : 480mm , B. C. : Fixed)

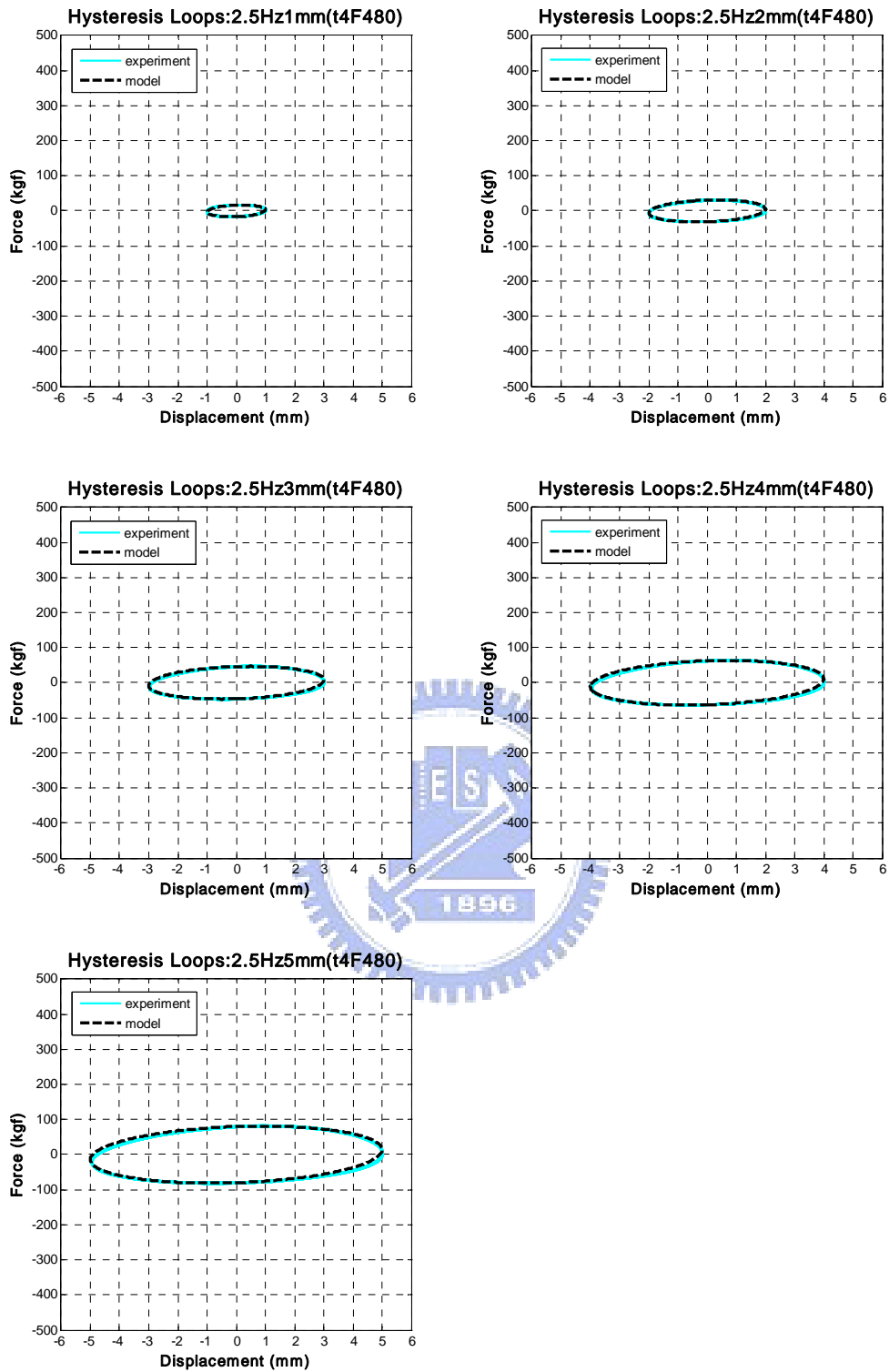


圖 4.12e t4F480 試體擾動頻率 2.5Hz 各振幅之遲滯迴圈

(Thickness : 4mm , Length : 480mm , B. C. : Fixed)

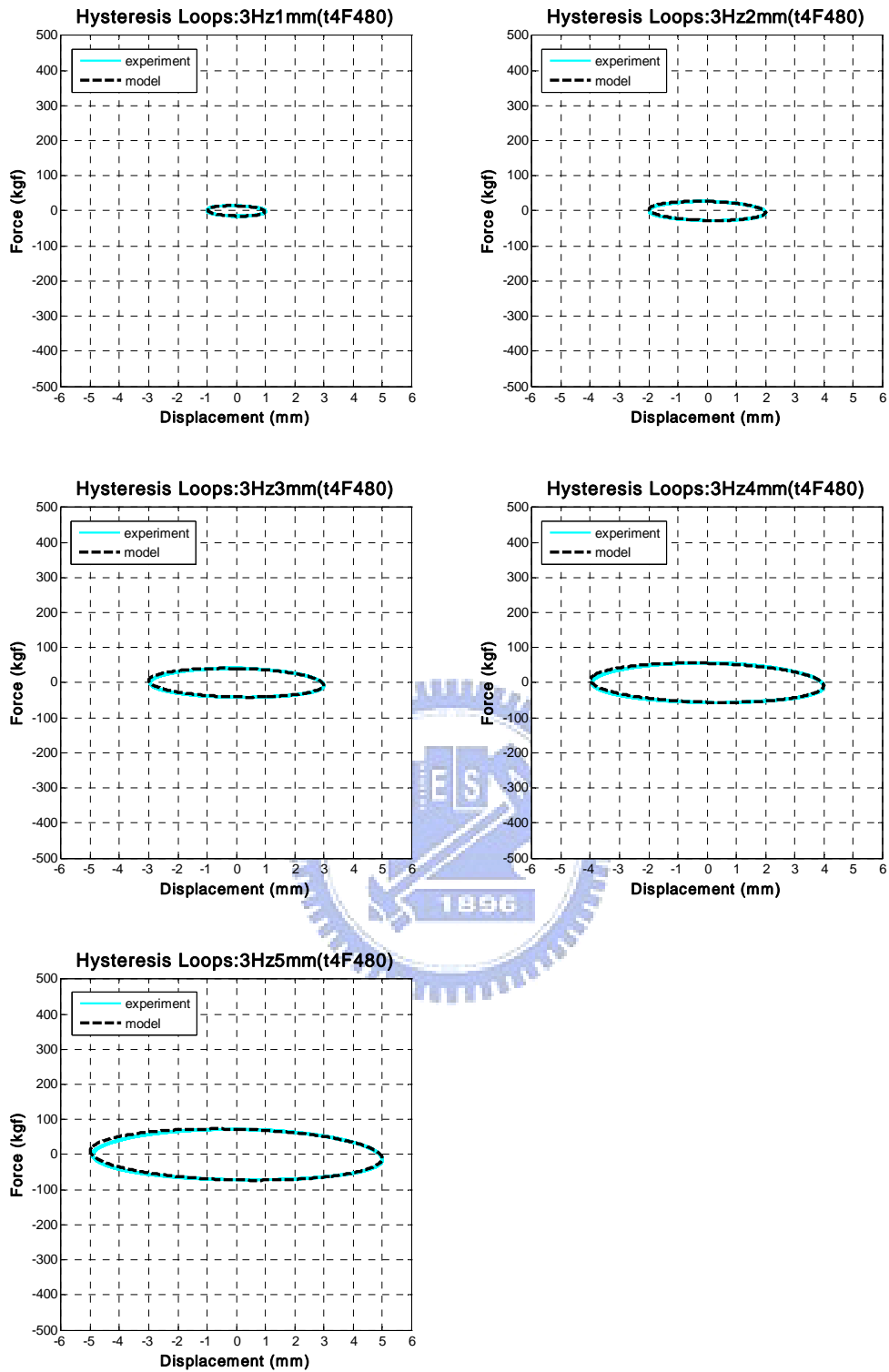


圖 4.12f t4F480 試體擾動頻率 3.0Hz 各振幅之遲滯迴圈

(Thickness : 4mm , Length : 480mm , B. C. : Fixed)

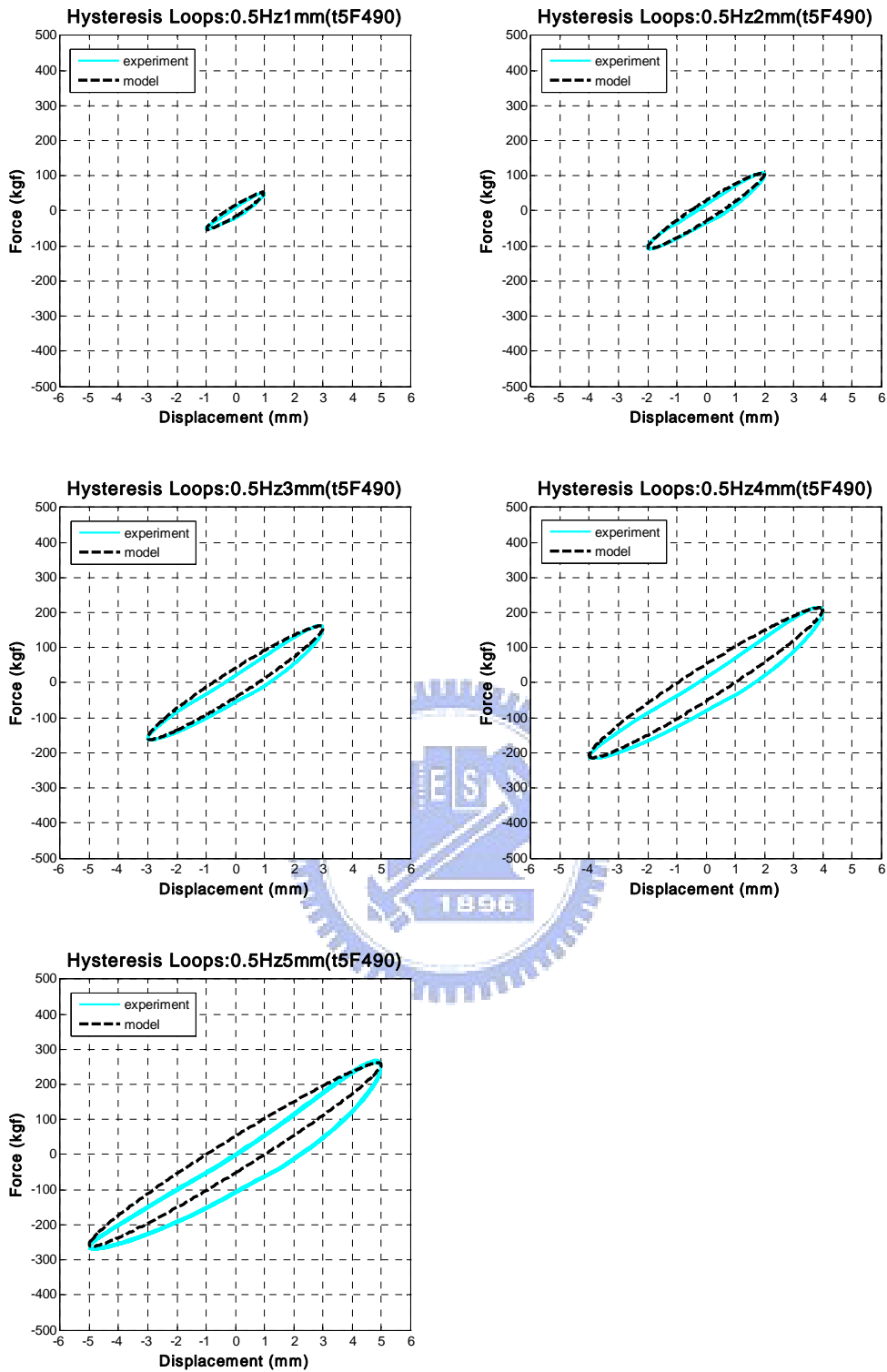


圖 4.13a t5F490 試體擾動頻率 0.5Hz 各振幅之遲滯迴圈

(Thickness : 5mm , Length : 490mm , B. C. : Fixed)

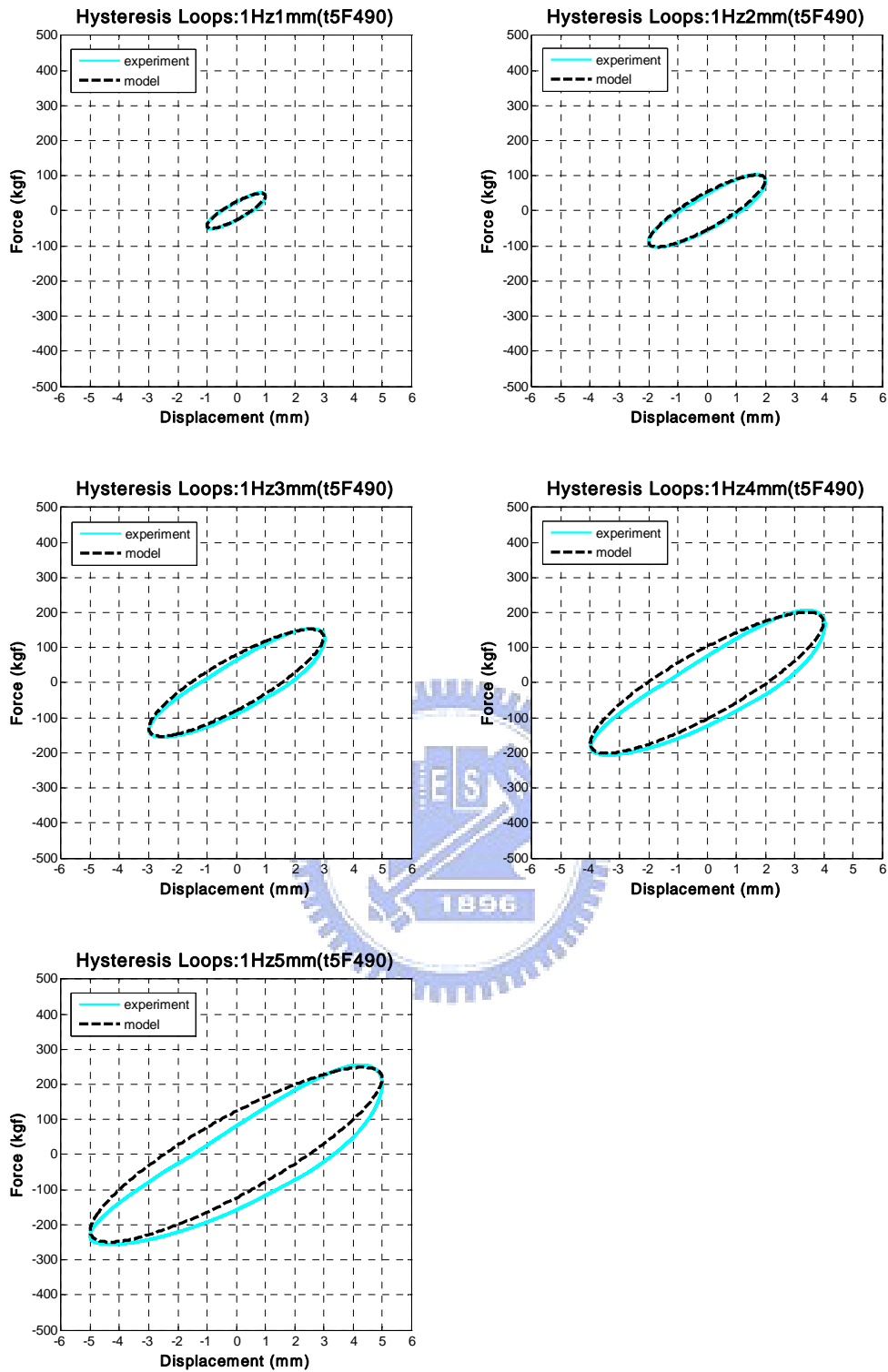


圖 4.13b t5F490 試體擾動頻率 1.0Hz 各振幅之遲滯迴圈

(Thickness : 5mm , Length : 490mm , B. C. : Fixed)

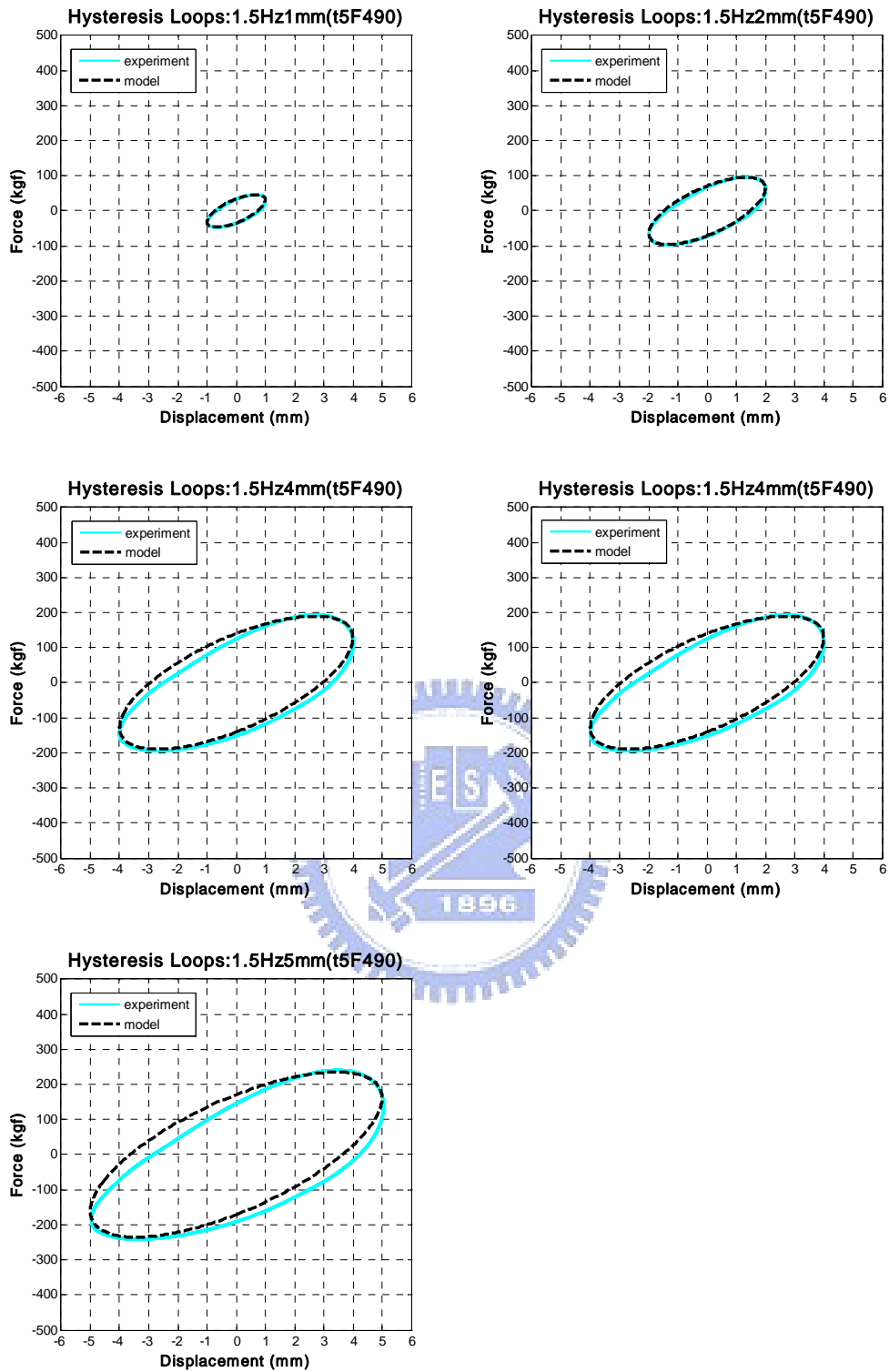


圖 4.13c t5F490 試體擾動頻率 1.5Hz 各振幅之遲滯迴圈

(Thickness : 5mm , Length : 490mm , B. C. : Fixed)

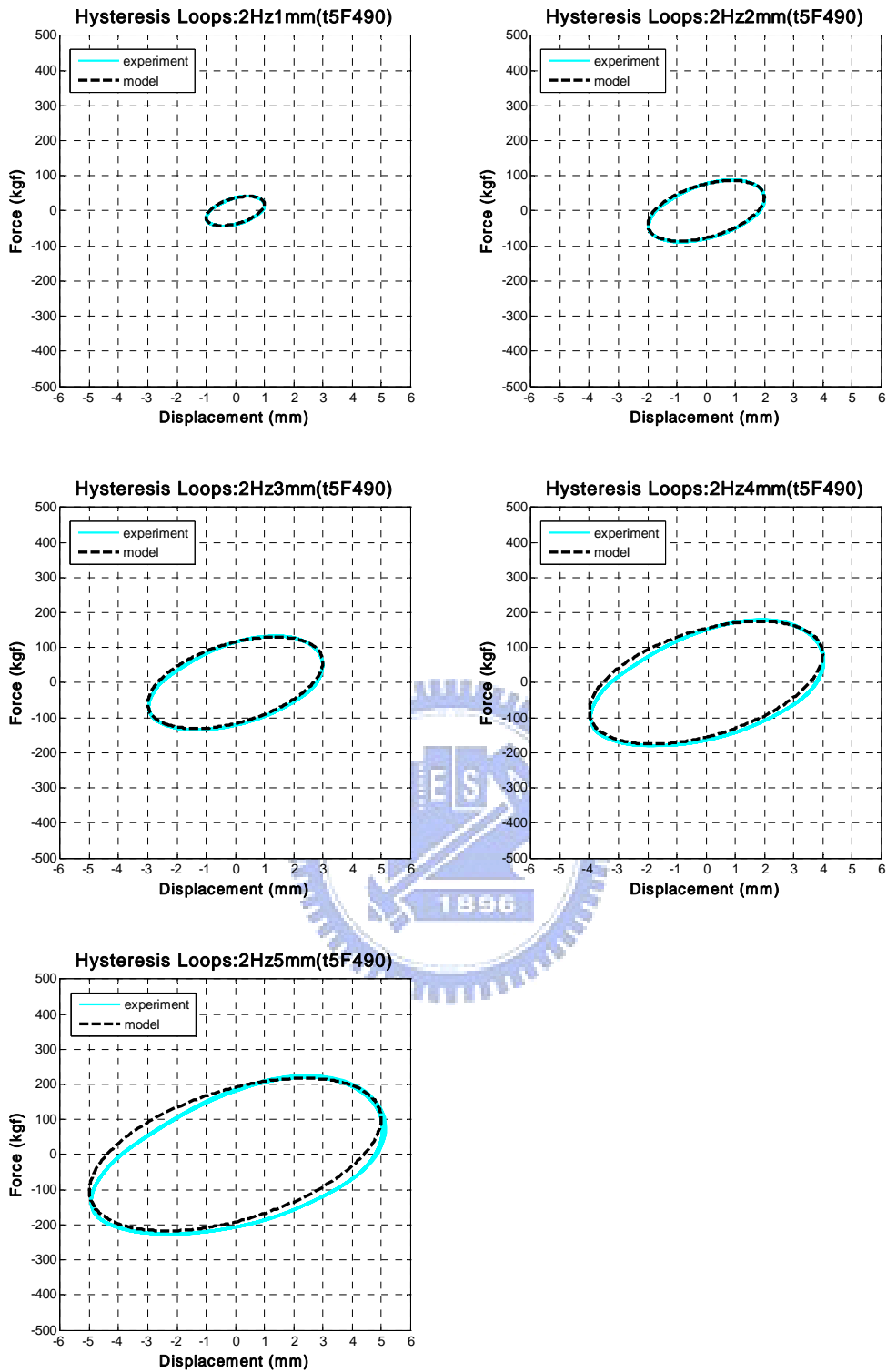


圖 4.13d t5F490 試體擾動頻率 2.0Hz 各振幅之遲滯迴圈

(Thickness : 5mm , Length : 490mm , B. C. : Fixed)

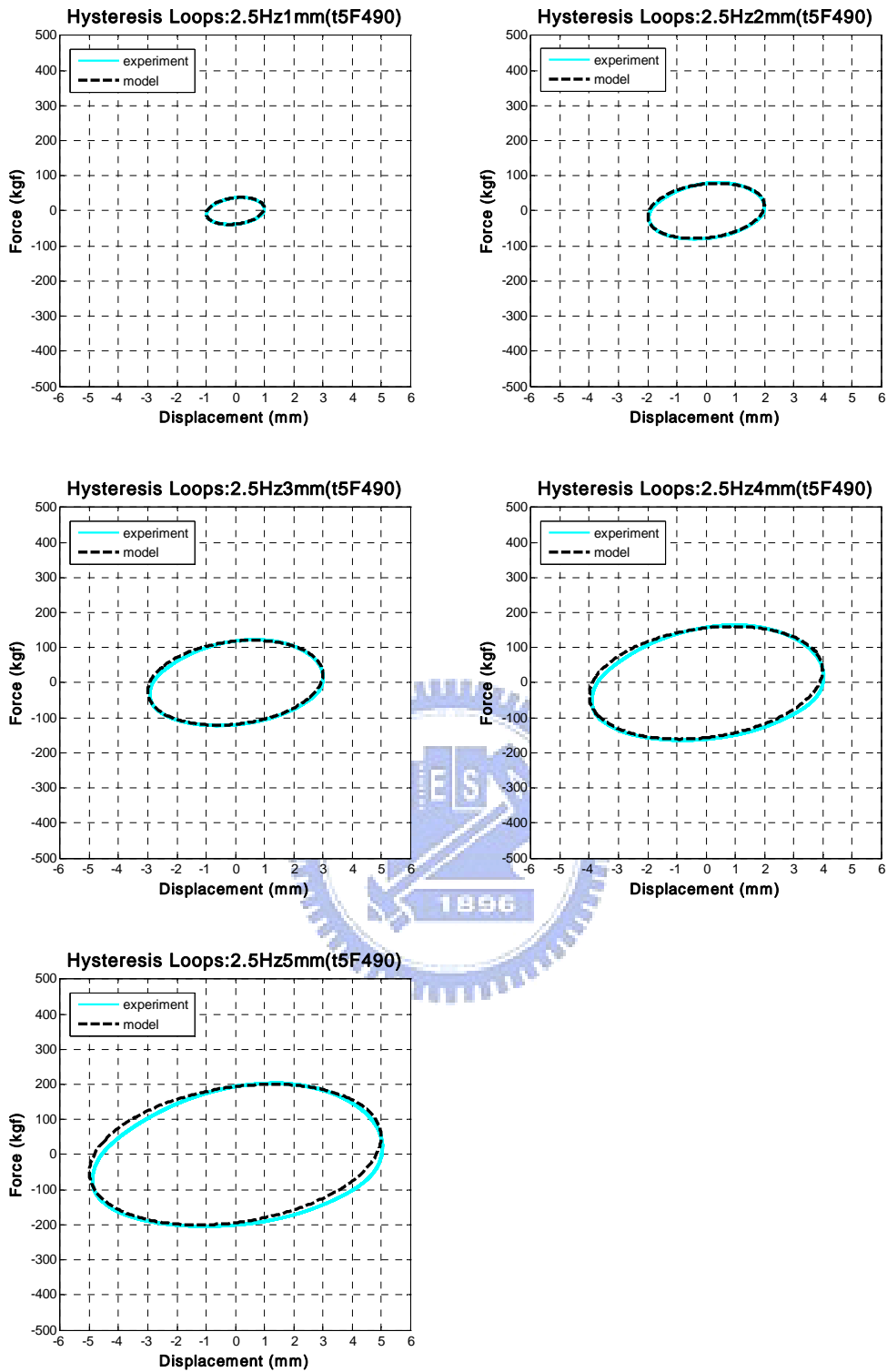


圖 4.13e t5F490 試體擾動頻率 2.5Hz 各振幅之遲滯迴圈

(Thickness : 5mm , Length : 490mm , B. C. : Fixed)

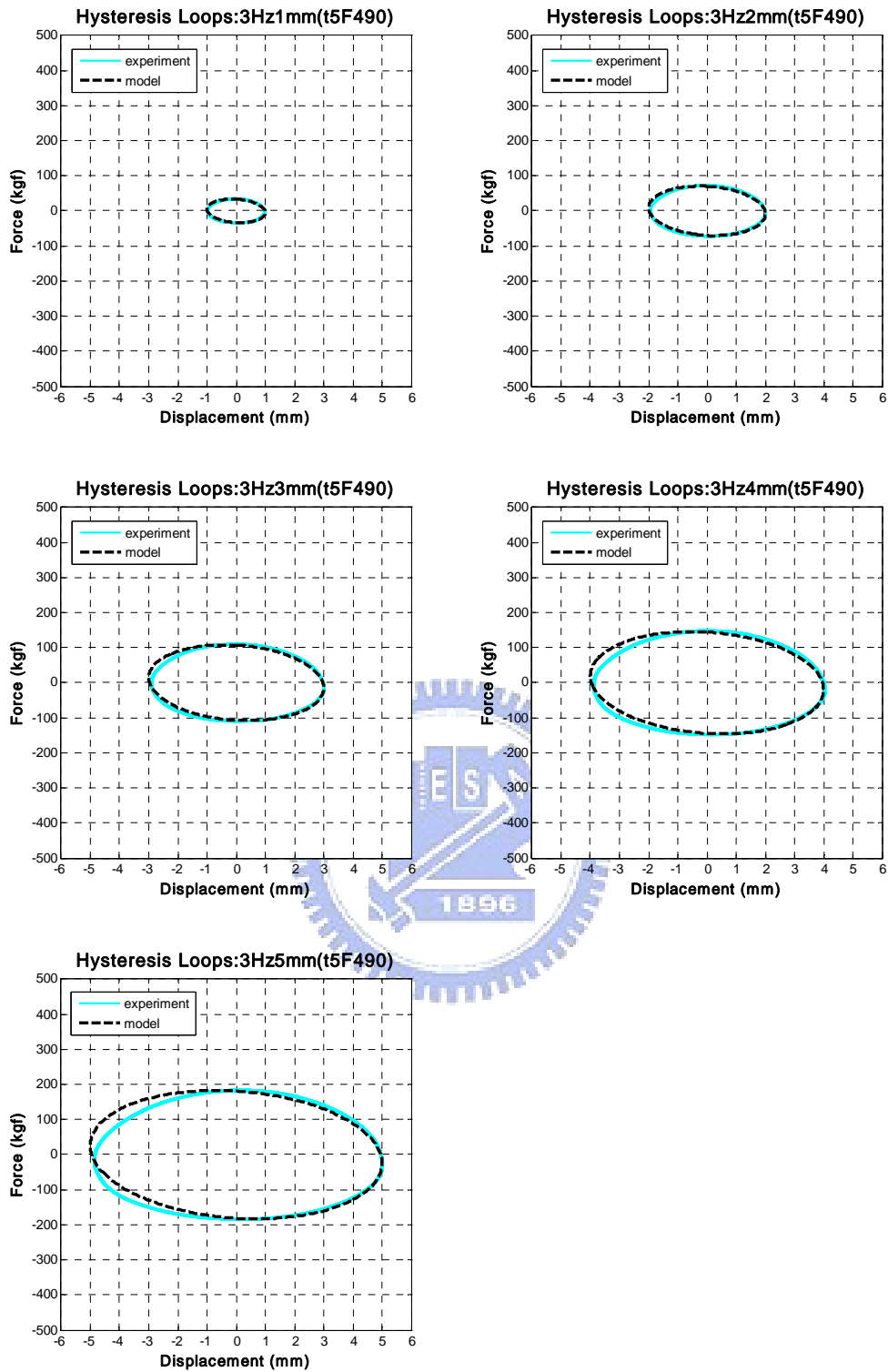


圖 4.13f t5F490 試體擾動頻率 3.0Hz 各振幅之遲滯迴圈

(Thickness : 5mm , Length : 490mm , B. C. : Fixed)

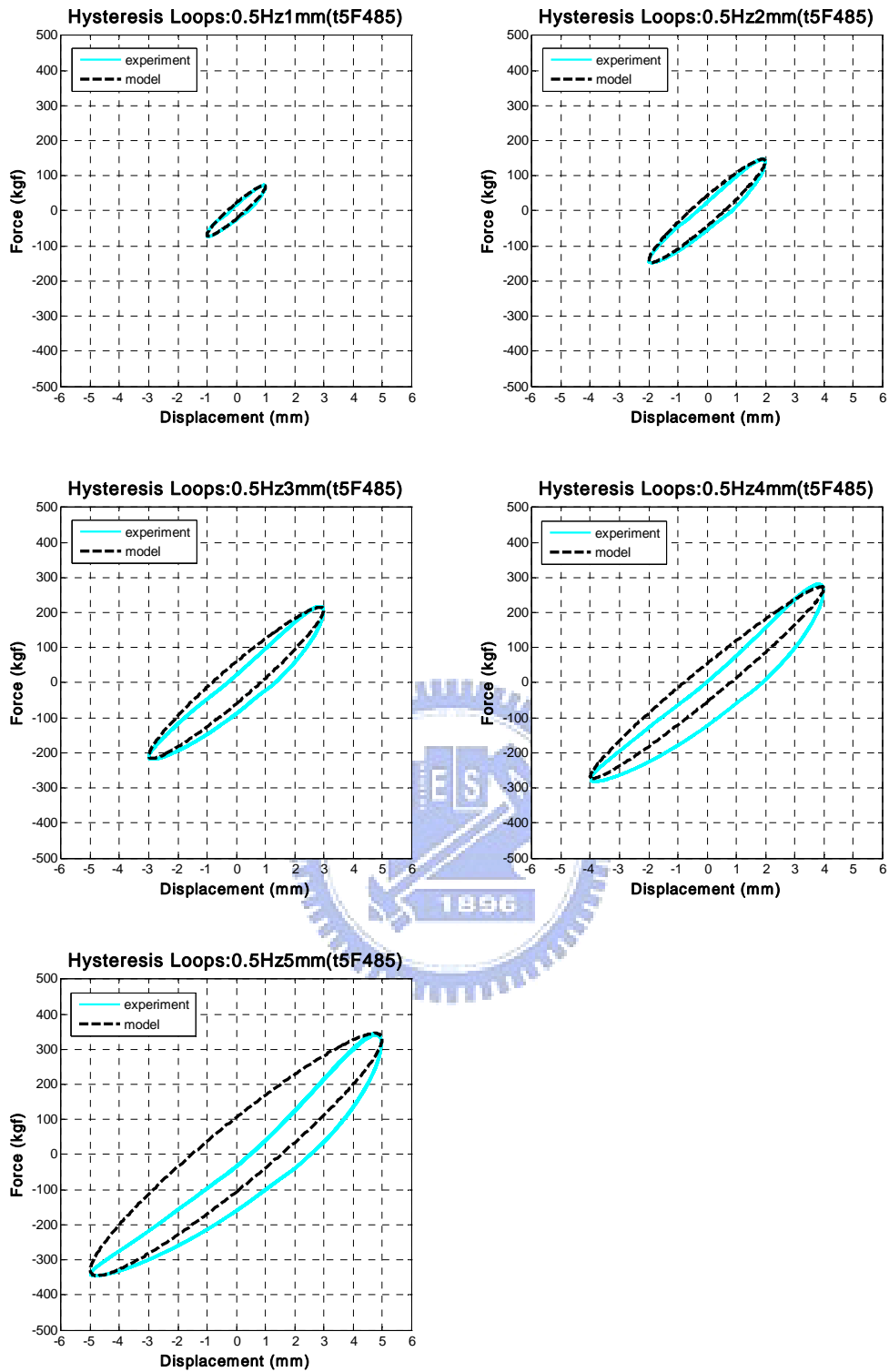


圖 4.14a t5F485 試體擾動頻率 0.5Hz 各振幅之遲滯迴圈

(Thickness : 5mm , Length : 485mm , B. C. : Fixed)

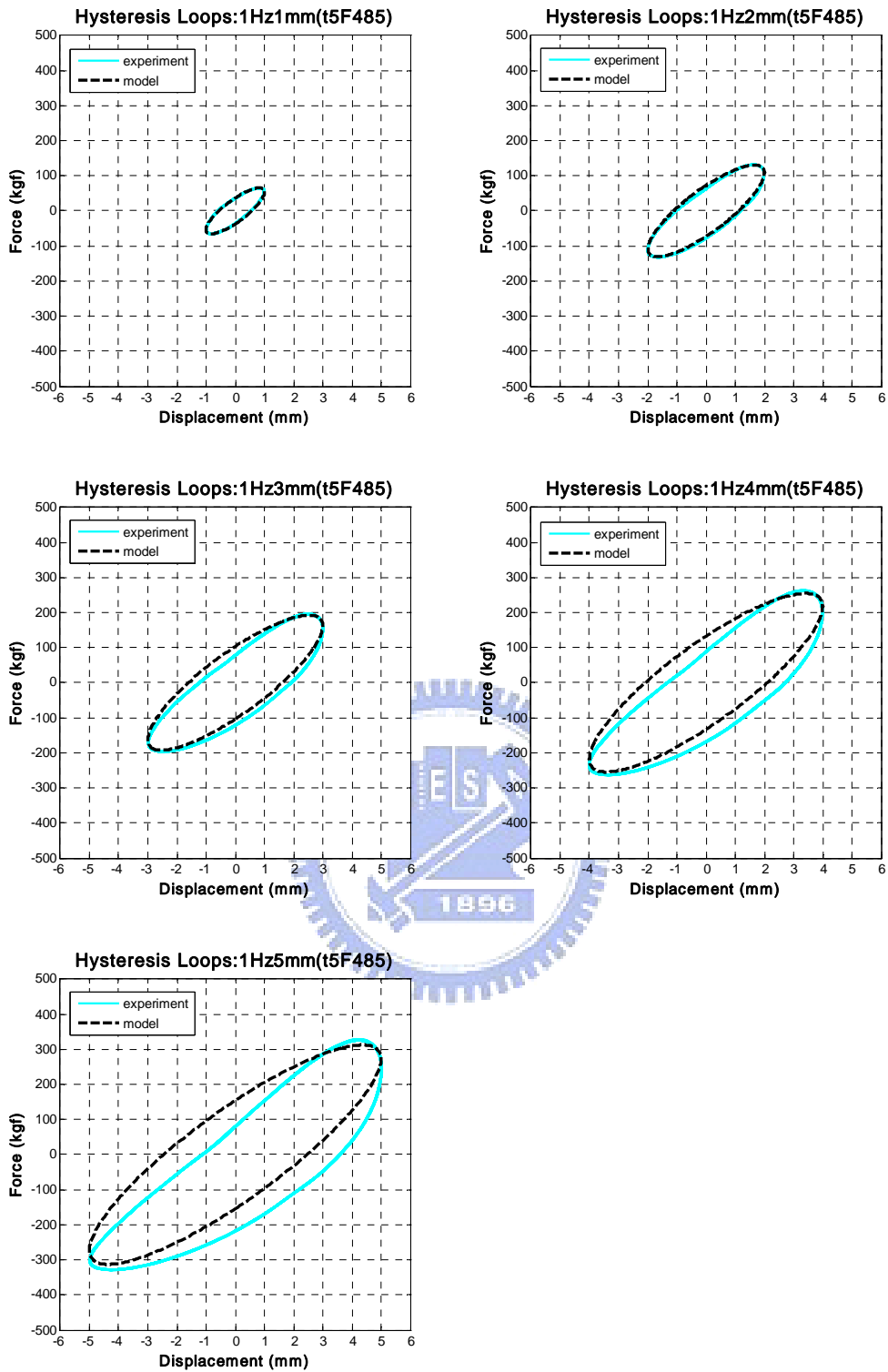


圖 4.14b t5F485 試體擾動頻率 1.0Hz 各振幅之遲滯迴圈

(Thickness : 5mm , Length : 485mm , B. C. : Fixed)

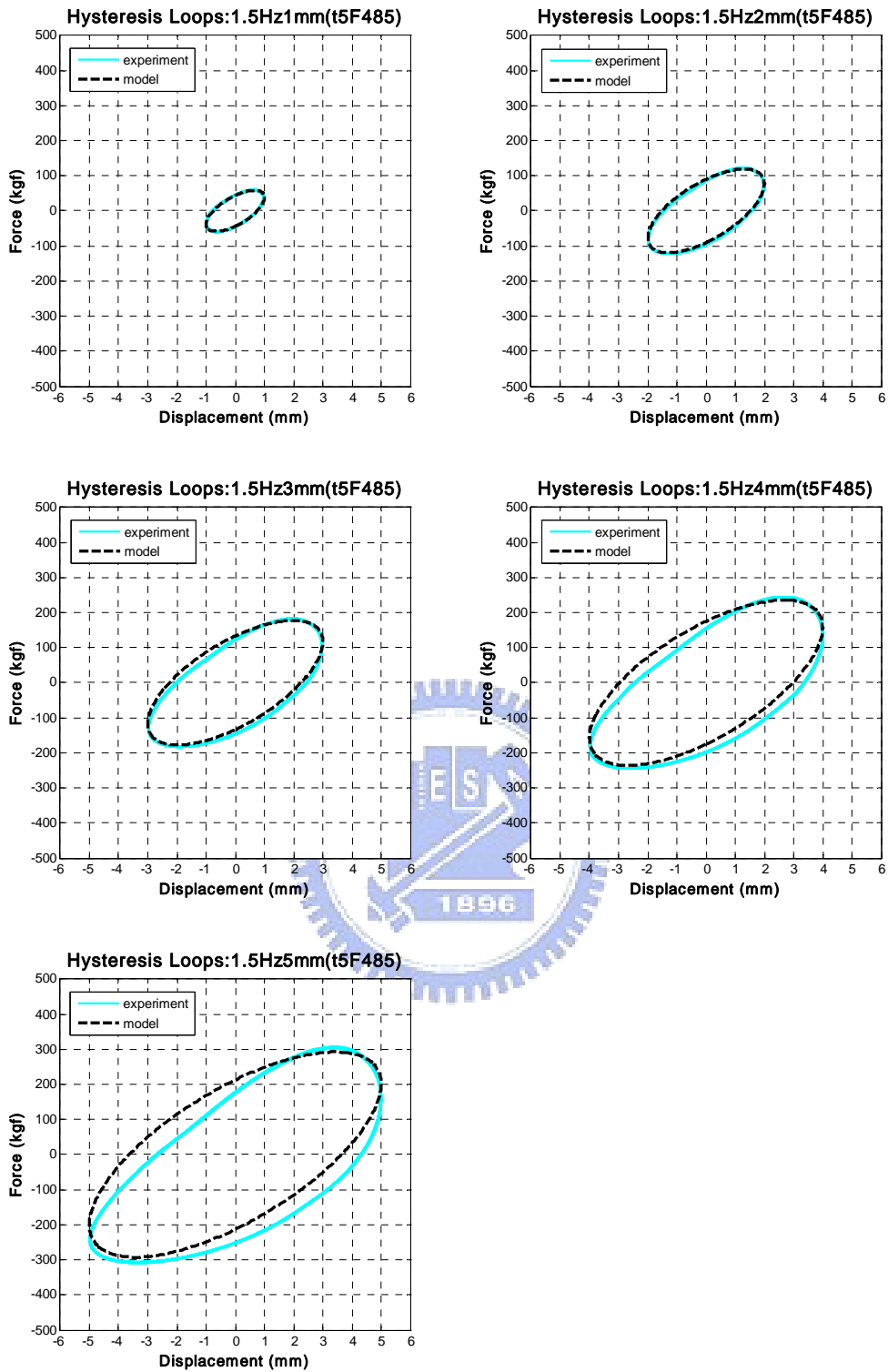


圖 4.14c t5F485 試體擾動頻率 1.5Hz 各振幅之遲滯迴圈

(Thickness : 5mm , Length : 485mm , B. C. : Fixed)

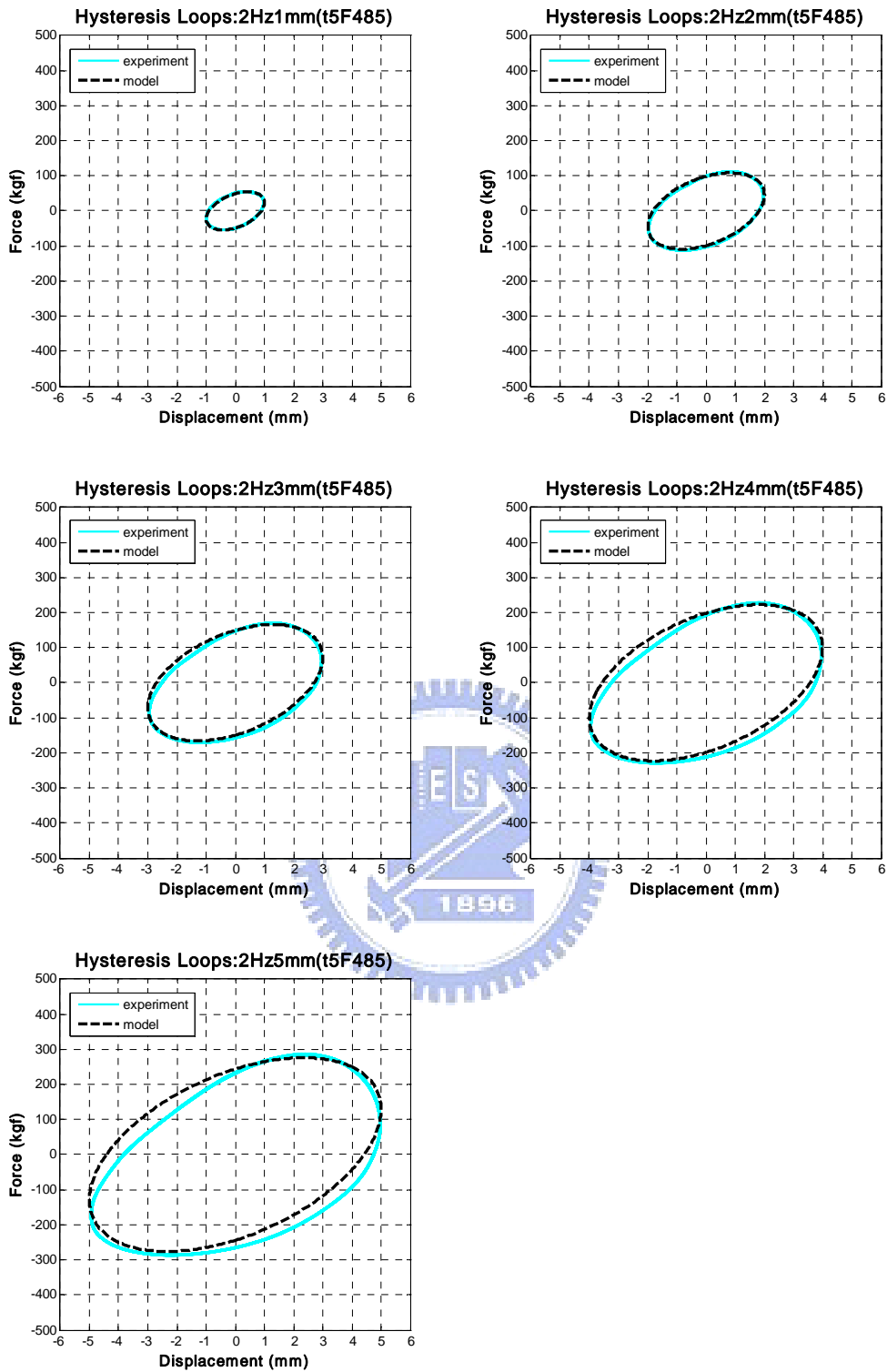


圖 4.14d t5F485 試體擾動頻率 2.0Hz 各振幅之遲滯迴圈

(Thickness : 5mm , Length : 485mm , B. C. : Fixed)

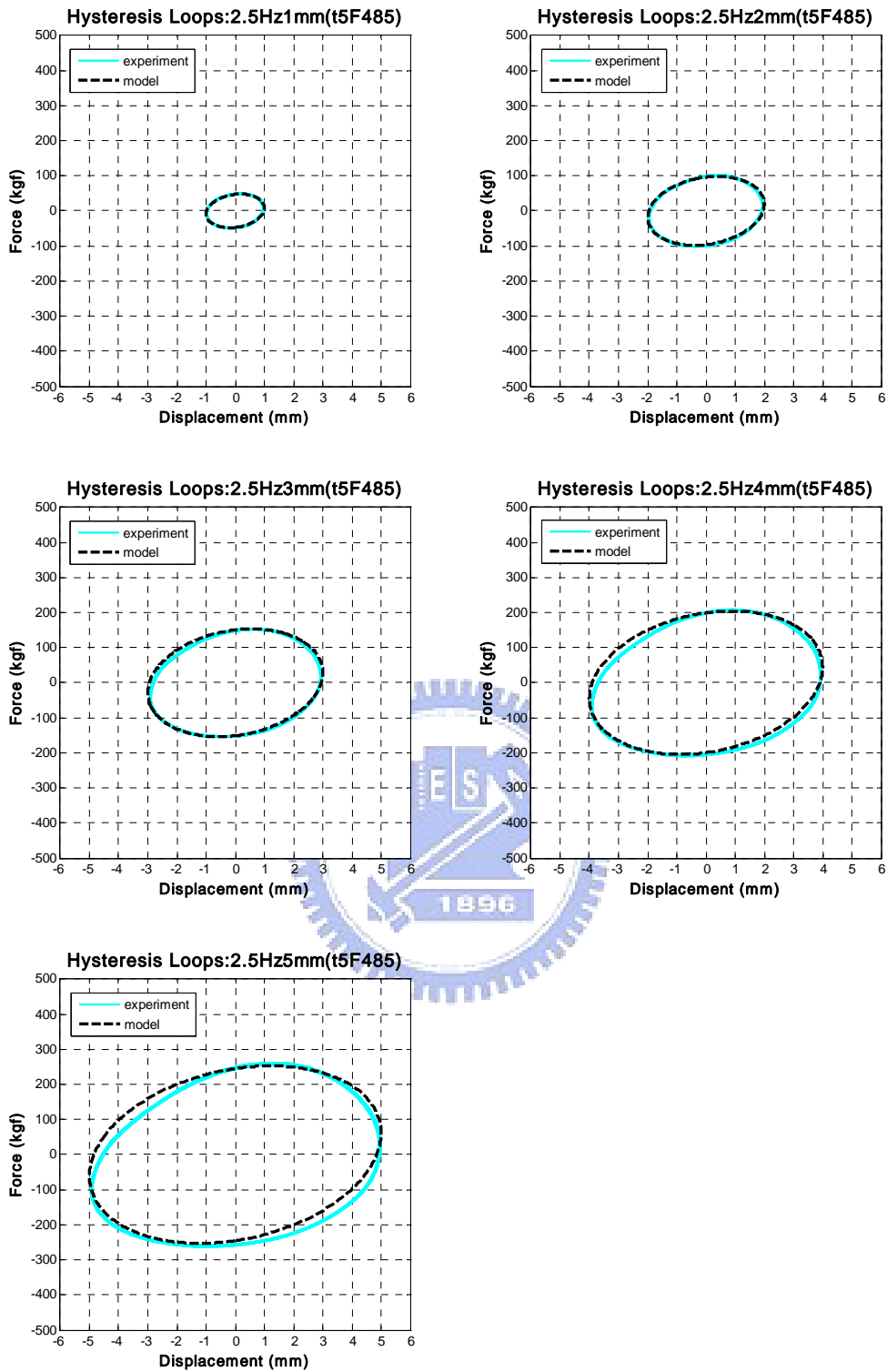


圖 4.14e t5F485 試體擾動頻率 2.5Hz 各振幅之遲滯迴圈

(Thickness : 5mm , Length : 485mm , B. C. : Fixed)

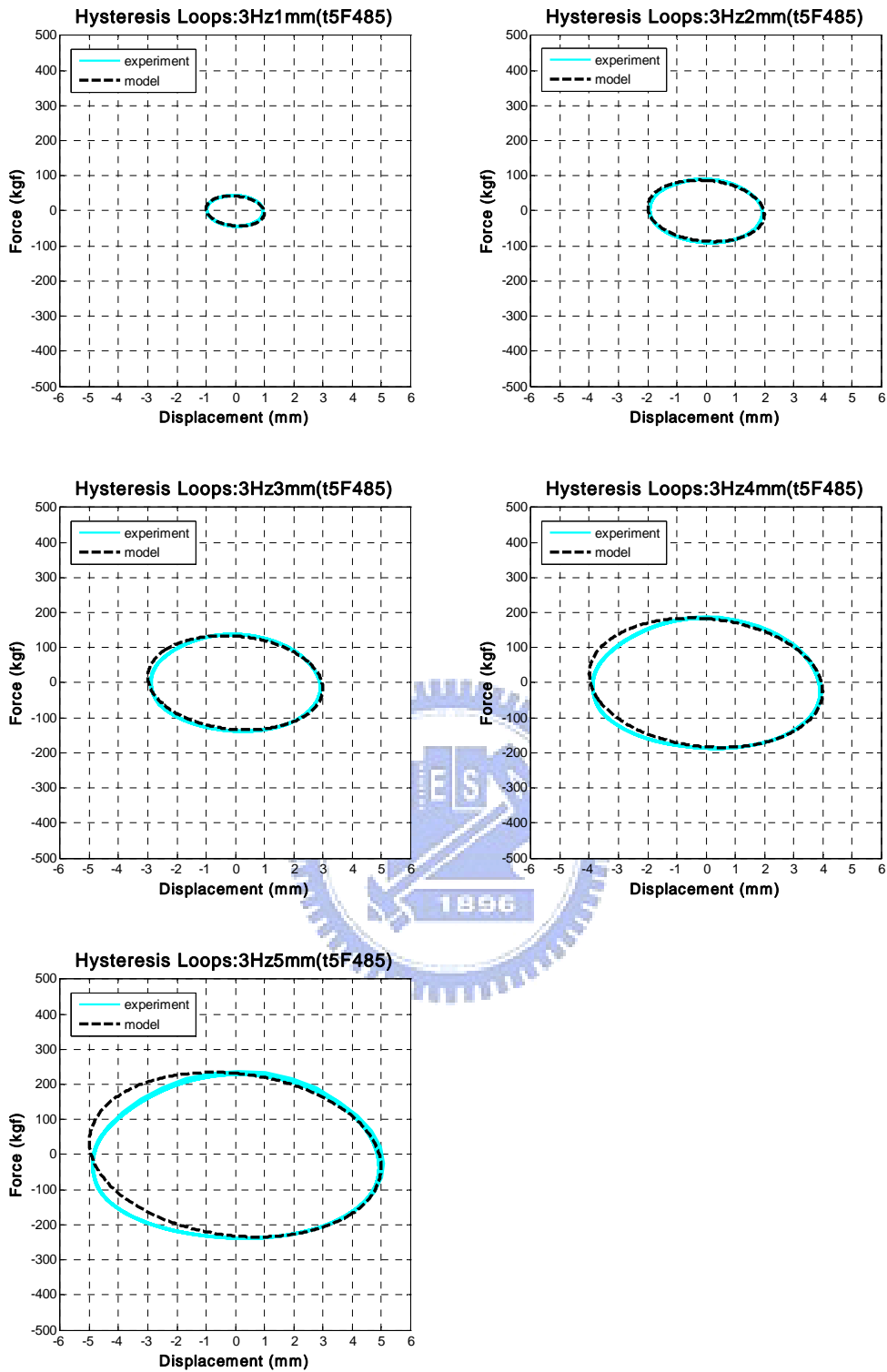


圖 4.14f t5F485 試體擾動頻率 3.0Hz 各振幅之遲滯迴圈

(Thickness : 5mm , Length : 485mm , B. C. : Fixed)

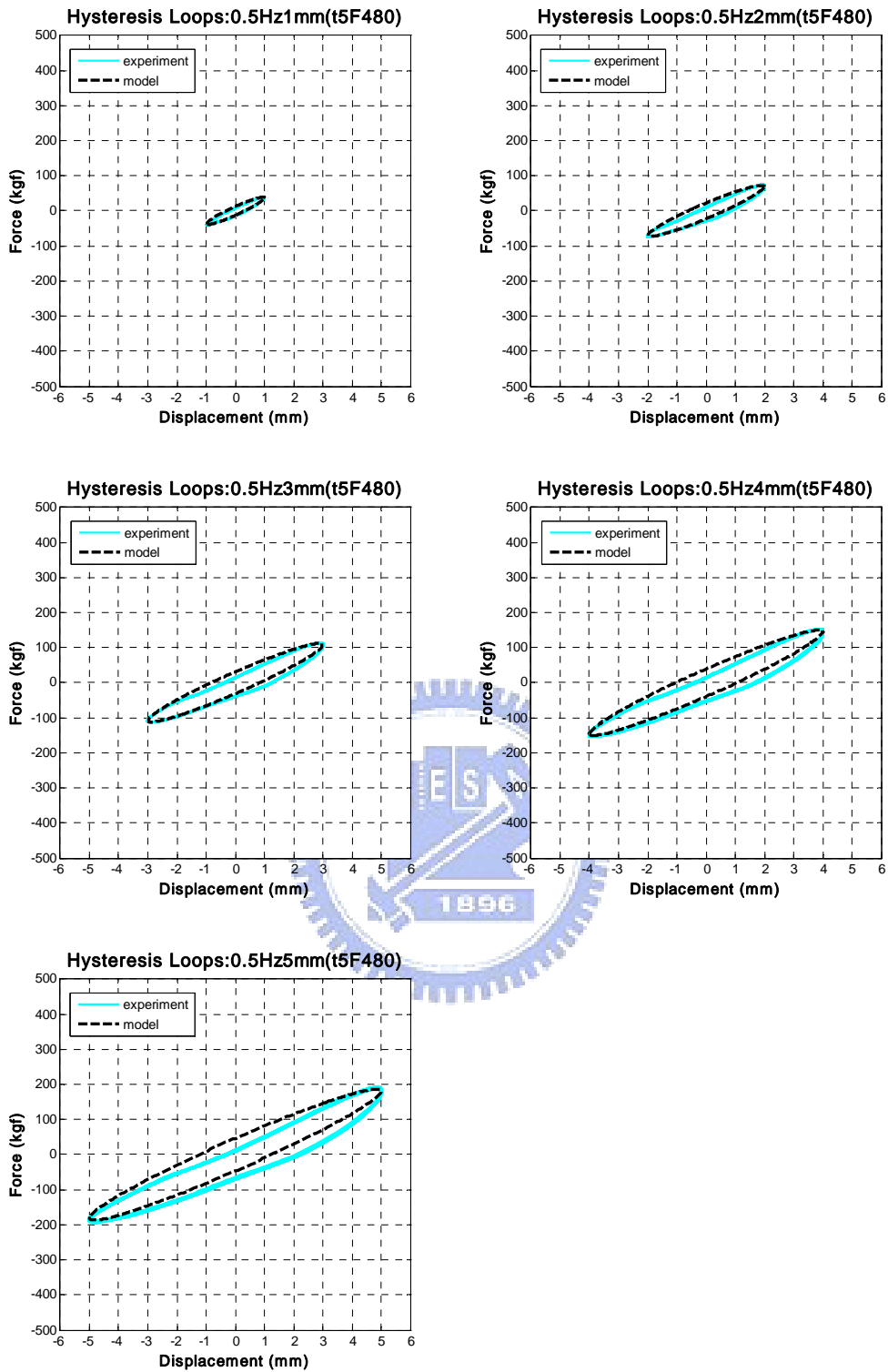


圖 4.15a t5F480 試體擾動頻率 0.5Hz 各振幅之遲滯迴圈

(Thickness : 5mm , Length : 480mm , B. C. : Fixed)

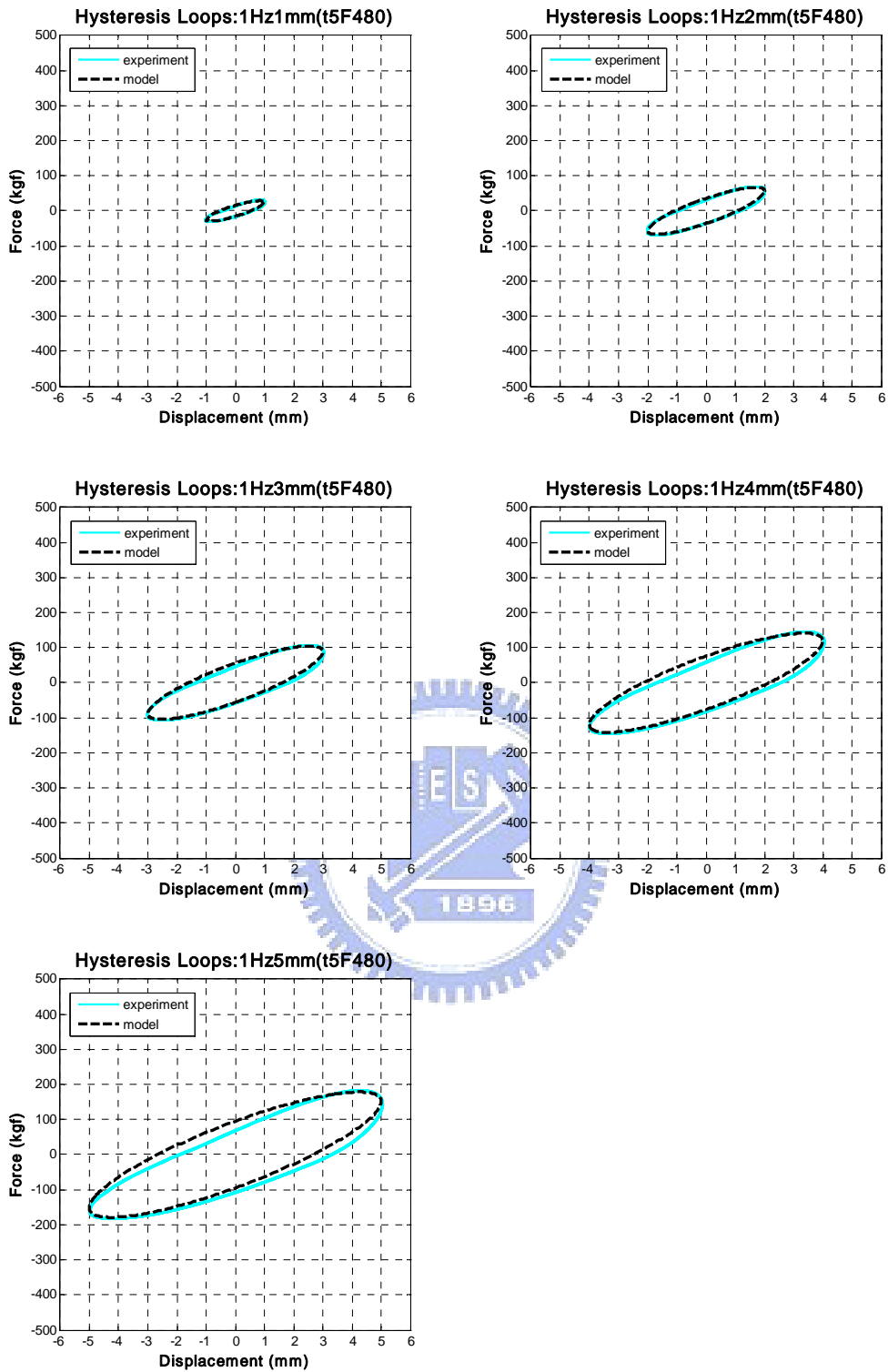


圖 4.15b $t5\text{F480}$ 試體擾動頻率 1.0Hz 各振幅之遲滯迴圈

(Thickness : 5mm , Length : 480mm , B. C. : Fixed)

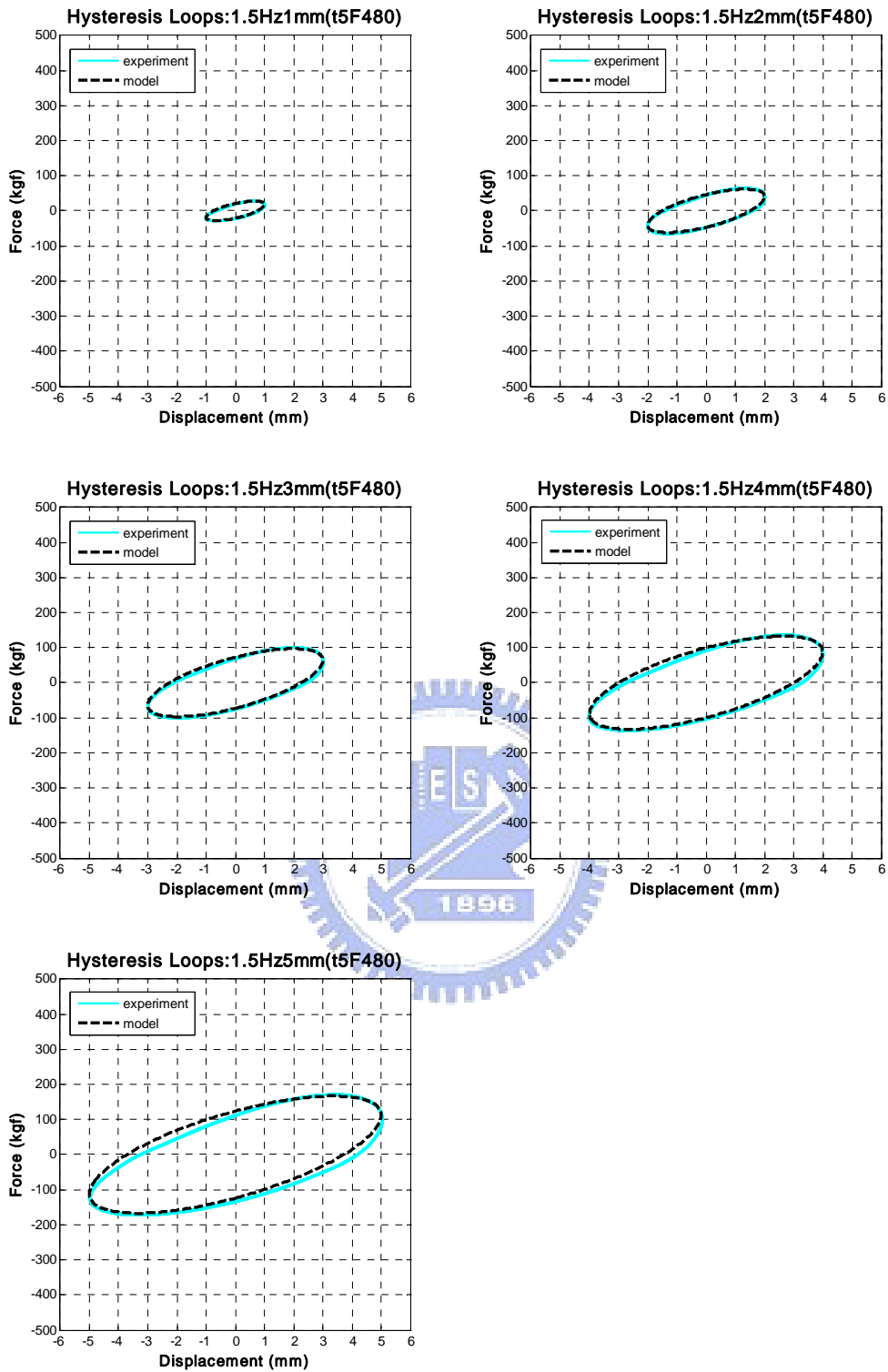


圖 4.15c t5F480 試體擾動頻率 1.5Hz 各振幅之遲滯迴圈

(Thickness : 5mm , Length : 480mm , B. C. : Fixed)

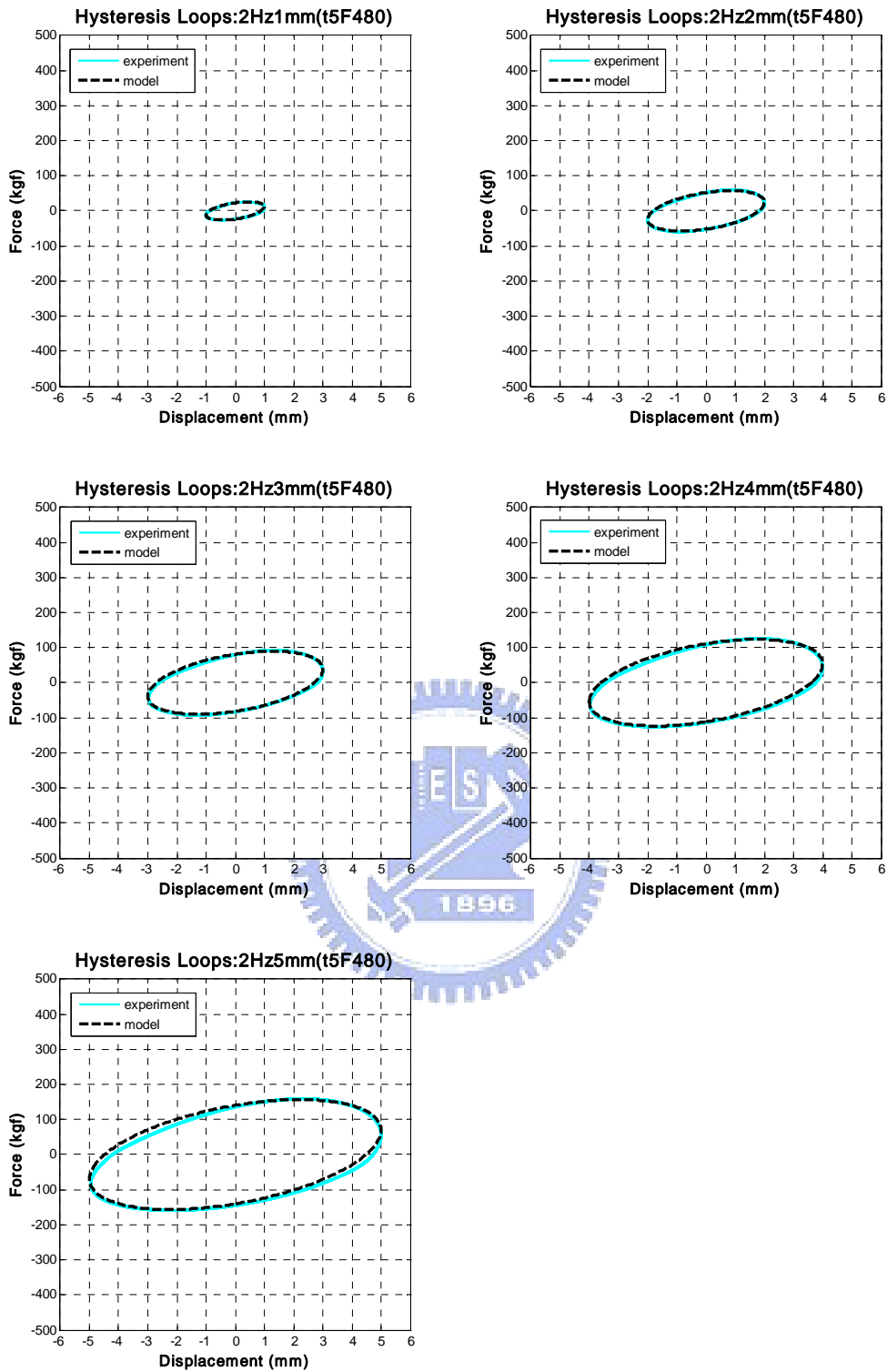


圖 4.15d t5F480 試體擾動頻率 2.0Hz 各振幅之遲滯迴圈

(Thickness : 5mm , Length : 480mm , B. C. : Fixed)

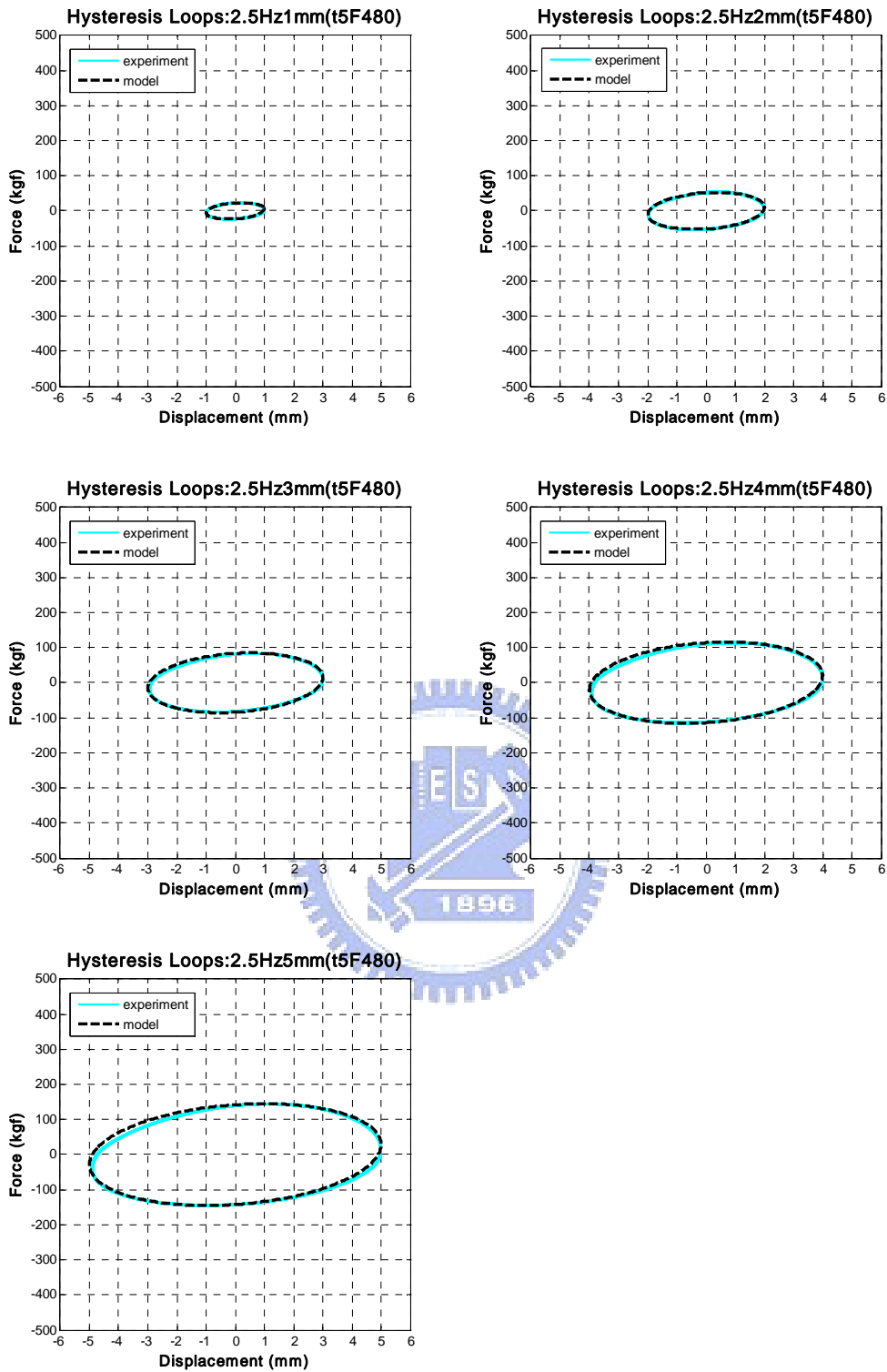


圖 4.15e t5F480 試體擾動頻率 2.5Hz 各振幅之遲滯迴圈

(Thickness : 5mm , Length : 480mm , B. C. : Fixed)

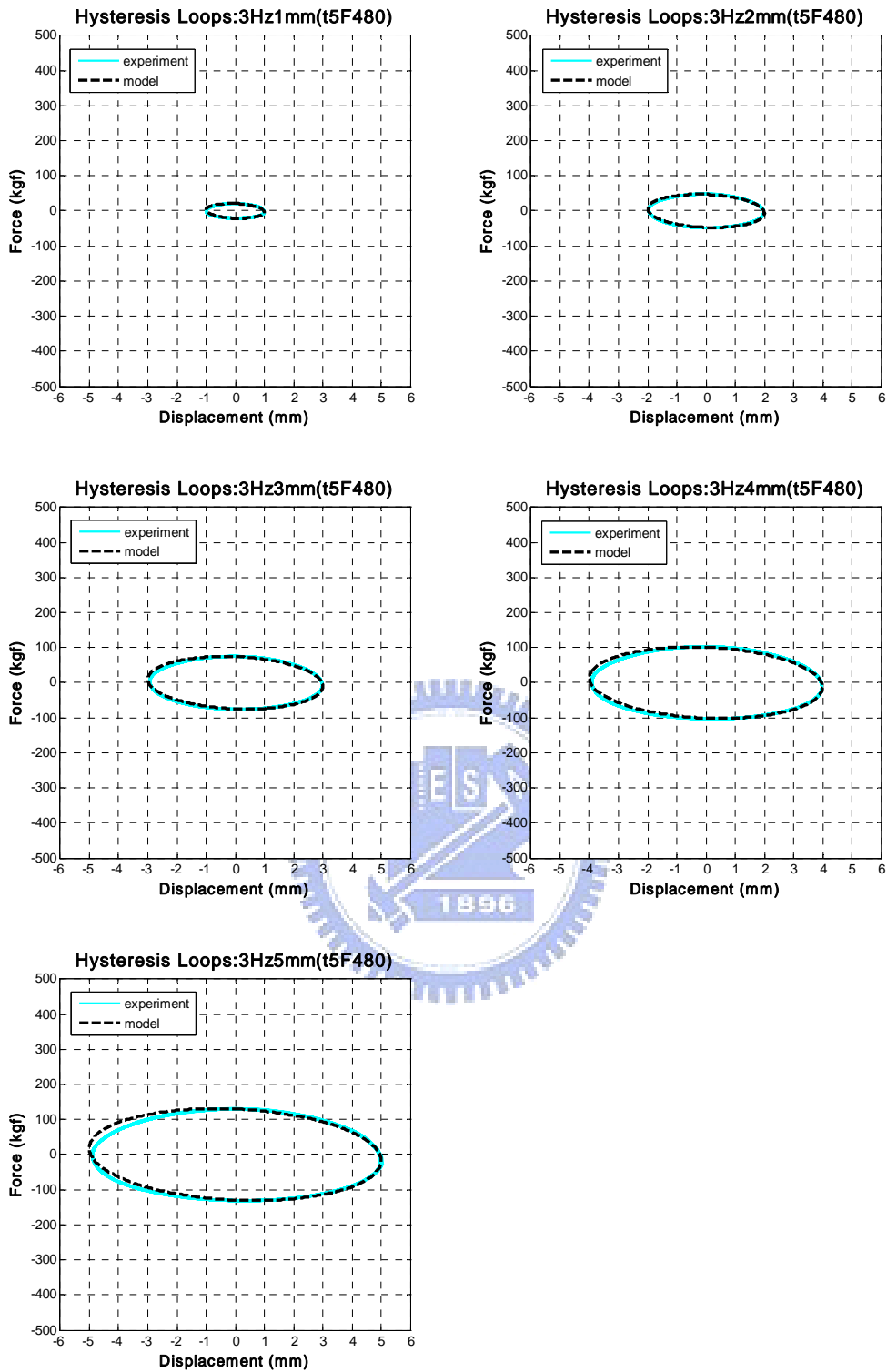


圖 4.15f t5F480 試體擾動頻率 3.0Hz 各振幅之遲滯迴圈

(Thickness : 5mm , Length : 480mm , B. C. : Fixed)

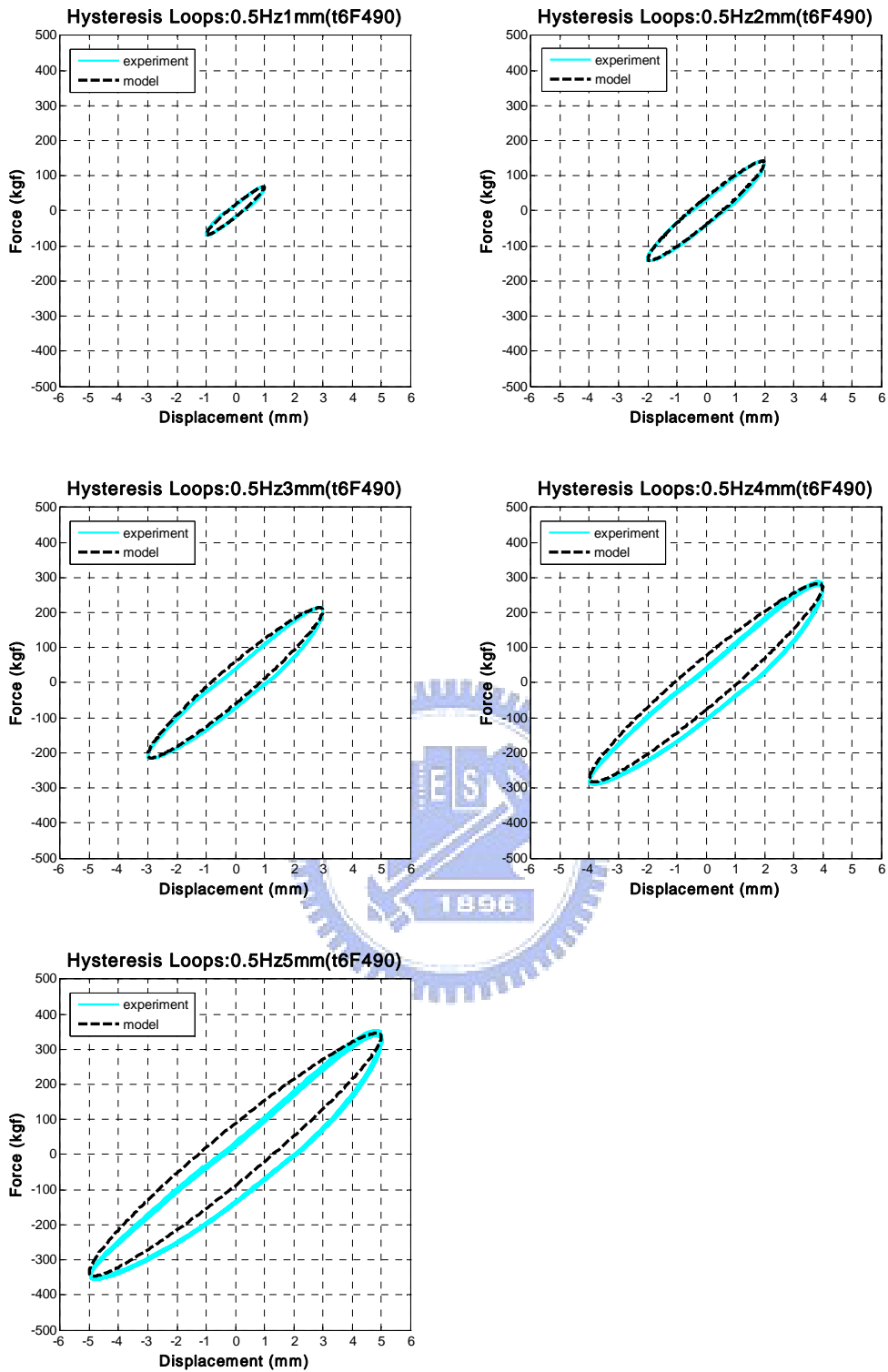


圖 4.16a t6F490 試體擾動頻率 0.5Hz 各振幅之遲滯迴圈

(Thickness : 6mm , Length : 490mm , B. C. : Fixed)

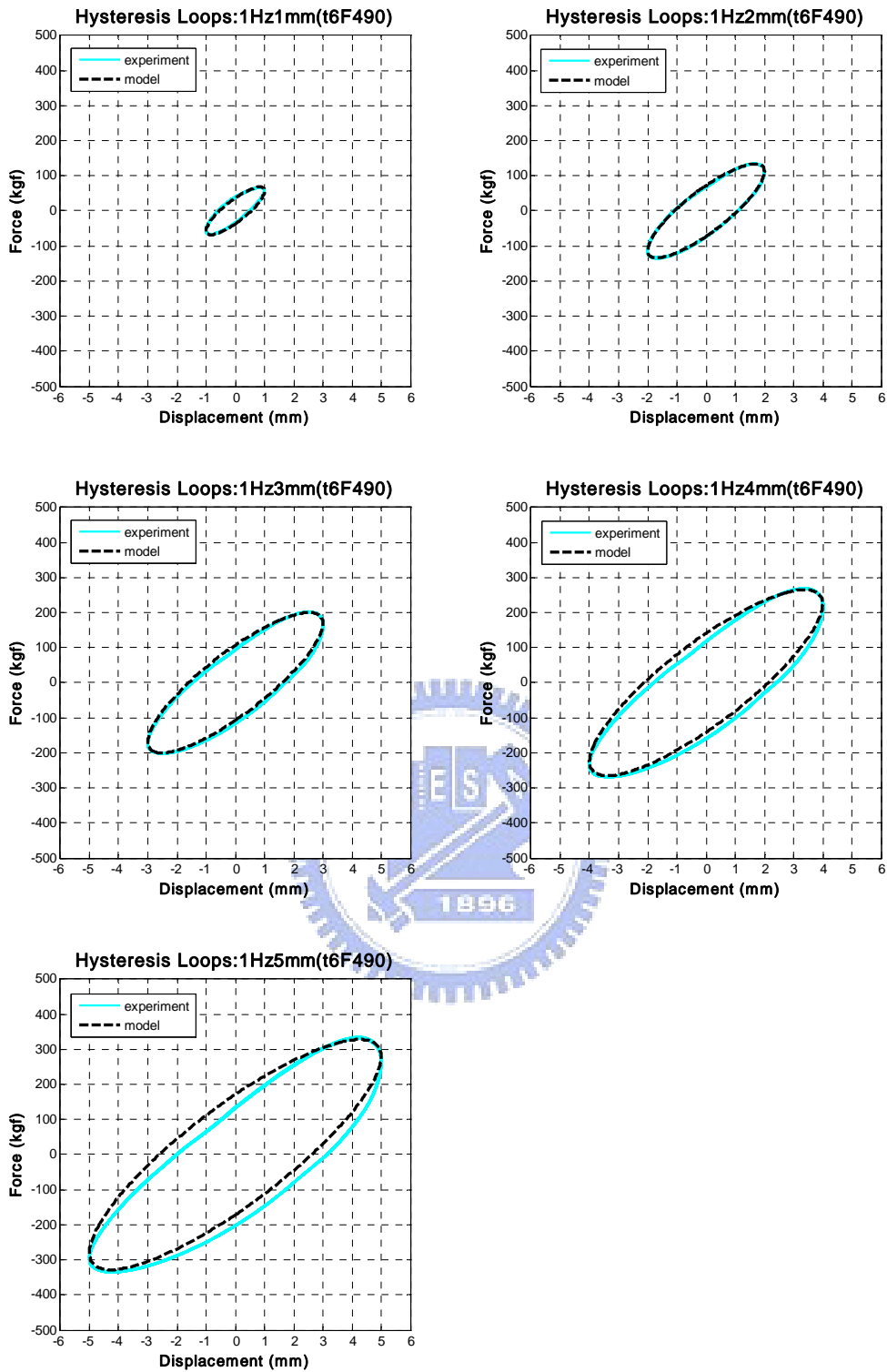


圖 4.16b t6F490 試體擾動頻率 1.0Hz 各振幅之遲滯迴圈

(Thickness : 6mm , Length : 490mm , B. C. : Fixed)

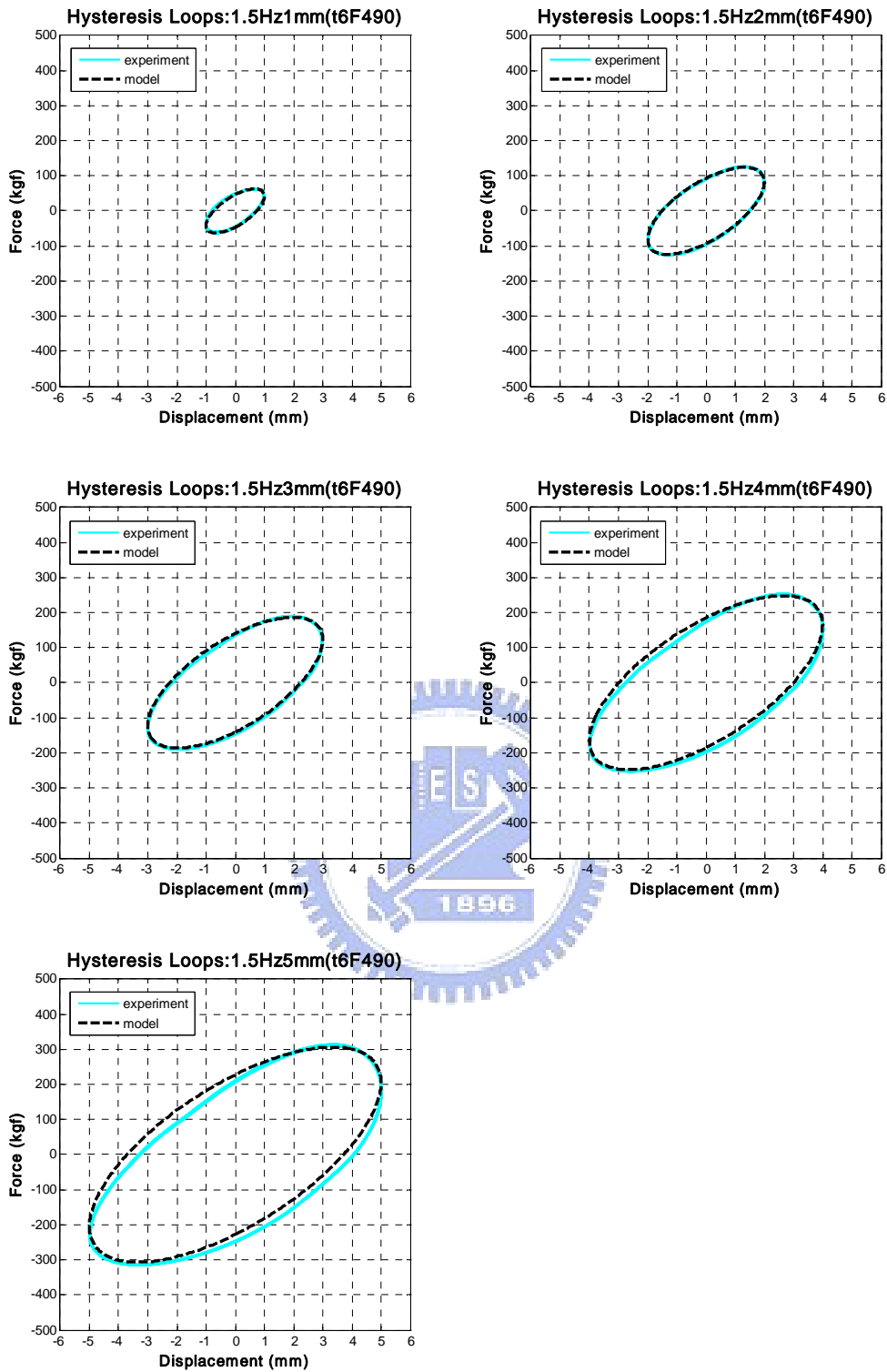


圖 4.16c t6F490 試體擾動頻率 1.5Hz 各振幅之遲滯迴圈

(Thickness : 6mm , Length : 490mm , B. C. : Fixed)

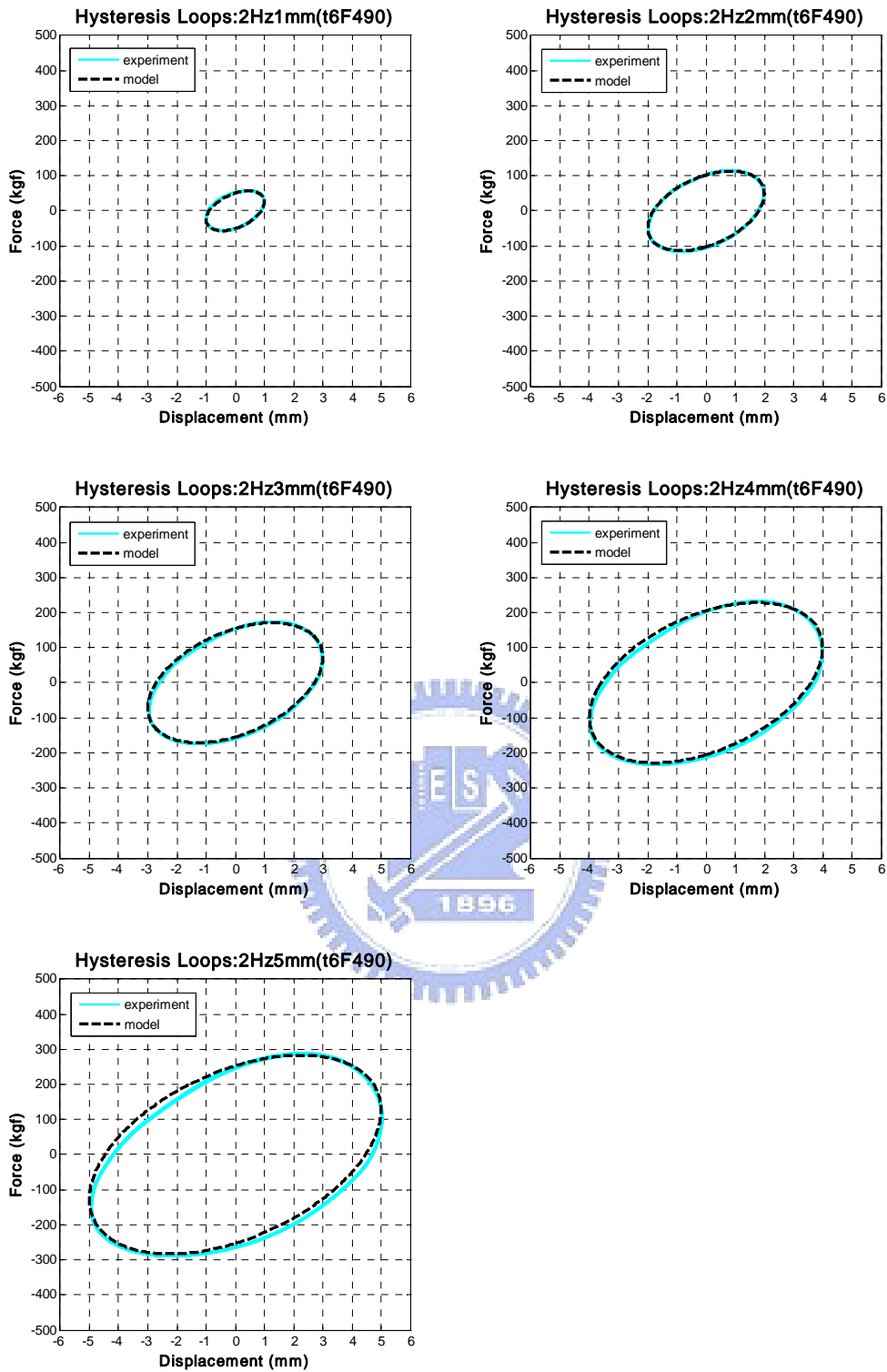


圖 4.16d t6F490 試體擾動頻率 2.0Hz 各振幅之遲滯迴圈

(Thickness : 6mm , Length : 490mm , B. C. : Fixed)

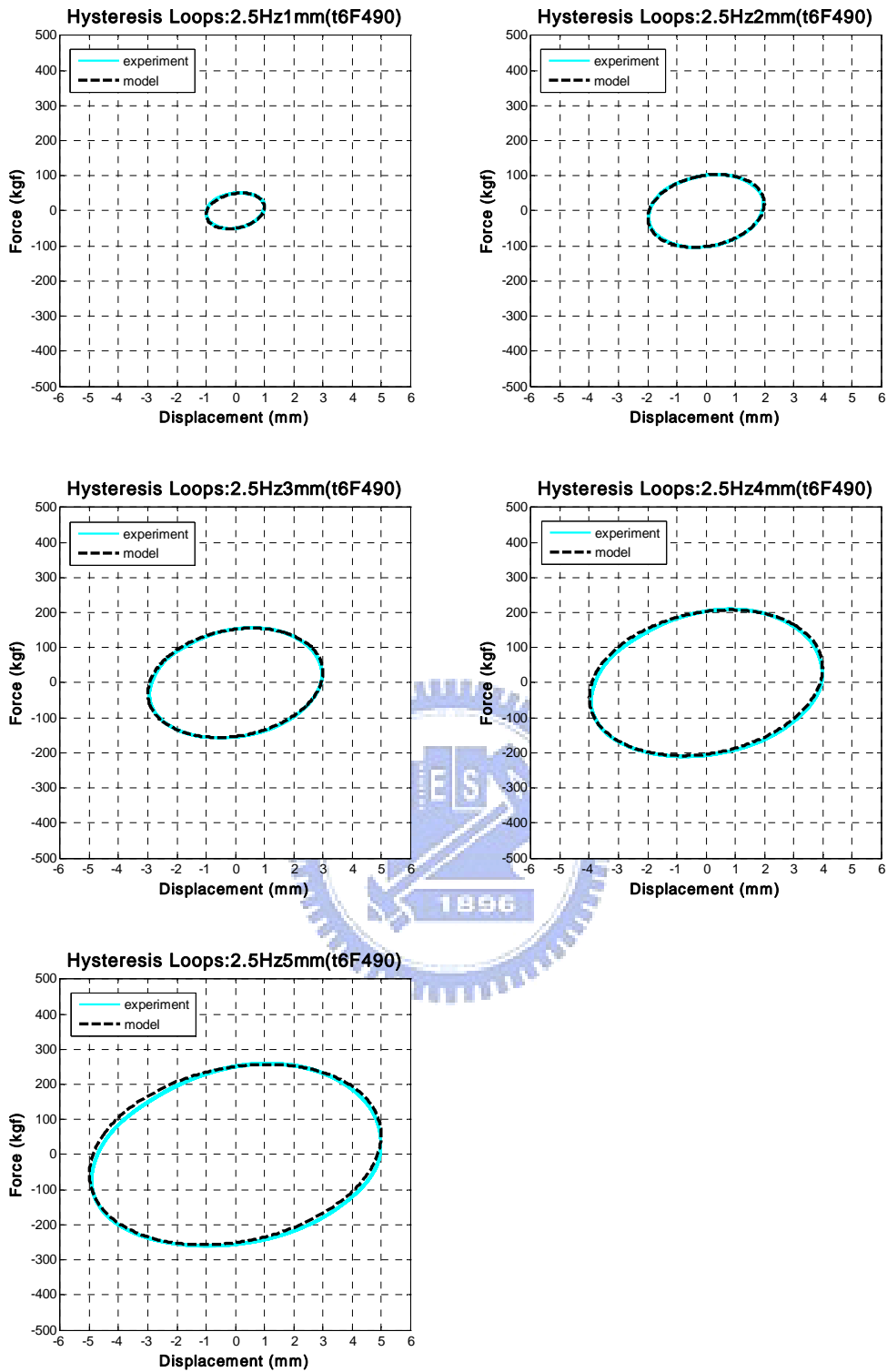


圖 4.16e t6F490 試體擾動頻率 2.5Hz 各振幅之遲滯迴圈

(Thickness : 6mm , Length : 490mm , B. C. : Fixed)

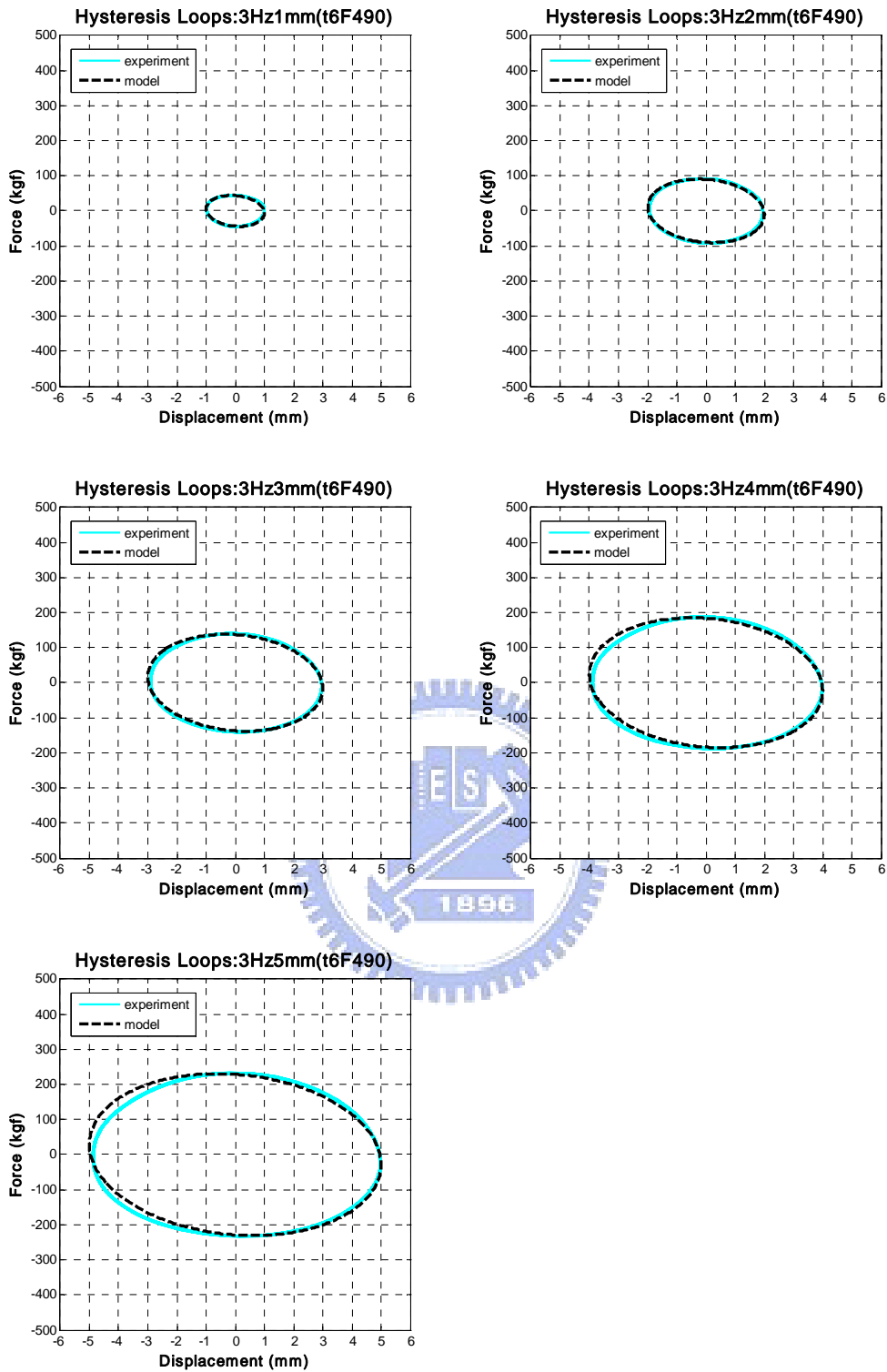


圖 4.16f t6F490 試體擾動頻率 3.0Hz 各振幅之遲滯迴圈

(Thickness : 6mm , Length : 490mm , B. C. : Fixed)

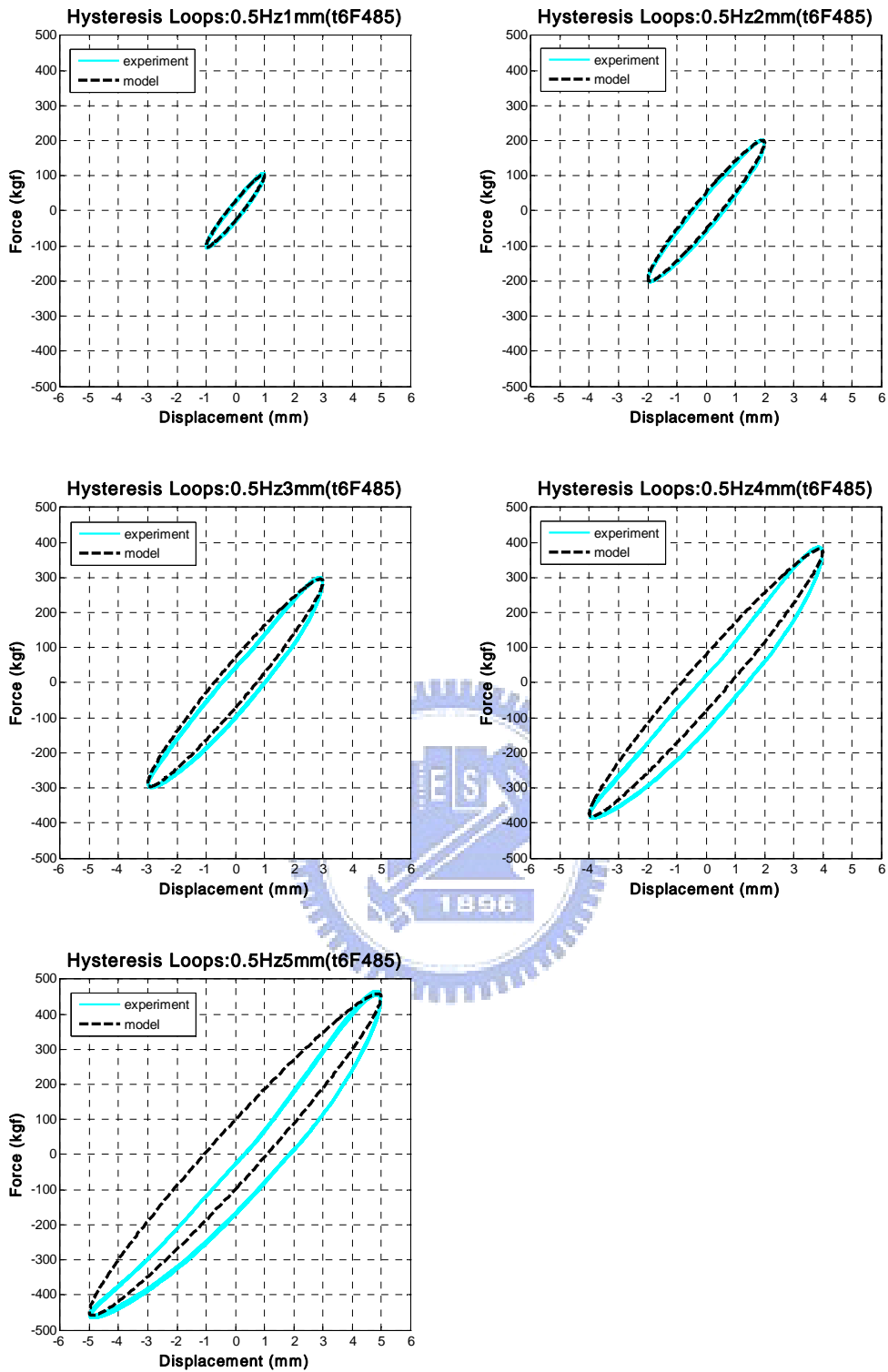


圖 4.17a t6F485 試體擾動頻率 0.5Hz 各振幅之遲滯迴圈

(Thickness : 6mm , Length : 485mm , B. C. : Fixed)

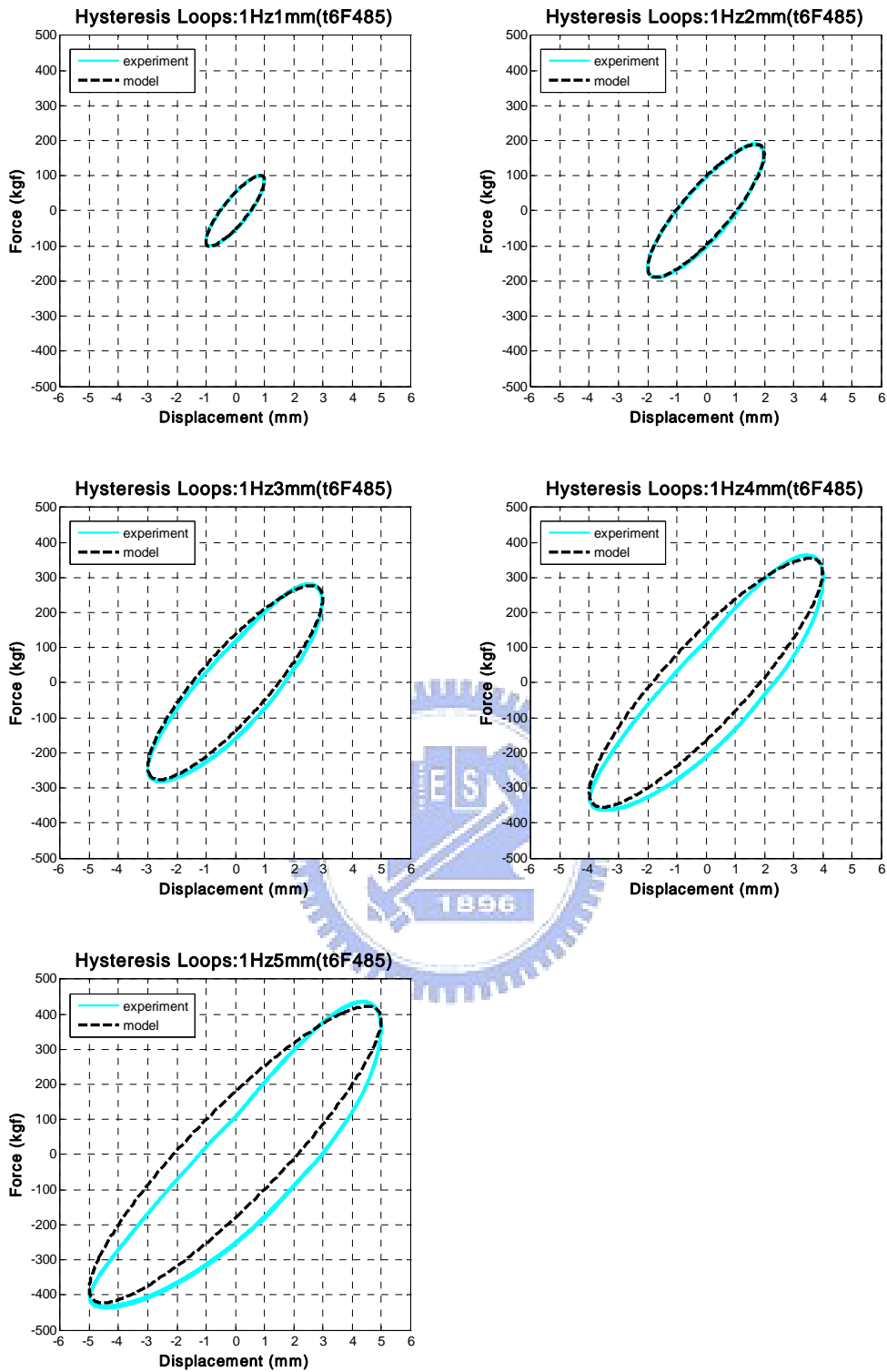


圖 4.17b t6F485 試體擾動頻率 1.0Hz 各振幅之遲滯迴圈

(Thickness : 6mm , Length : 485mm , B. C. : Fixed)

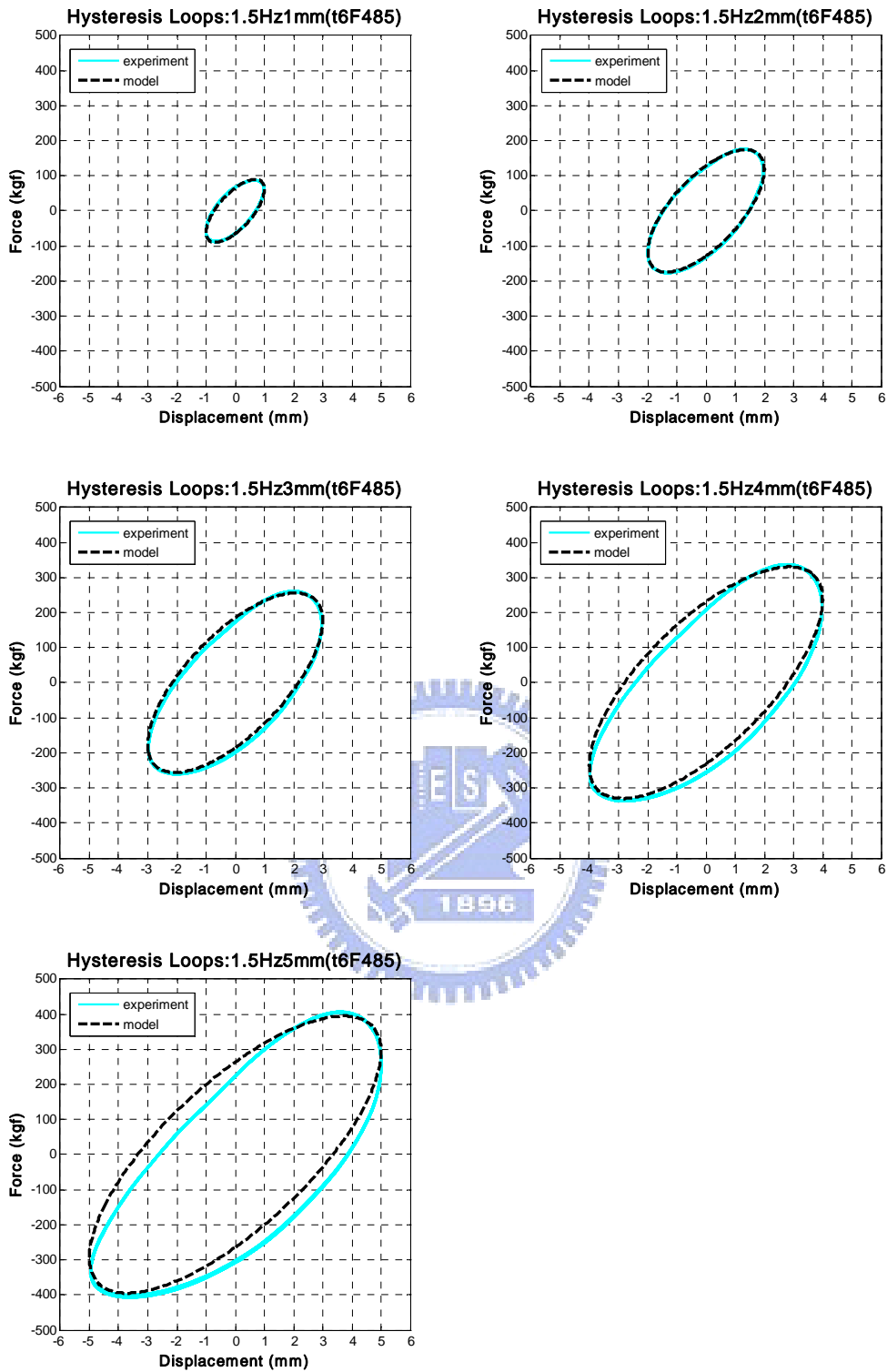


圖 4.17c t6F485 試體擾動頻率 1.5Hz 各振幅之遲滯迴圈

(Thickness : 6mm , Length : 485mm , B. C. : Fixed)

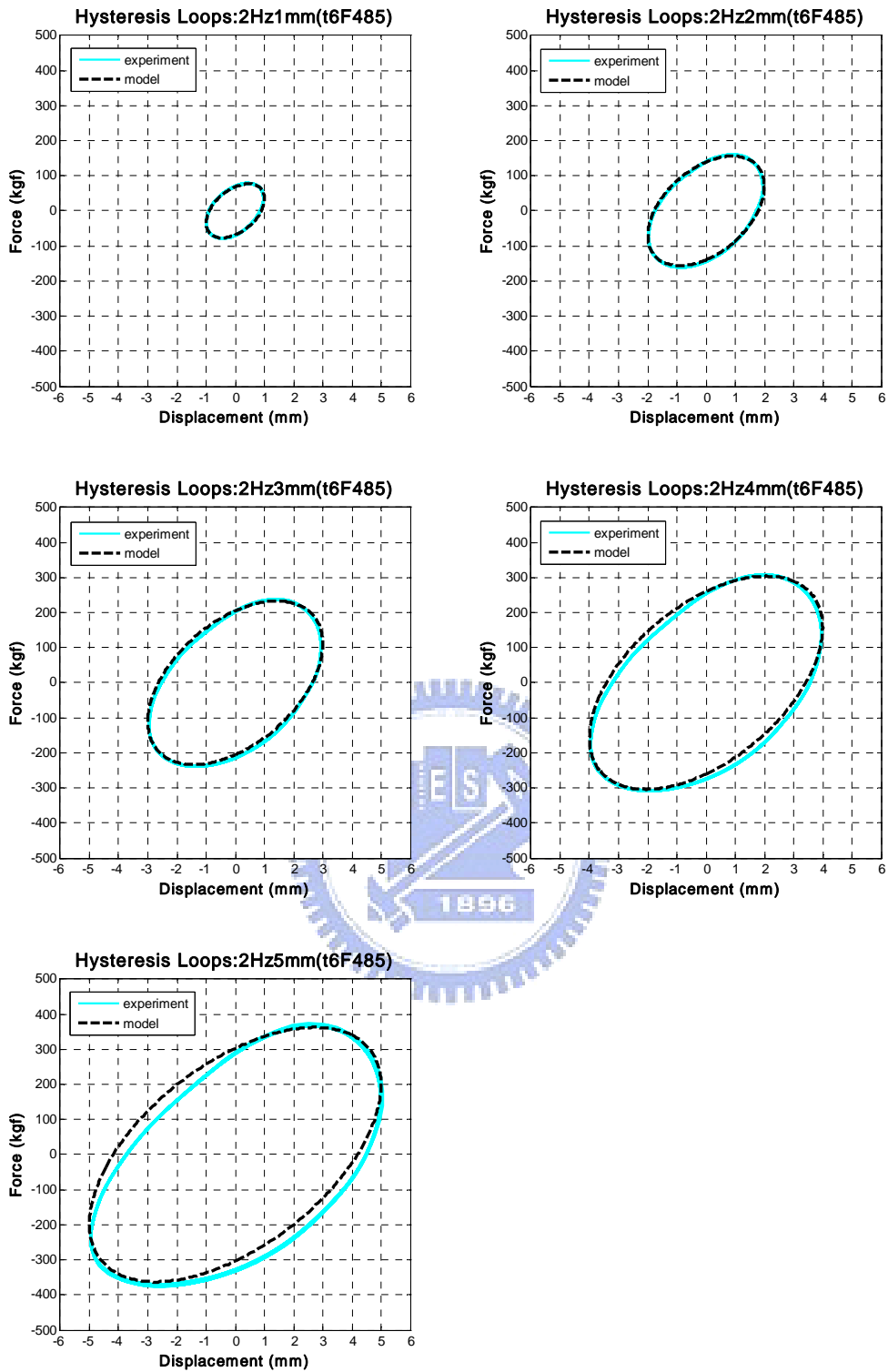


圖 4.17d t6F485 試體擾動頻率 2.0Hz 各振幅之遲滯迴圈

(Thickness : 6mm , Length : 485mm , B. C. : Fixed)

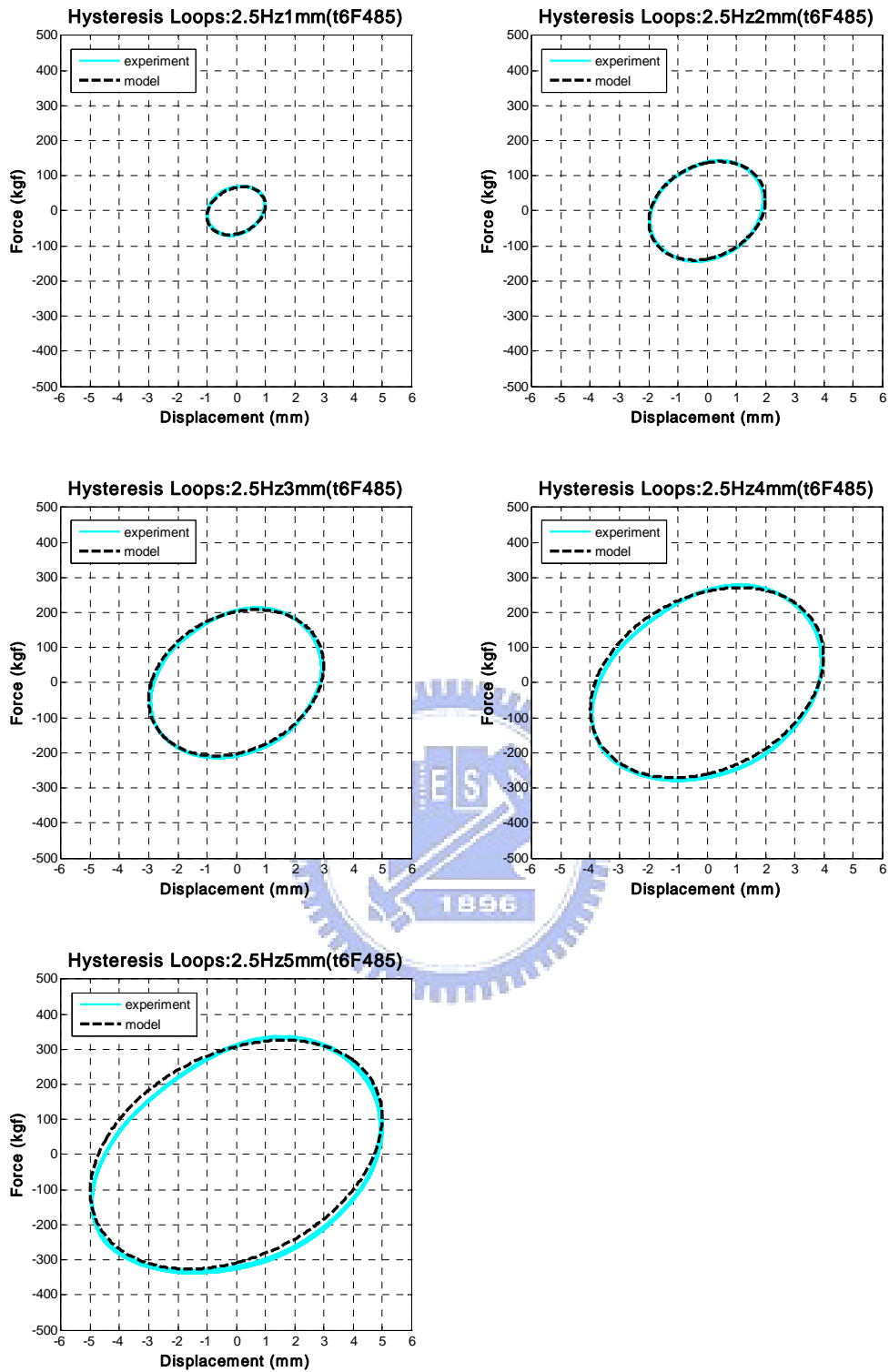


圖 4.17e t6F485 試體擾動頻率 2.5Hz 各振幅之遲滯迴圈

(Thickness : 6mm , Length : 485mm , B. C. : Fixed)

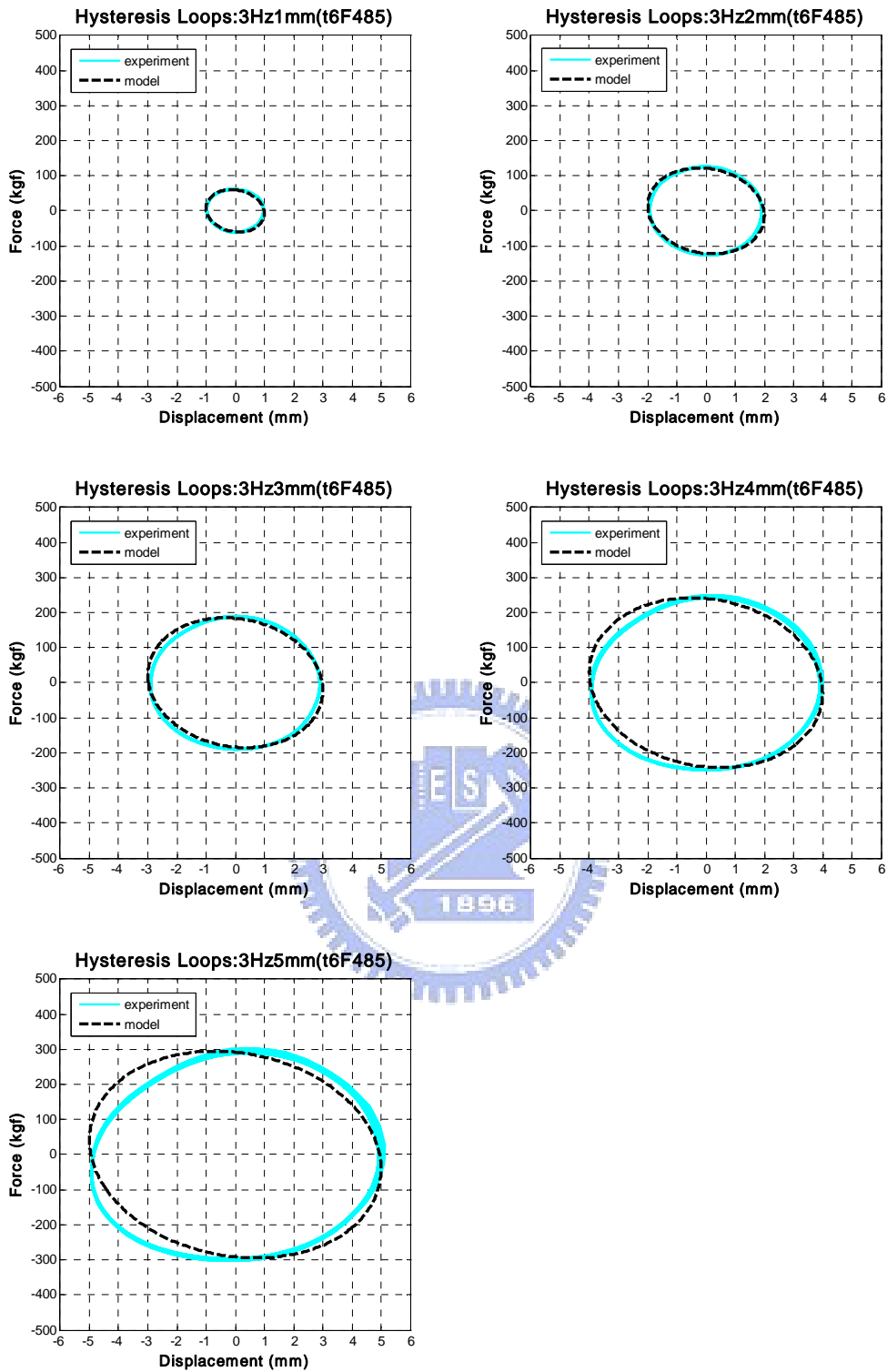


圖 4.17f t6F485 試體擾動頻率 3.0Hz 各振幅之遲滯迴圈

(Thickness : 6mm , Length : 485mm , B. C. : Fixed)

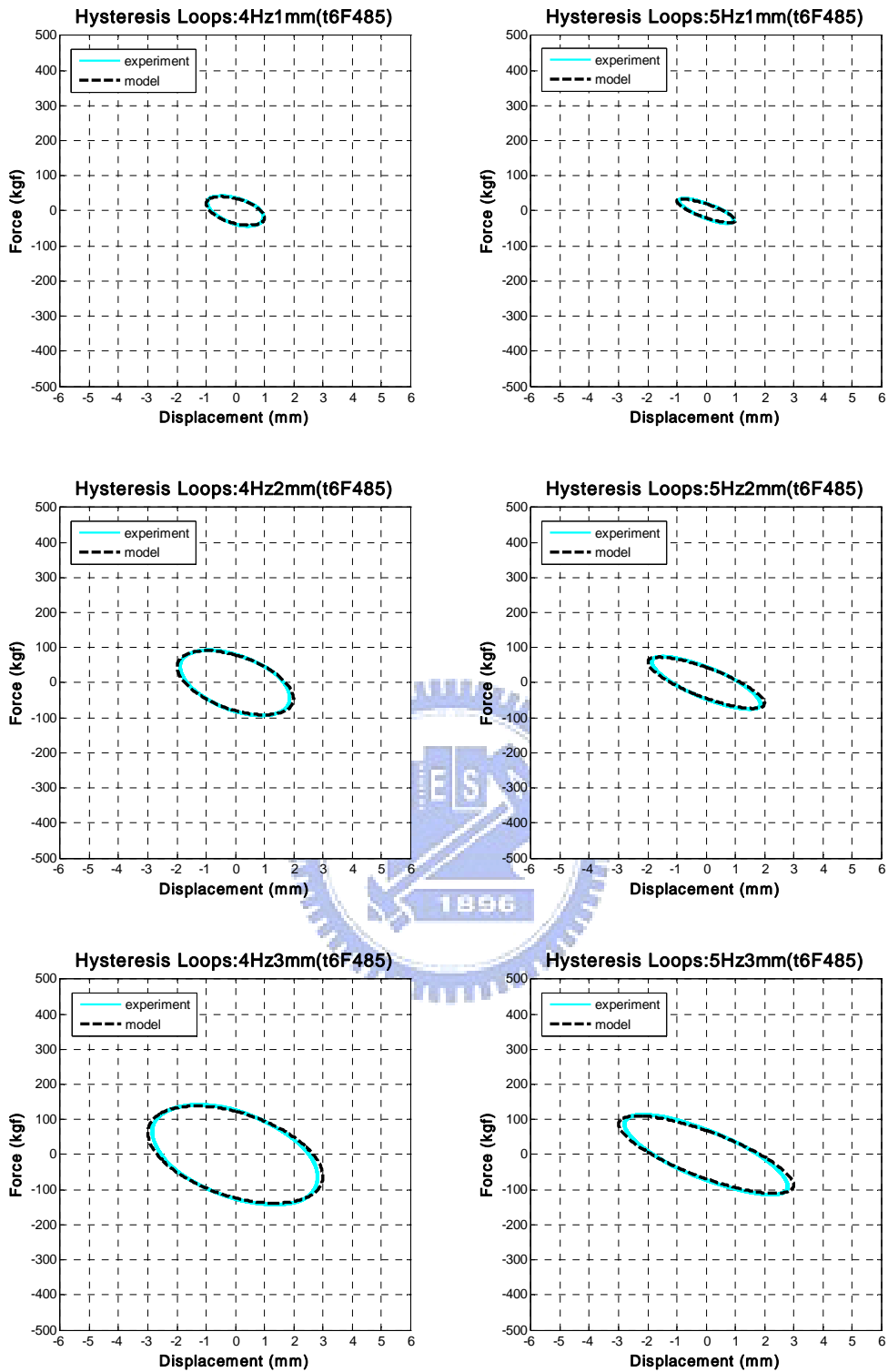


圖 4.17g t6F485 試體擾動頻率 4.0Hz 與 5.0Hz 各振幅之遲滯迴圈

(Thickness : 6mm , Length : 485mm , B. C. : Fixed)

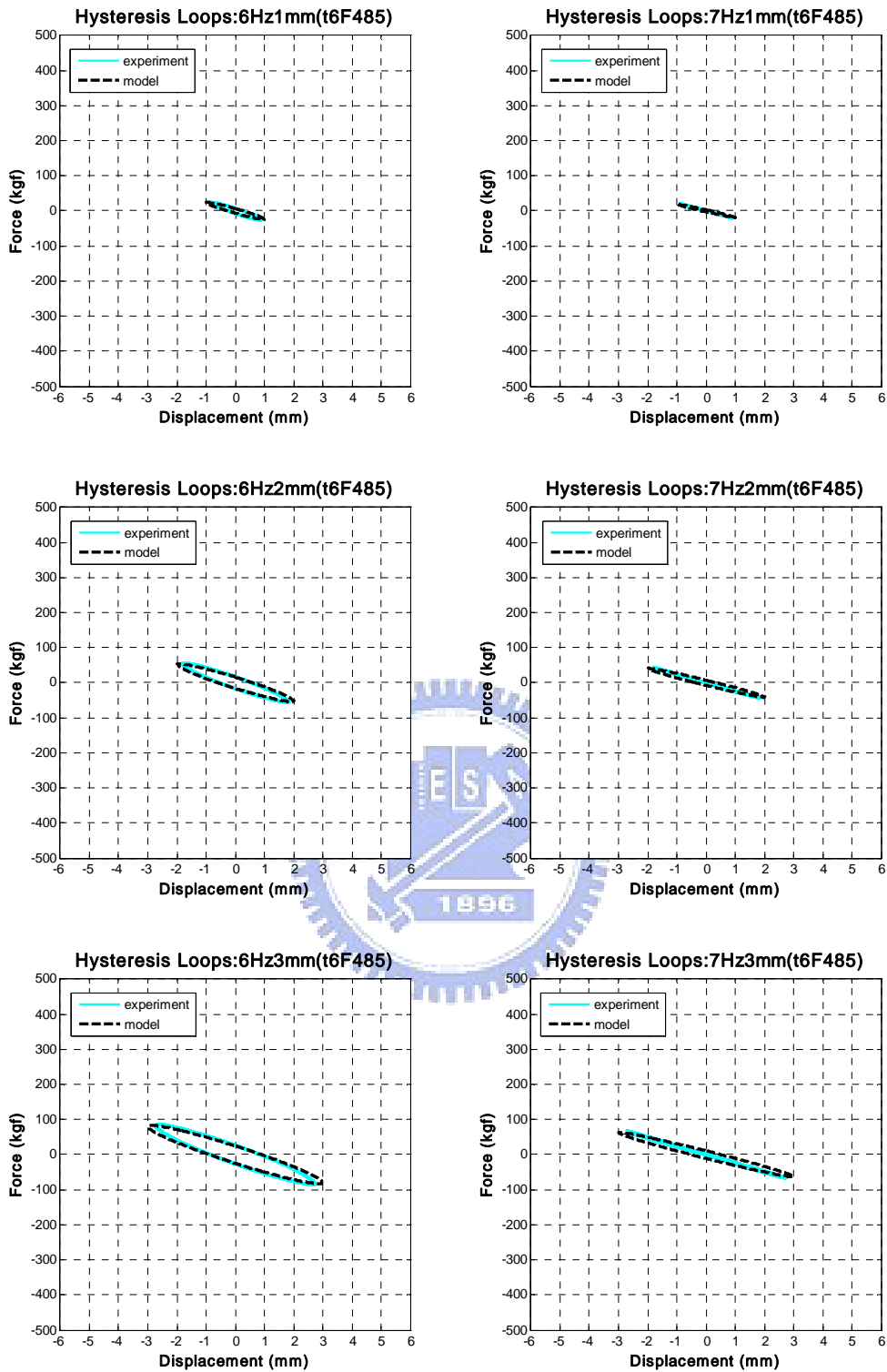


圖 4.17h t6F485 試體擾動頻率 6.0Hz 與 7.0Hz 各振幅之遲滯迴圈

(Thickness : 6mm , Length : 485mm , B. C. : Fixed)

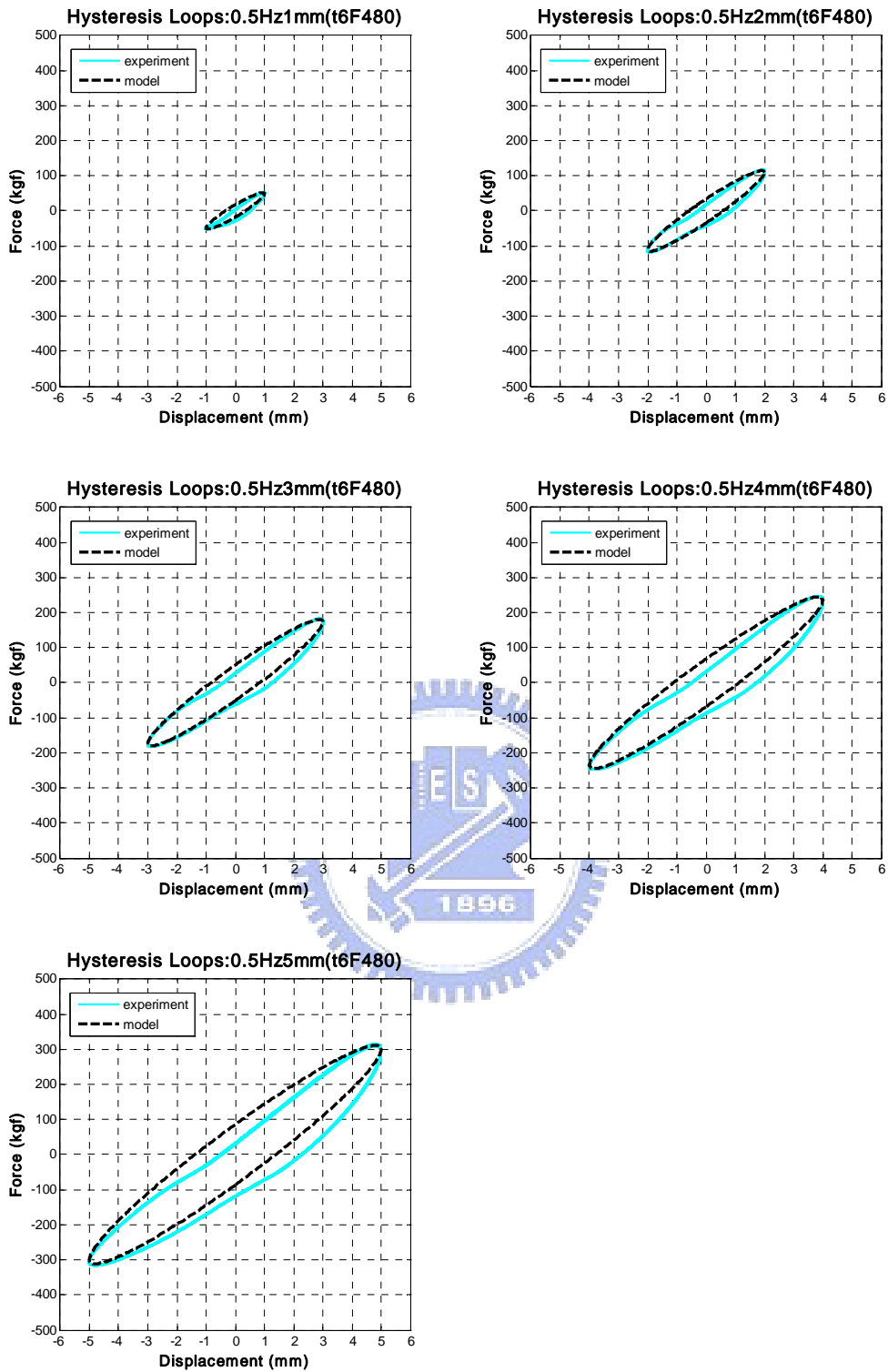


圖 4.18a t6F480 試體擾動頻率 0.5Hz 各振幅之遲滯迴圈

(Thickness : 6mm , Length : 480mm , B. C. : Fixed)

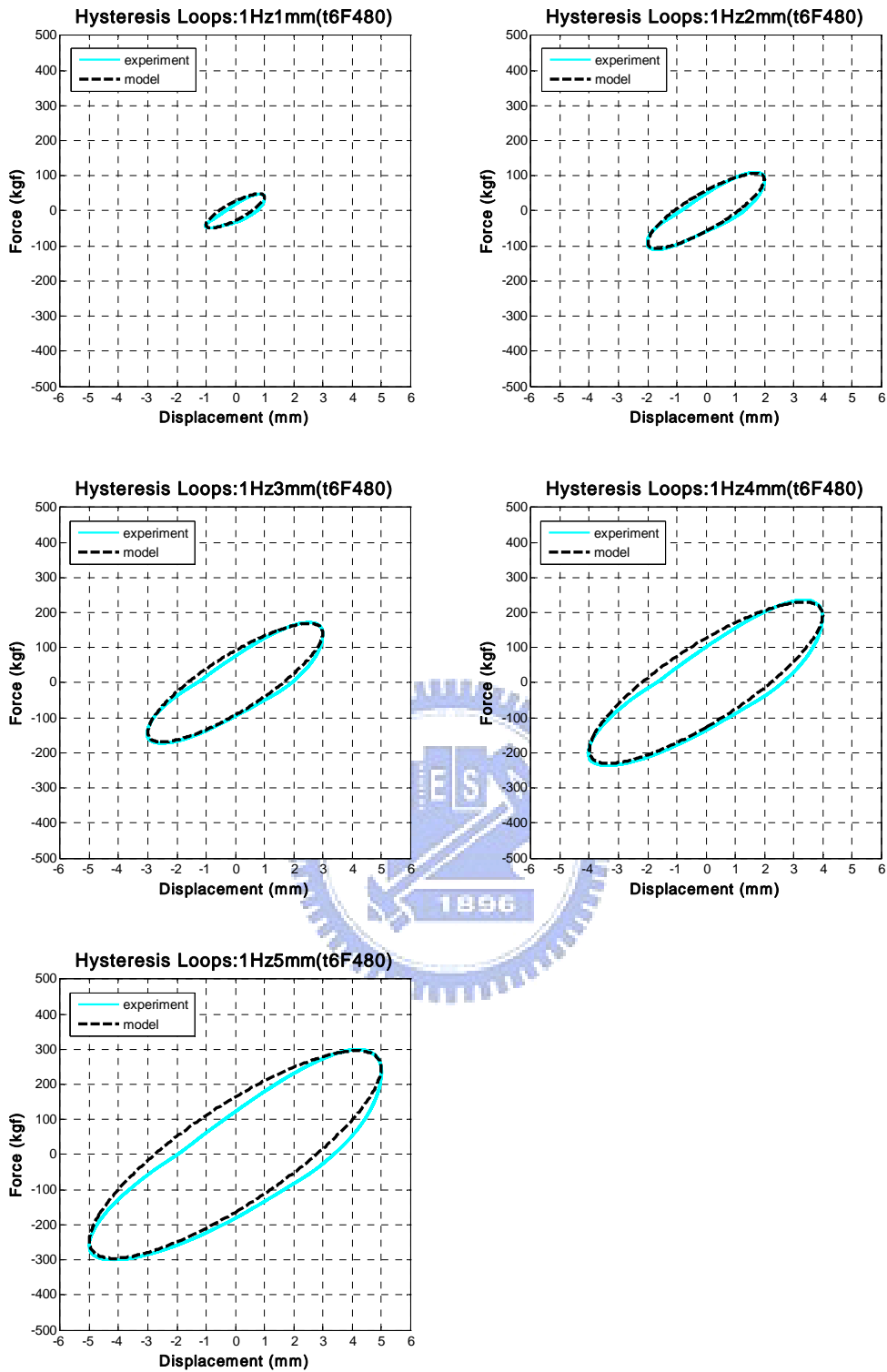


圖 4.18b t6F480 試體擾動頻率 1.0Hz 各振幅之遲滯迴圈

(Thickness : 6mm , Length : 480mm , B. C. : Fixed)

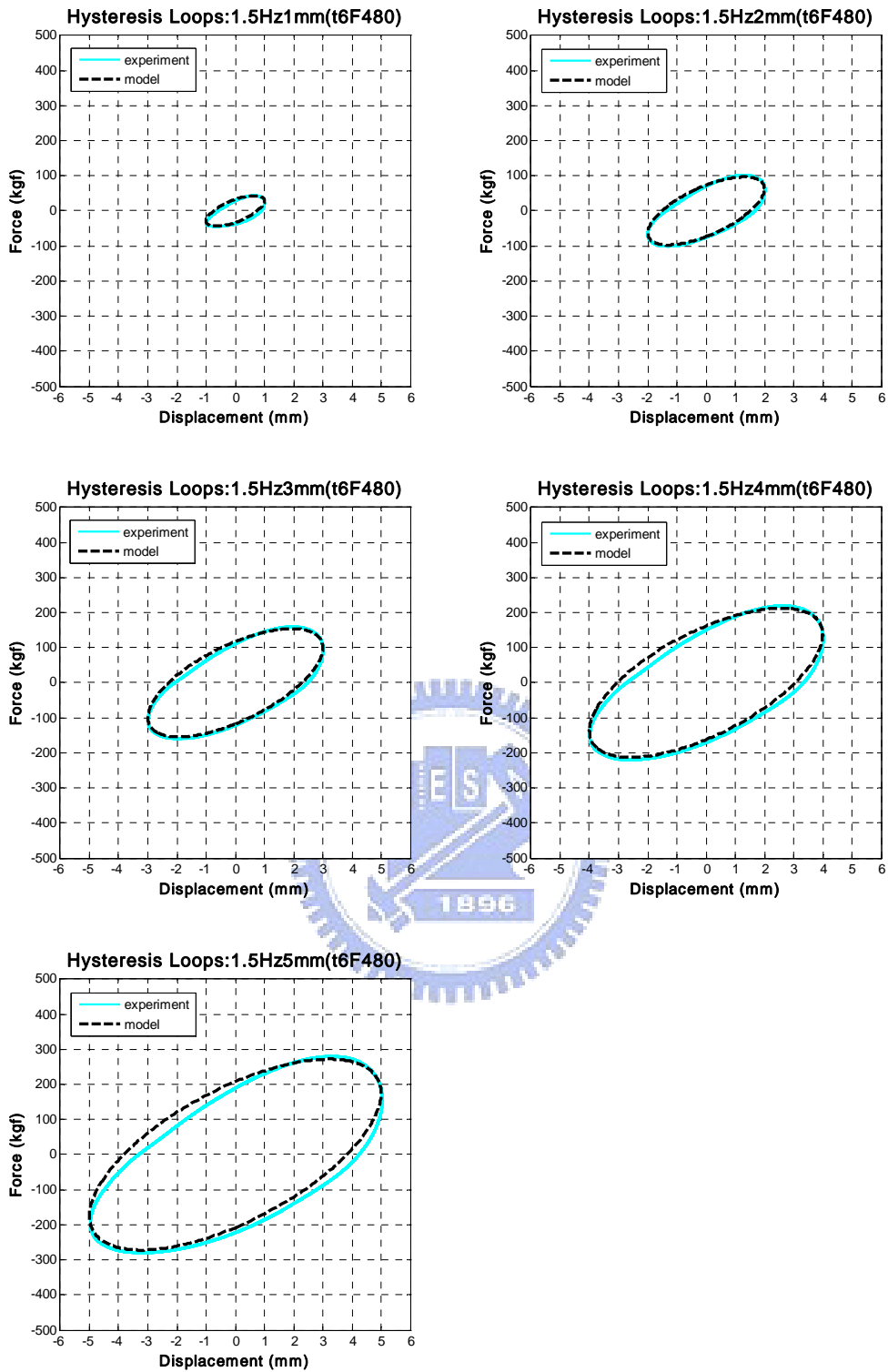


圖 4.18c t6F480 試體擾動頻率 1.5Hz 各振幅之遲滯迴圈

(Thickness : 6mm , Length : 480mm , B. C. : Fixed)

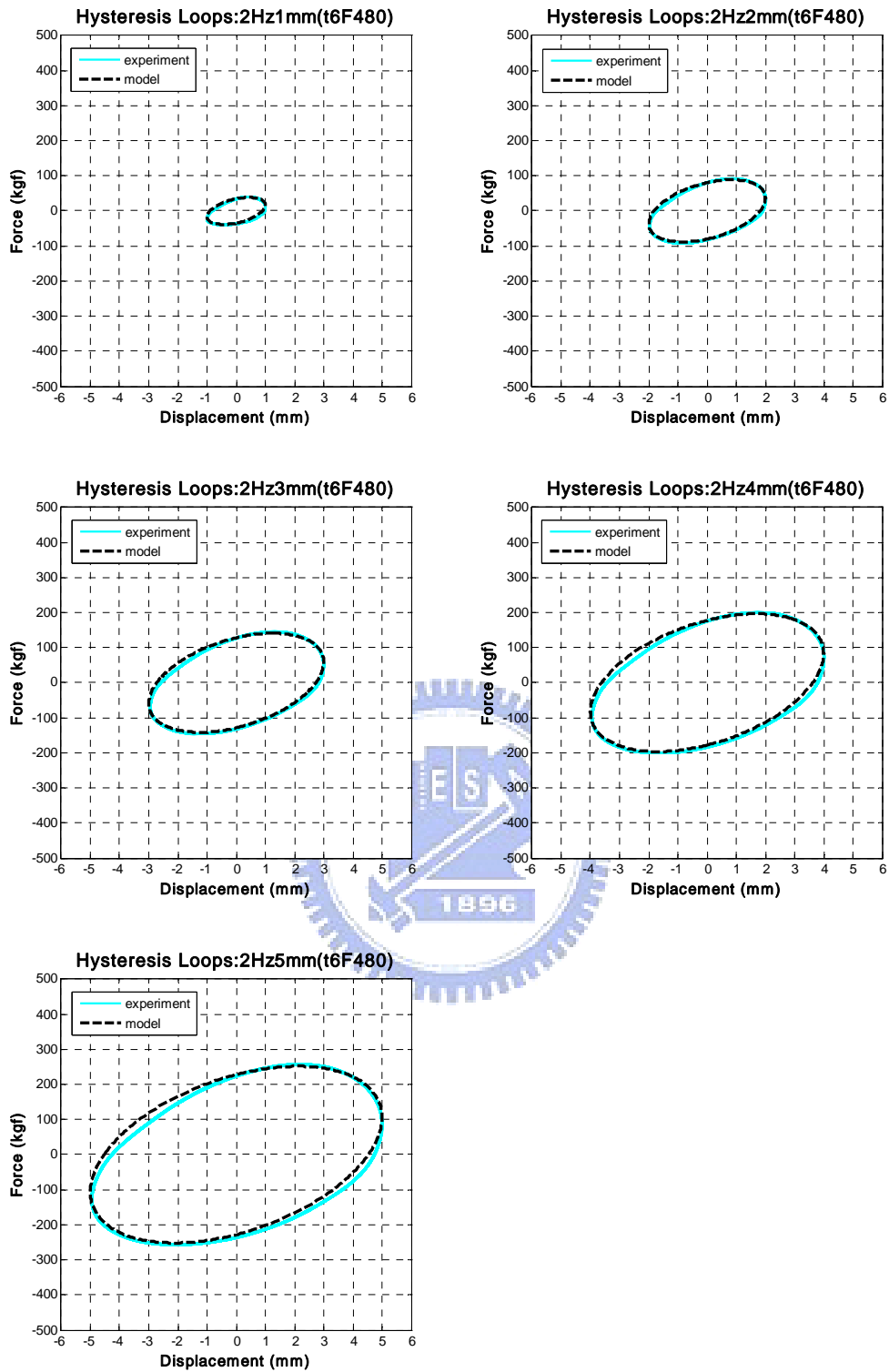


圖 4.18d t6F480 試體擾動頻率 2.0Hz 各振幅之遲滯迴圈

(Thickness : 6mm , Length : 480mm , B. C. : Fixed)

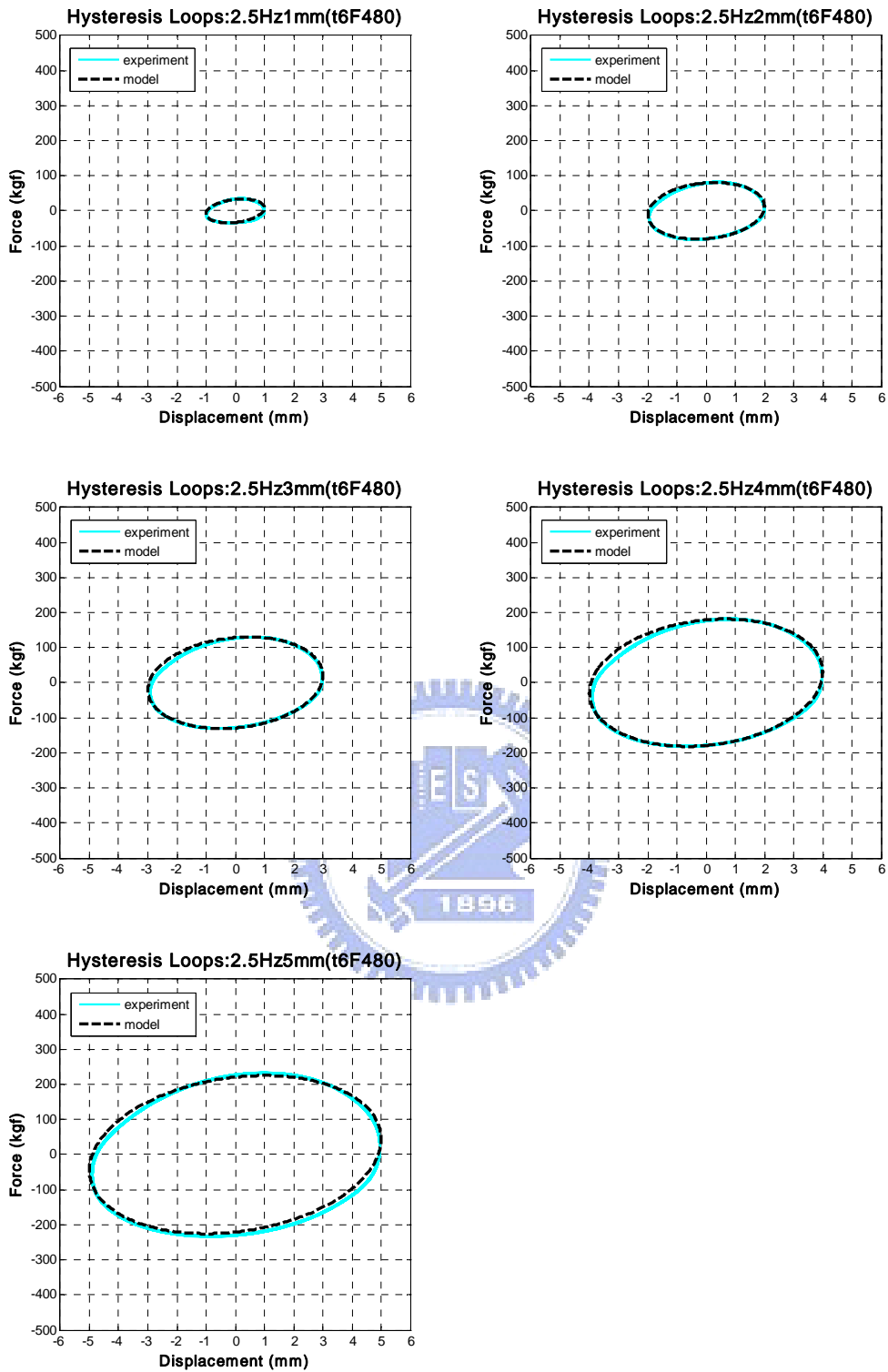


圖 4.18e t6F480 試體擾動頻率 2.5Hz 各振幅之遲滯迴圈

(Thickness : 6mm , Length : 480mm , B. C. : Fixed)

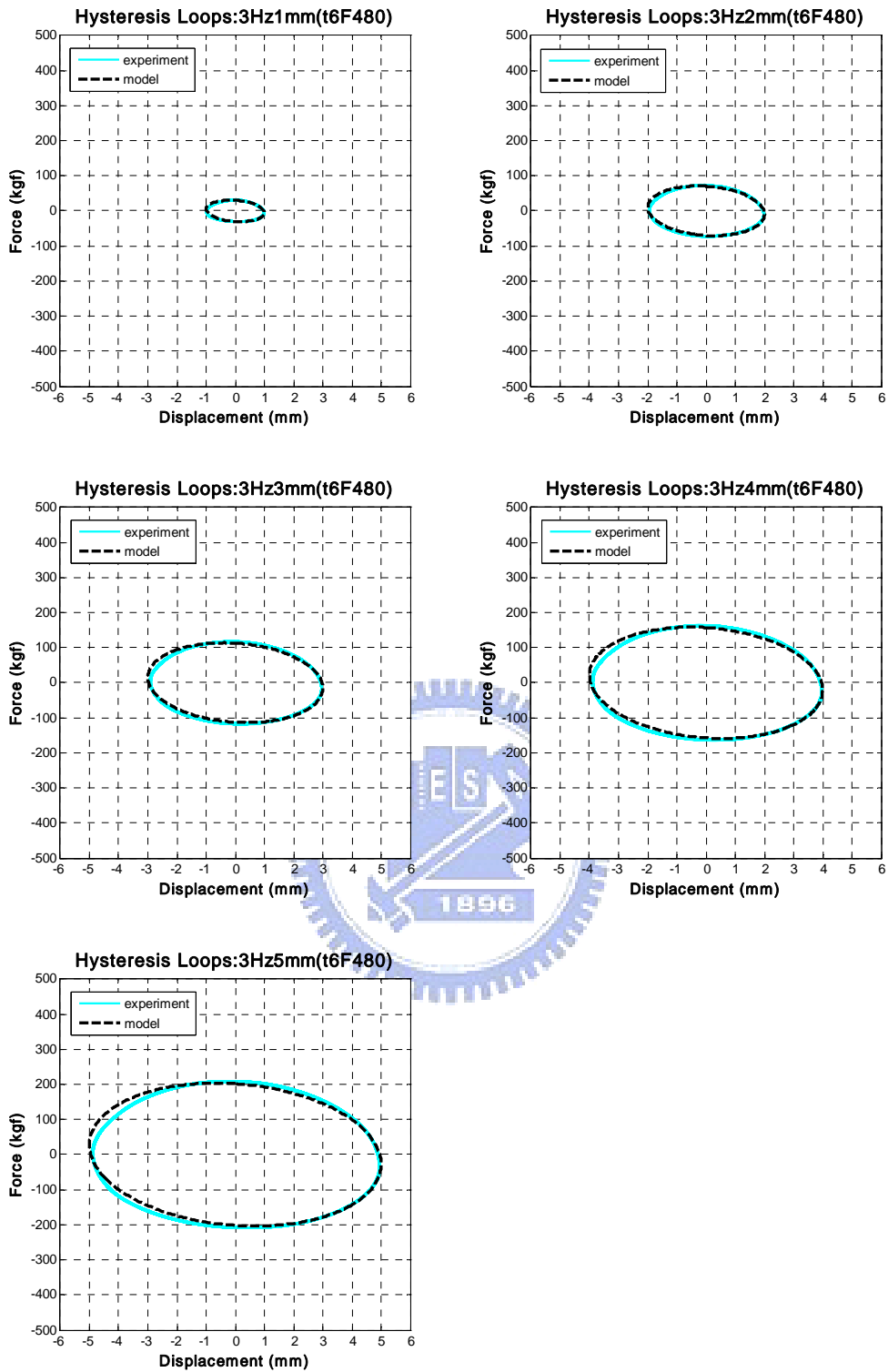


圖 4.18f t6F480 試體擾動頻率 3.0Hz 各振幅之遲滯迴圈

(Thickness : 6mm , Length : 480mm , B.C. : Fixed)

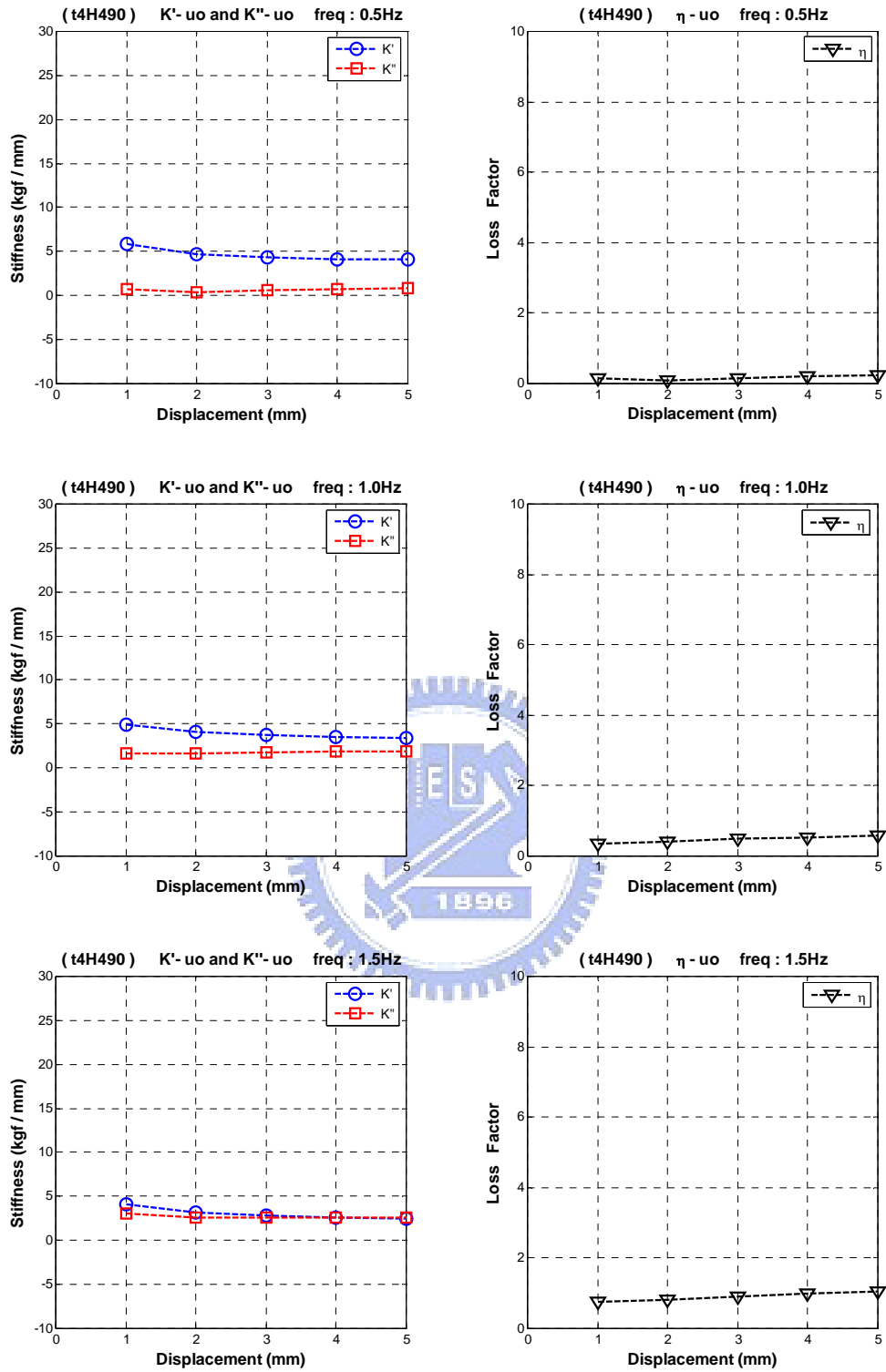


圖 4.19-1 t4H490 K' 、 K'' 、 η 與 u_0 的關係圖

(Thickness : 4mm , Length : 490mm , B.C. : Hinged)

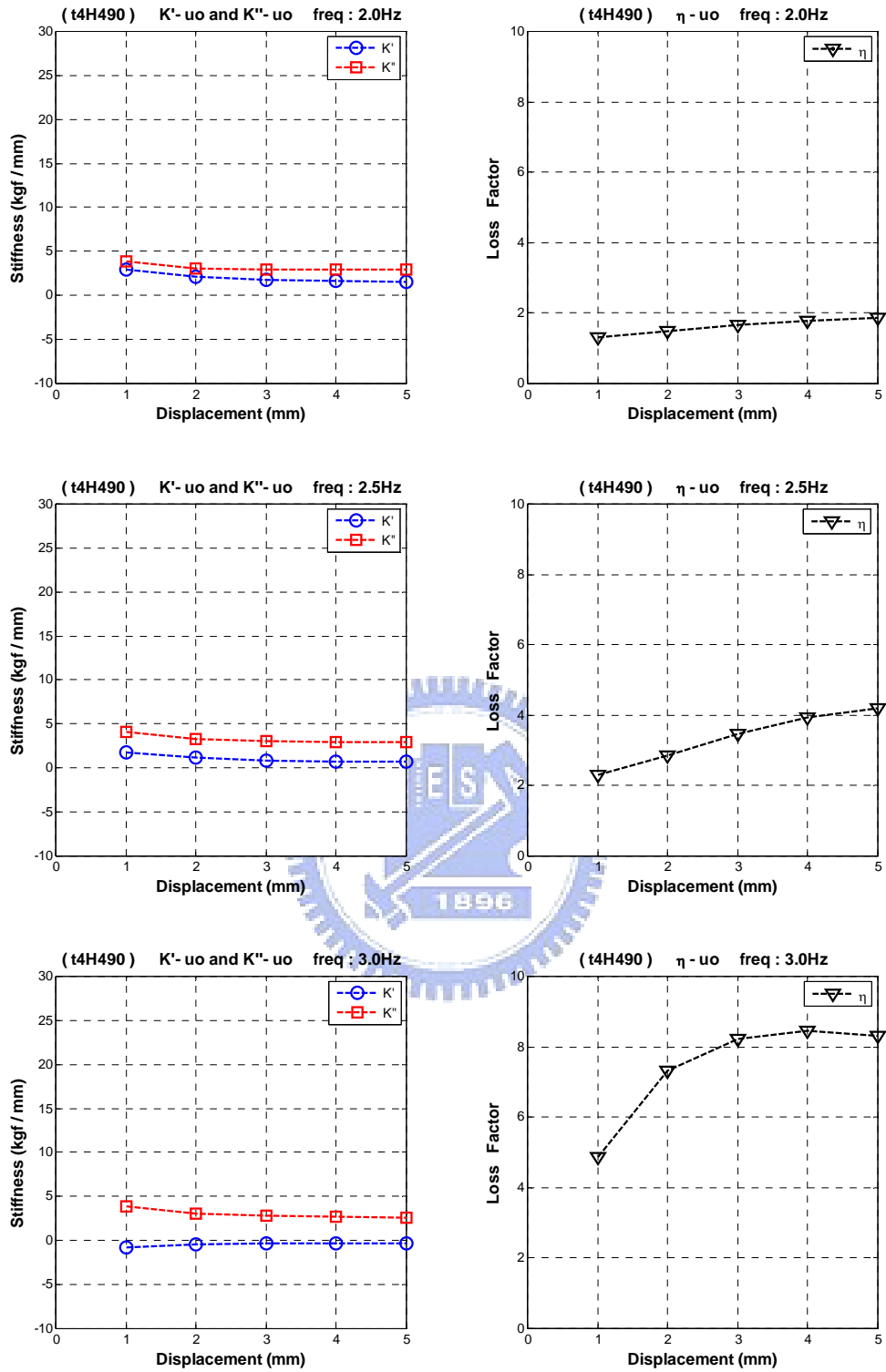


圖 4.19-2 t4H490 K' 、 K'' 、 η 與 u_0 的關係圖

(Thickness : 4mm , Length : 490mm , B.C. : Hinged)

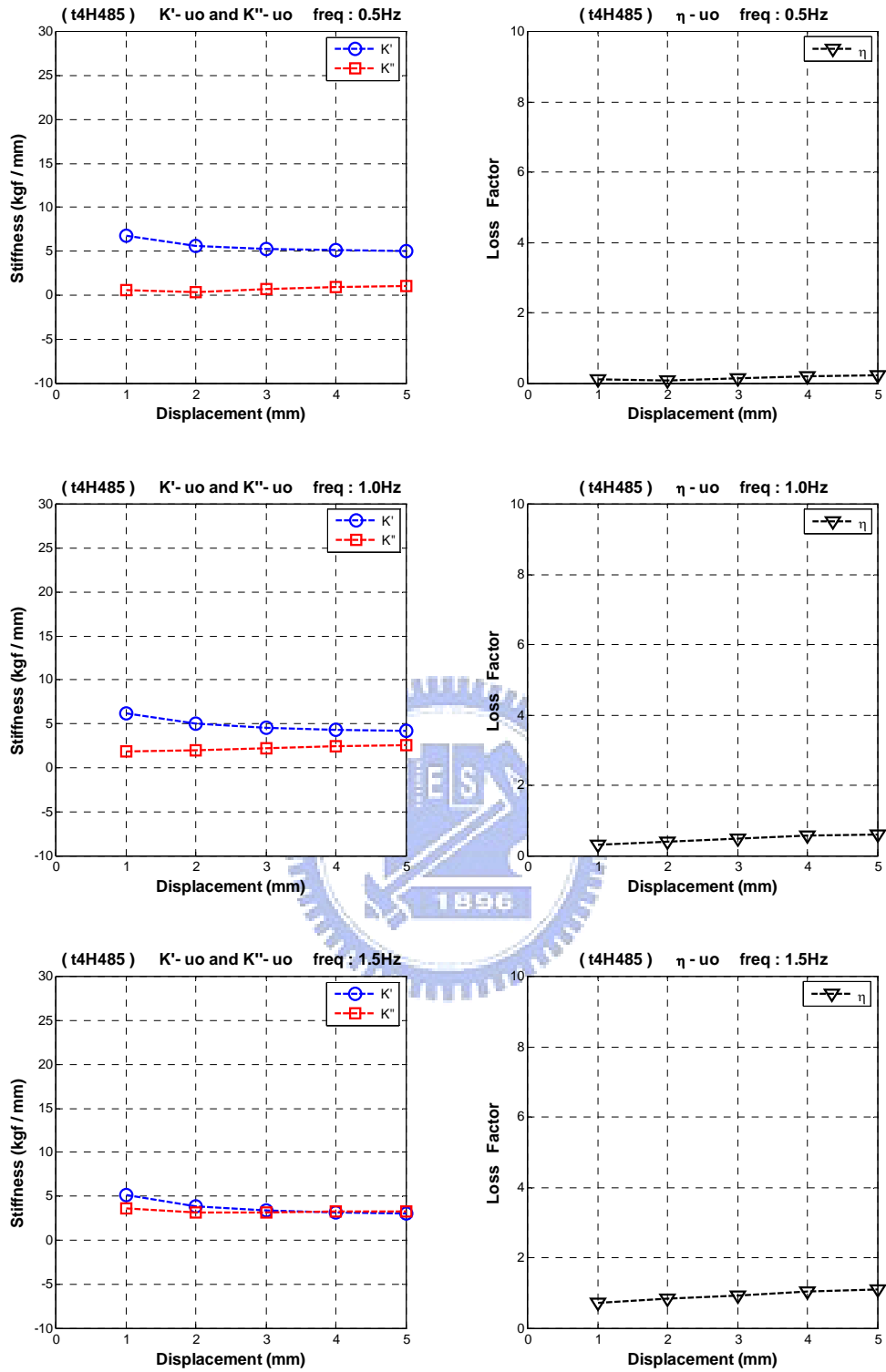


圖 4.20-1 t4H485 K' 、 K'' 、 η 與 u_0 的關係圖

(Thickness : 4mm , Length : 485mm , B.C. : Hinged)

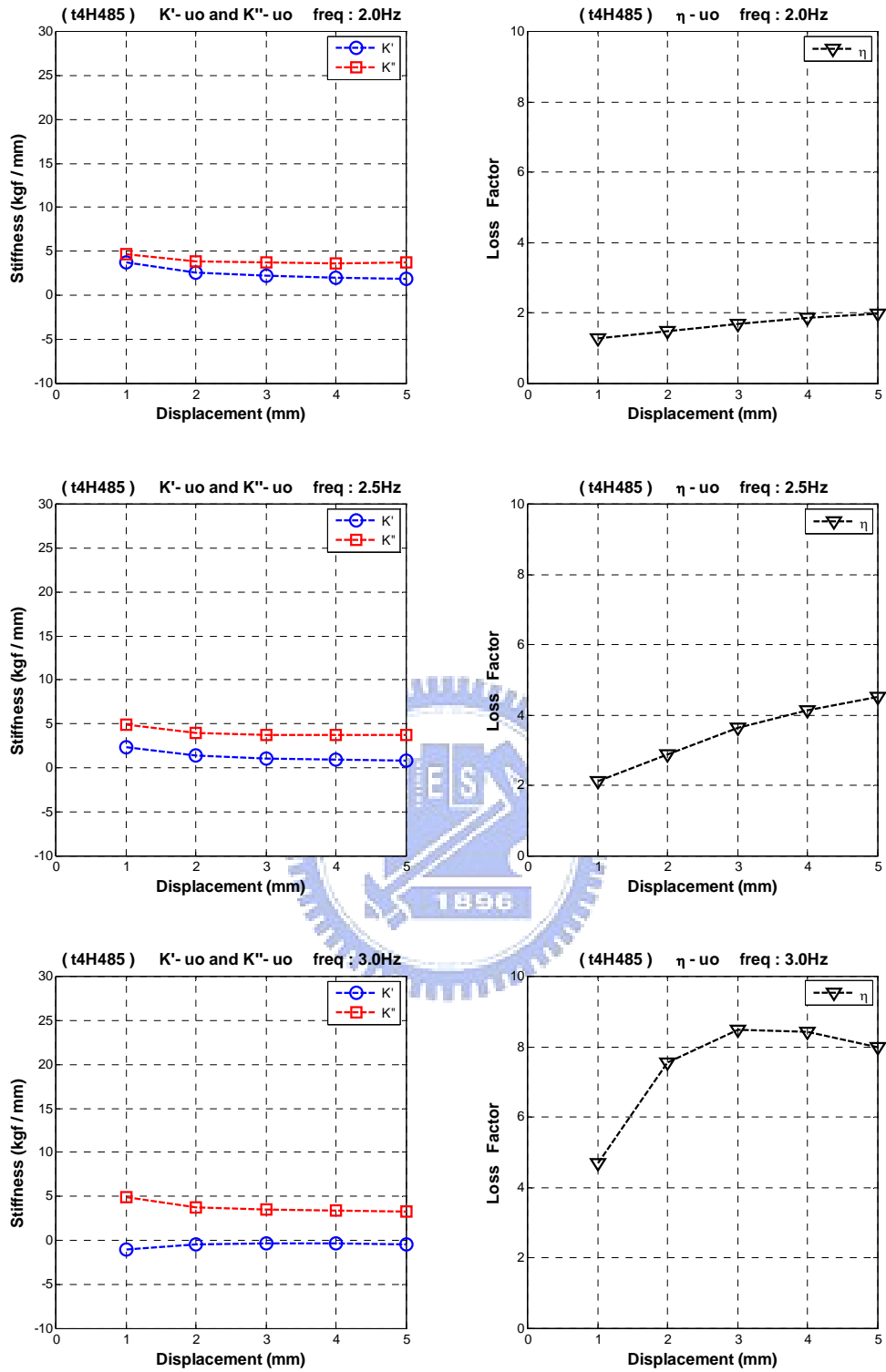


圖 4.20-2 t4H485 K' 、 K'' 、 η 與 u_0 的關係圖

(Thickness : 4mm , Length : 485mm , B.C. : Hinged)

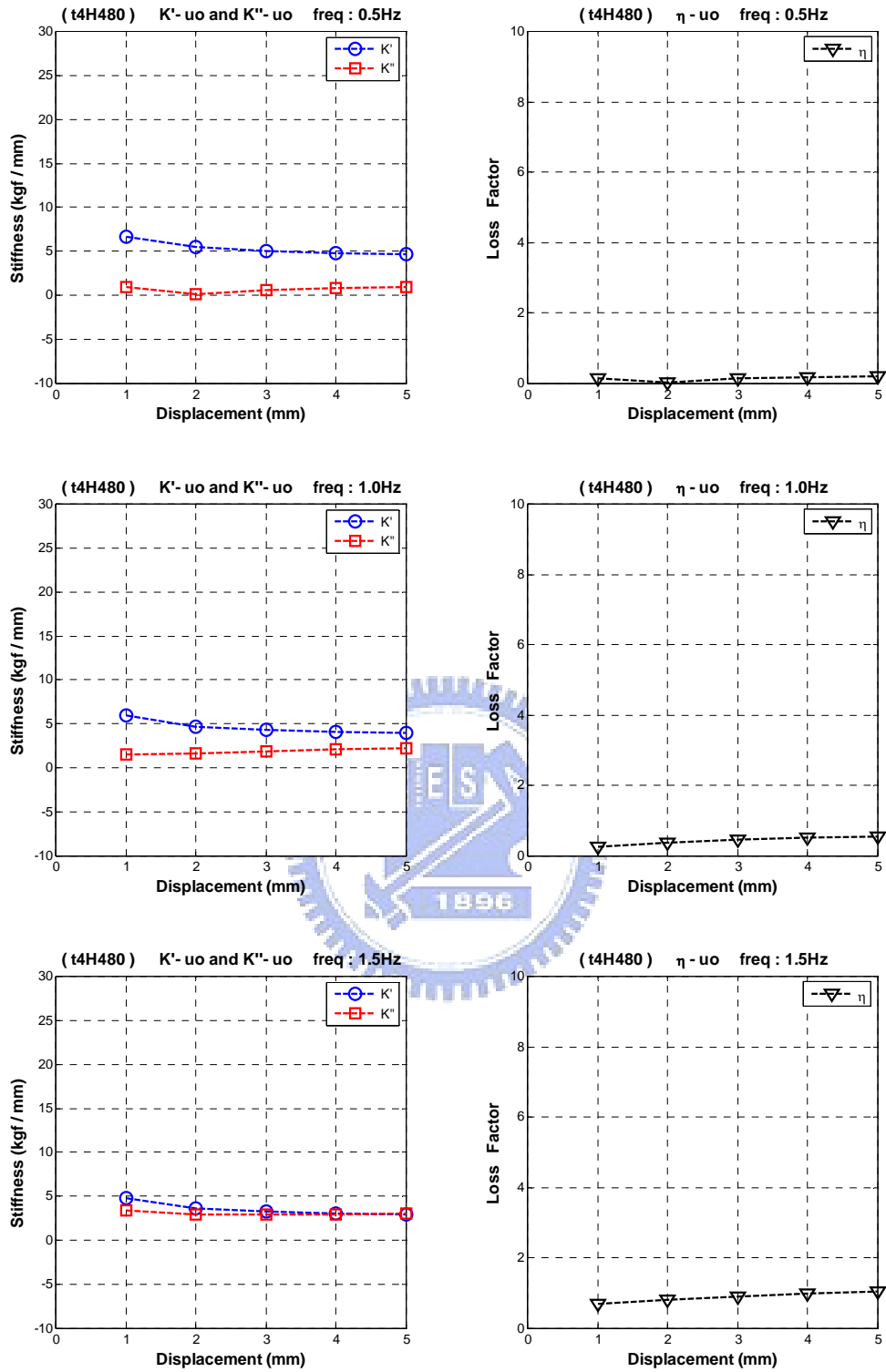


圖 4.21-1 t4H480 K' 、 K'' 、 η 與 u_0 的關係圖

(Thickness : 4mm , Length : 480mm , B.C. : Hinged)

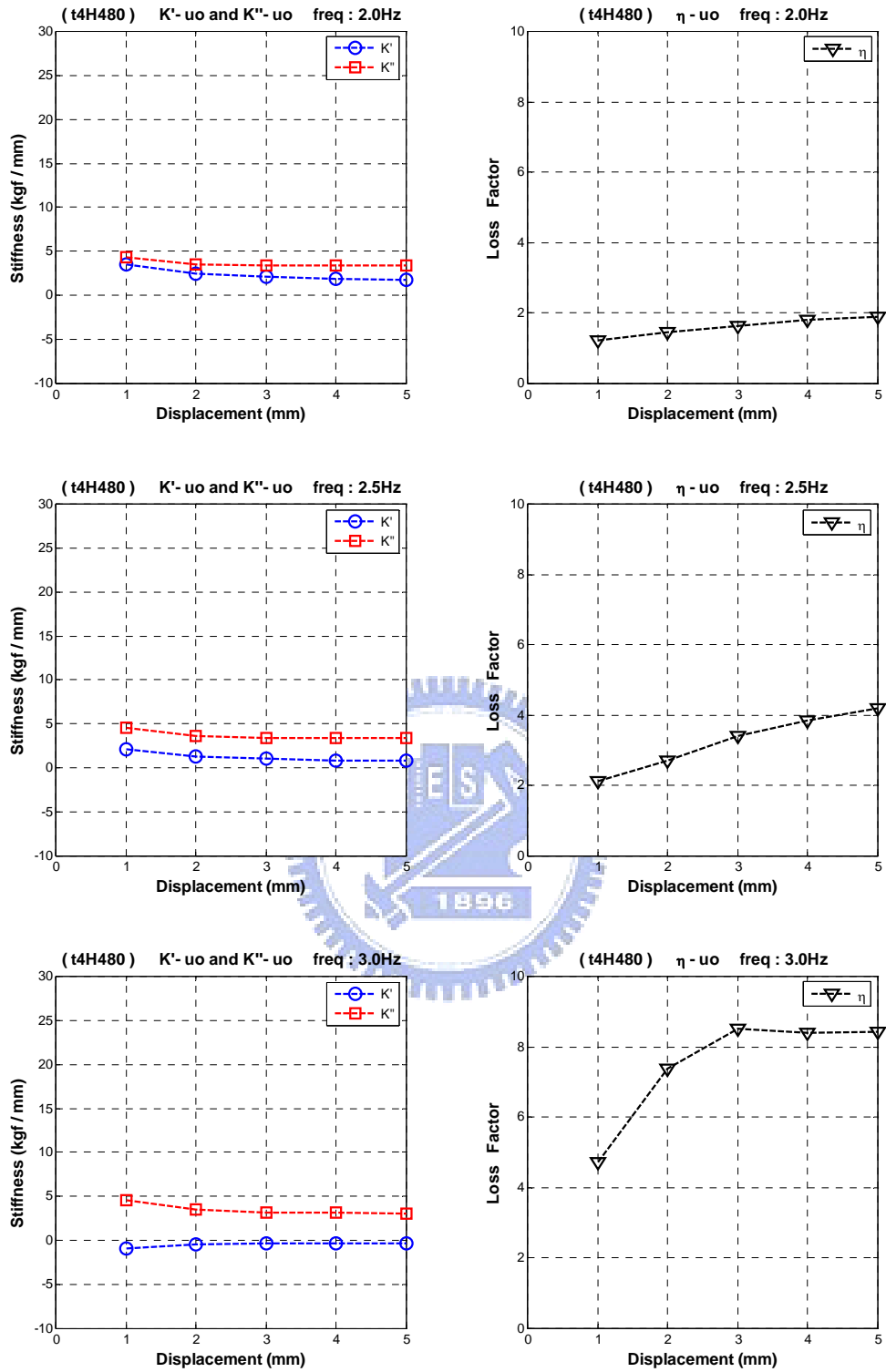


圖 4.21-2 t4H480 K' 、 K'' 、 η 與 u_0 的關係圖

(Thickness : 5mm , Length : 480mm , B.C. : Hinged)

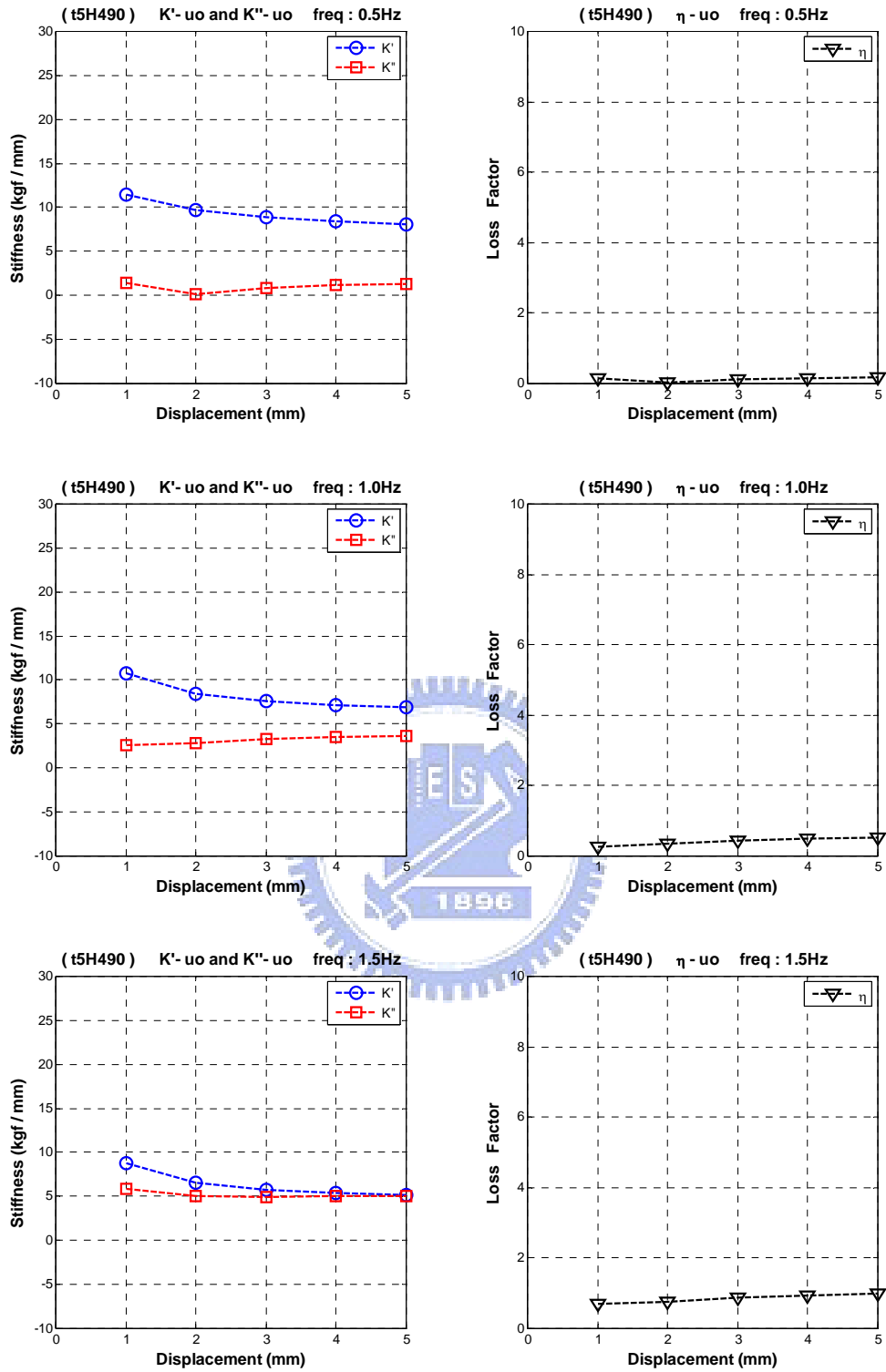


圖 4.22-1 t5H490 K' 、 K'' 、 η 與 u_0 的關係圖

(Thickness : 5mm , Length : 490mm , B.C. : Hinged)

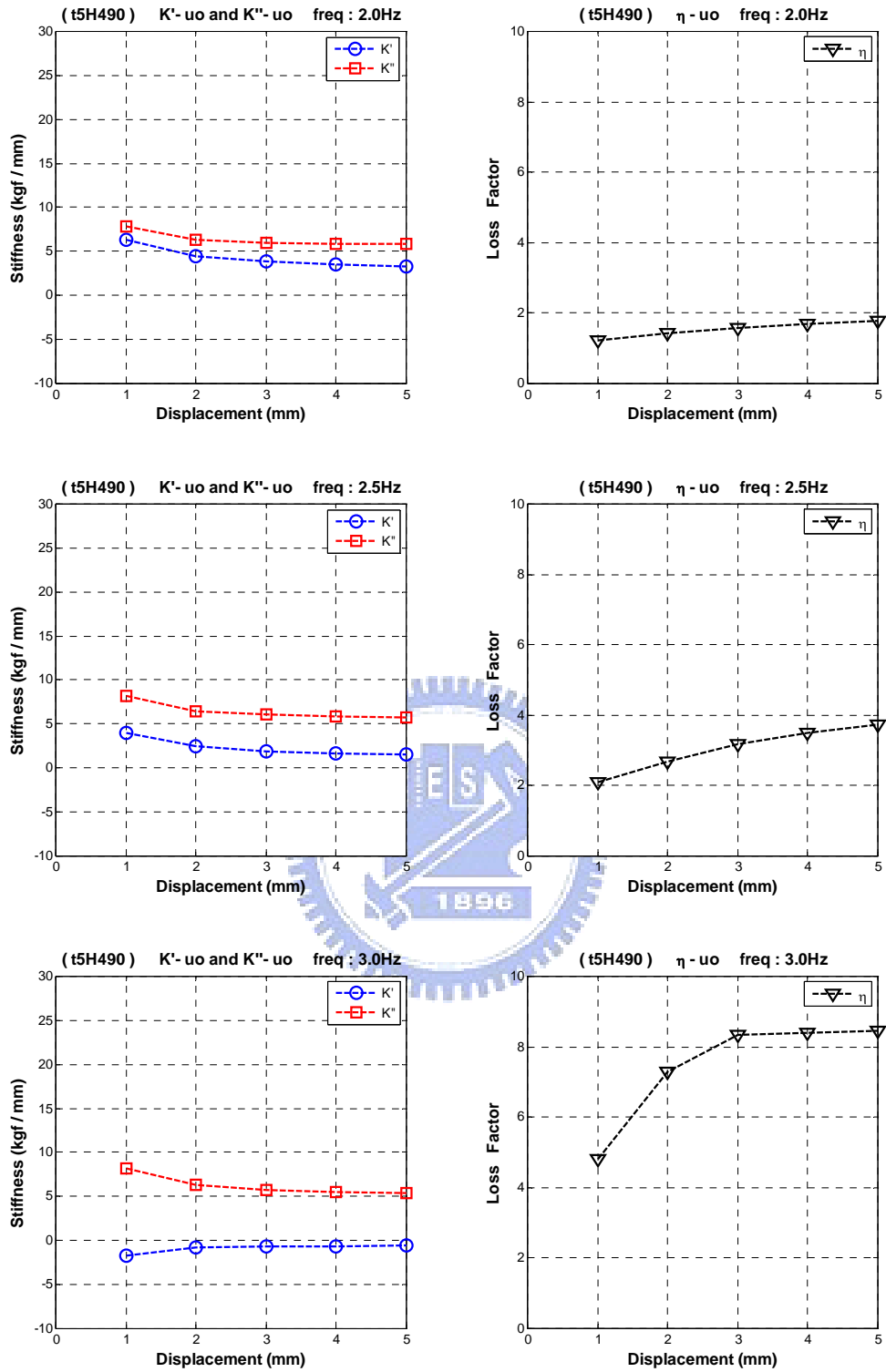


圖 4.22-2 t5H490 K' 、 K'' 、 η 與 u_0 的關係圖

(Thickness : 5mm , Length : 490mm , B.C. : Hinged)

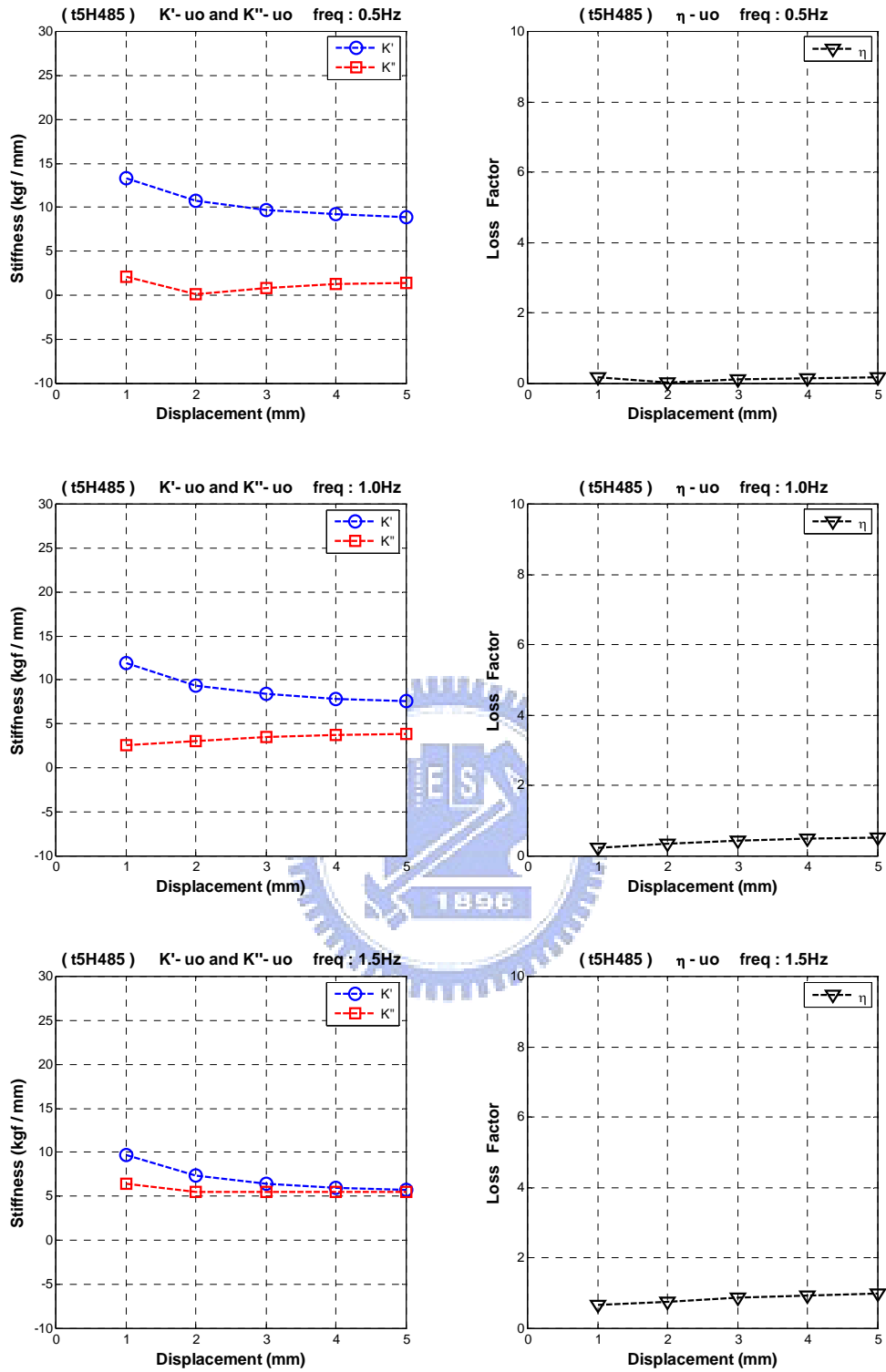


圖 4.23-1 t5H485 K' 、 K'' 、 η 與 u_0 的關係圖

(Thickness : 5mm , Length : 485mm , B.C. : Hinged)

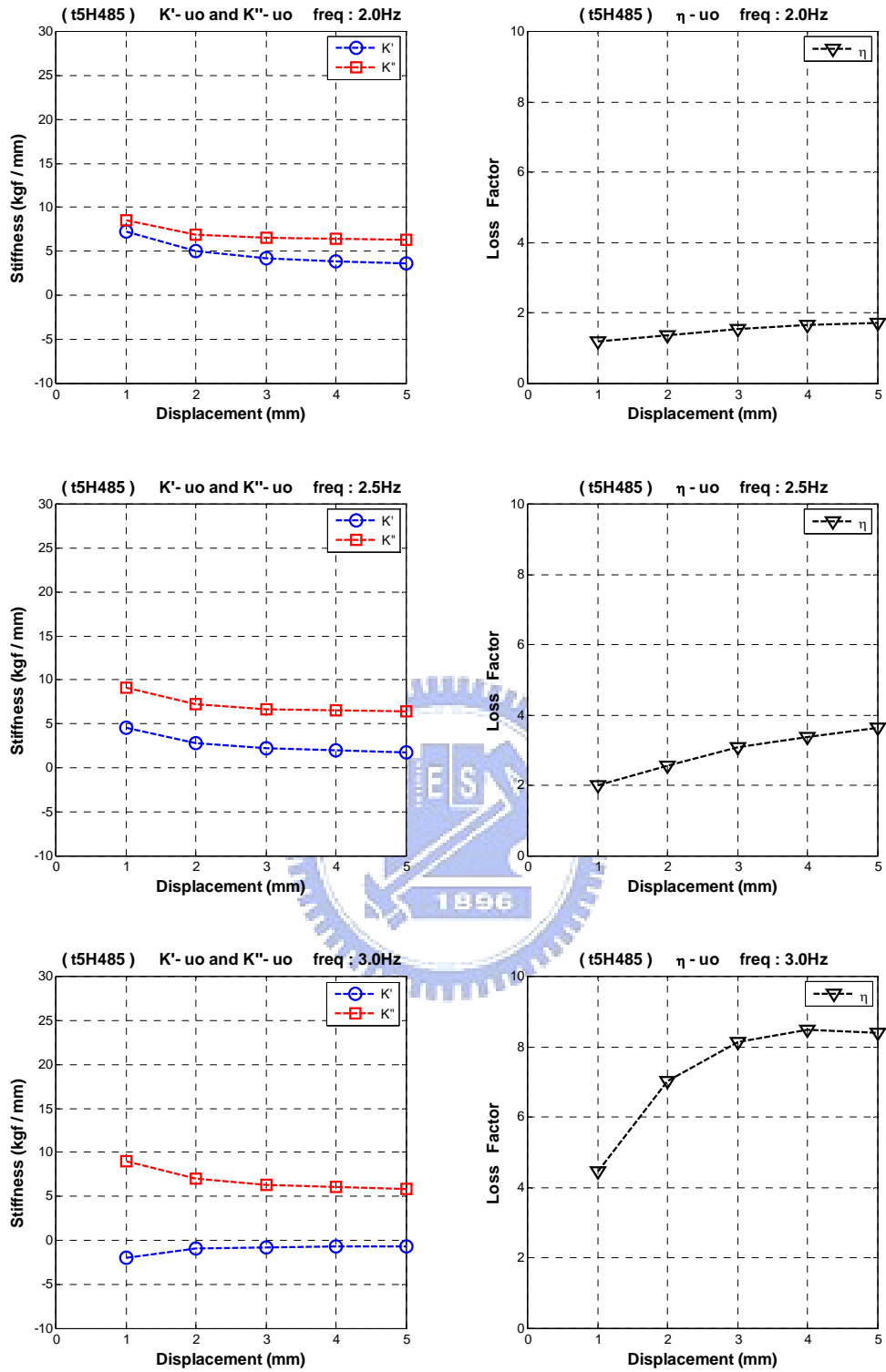


圖 4.23-2 t5H485 K' 、 K'' 、 η 與 u_0 的關係圖

(Thickness : 5mm , Length : 485mm , B.C. : Hinged)

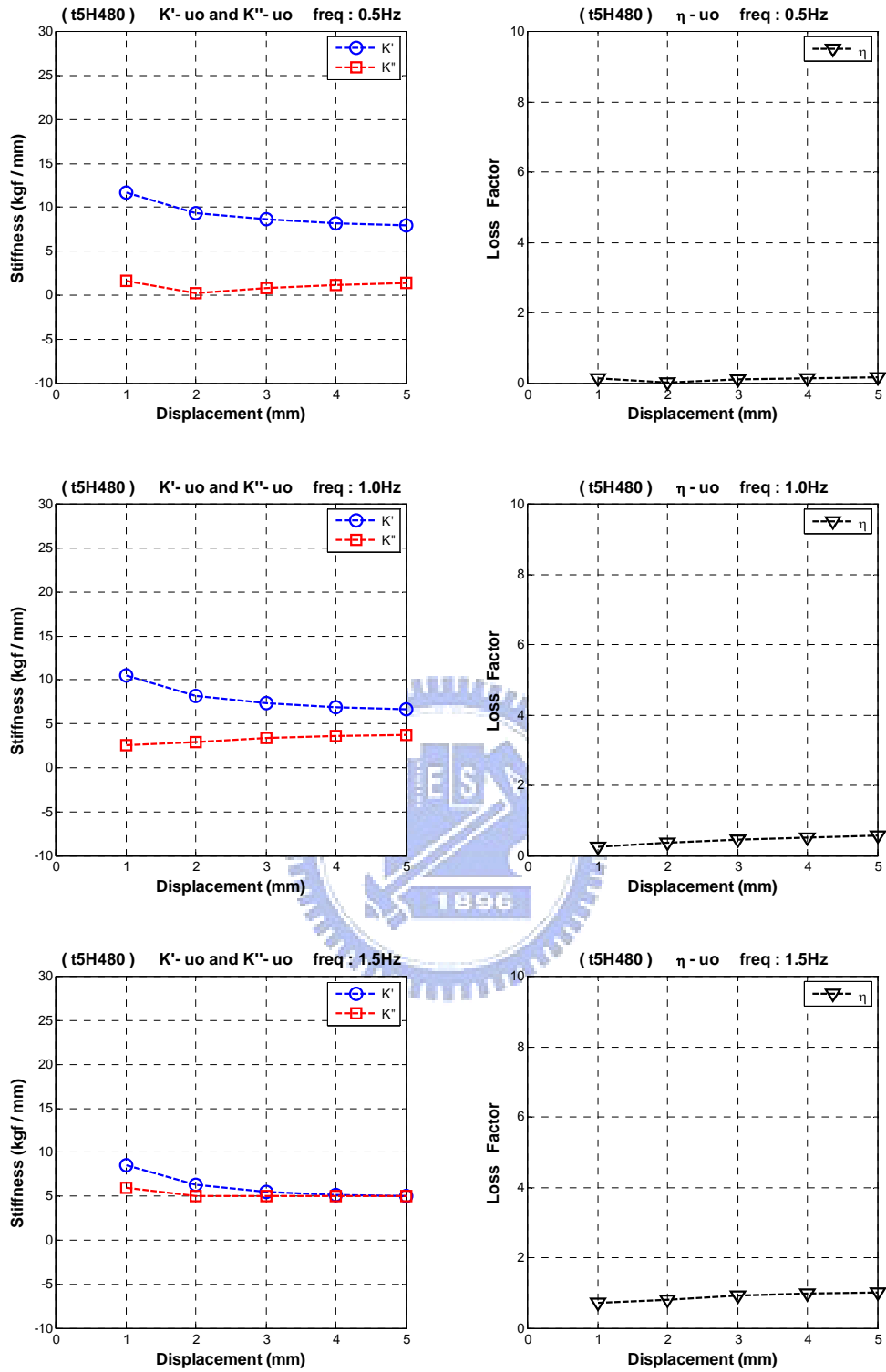


圖 4.24-1 t5H480 K' 、 K'' 、 η 與 u_0 的關係圖

(Thickness : 5mm , Length : 480mm , B.C. : Hinged)

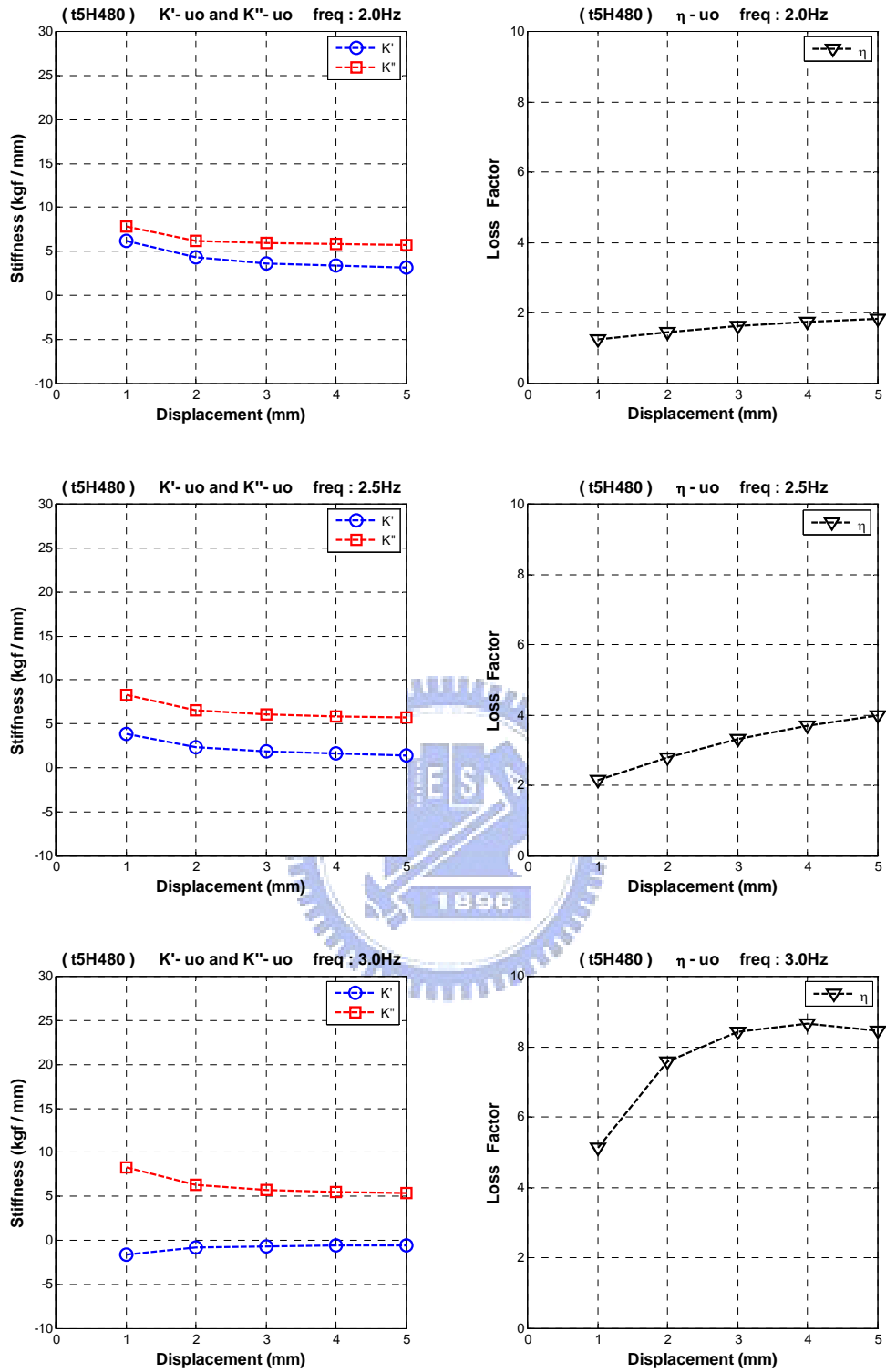


圖 4.24-2 t5H480 K' 、 K'' 、 η 與 u_0 的關係圖

(Thickness : 5mm , Length : 480mm , B.C. : Hinged)

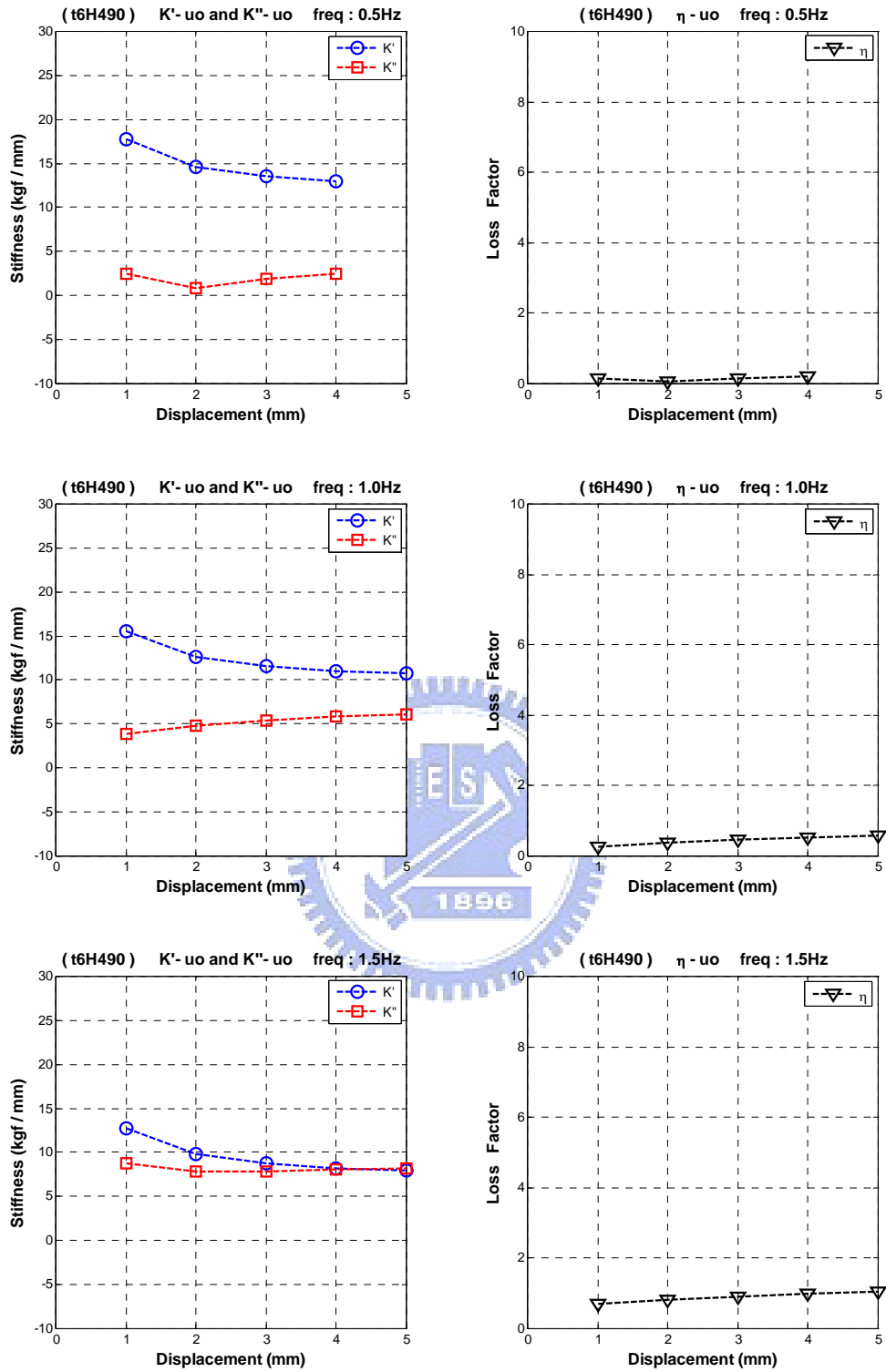


圖 4.25-1 t6H490 K' 、 K'' 、 η 與 u_0 的關係圖

(Thickness : 6mm , Length : 490mm , B.C. : Hinged)

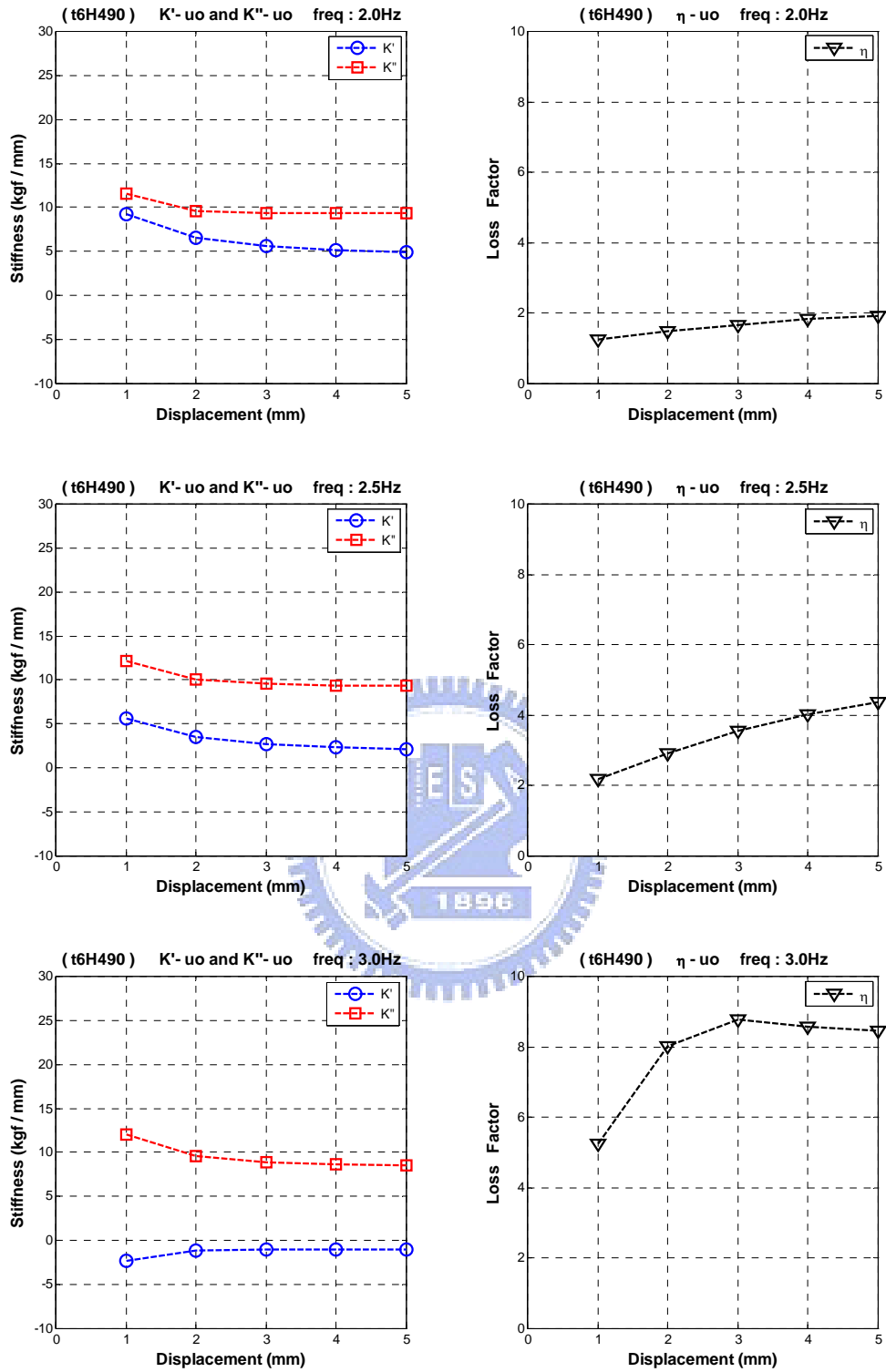


圖 4.25-2 t6H490 K' 、 K'' 、 η 與 u_0 的關係圖

(Thickness : 6mm , Length : 490mm , B.C. : Hinged)

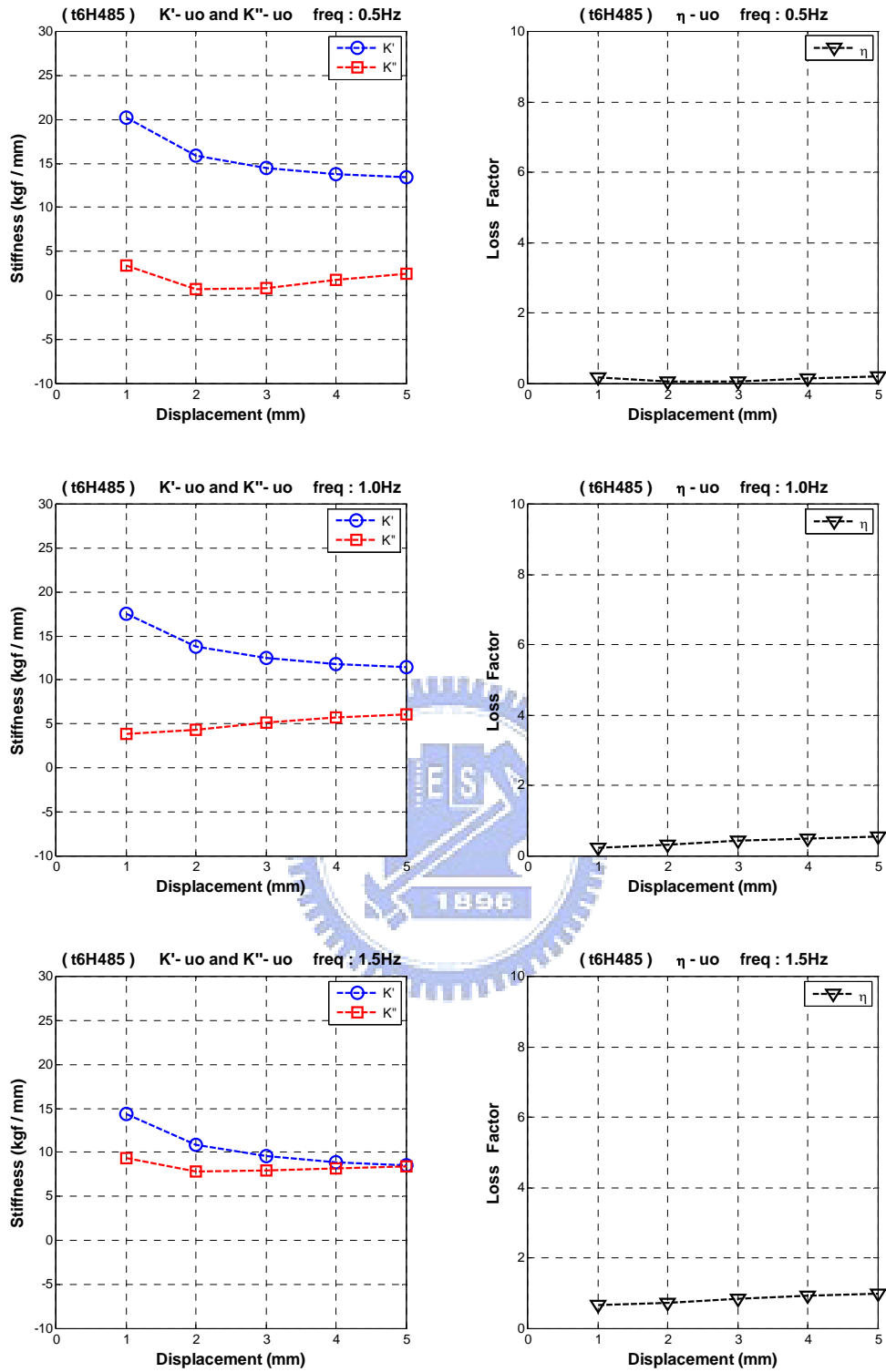


圖 4.26-1 t6H485 K' 、 K'' 、 η 與 u_0 的關係圖

(Thickness : 6mm , Length : 485mm , B.C. : Hinged)

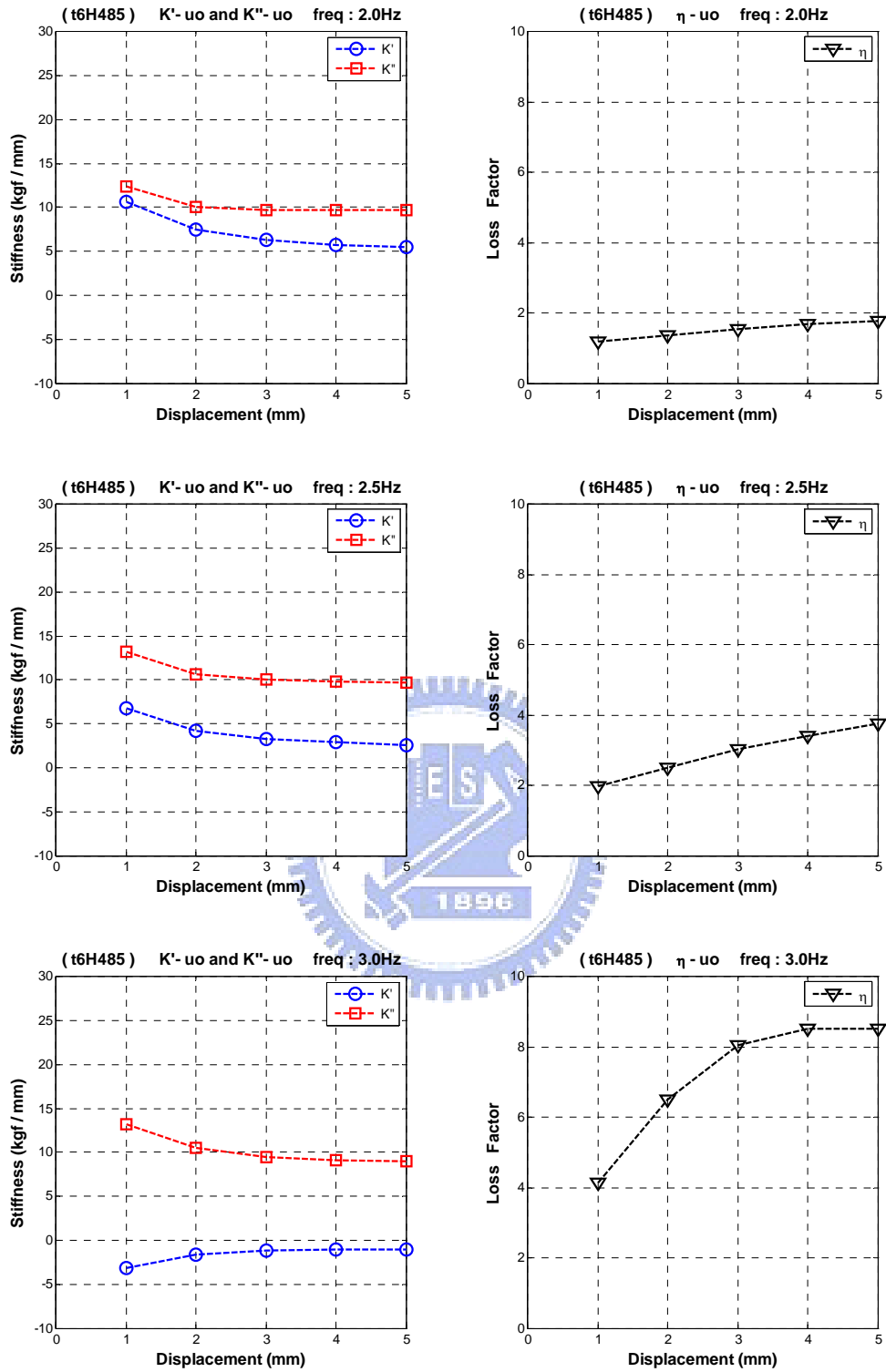


圖 4.26-2 t6H485 K' 、 K'' 、 η 與 u_0 的關係圖

(Thickness : 6mm , Length : 485mm , B.C. : Hinged)

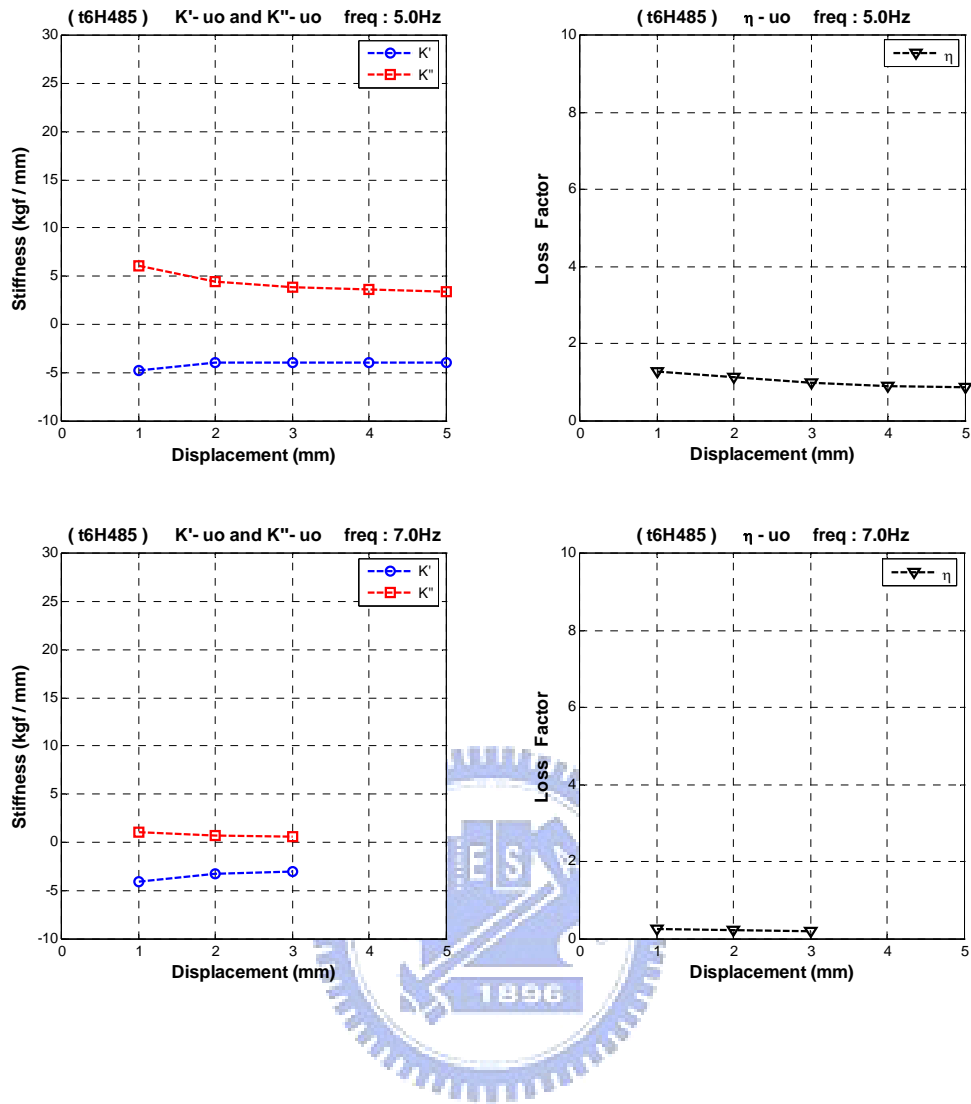


圖 4.26-3 t6H485 K' 、 K'' 、 η 與 u_0 的關係圖

(Thickness : 6mm , Length : 485mm , B.C. : Hinged)

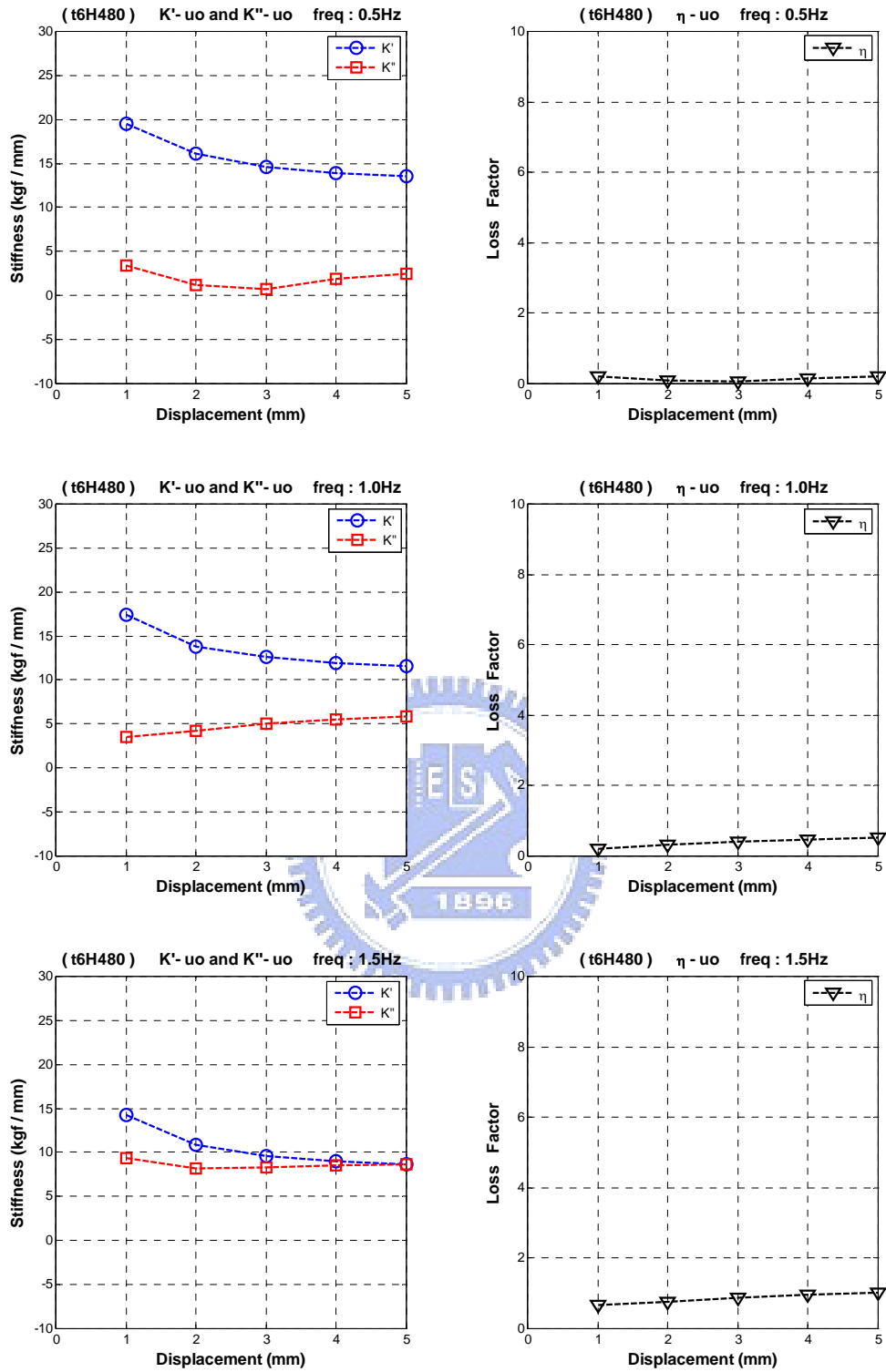


圖 4.27-1 t6H480 K' 、 K'' 、 η 與 u_0 的關係圖

(Thickness : 6mm , Length : 480mm , B.C. : Hinged)

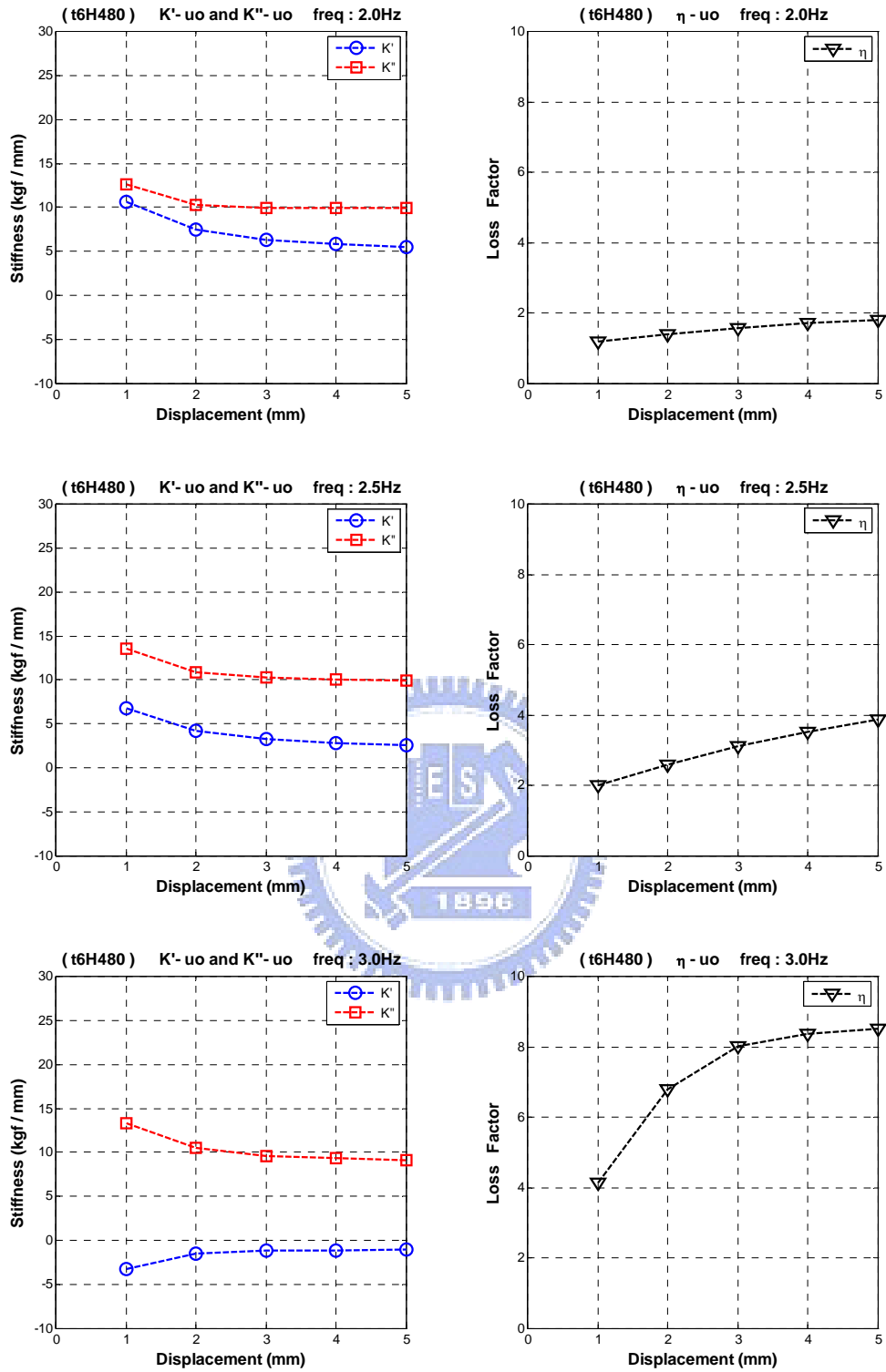


圖 4.27-2 t6H480 K' 、 K'' 、 η 與 u_0 的關係圖

(Thickness : 6mm , Length : 480mm , B.C. : Hinged)

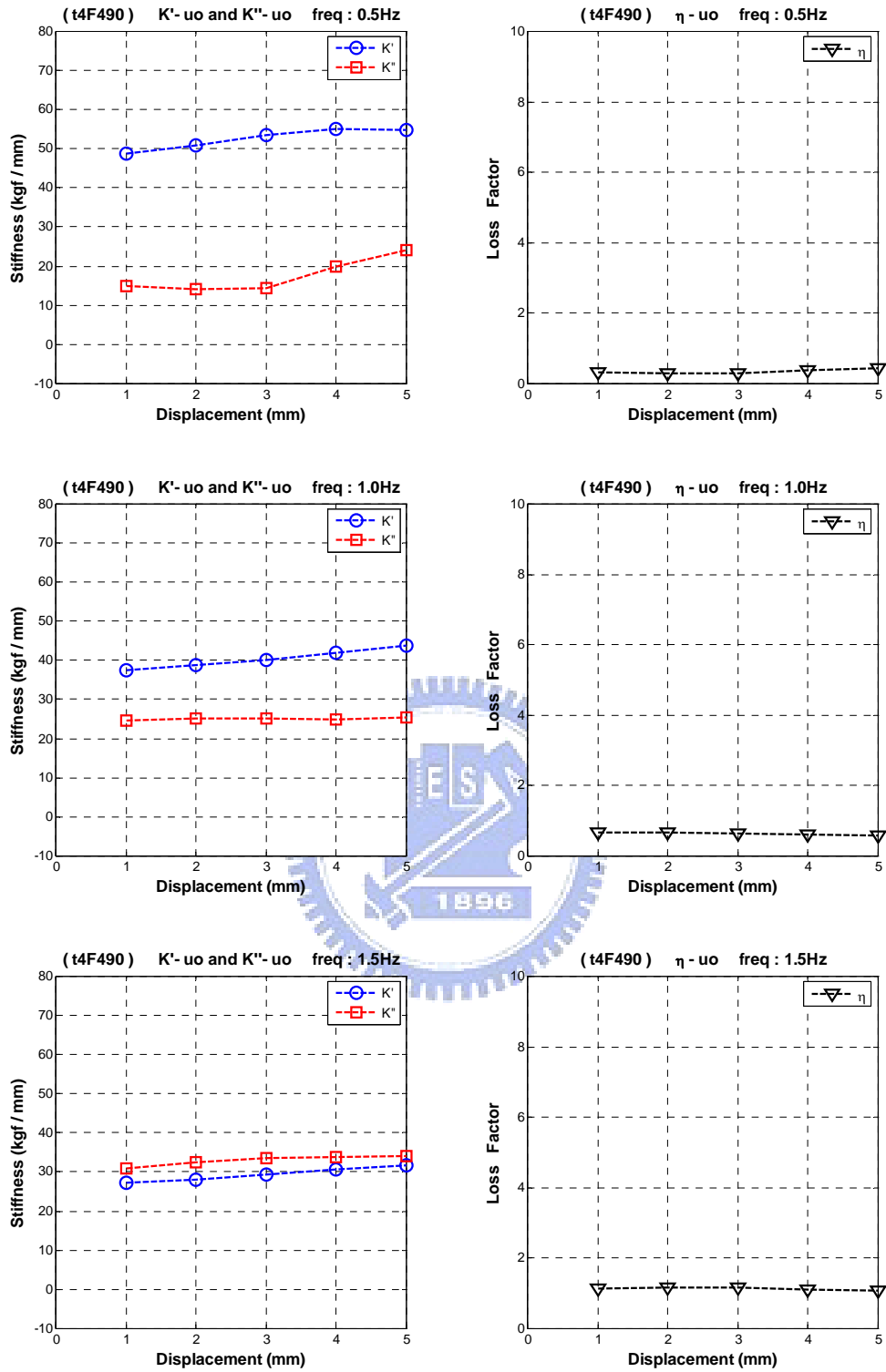


圖 4.28-1 t4F490 K' 、 K'' 、 η 與 u_0 的關係圖

(Thickness : 4mm , Length : 490mm , B.C. : Fixed)

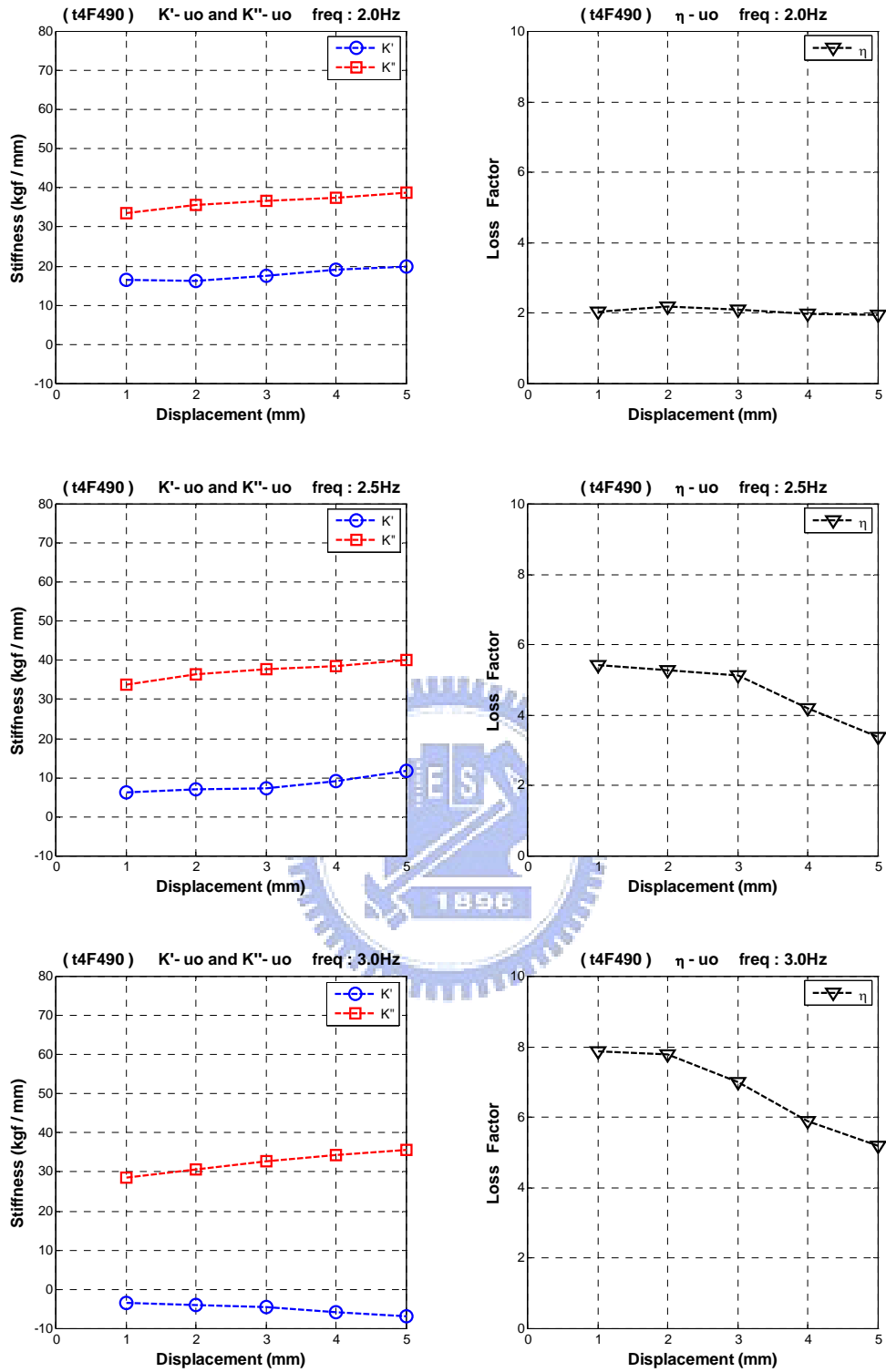


圖 4.28-2 t4F490 K' 、 K'' 、 η 與 u_0 的關係圖

(Thickness : 4mm , Length : 490mm , B.C. : Fixed)

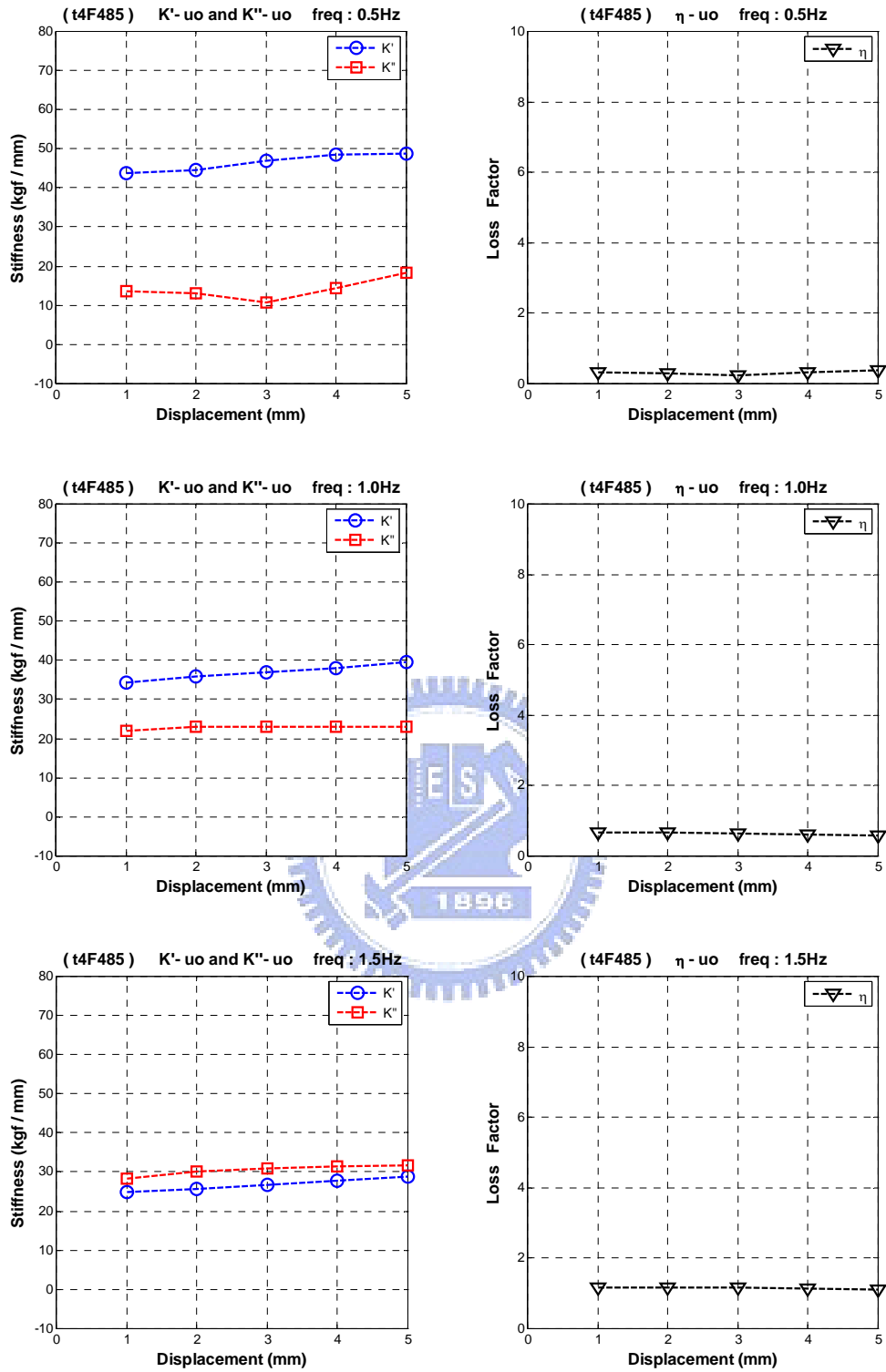


圖 4.29-1 t4F485 K' 、 K'' 、 η 與 u_0 的關係圖

(Thickness : 4mm , Length : 485mm , B.C. : Fixed)

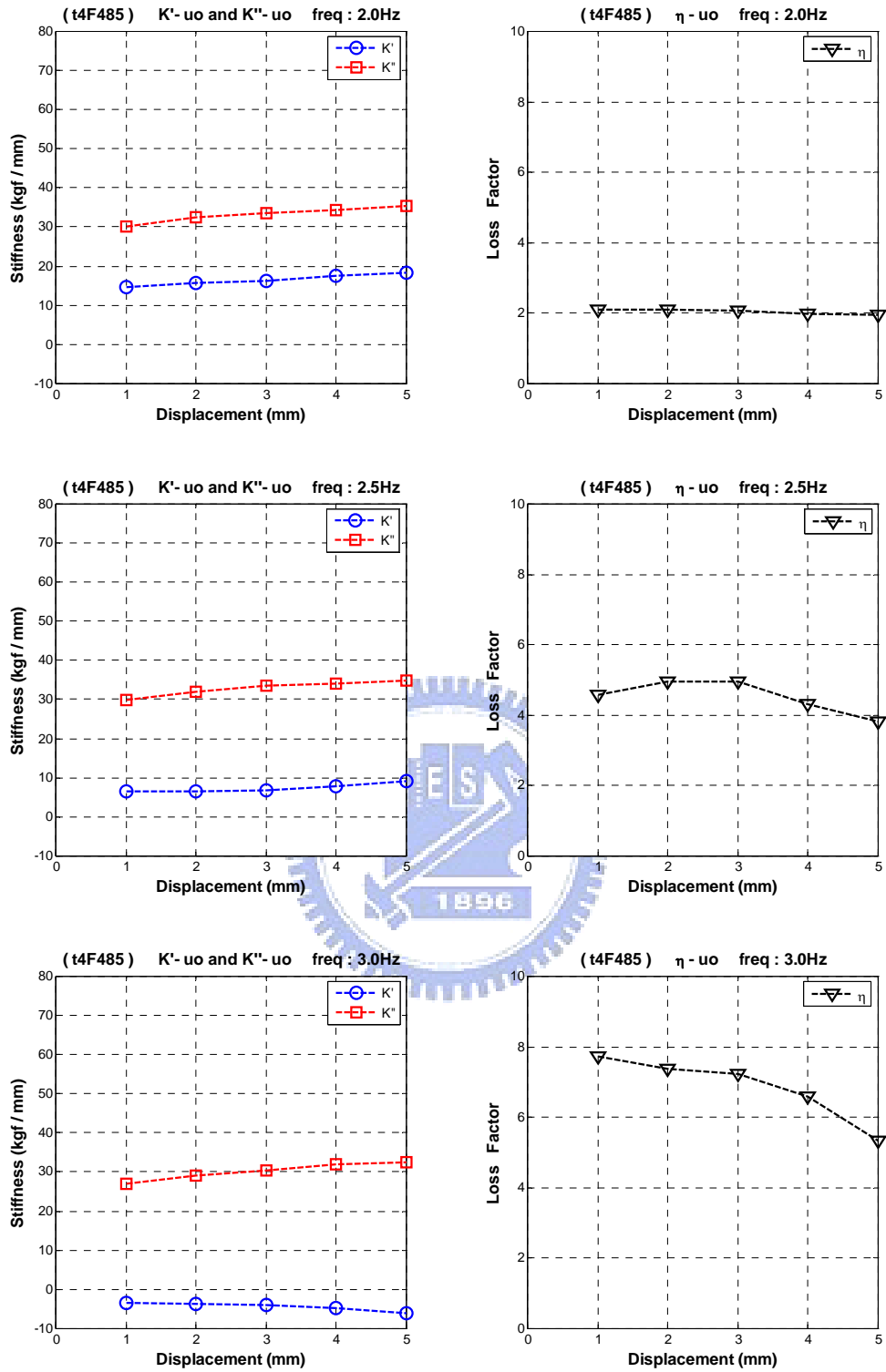


圖 4.29-2 t4F485 K' 、 K'' 、 η 與 u_0 的關係圖

(Thickness : 4mm , Length : 485mm , B.C. : Fixed)

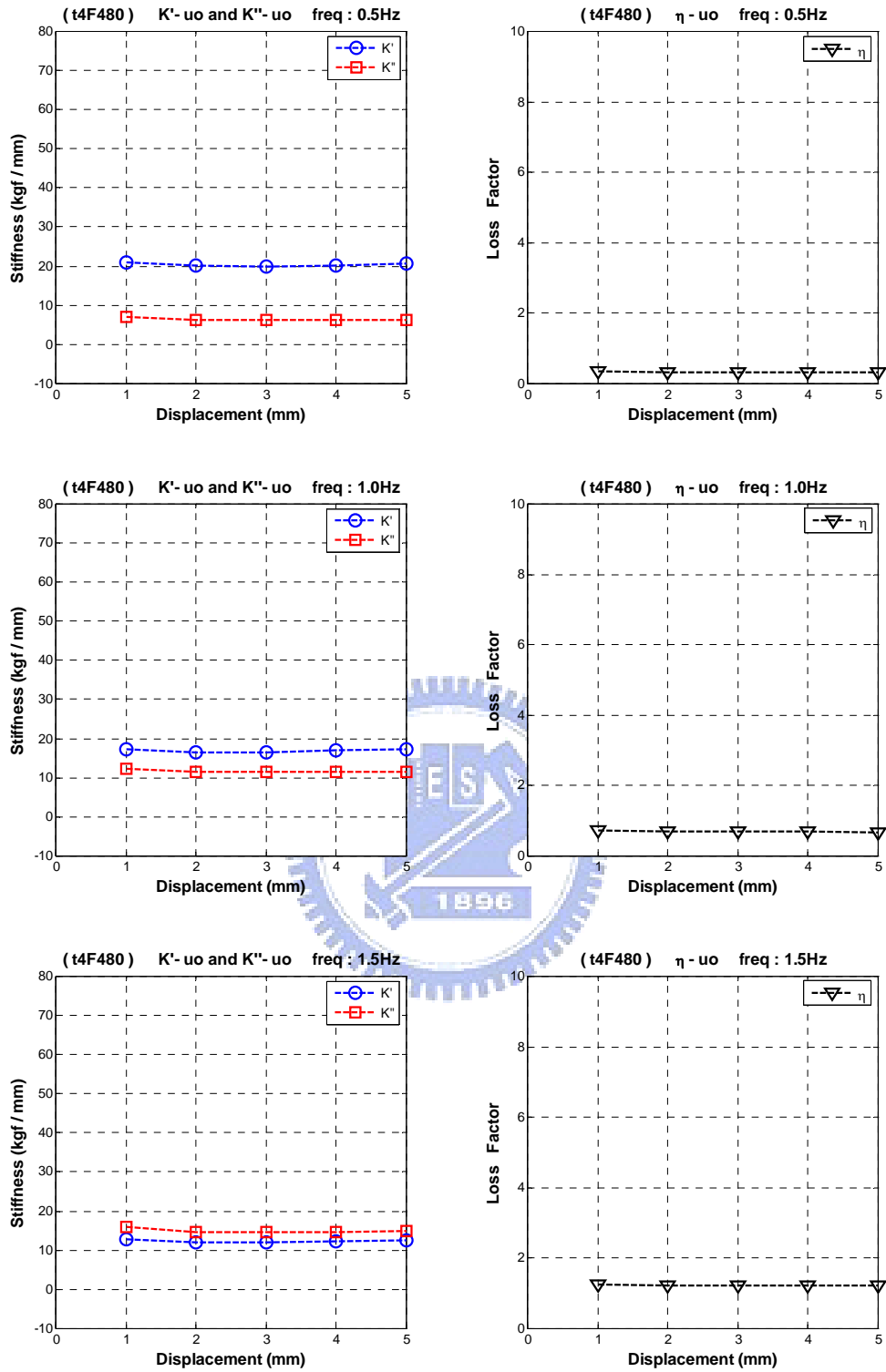


圖 4.30-1 t4F480 K' 、 K'' 、 η 與 u_0 的關係圖

(Thickness : 4mm , Length : 480mm , B.C. : Fixed)

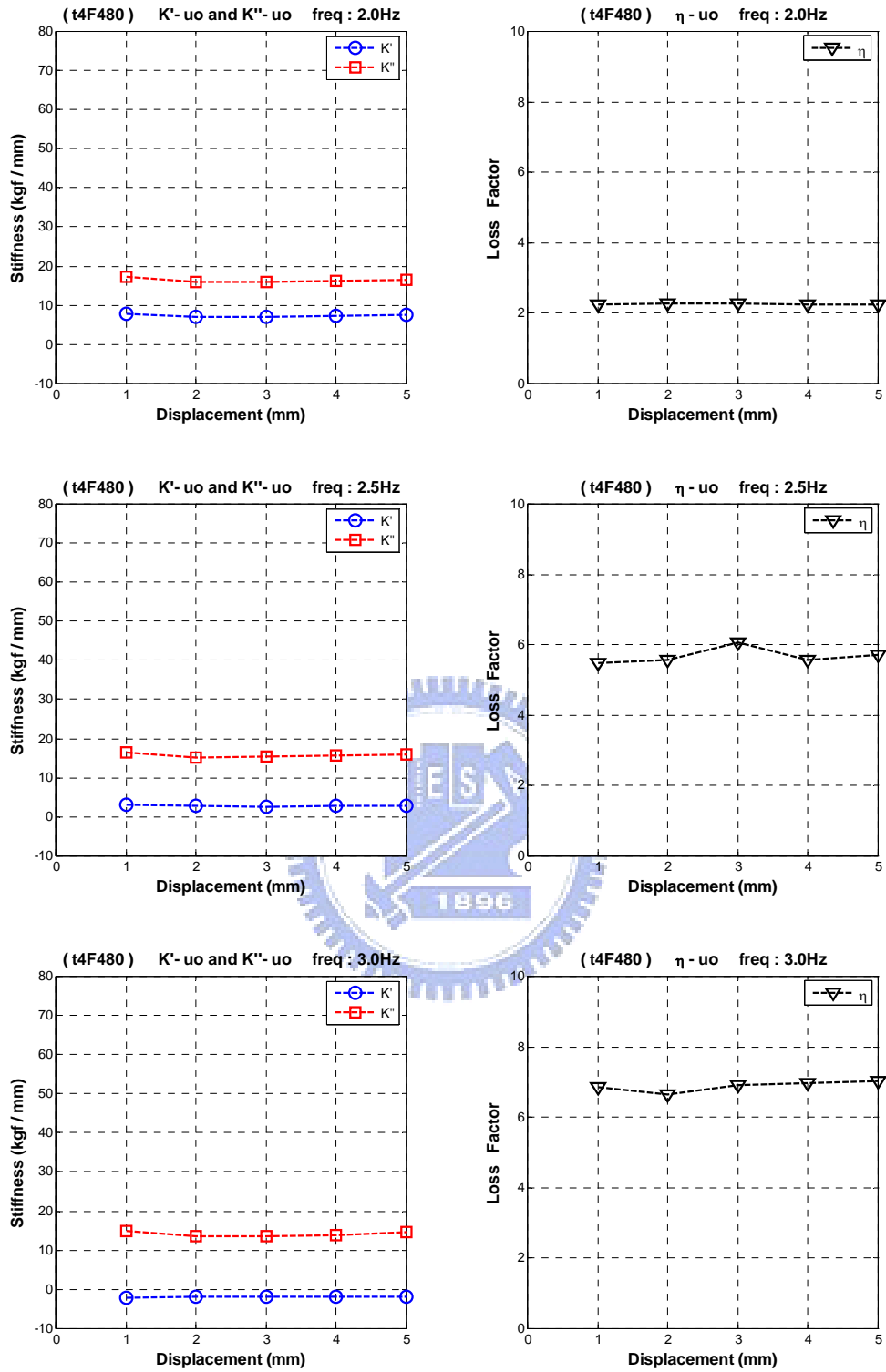


圖 4.30-2 t4F480 K' 、 K'' 、 η 與 u_0 的關係圖

(Thickness : 4mm , Length : 480mm , B.C. : Fixed)

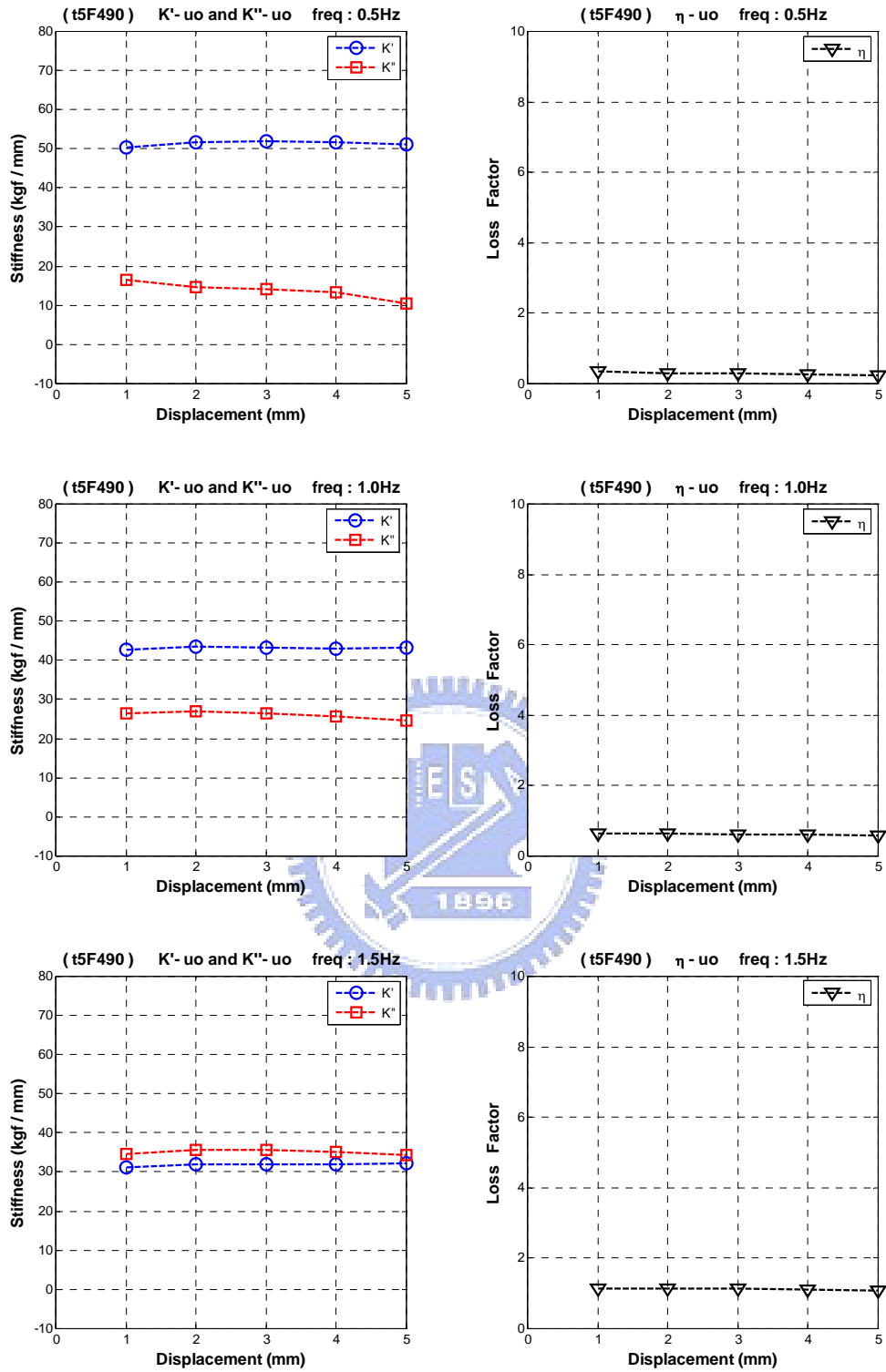


圖 4.31-1 t5F490 K' 、 K'' 、 η 與 u_0 的關係圖

(Thickness : 5mm , Length : 490mm , B.C. : Fixed)

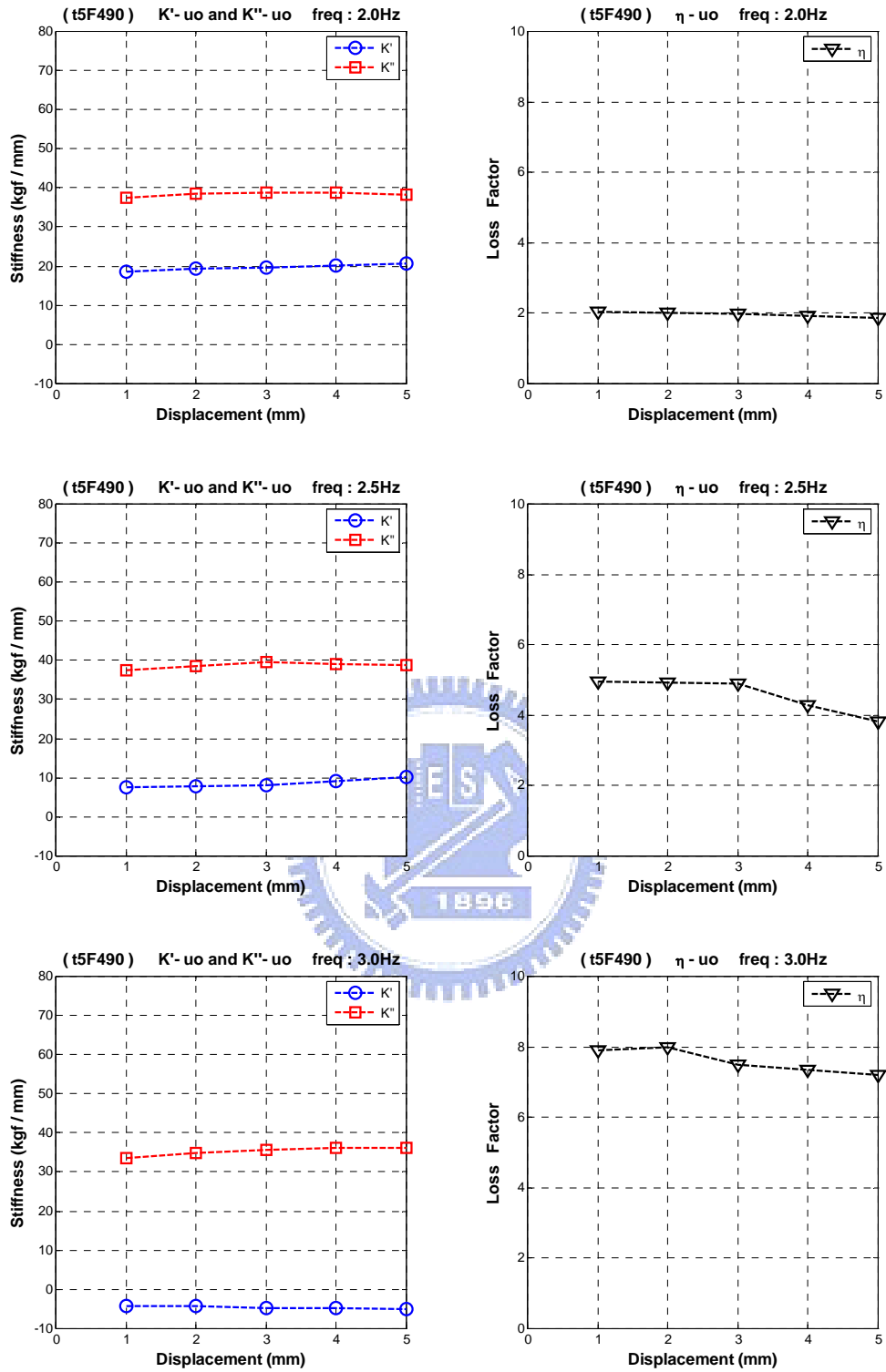


圖 4.31-2 t5F490 K' 、 K'' 、 η 與 u_0 的關係圖

(Thickness : 5mm , Length : 490mm , B.C. : Fixed)

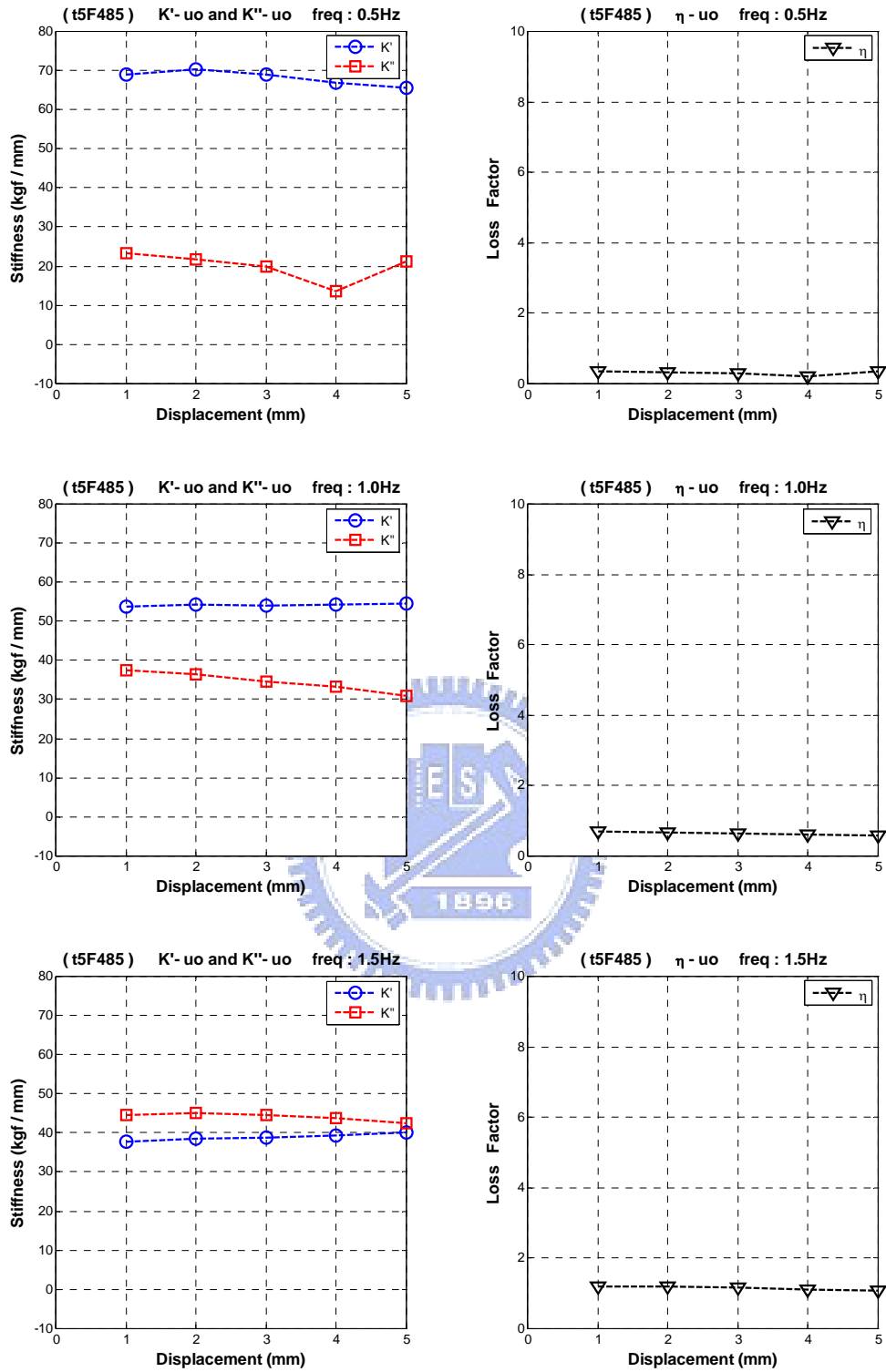


圖 4.32-1 t5F485 K' 、 K'' 、 η 與 u_0 的關係圖

(Thickness : 5mm , Length : 485mm , B. C. : Fixed)

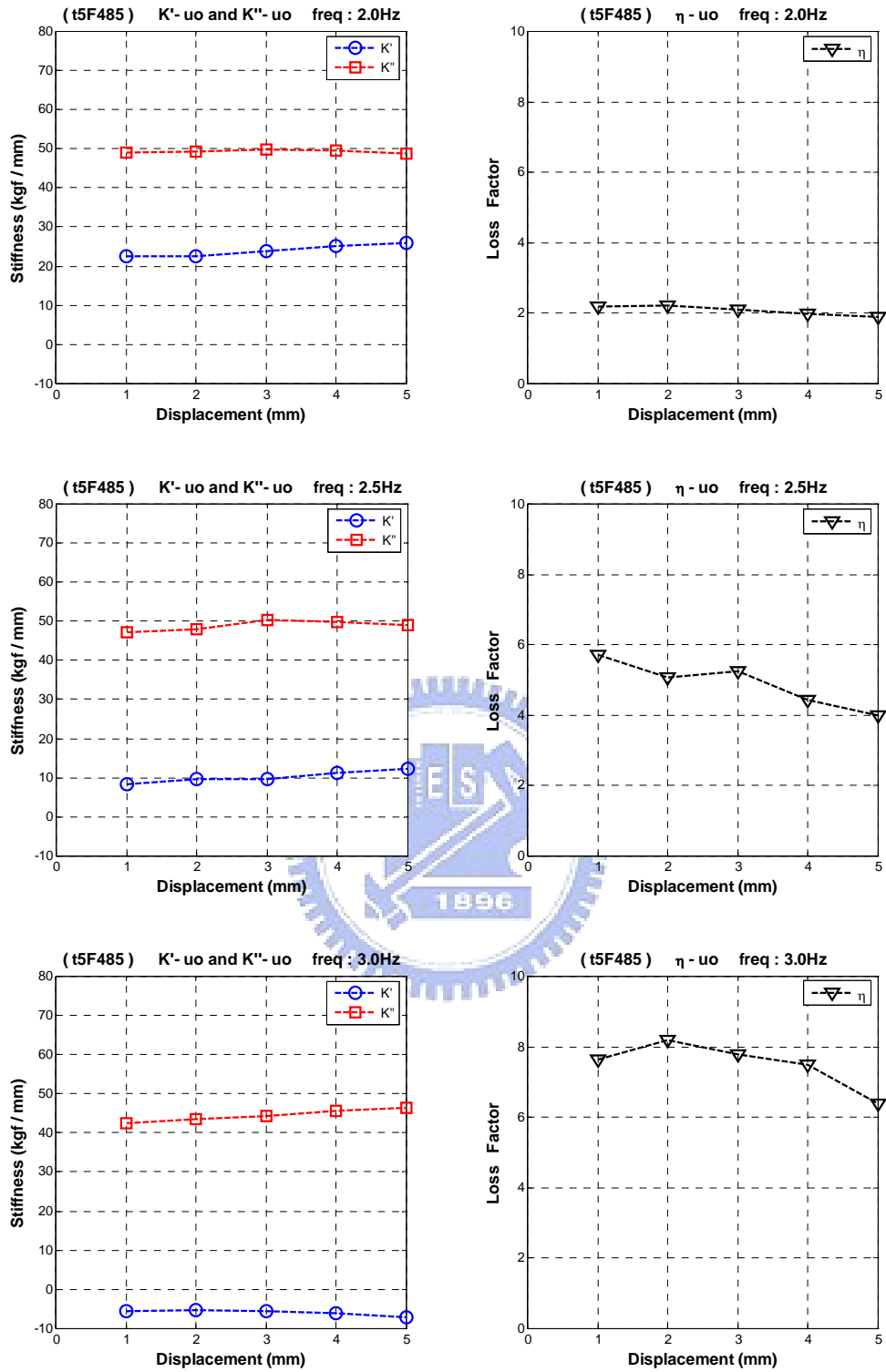


圖 4.32-2 t5F485 K' 、 K'' 、 η 與 u_0 的關係圖

(Thickness : 5mm , Length : 485mm , B.C. : Fixed)

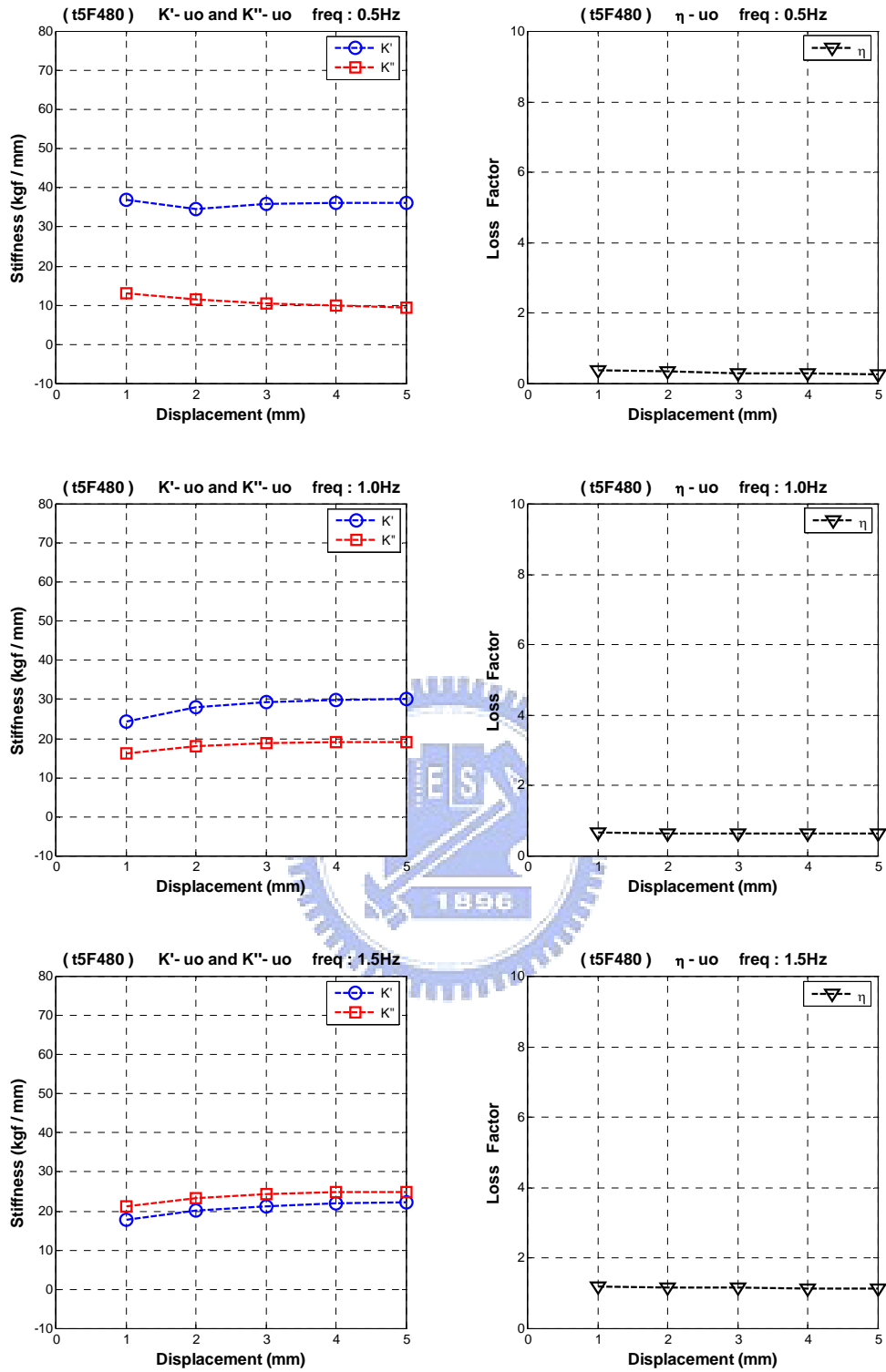


圖 4.33-1 t5F480 K' 、 K'' 、 η 與 u_0 的關係圖

(Thickness : 5mm , Length : 480mm , B.C. : Fixed)

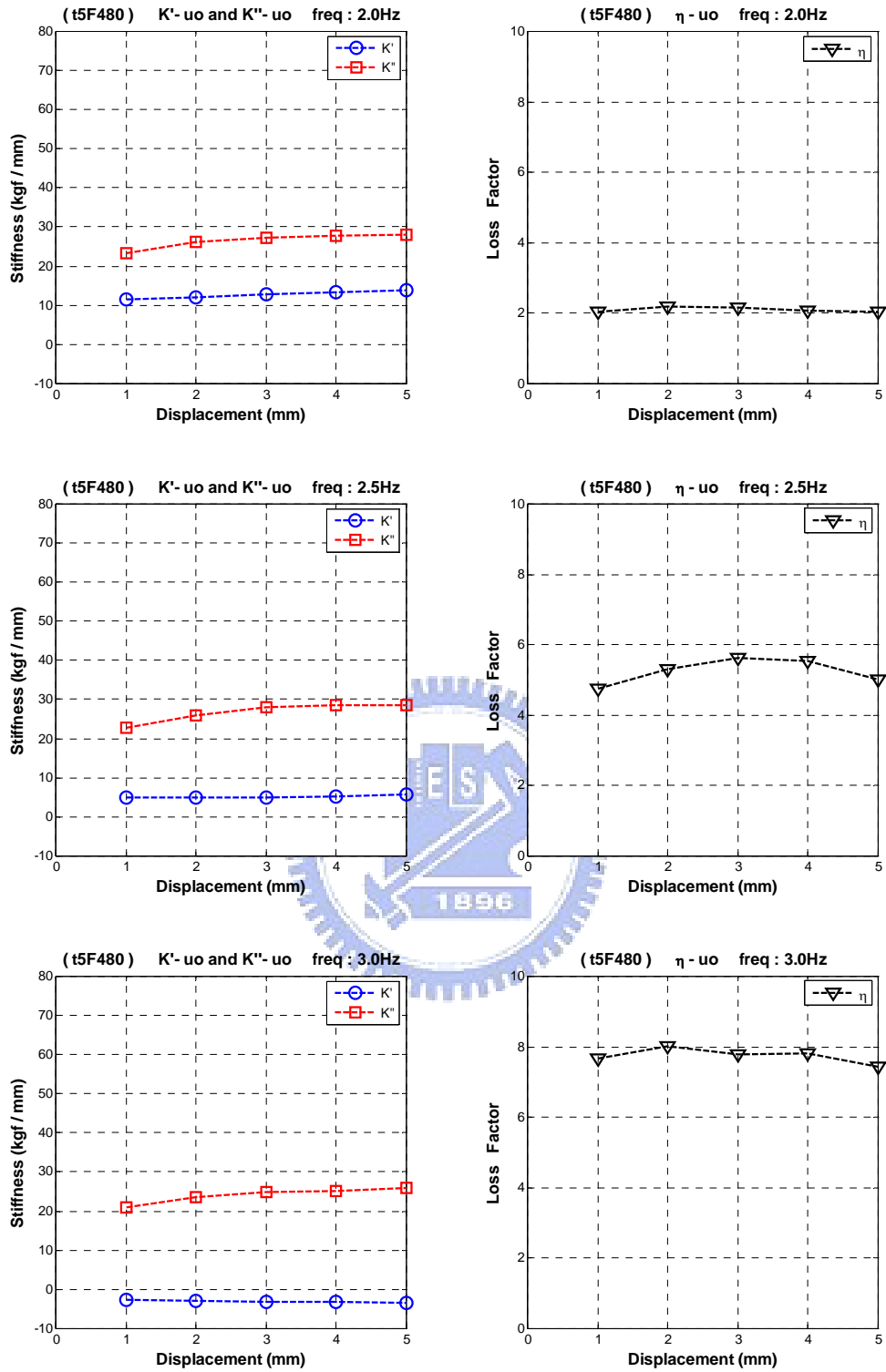


圖 4.33-2 t5F480 K' 、 K'' 、 η 與 u_0 的關係圖

(Thickness : 5mm , Length : 480mm , B.C. : Fixed)

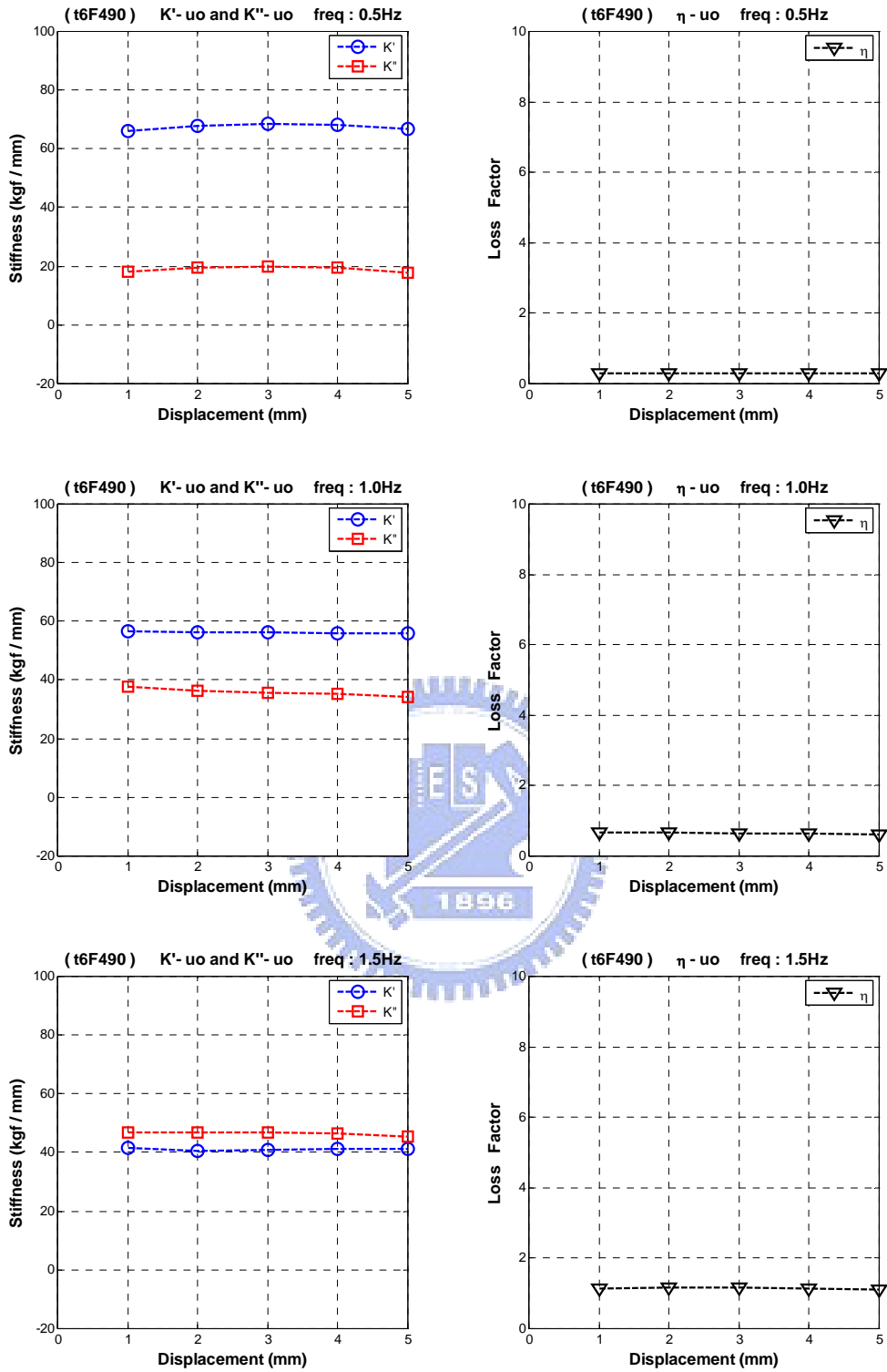


圖 4.34-1 t6F490 K' 、 K'' 、 η 與 u_0 的關係圖

(Thickness : 6mm , Length : 490mm , B.C. : Fixed)

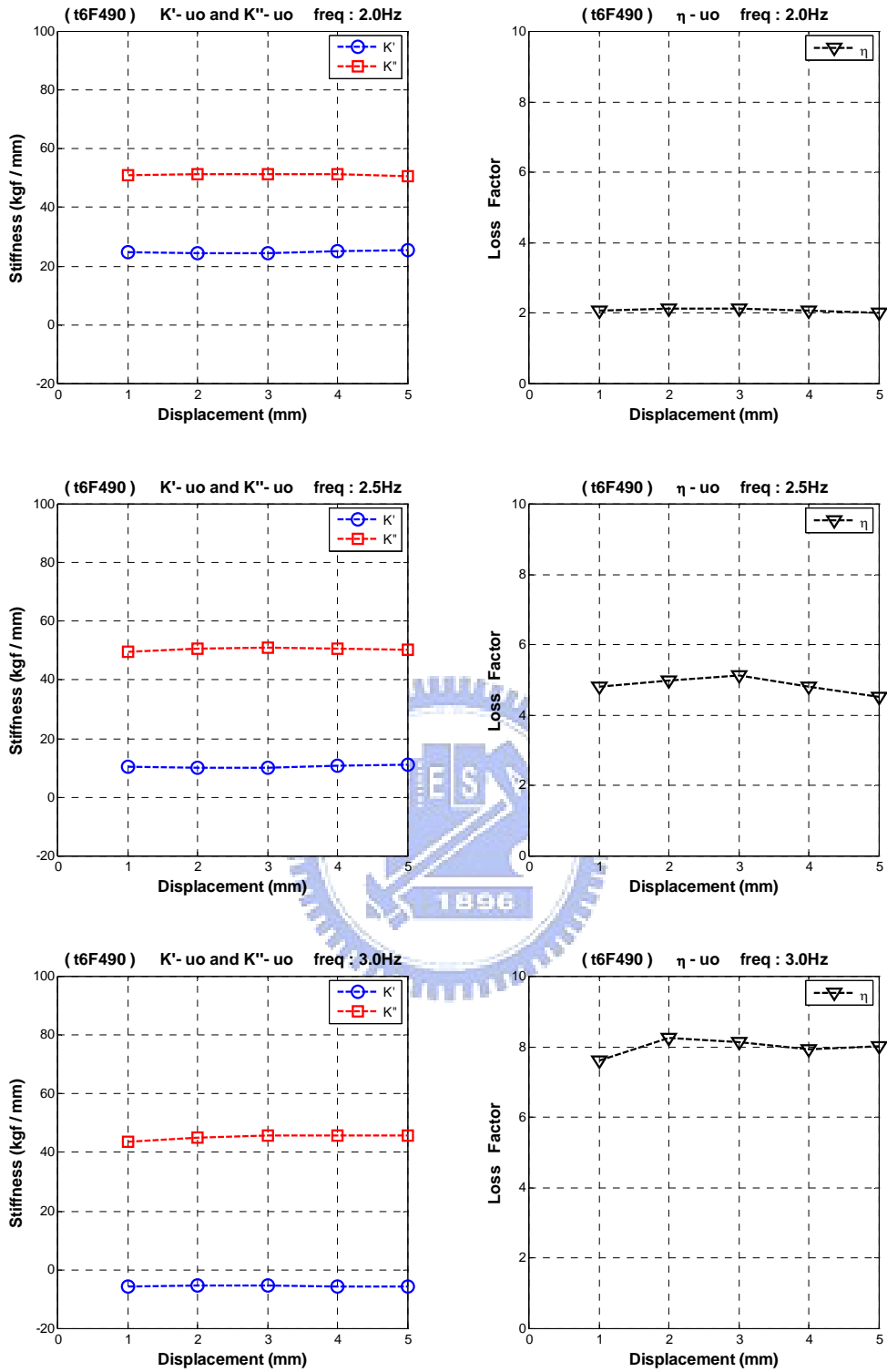


圖 4.34-2 t6F490 K' 、 K'' 、 η 與 u_0 的關係圖

(Thickness : 6mm , Length : 490mm , B.C. : Fixed)

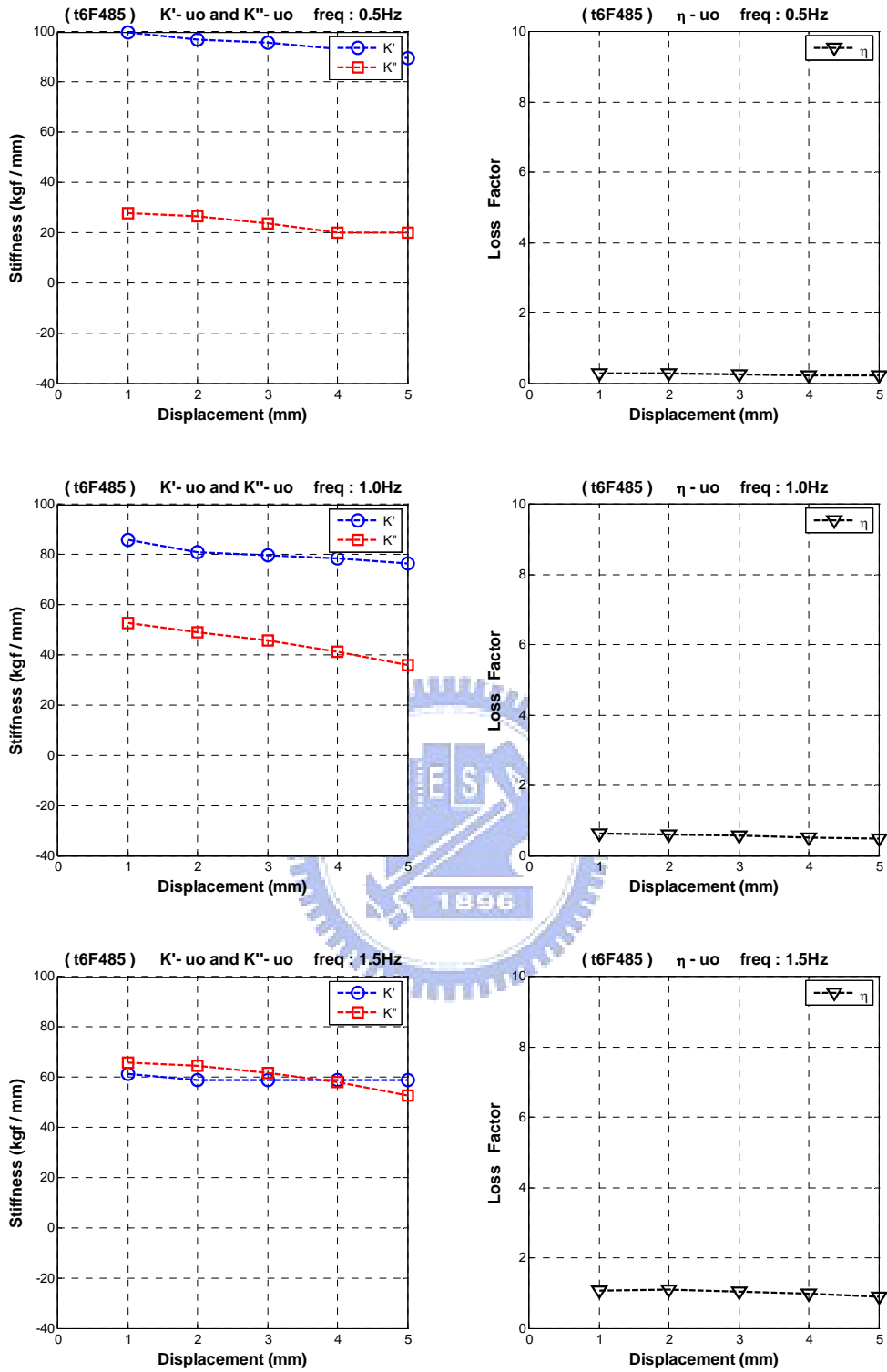


圖 4.35-1 t6F485 K' 、 K'' 、 η 與 u_0 的關係圖

(Thickness : 6mm , Length : 485mm , B.C. : Fixed)

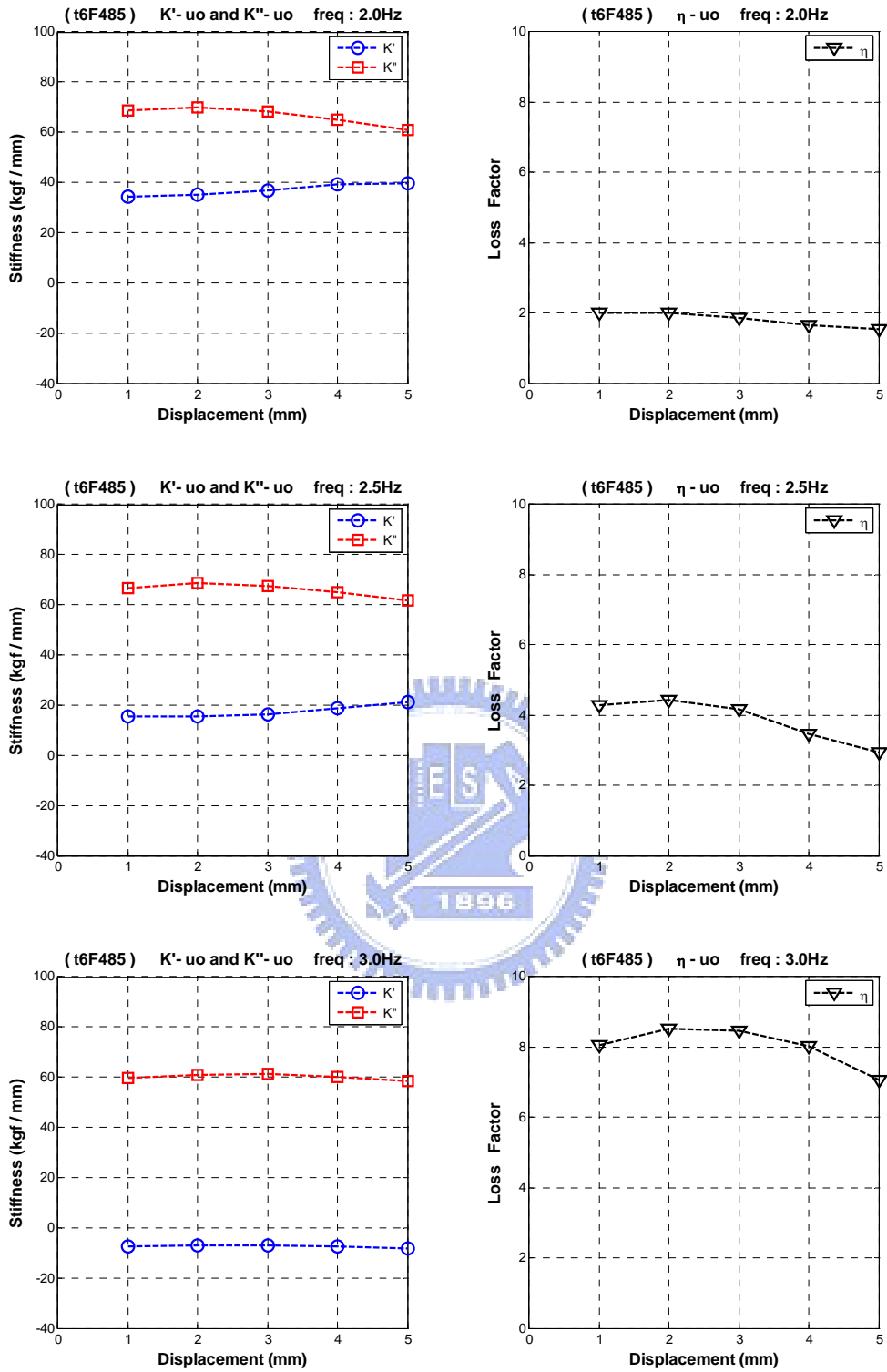


圖 4.35-2 t6F485 K' 、 K'' 、 η 與 u_0 的關係圖

(Thickness : 6mm , Length : 485mm , B.C. : Fixed)

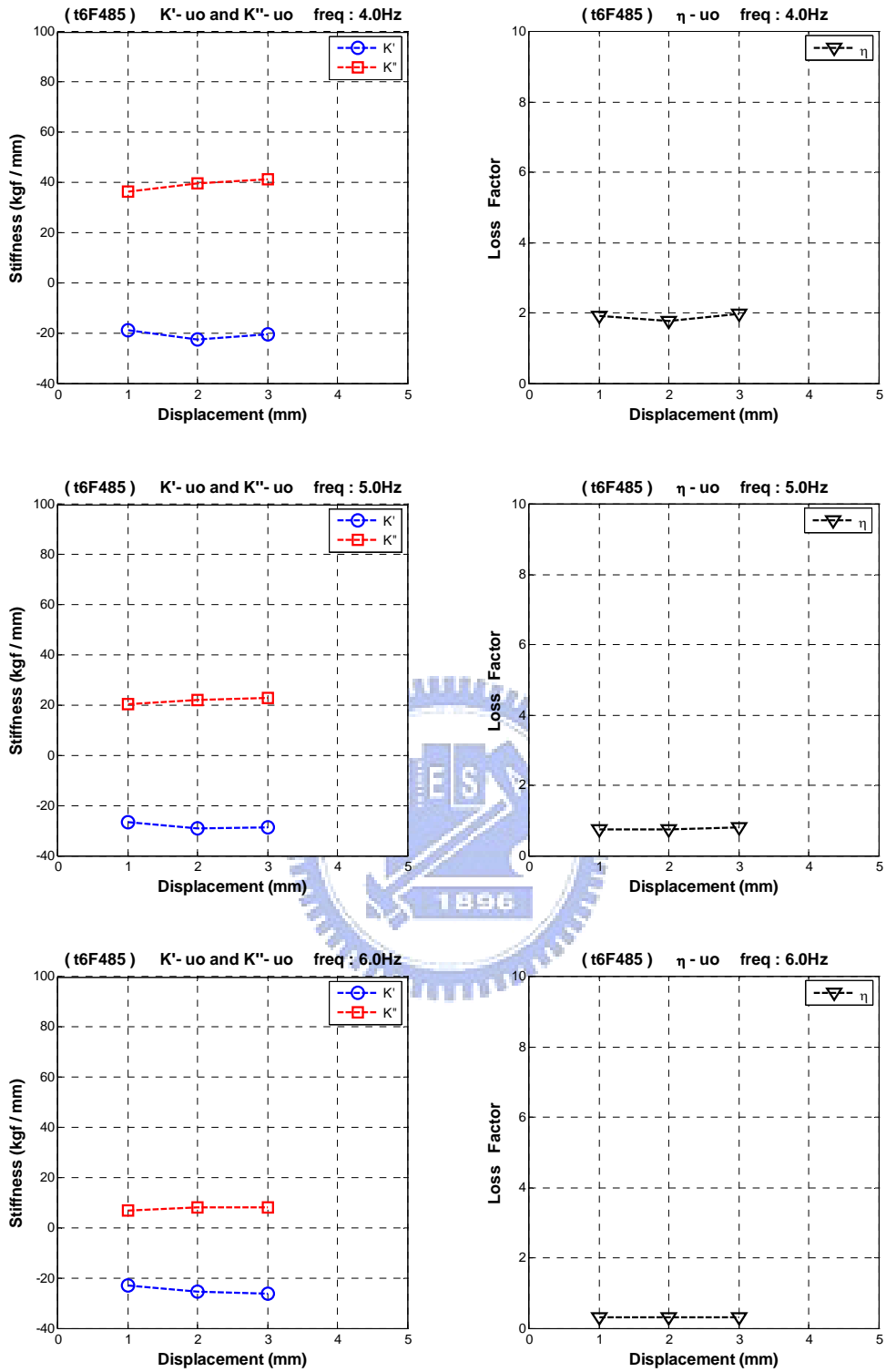


圖 4.35-3 t6F485 K' 、 K'' 、 η 與 u_0 的關係圖

(Thickness : 6mm , Length : 485mm , B.C. : Fixed)

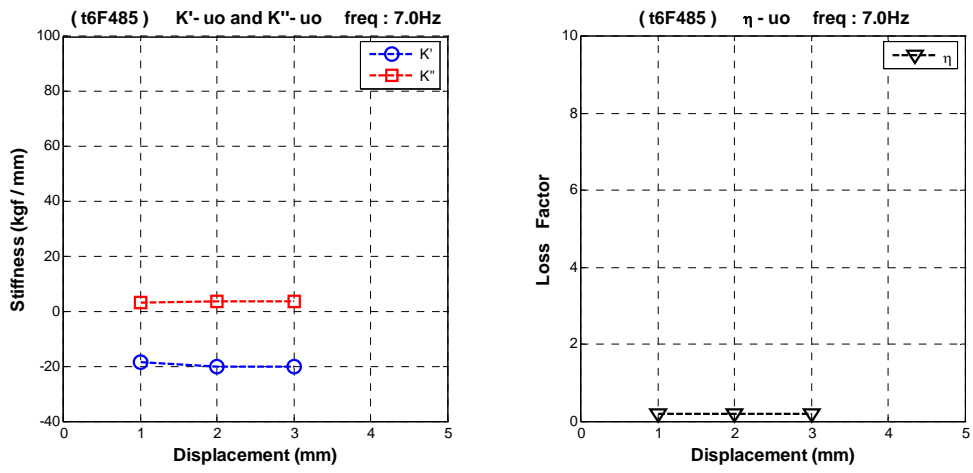


圖 4.35-4 t6F485 K' 、 K'' 、 η 與 u_0 的關係圖

(Thickness : 6mm , Length : 485mm , B.C. : Fixed)

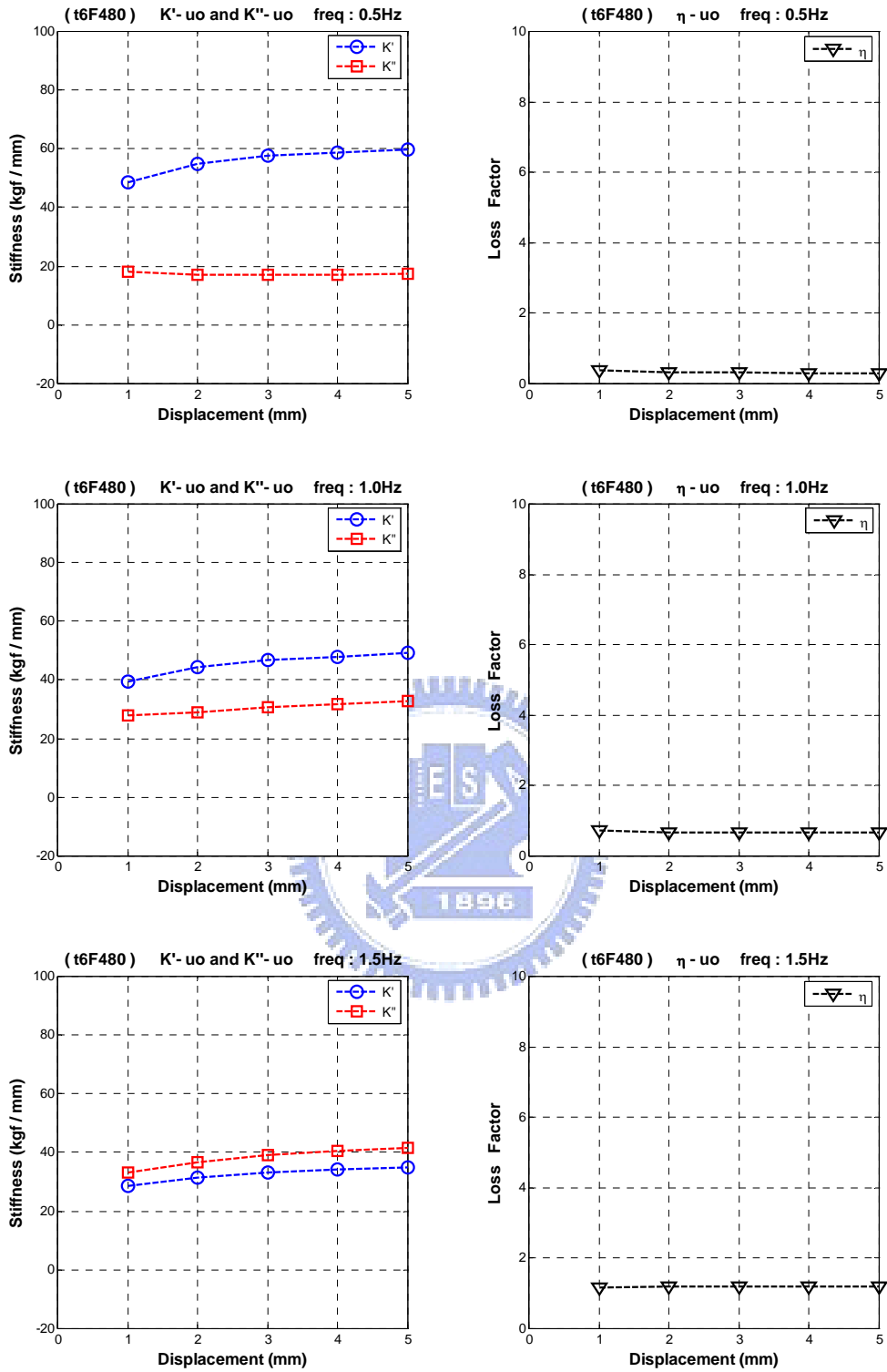


圖 4.36-1 t6F480 K' 、 K'' 、 η 與 u_0 的關係圖

(Thickness : 6mm , Length : 480mm , B.C. : Fixed)

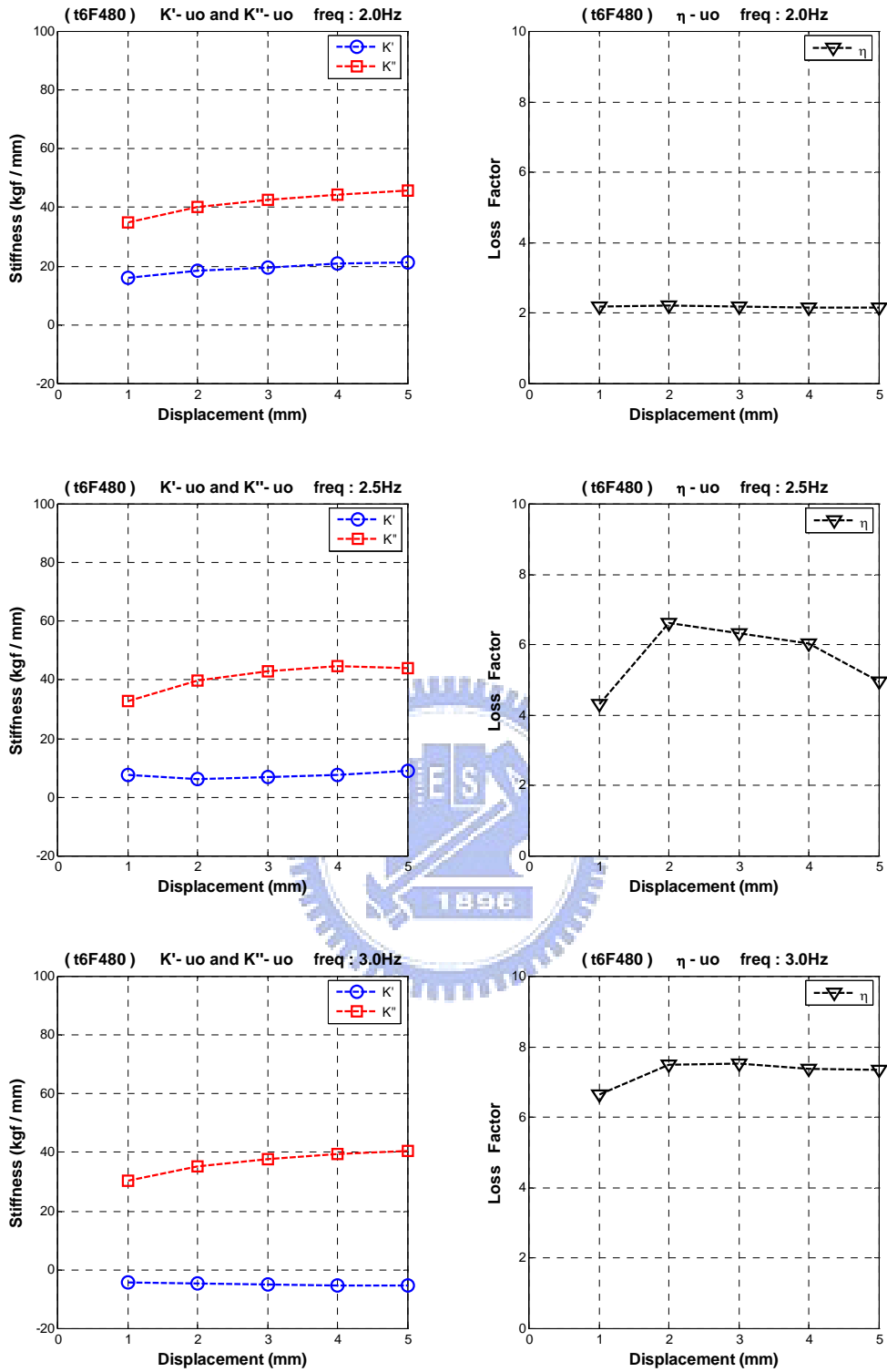


圖 4.36-2 t6F480 K' 、 K'' 、 η 與 u_0 的關係圖

(Thickness : 6mm , Length : 480mm , B. C. : Fixed)

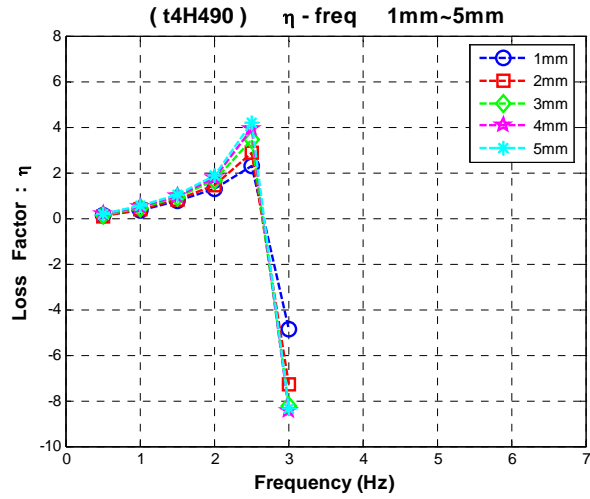


圖 4.37 t4H490 η 與頻率 f 的關係圖

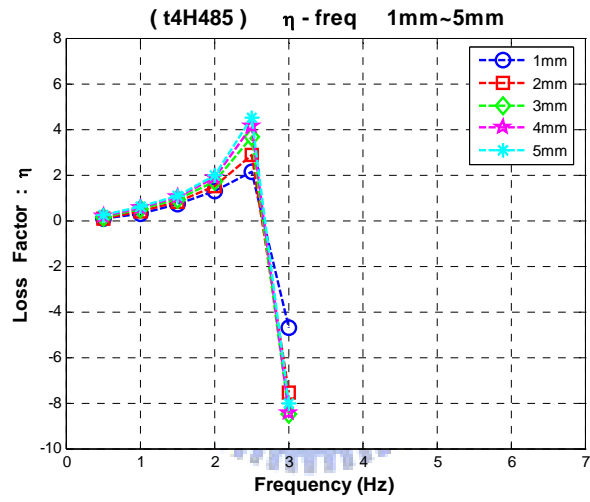


圖 4.38 t4H485 η 與頻率 f 的關係圖

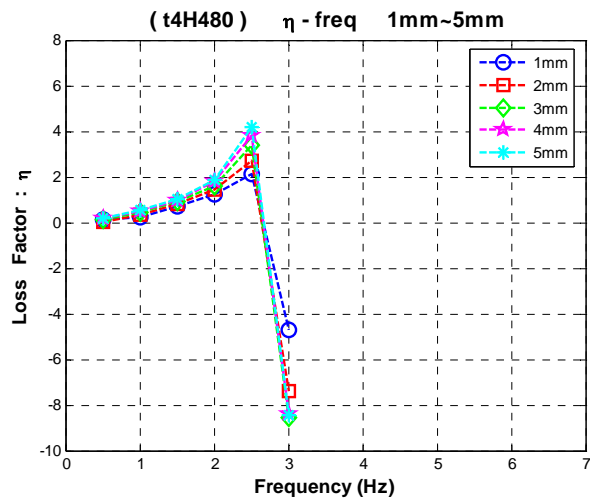


圖 4.39 t4H480 η 與頻率 f 的關係圖

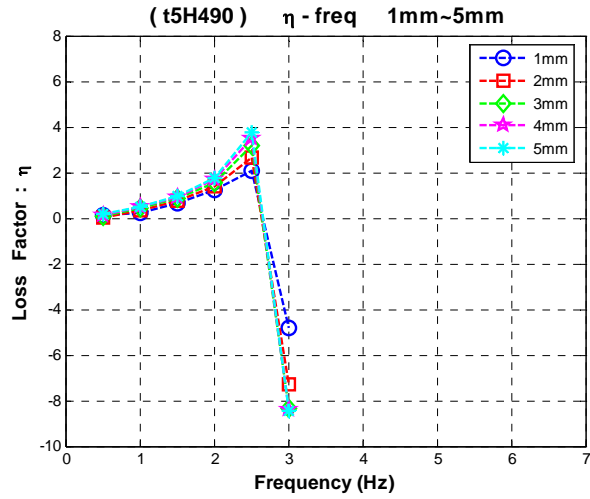


圖 4.40 t5H490 η 與頻率 f 的關係圖

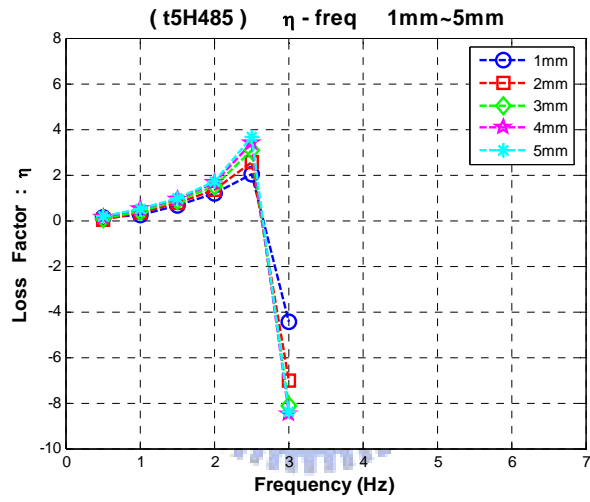


圖 4.41 t5H485 η 與頻率 f 的關係圖

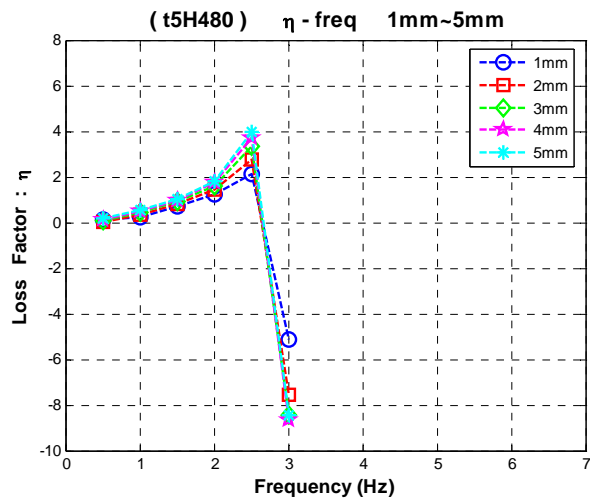


圖 4.42 t5H480 η 與頻率 f 的關係圖

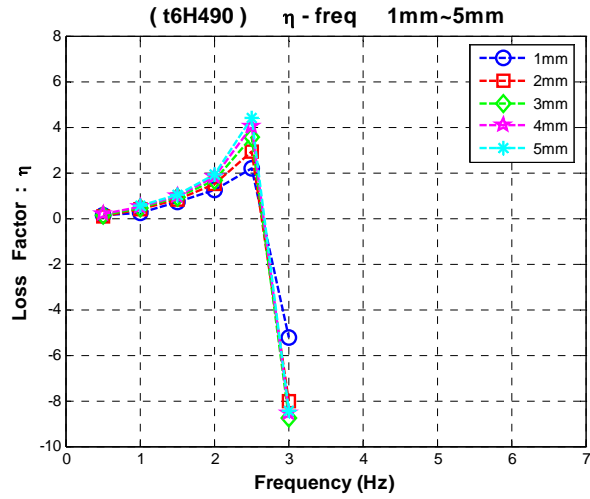


圖 4.43 t6H490 η 與頻率 f 的關係圖

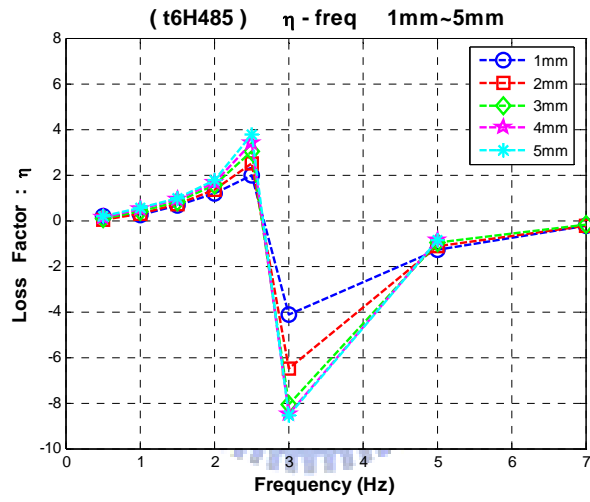


圖 4.44 t6H485 η 與頻率 f 的關係圖

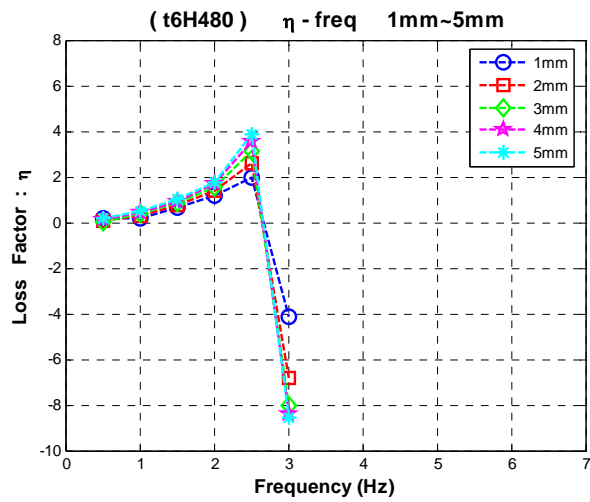


圖 4.45 t6H480 η 與頻率 f 的關係圖

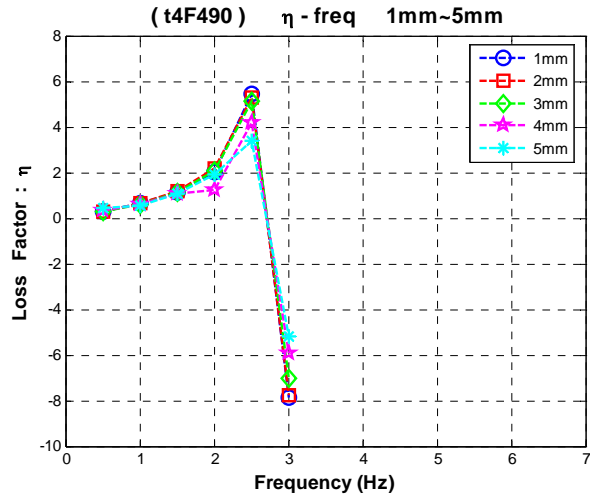


圖 4.46 t4F490 η 與頻率 f 的關係圖

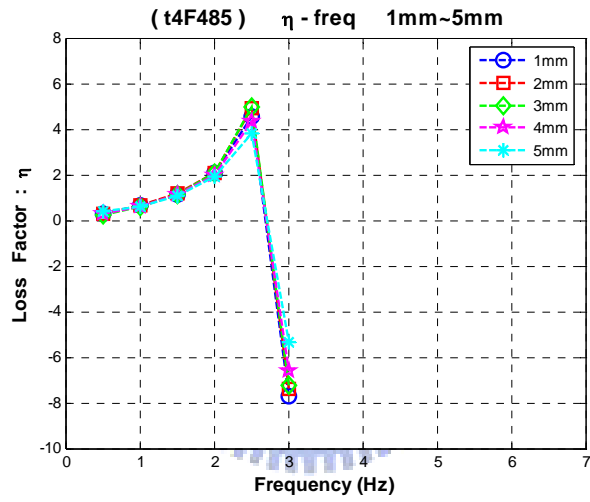


圖 4.47 t4F485 η 與頻率 f 的關係圖

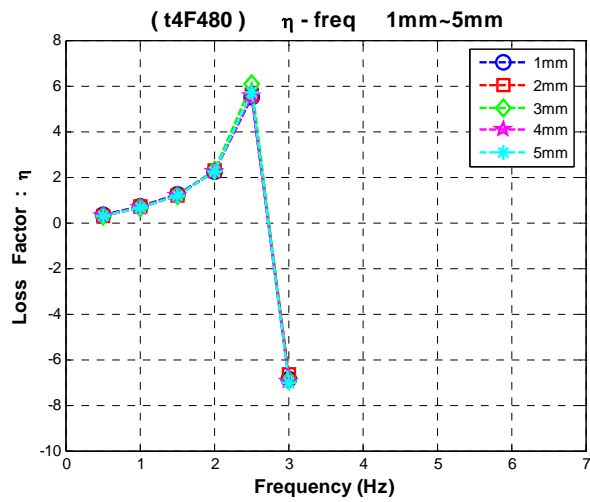


圖 4.48 t4F480 η 與頻率 f 的關係圖

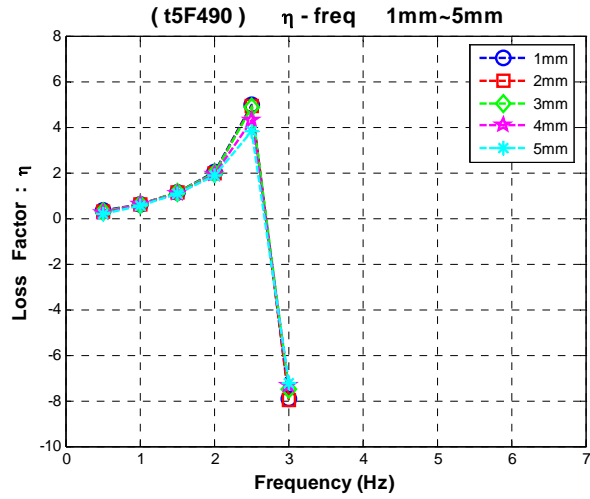


圖 4.49 t5F490 η 與頻率 f 的關係圖

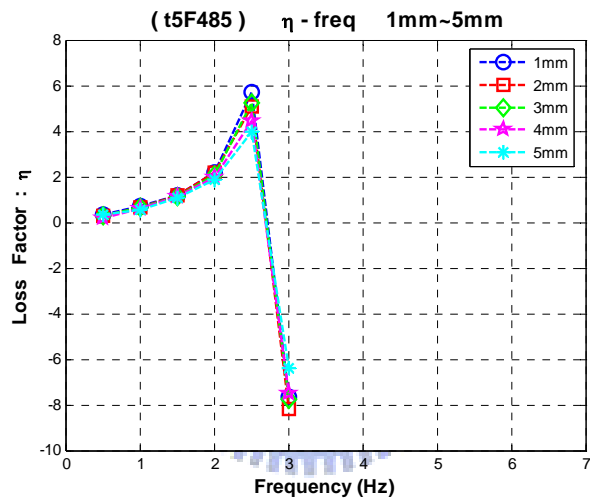


圖 4.50 t5F485 η 與頻率 f 的關係圖

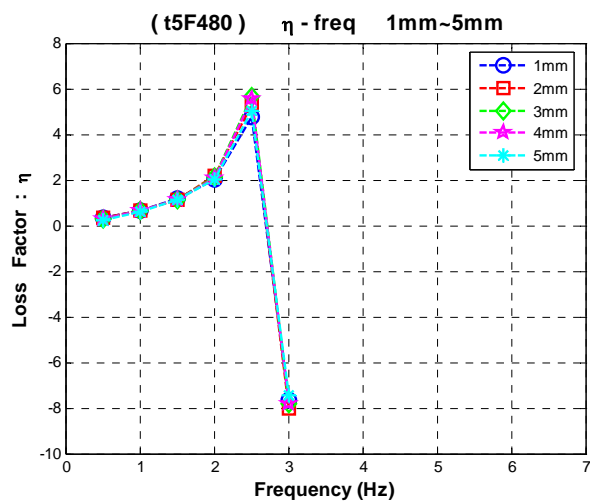


圖 4.51 t5F480 η 與頻率 f 的關係圖

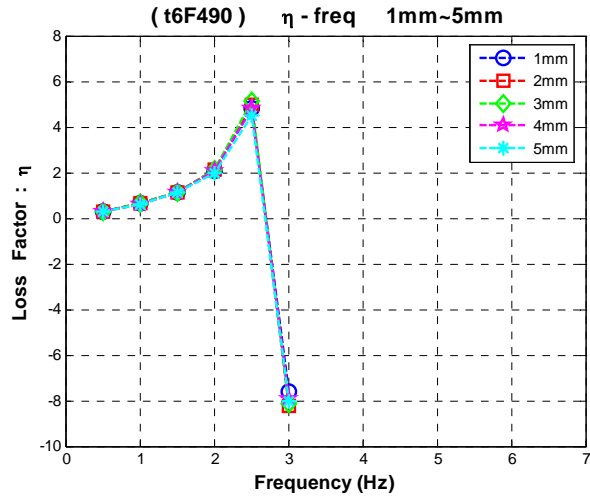


圖 4.52 t6F490 η 與頻率 f 的關係圖

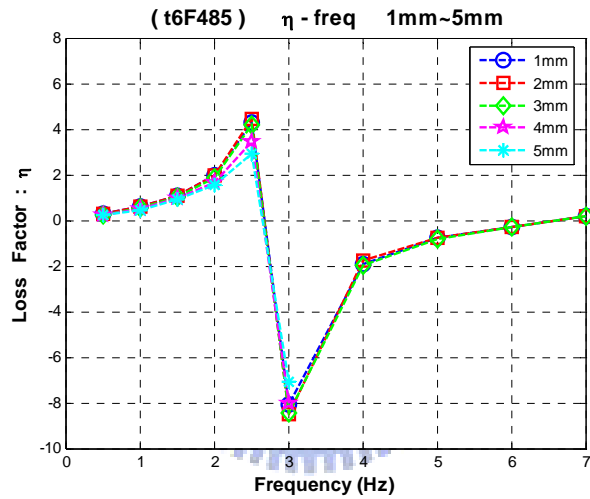


圖 4.53 t6F485 η 與頻率 f 的關係圖

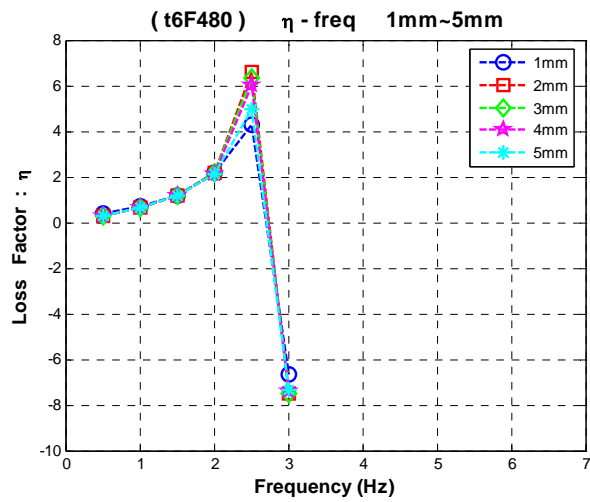


圖 4.54 t6F480 η 與頻率 f 的關係圖

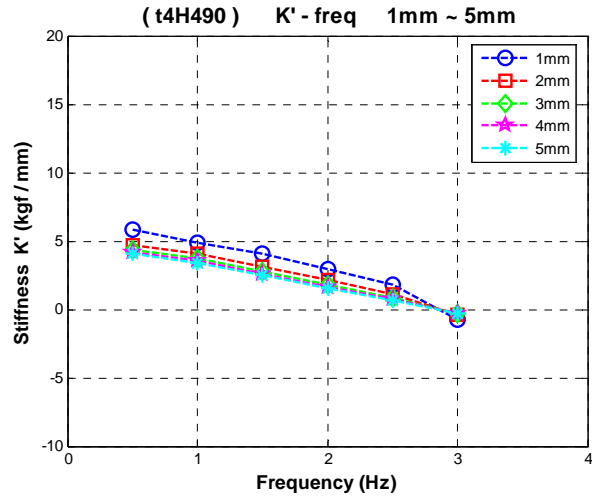


圖 4.55 t4H490 K' 與頻率 f 的關係圖

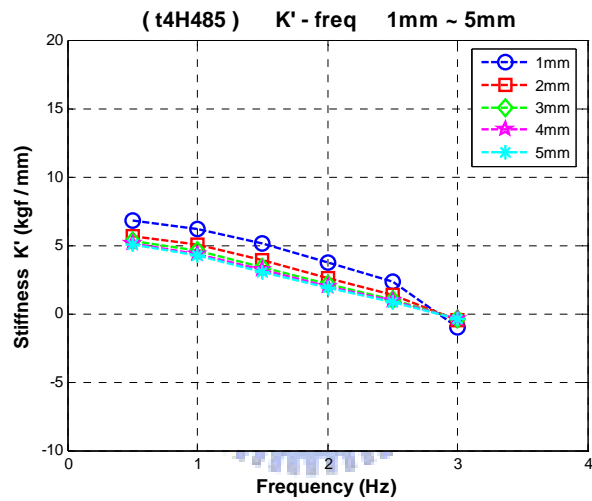


圖 4.56 t4H485 K' 與頻率 f 的關係圖

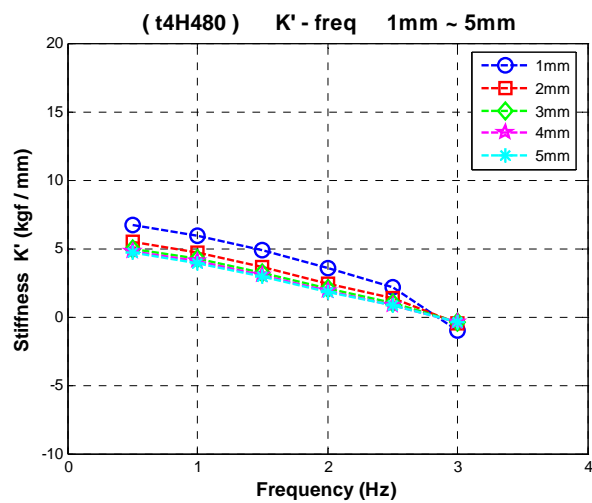


圖 4.57 t4H480 K' 與頻率 f 的關係圖

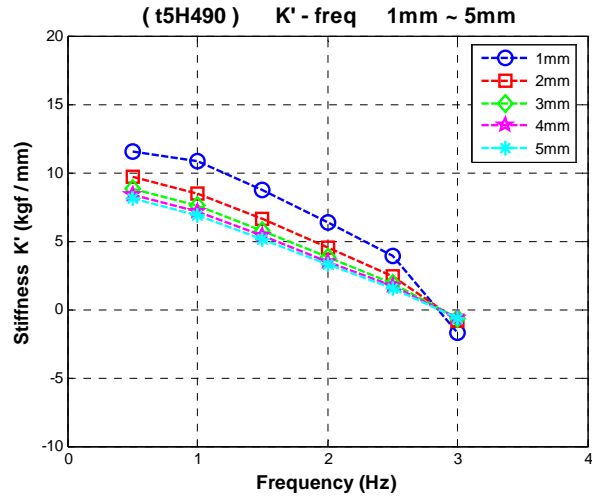


圖 4.58 t5H490 K' 與頻率 f 的關係圖

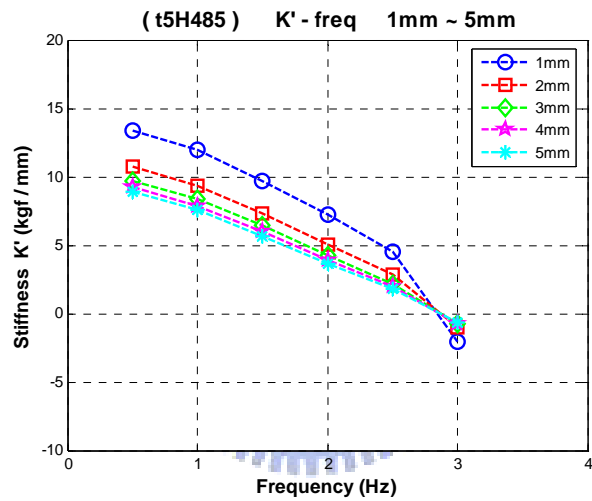


圖 4.59 t5H485 K' 與頻率 f 的關係圖

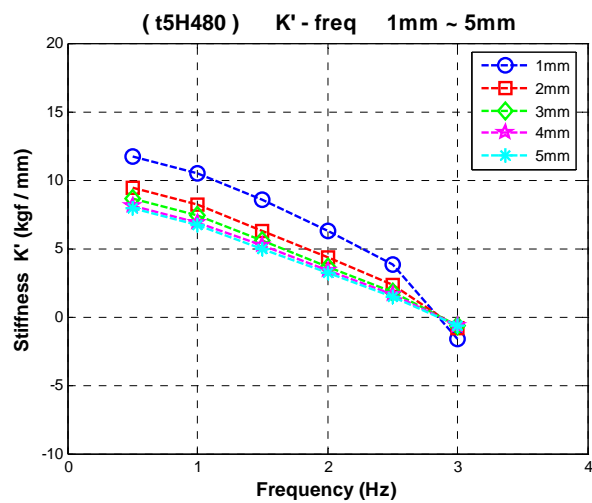


圖 4.60 t5H480 K' 與頻率 f 的關係圖

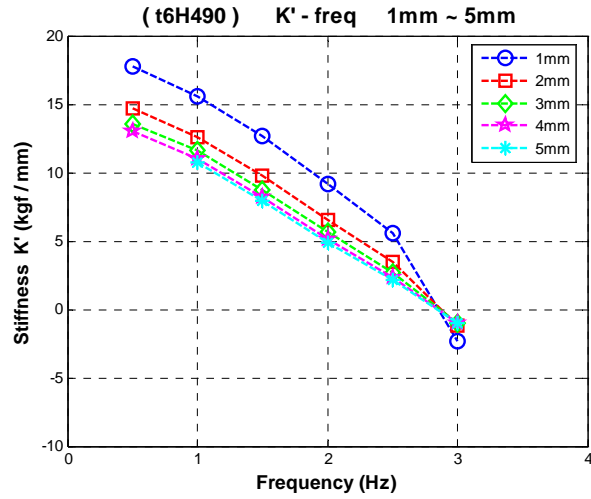


圖 4.61 t6H490 K' 與頻率 f 的關係圖

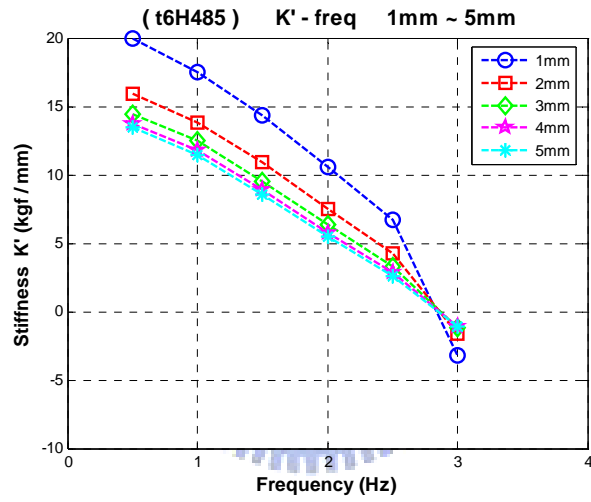


圖 4.62 t6H485 K' 與頻率 f 的關係圖

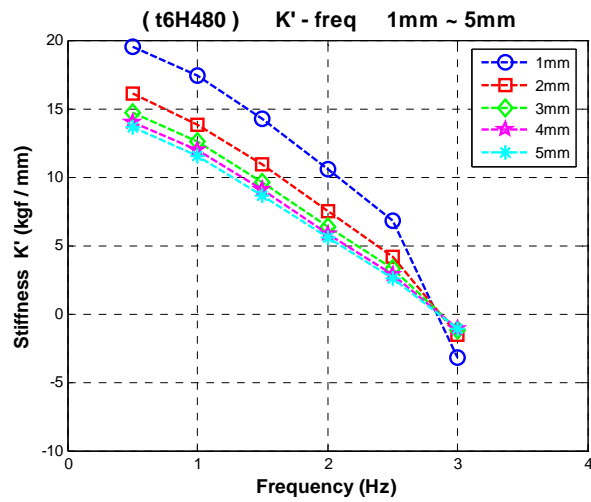


圖 4.63 t6H480 K' 與頻率 f 的關係圖

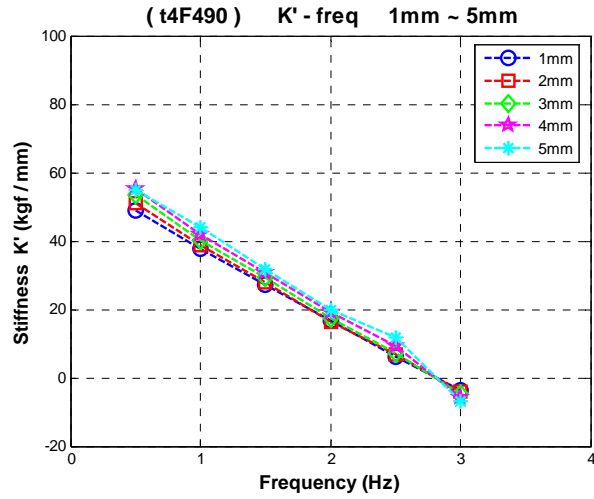


圖 4.64 t4F490 K' 與頻率 f 的關係圖

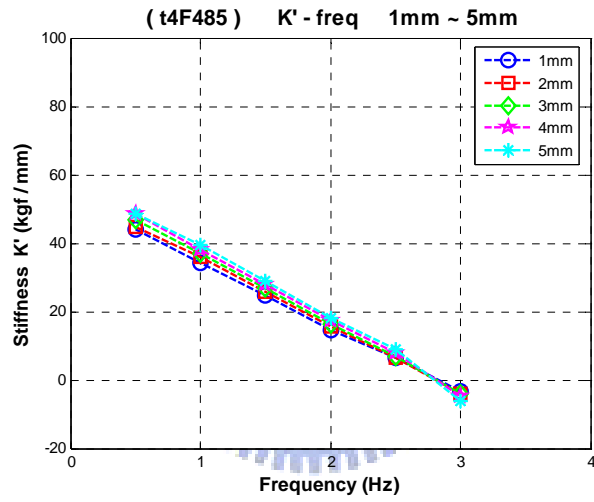


圖 4.65 t4F485 K' 與頻率 f 的關係圖

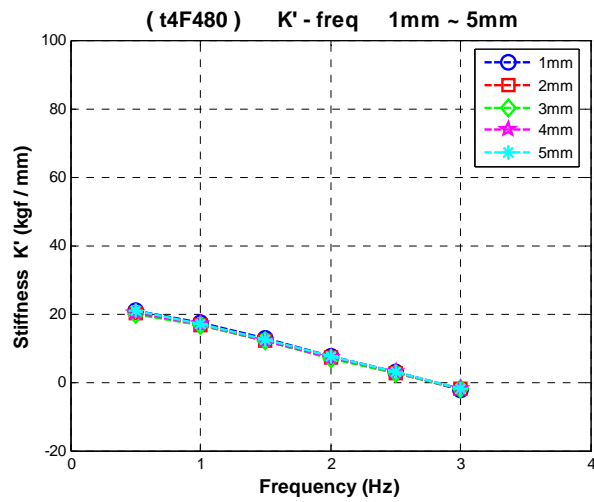


圖 4.66 t4F480 K' 與頻率 f 的關係圖

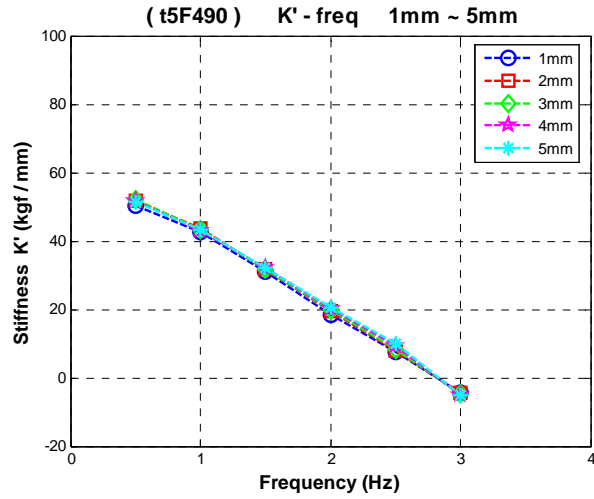


圖 4.67 t5F490 K' 與頻率 f 的關係圖

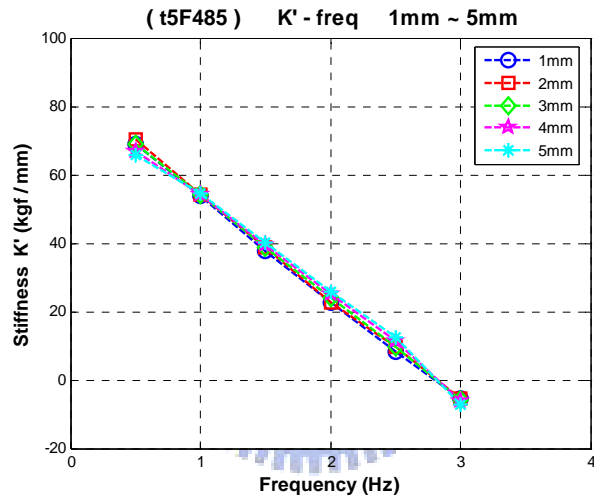


圖 4.68 t5F485 K' 與頻率 f 的關係圖

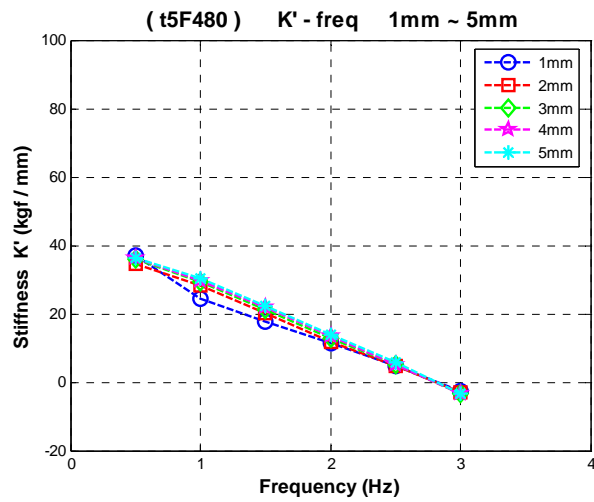


圖 4.69 t5F480 K' 與頻率 f 的關係圖

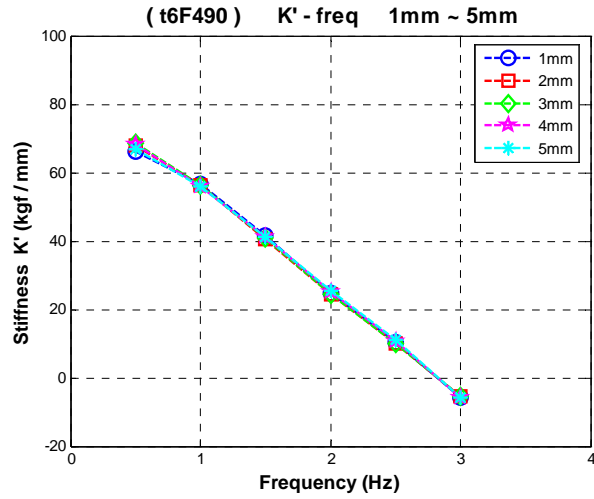


圖 4.70 t6F490 K' 與頻率 f 的關係圖

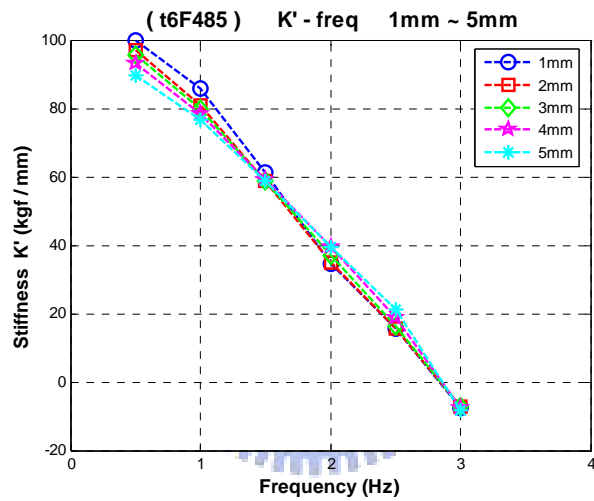


圖 4.71 t6F485 K' 與頻率 f 的關係圖

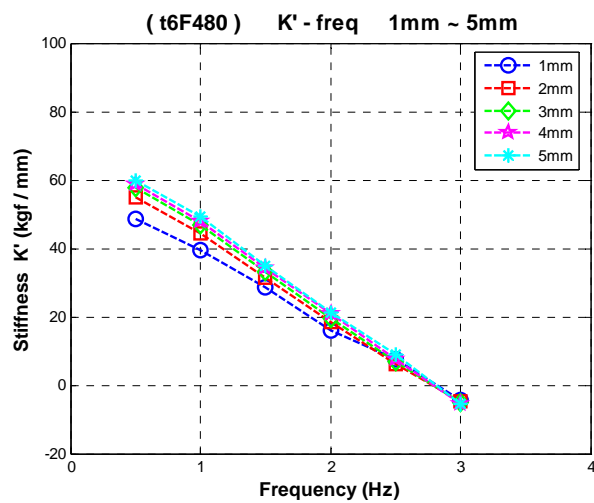


圖 4.72 t6F480 K' 與頻率 f 的關係圖

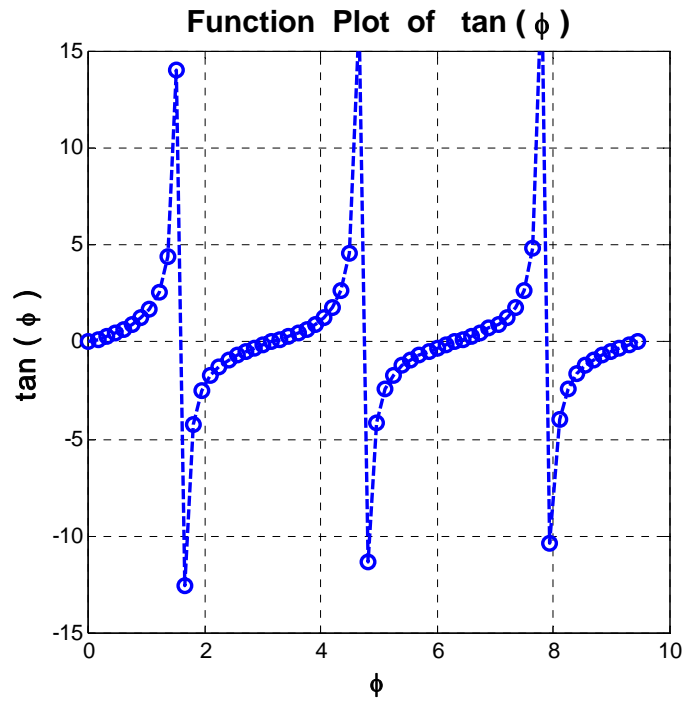


圖 4.73a 一般 tangent 函數圖

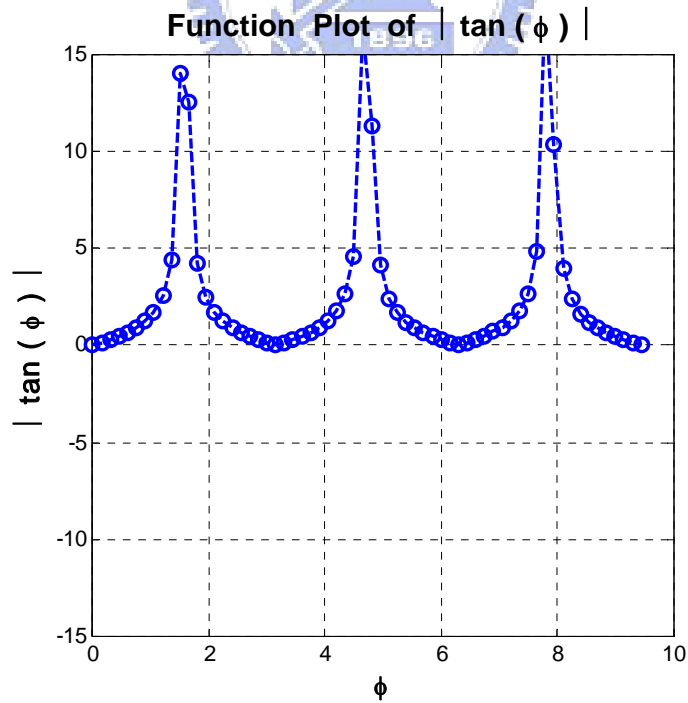


圖 4.73b tangent 函數取絕對值曲線圖

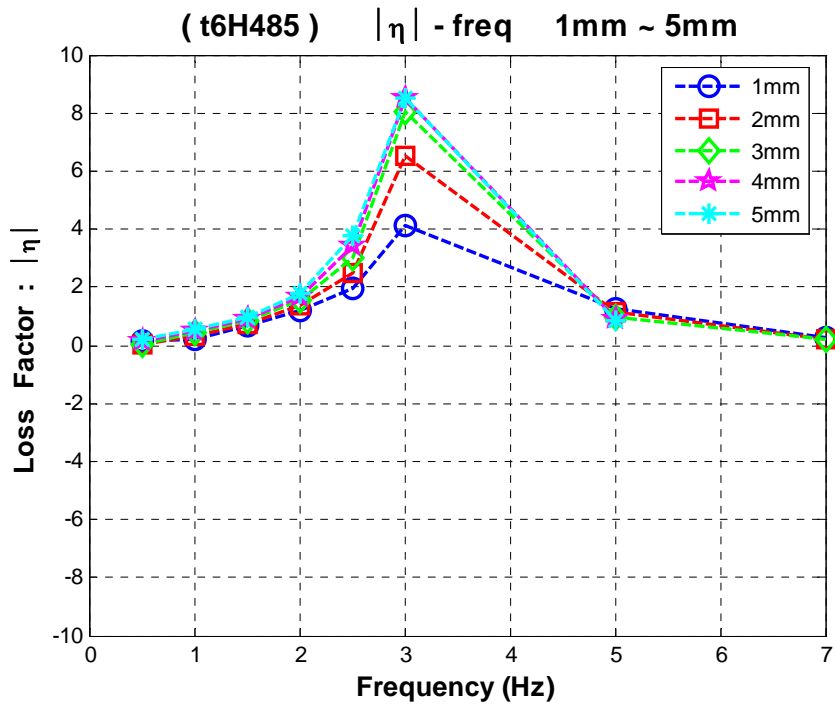


圖 4.74a t6H485 施予不同頻寬之 $|\eta|$ - f 關係圖

(Thickness : 6mm , Length : 485mm , B.C. : Hinged)

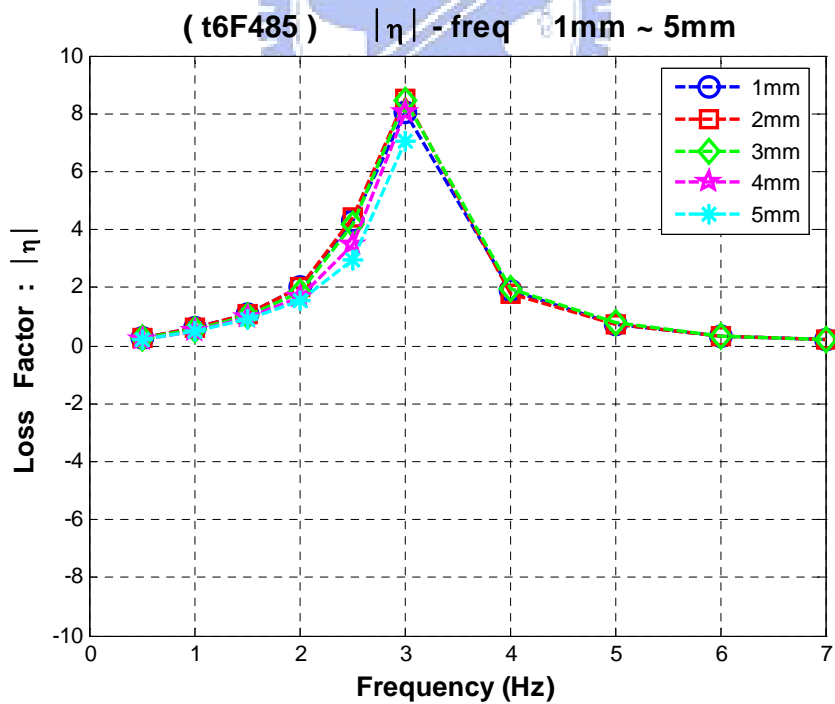


圖 4.74b t6F485 施予不同頻寬之 $|\eta|$ - f 關係圖

(Thickness : 6mm , Length : 485mm , B.C. : Fixed)

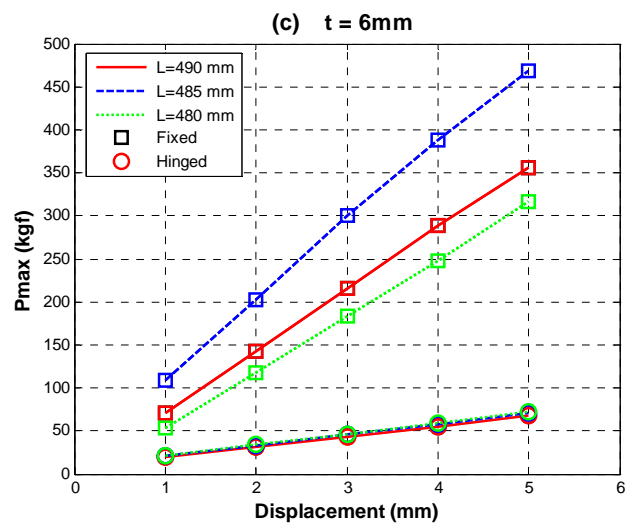
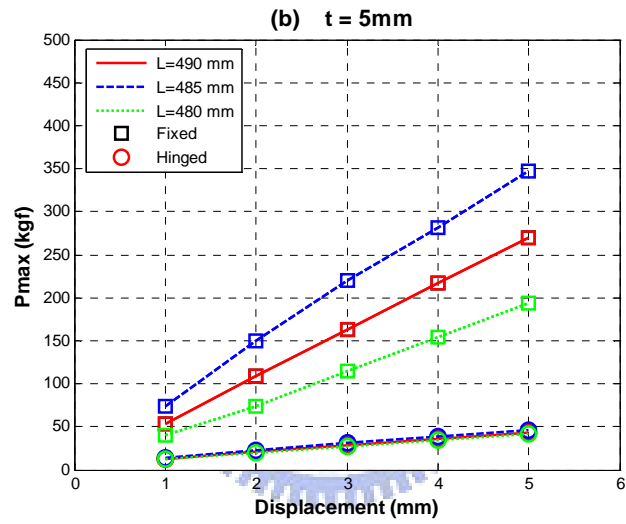
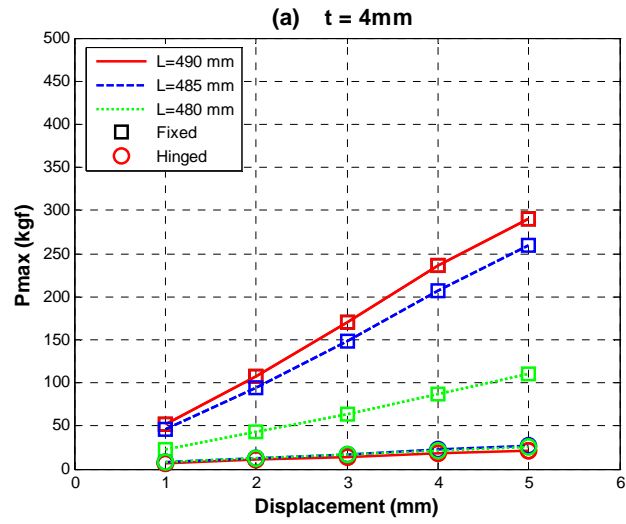


圖 4.75a 不同邊界及長度試體與振幅之最大出力 ($t=4$ 、 5 、 6mm)

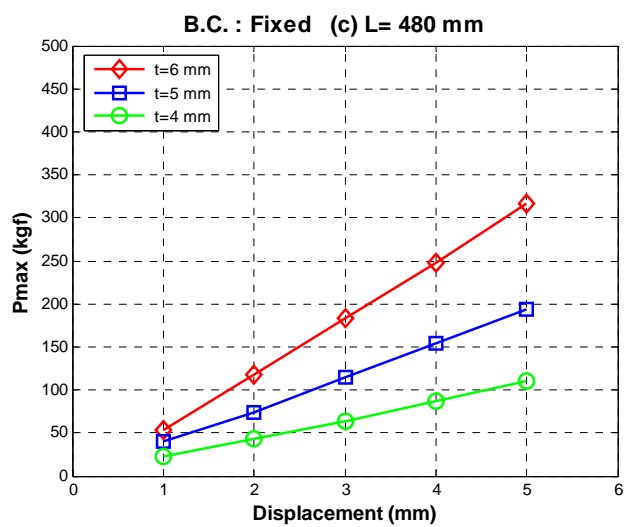
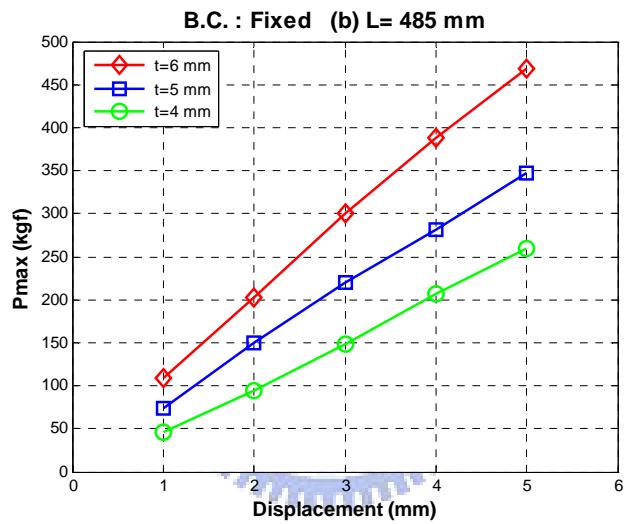
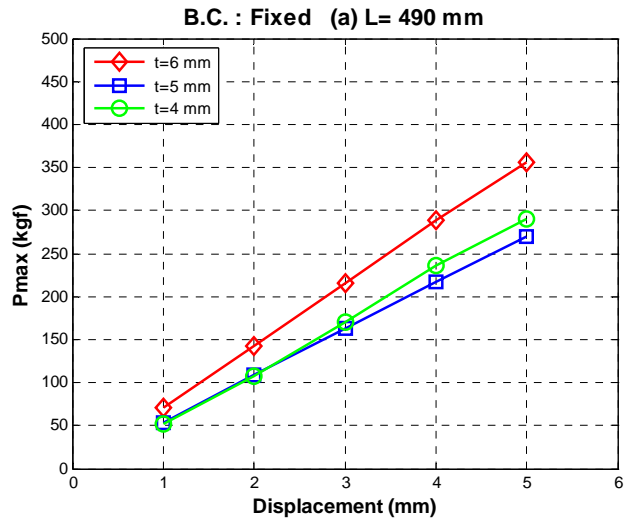


圖 4.75b 相同長度不同厚度試體與振幅之最大出力 (t=4、5、6mm)

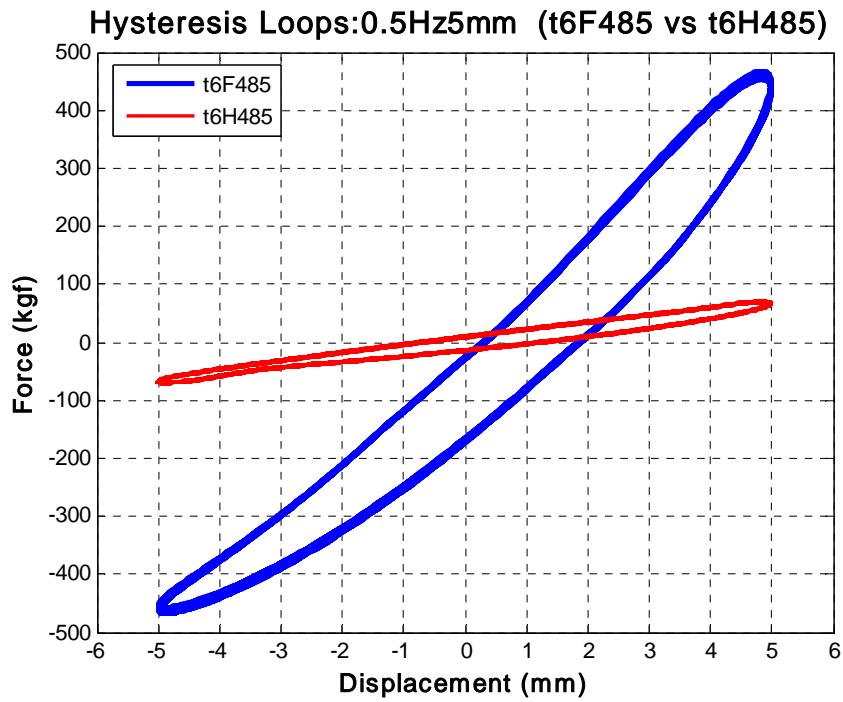


圖 4.76 鉸接與固接遲滯迴圈之比較

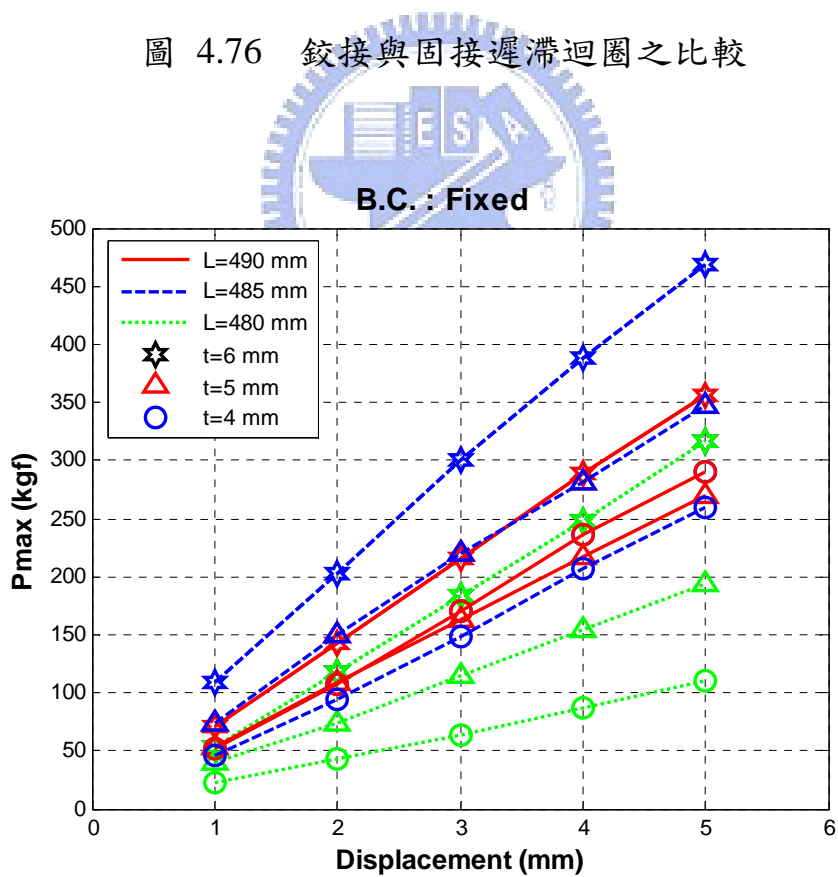


圖 4.77 固接條件下，不同元件厚度及長度之最大出力

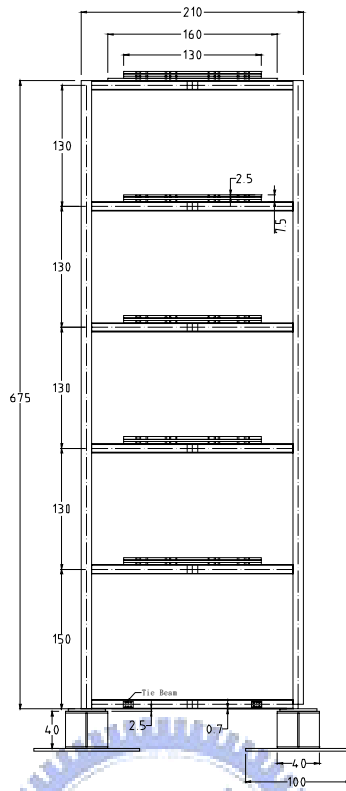


圖 4.78 五層樓模型結構之立面圖



圖 4.79 挫屈型消能斜撐阻尼器



圖 4.80 挫屈型消能斜撐阻尼器（局部）



圖 4.81 裝設阻尼器之五層樓模型結構於振動台上

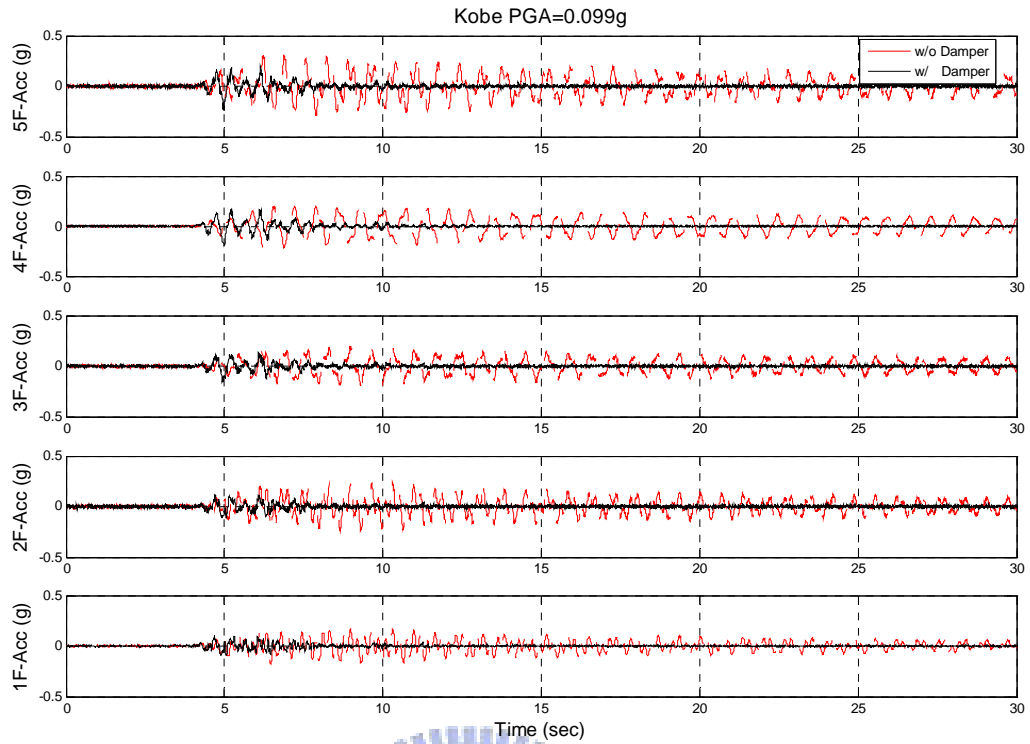


圖 4.82 各樓層加速度反應比較 (Kobe ; PGA=0.099g)

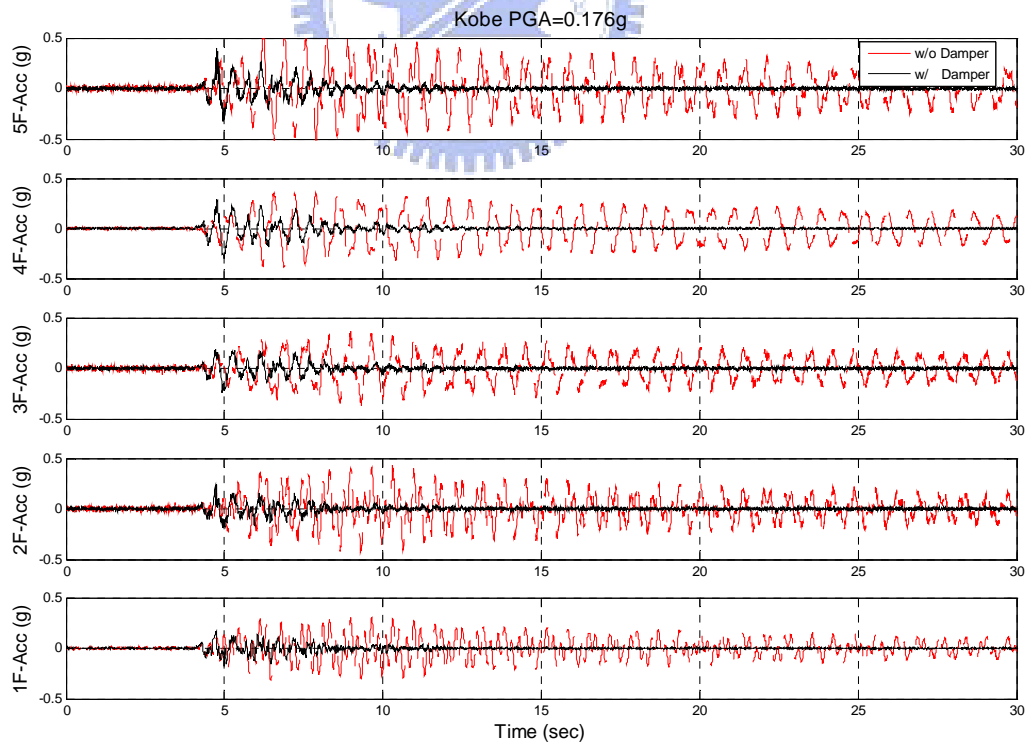


圖 4.83 各樓層加速度反應比較 (Kobe ; PGA=0.176g)

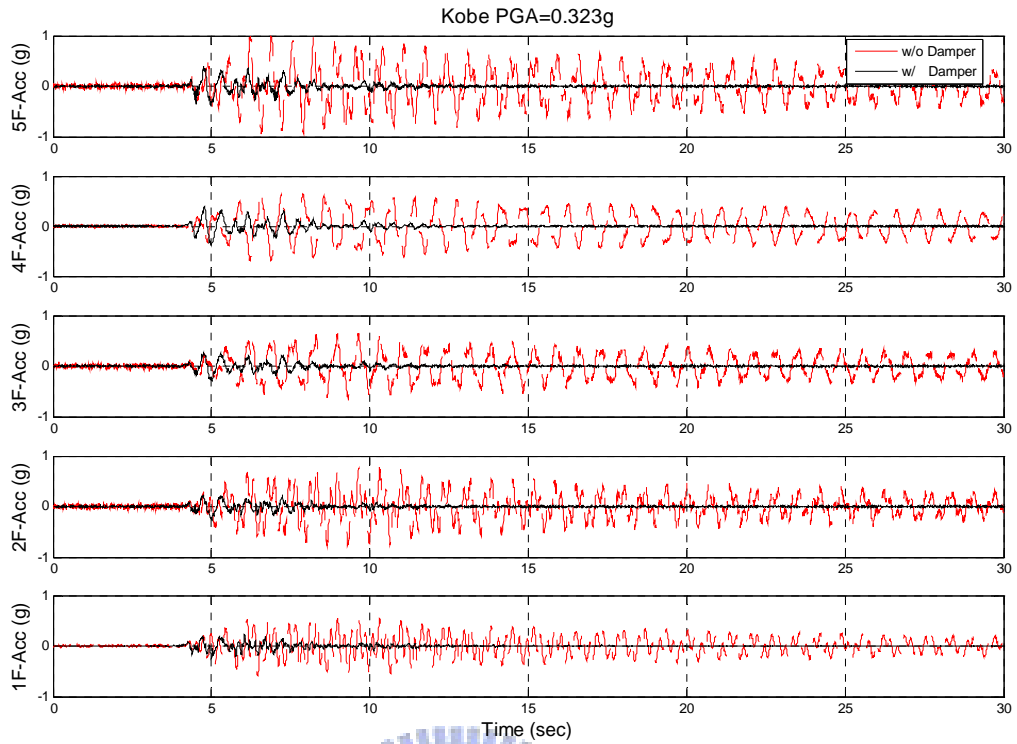


圖 4.84 各樓層加速度反應比較 (Kobe ; PGA=0.323g)

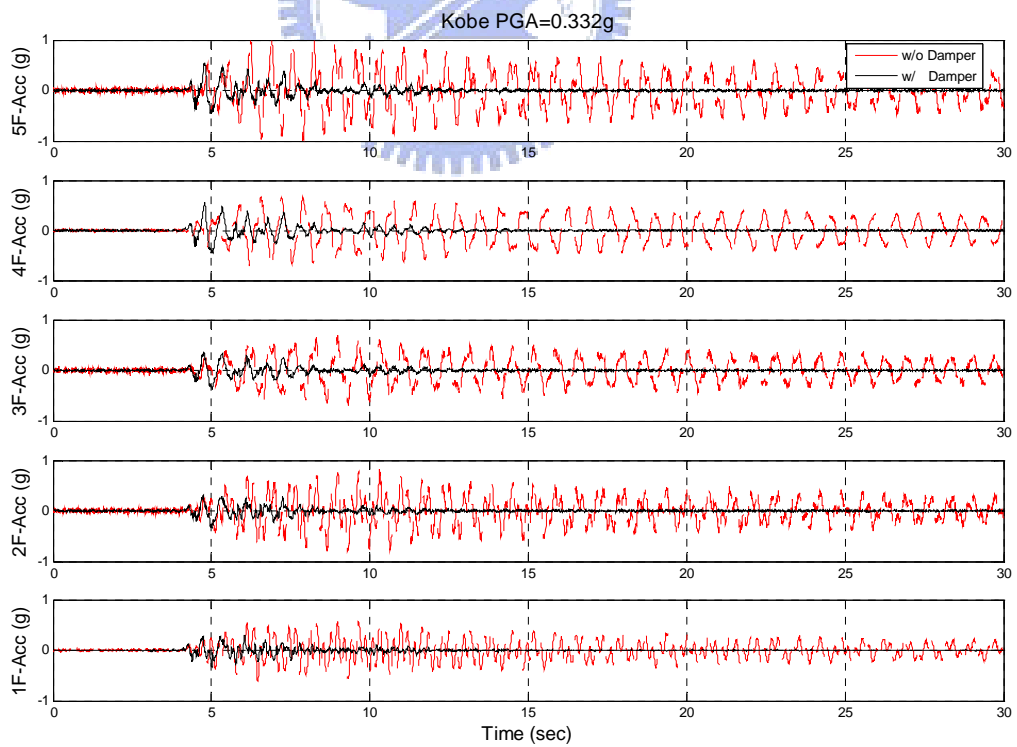


圖 4.85 各樓層加速度反應比較 (Kobe ; PGA=0.332g)

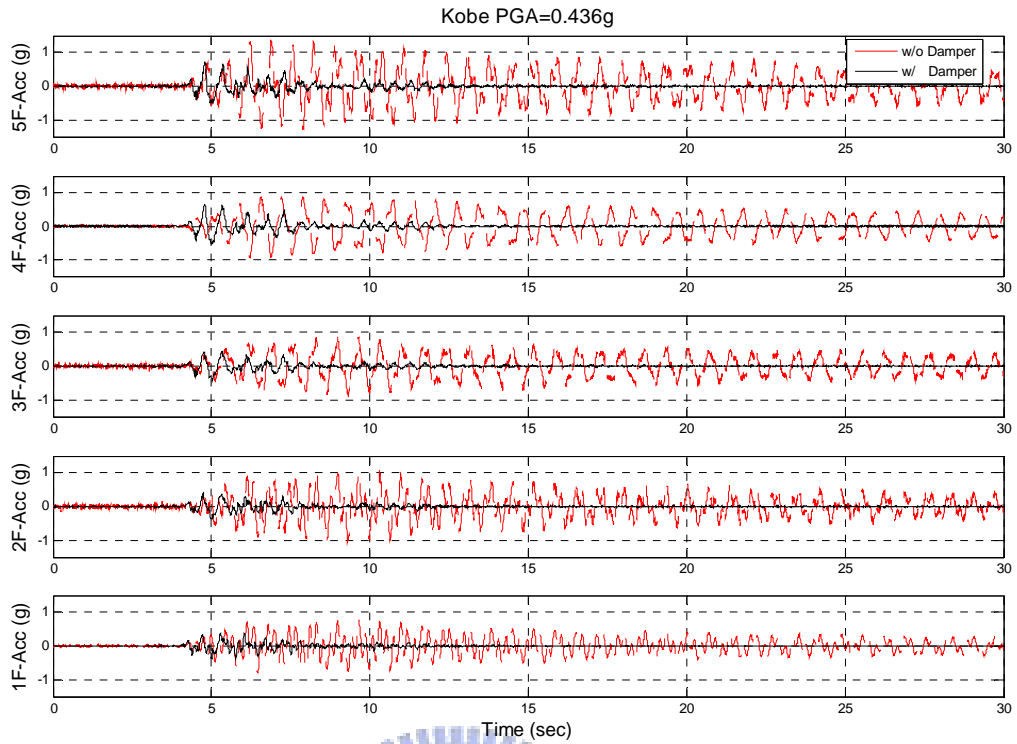


圖 4.86 各樓層加速度反應比較 (Kobe ; PGA=0.436g)

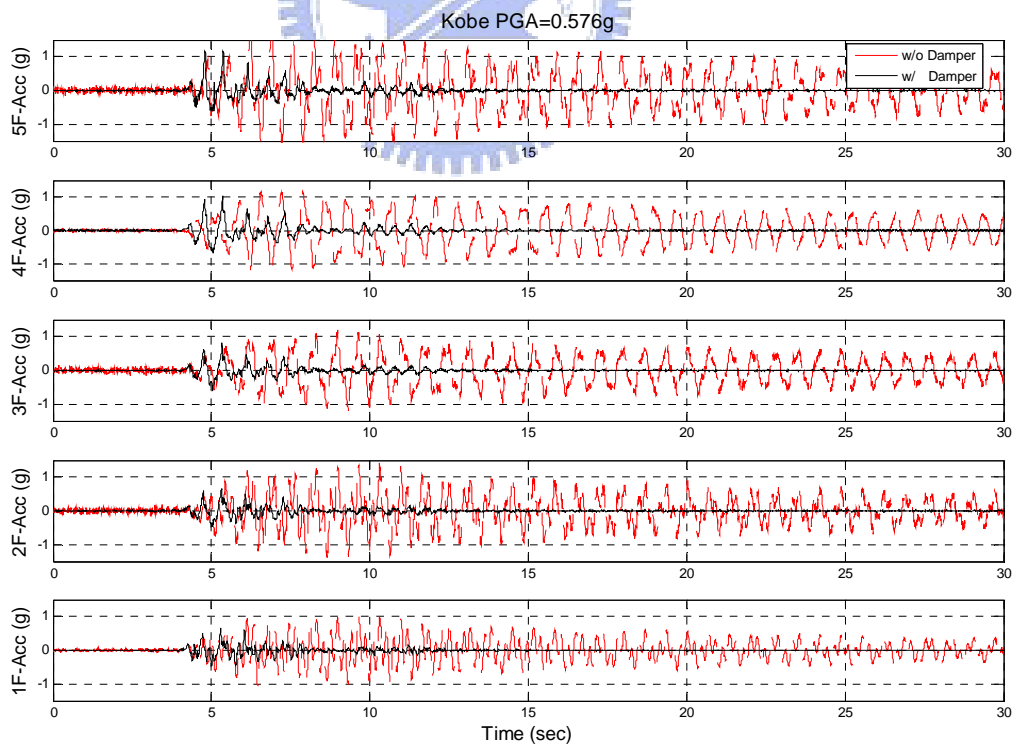


圖 4.87 各樓層加速度反應比較 (Kobe ; PGA=0.576g)

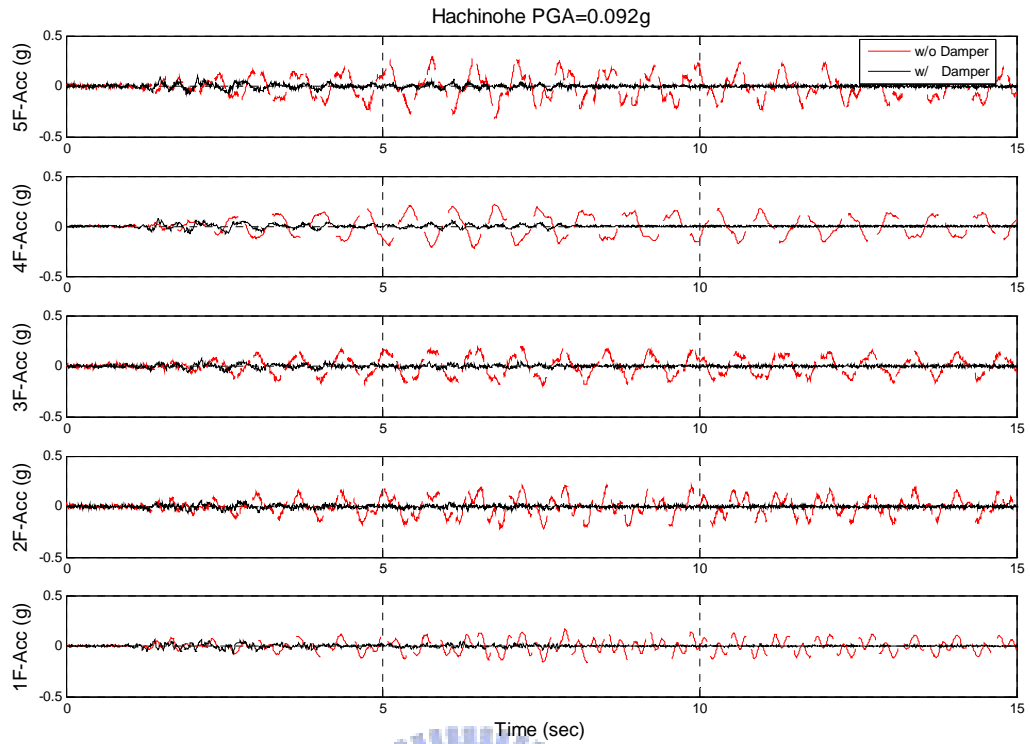


圖 4.88 各樓層加速度反應比較 (Hachinohe ; PGA=0.092g)

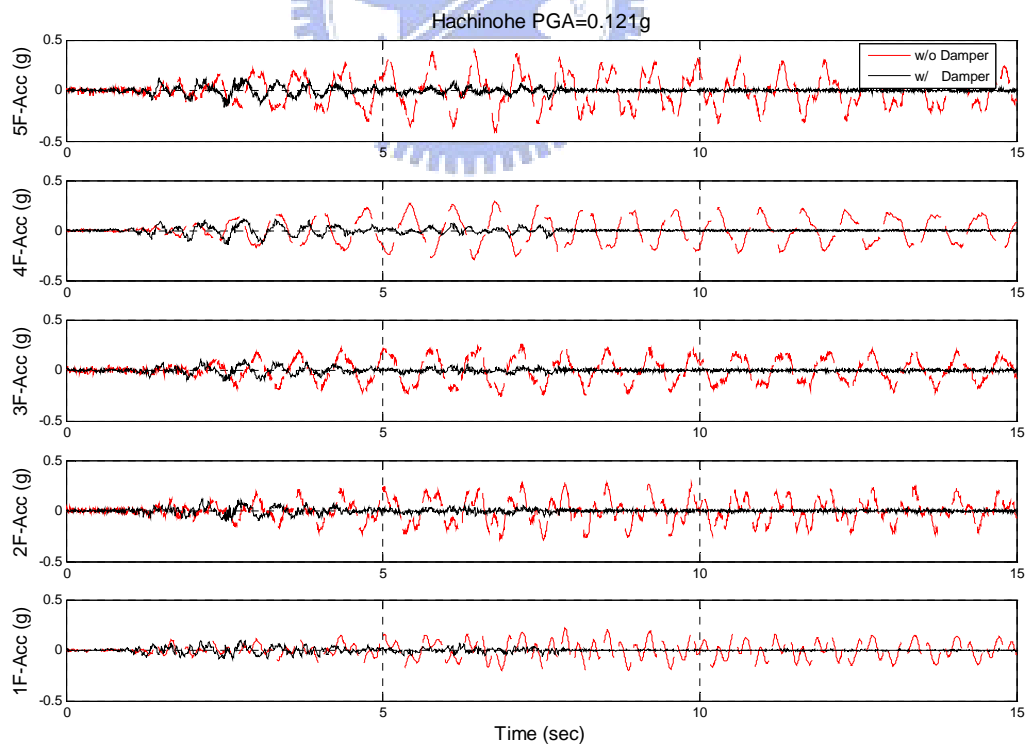


圖 4.89 各樓層加速度反應比較 (Hachinohe ; PGA=0.121g)

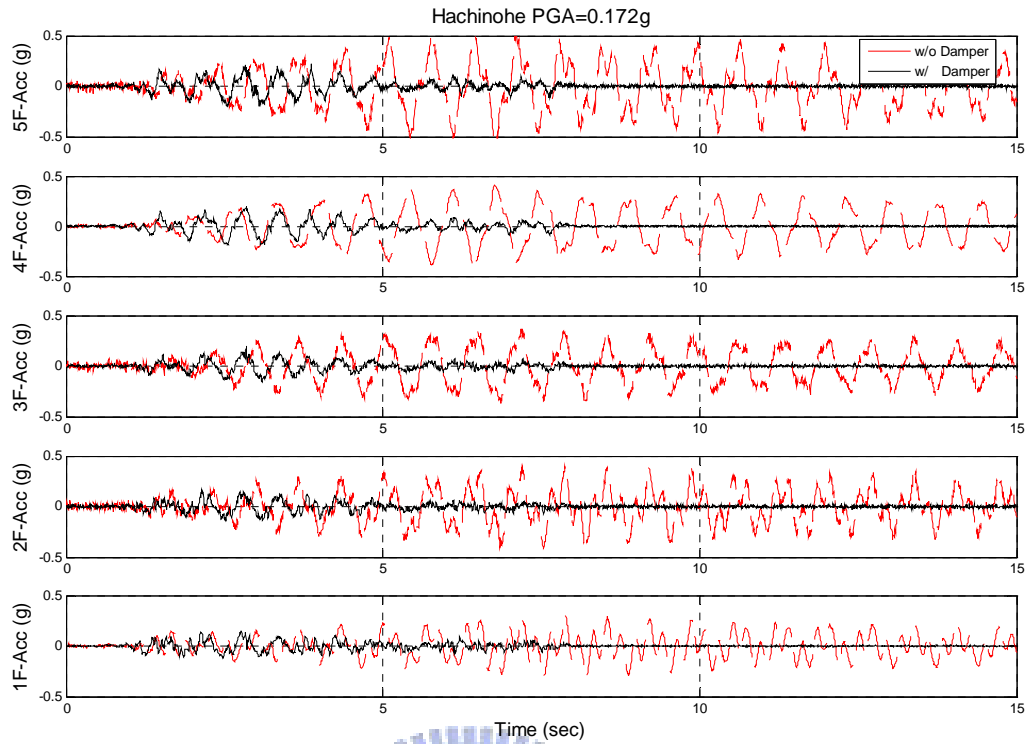


圖 4.90 各樓層加速度反應比較 (Hachinohe ; PGA=0.172g)

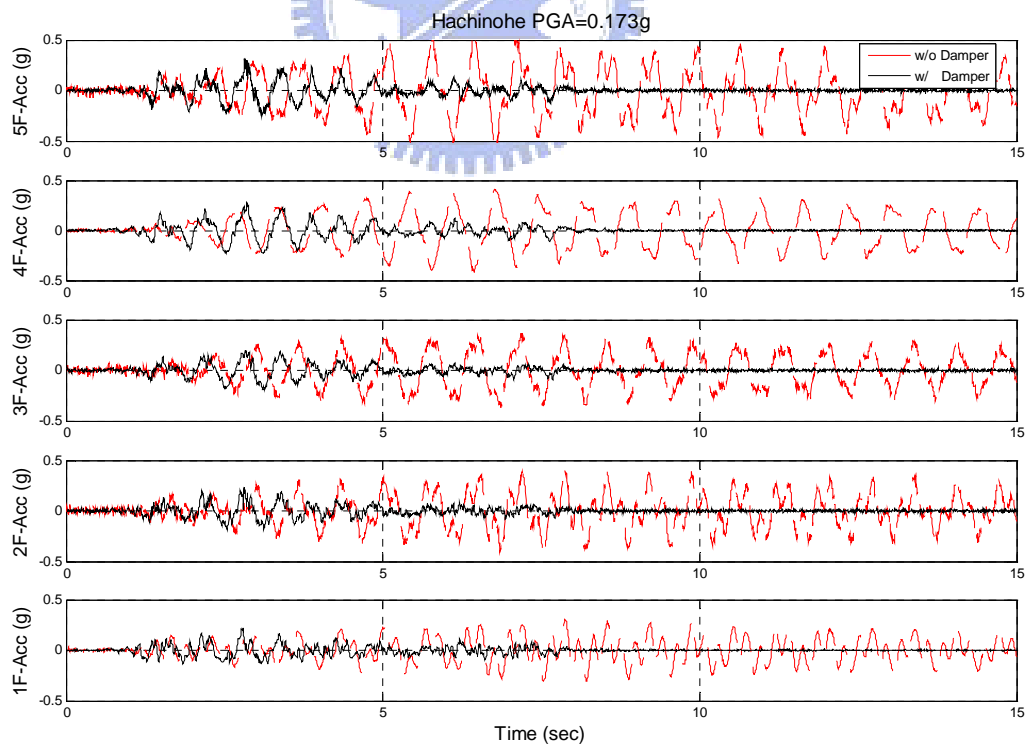


圖 4.91 各樓層加速度反應比較 (Hachinohe ; PGA=0.173g)

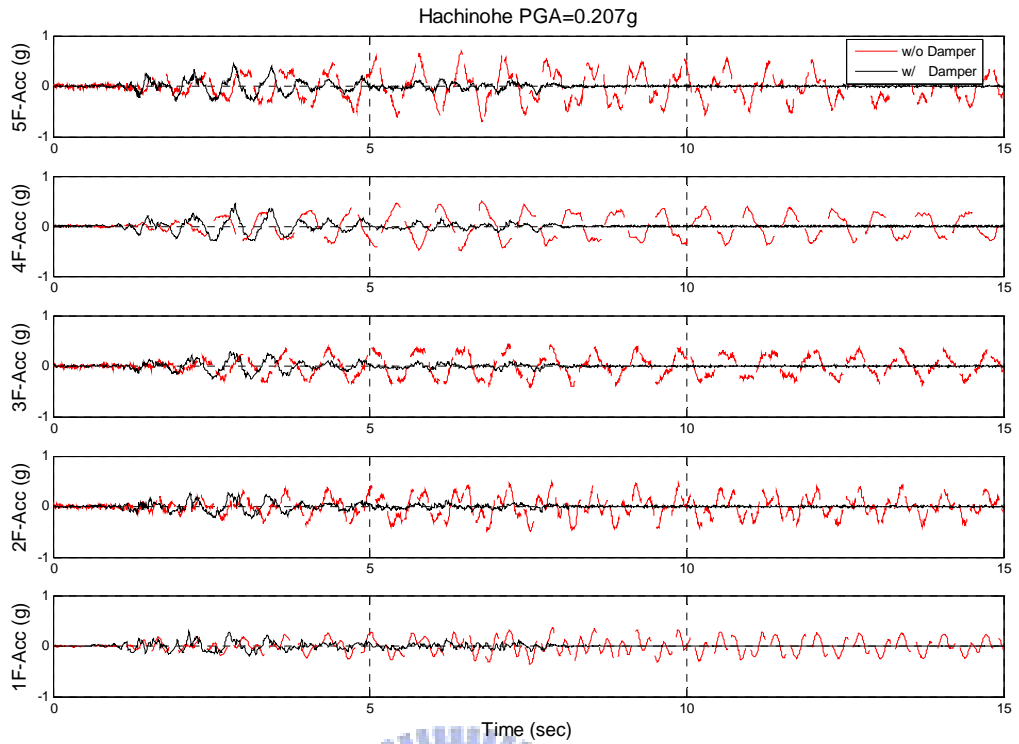


圖 4.92 各樓層加速度反應比較 (Hachinohe ; PGA=0.207g)

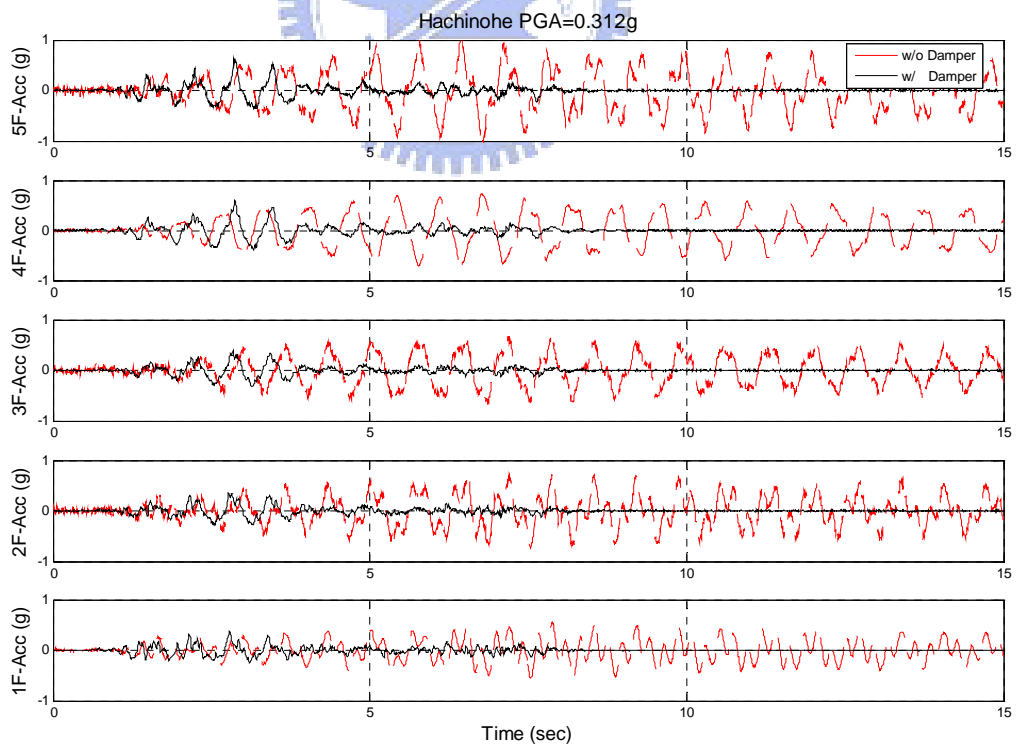


圖 4.93 各樓層加速度反應比較 (Hachinohe ; PGA=0.312g)

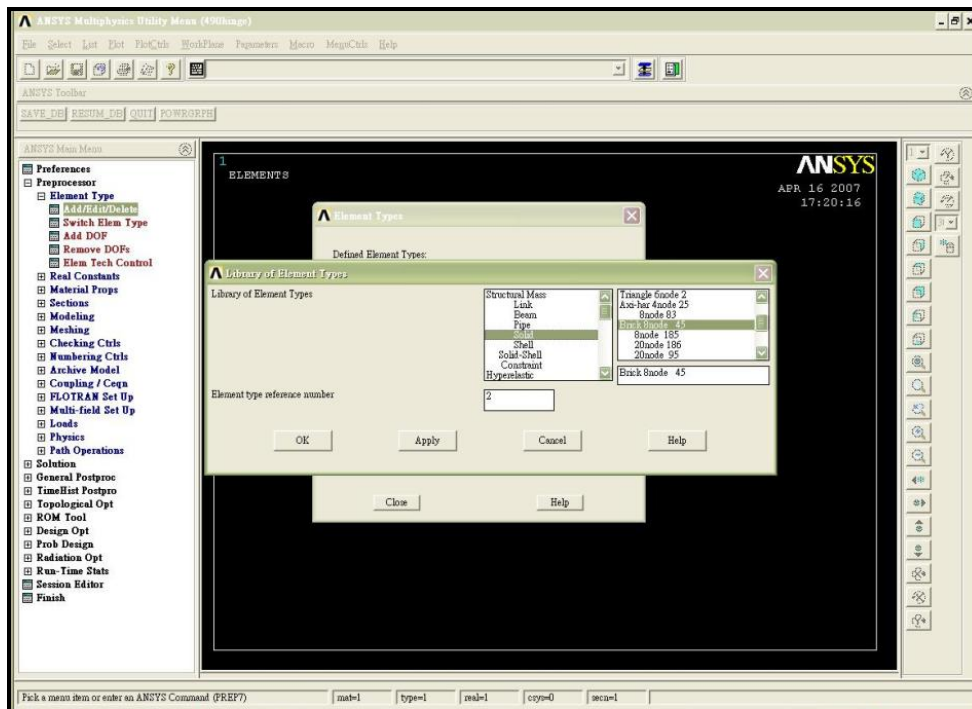


圖 5.1 選取 solid45 實體元素

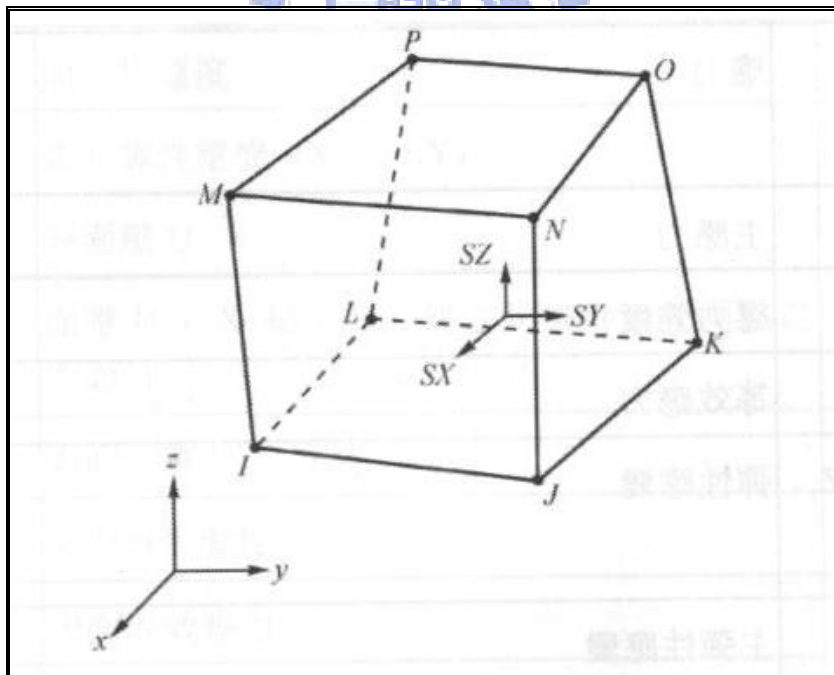


圖 5.2 solid45 3-D 實體結構

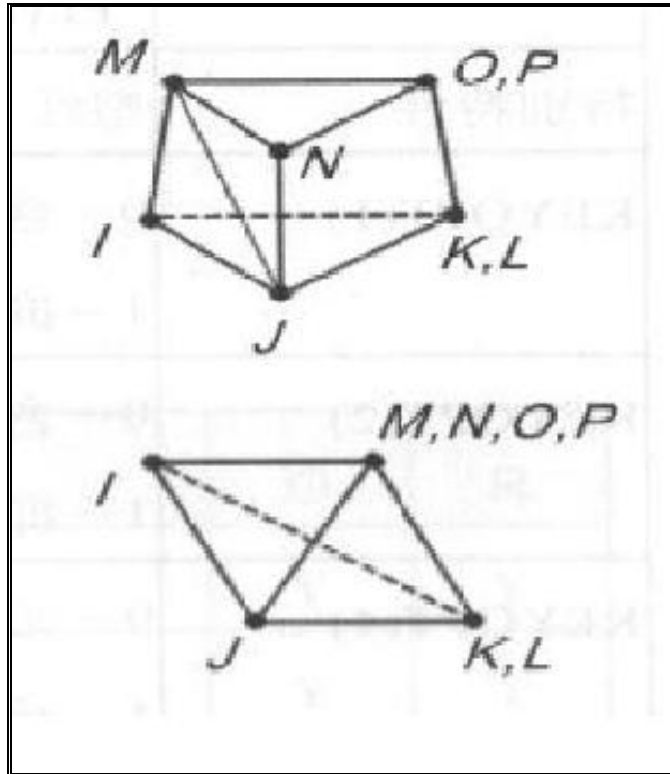


圖 5.3 solid45 角柱及角錐情形

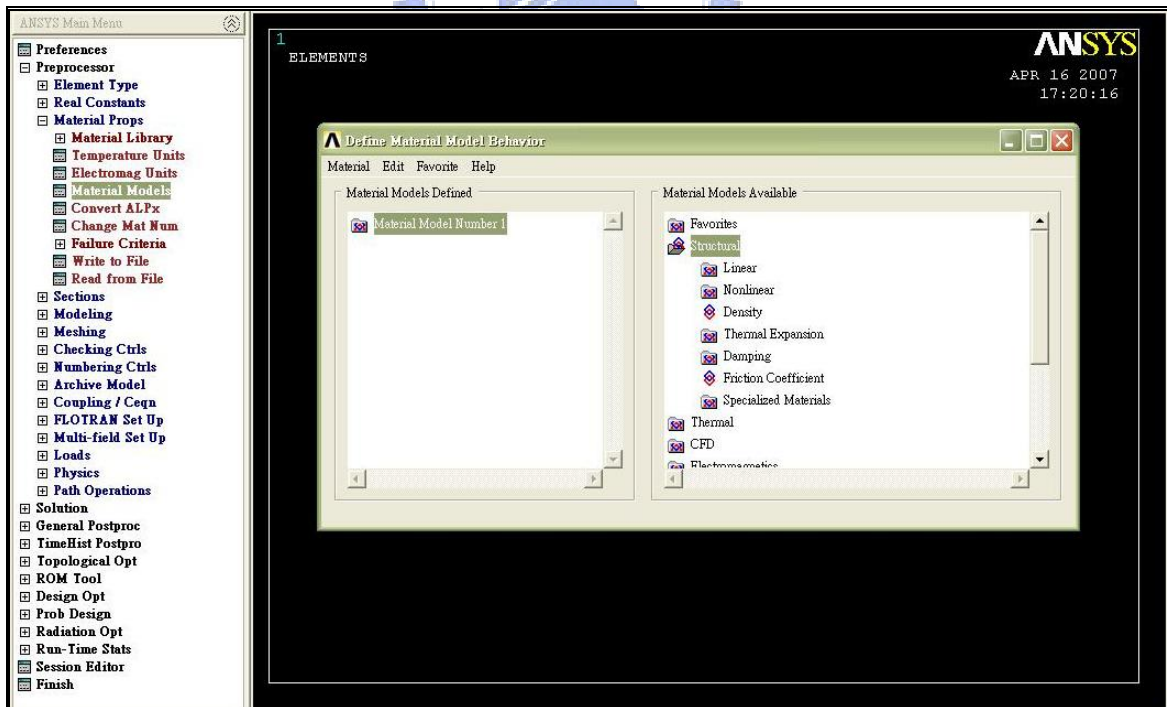


圖 5.4 定義結構分析

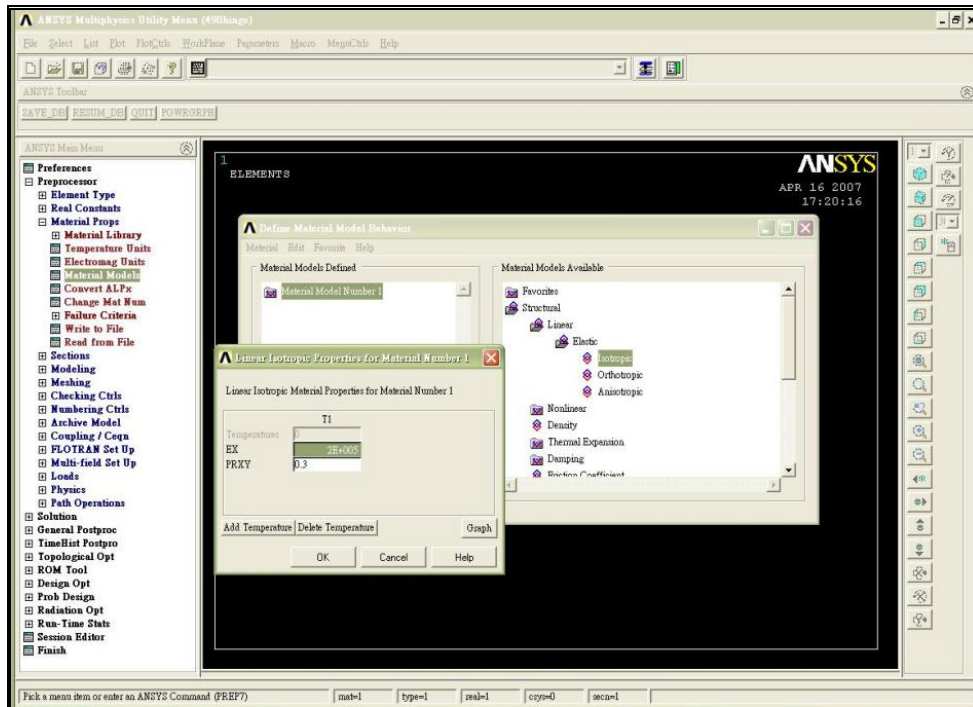


圖 5.5 材料線性性質之設定

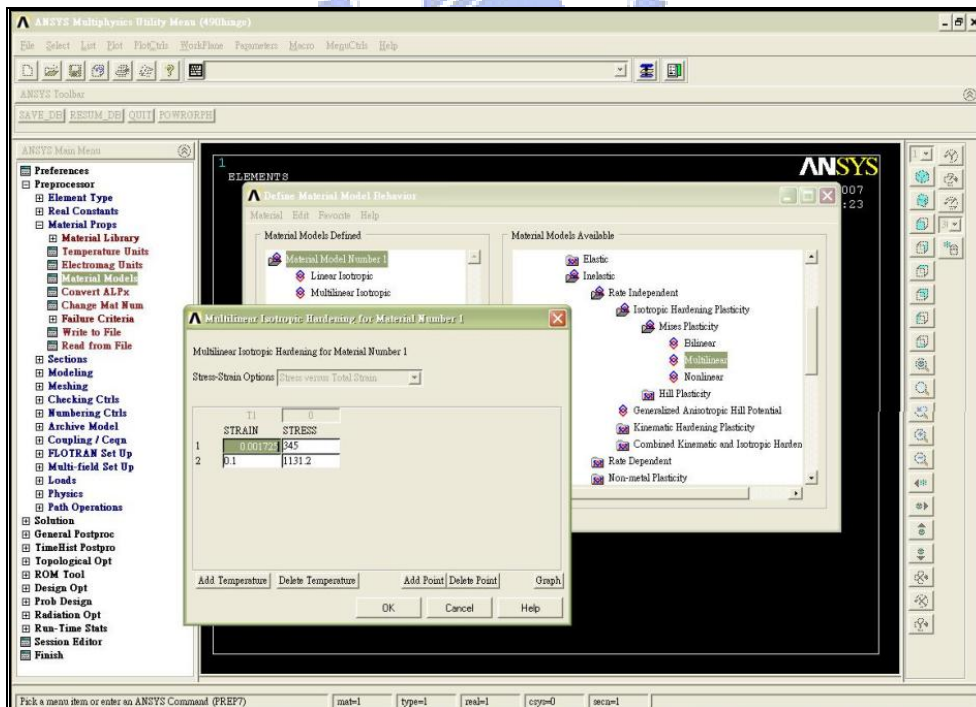


圖 5.6 材料非線性性質之設定

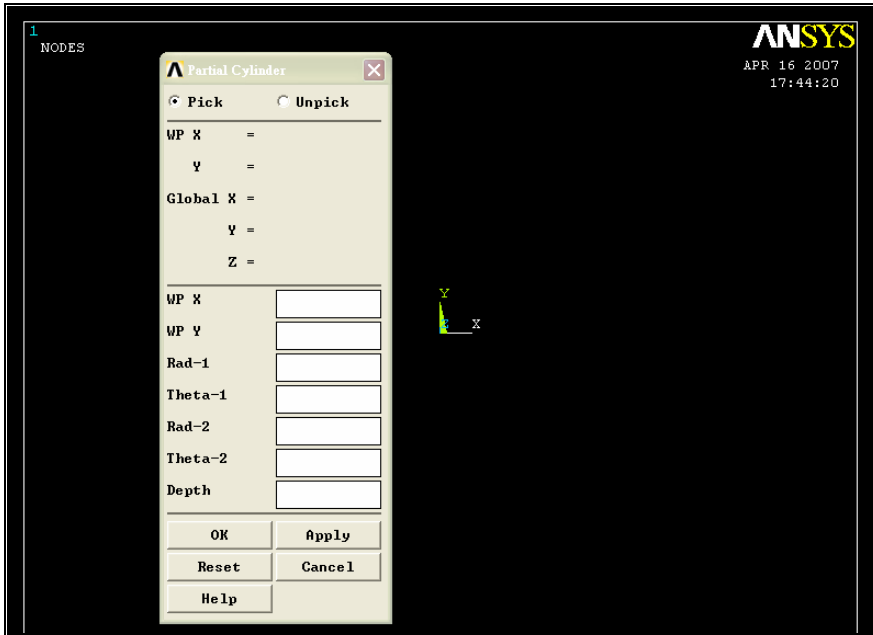


圖 5.7 partial cylinder 選項自定尺寸

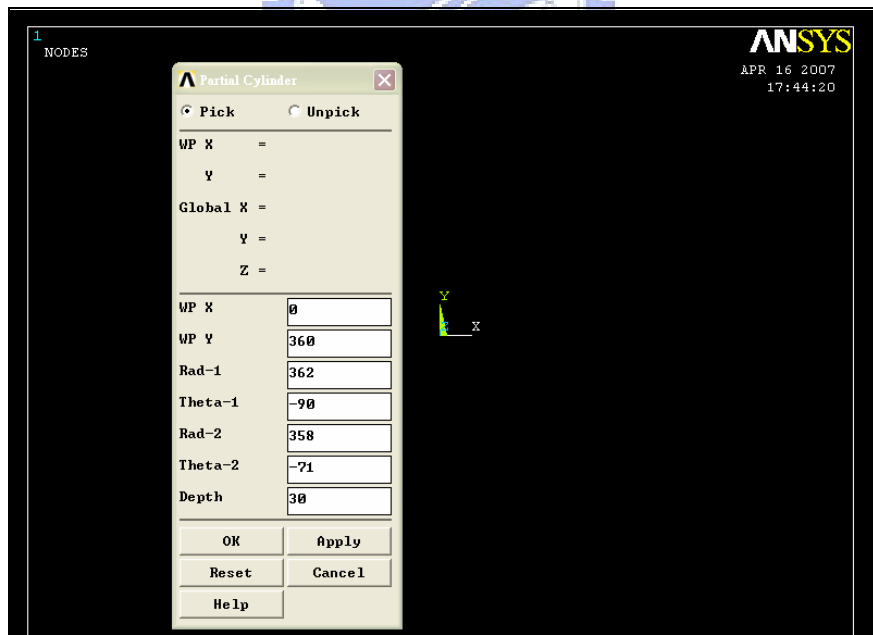


圖 5.8 輸入關鍵點位置

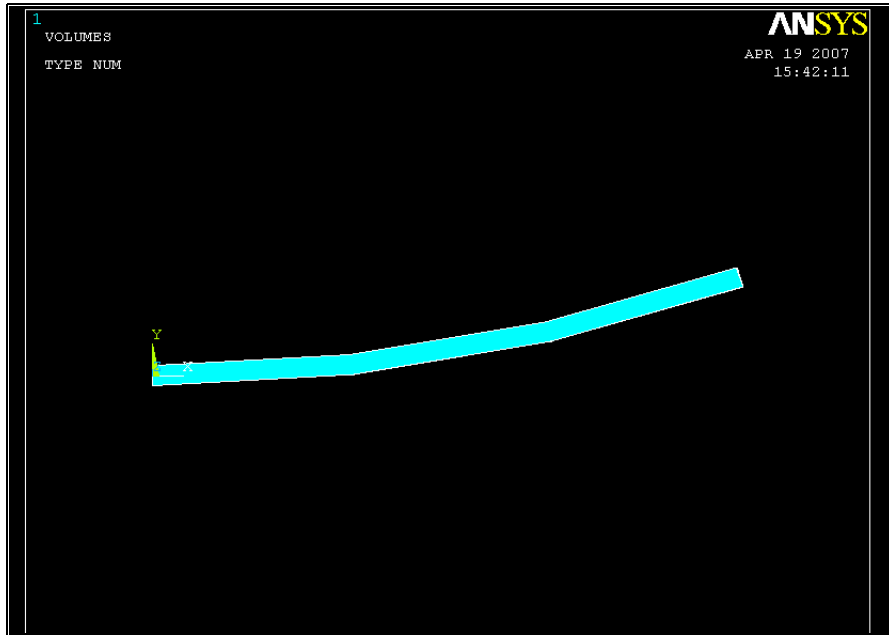


圖 5.9 左半邊連桿模型

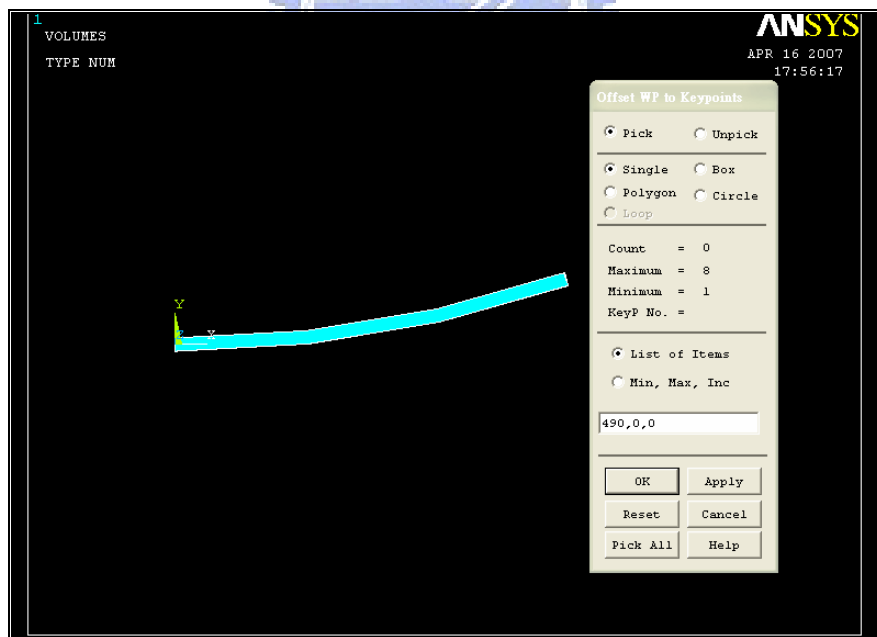


圖 5.10 移動工作平面

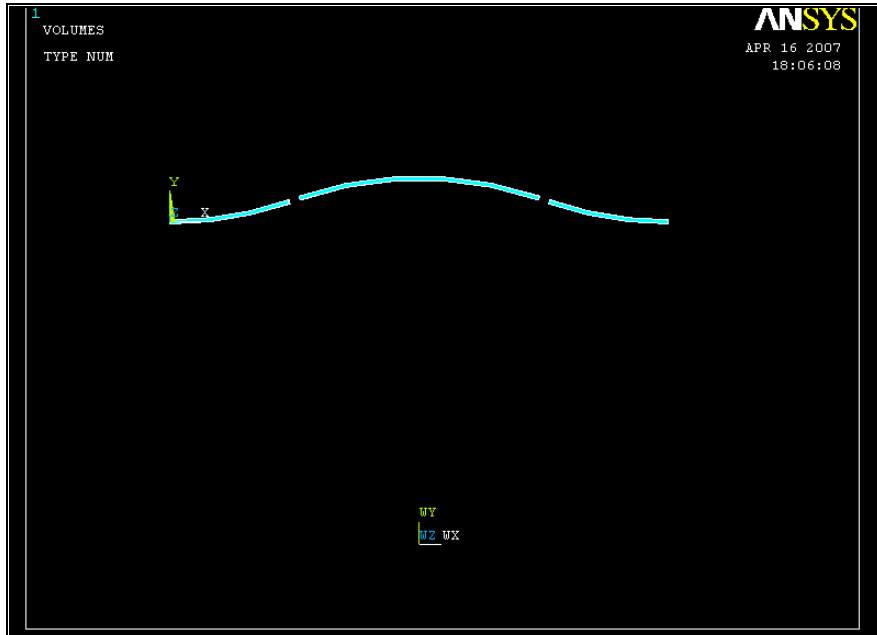


圖 5.11 連桿三個主體部分

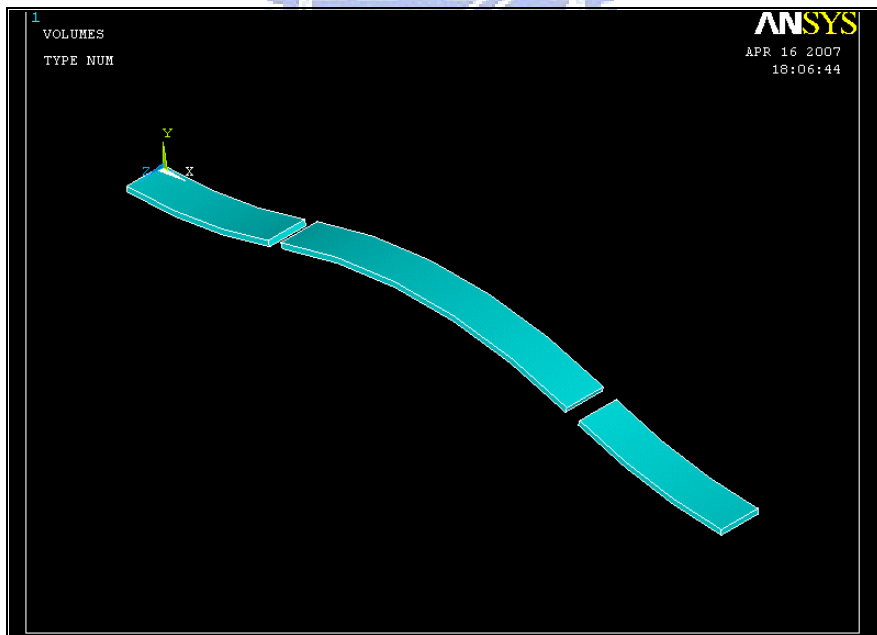


圖 5.12 畫面轉換為 3-D

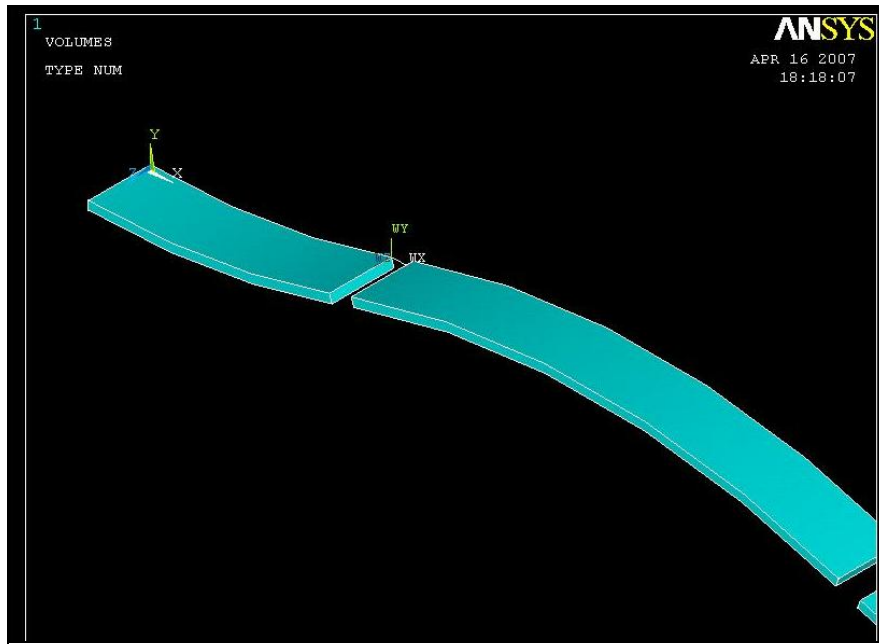


圖 5.13 移動工作平面到左段模型右端

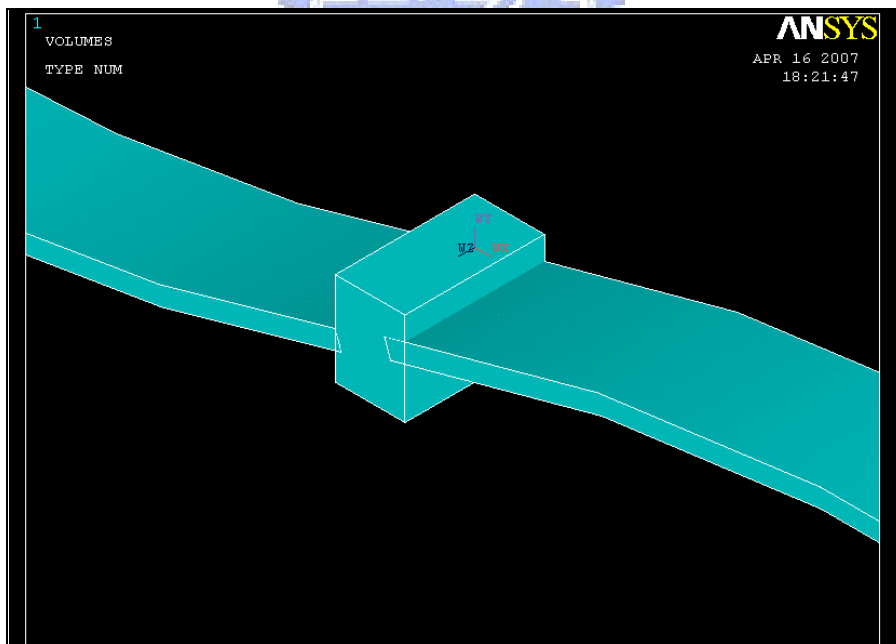


圖 5.14 建立適當矩形塊

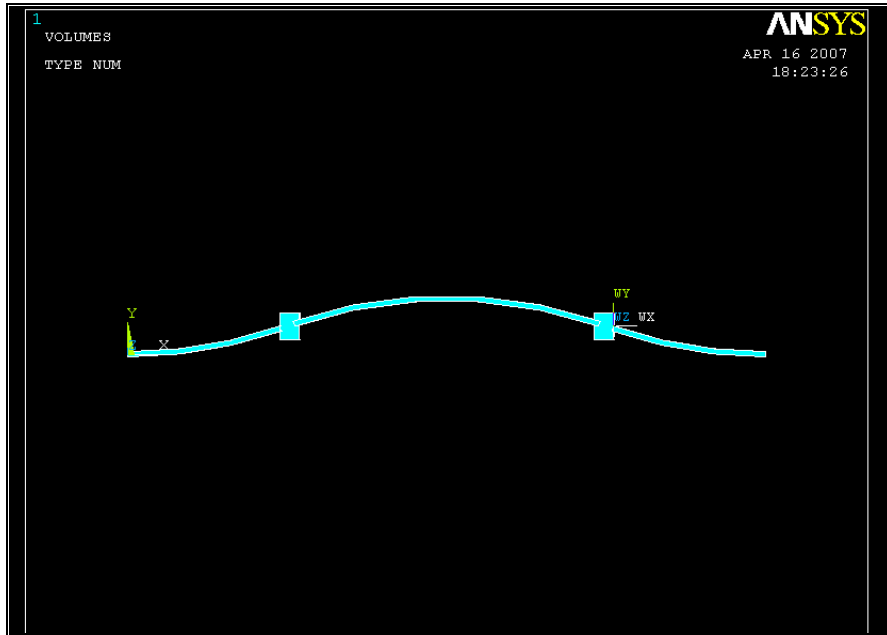


圖 5.15 兩端空隙均以矩形塊填滿

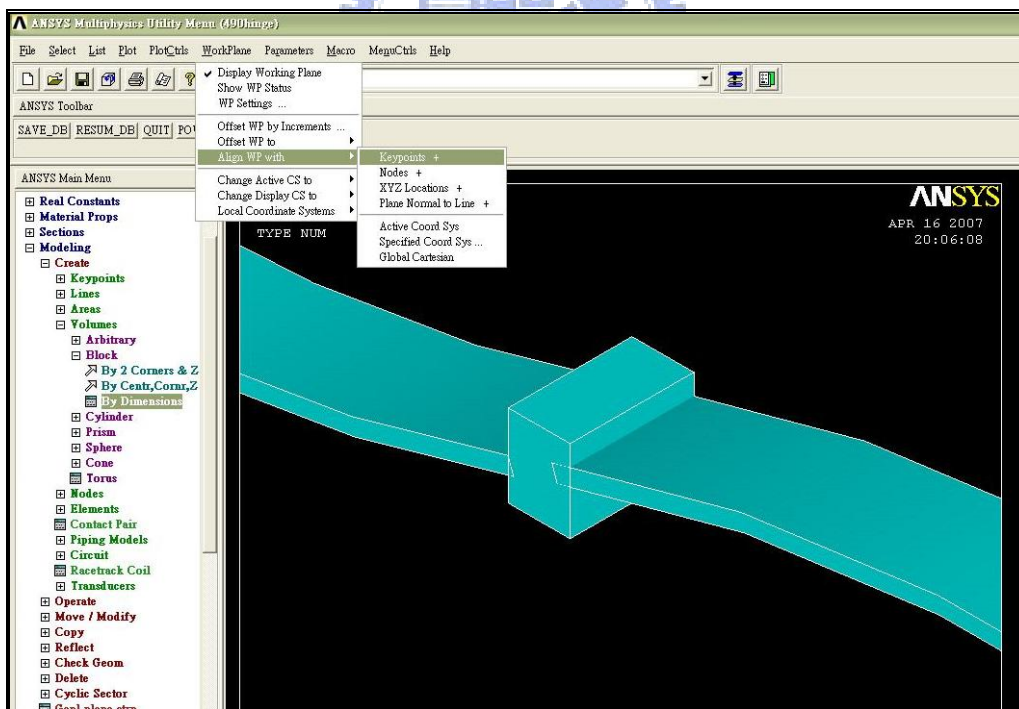


圖 5.16 選擇 Align WP with 功能

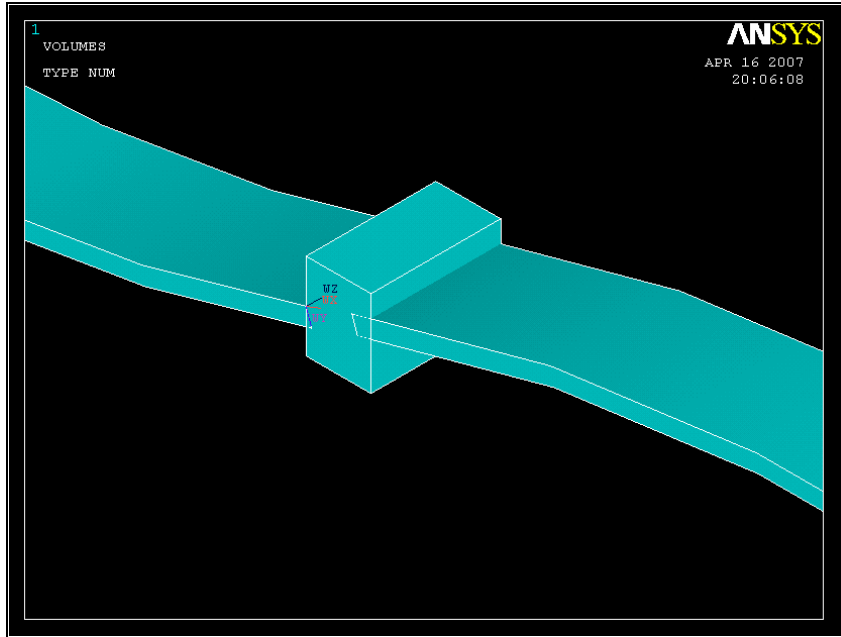


圖 5.17 使座標沿吾人欲修正方向

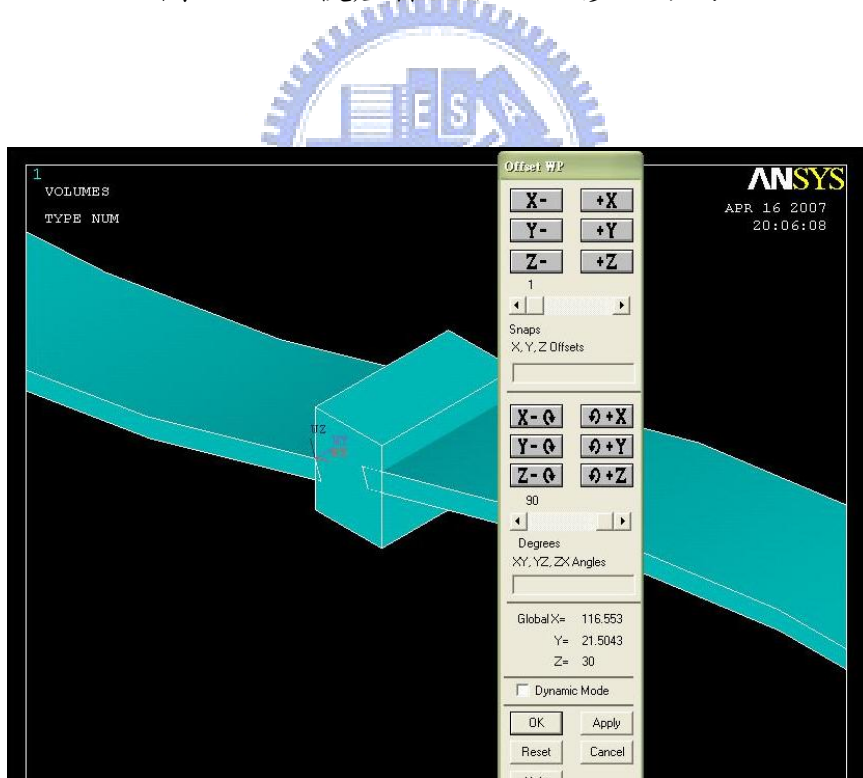


圖 5.18 調整 X-Y plane 面對欲分割面

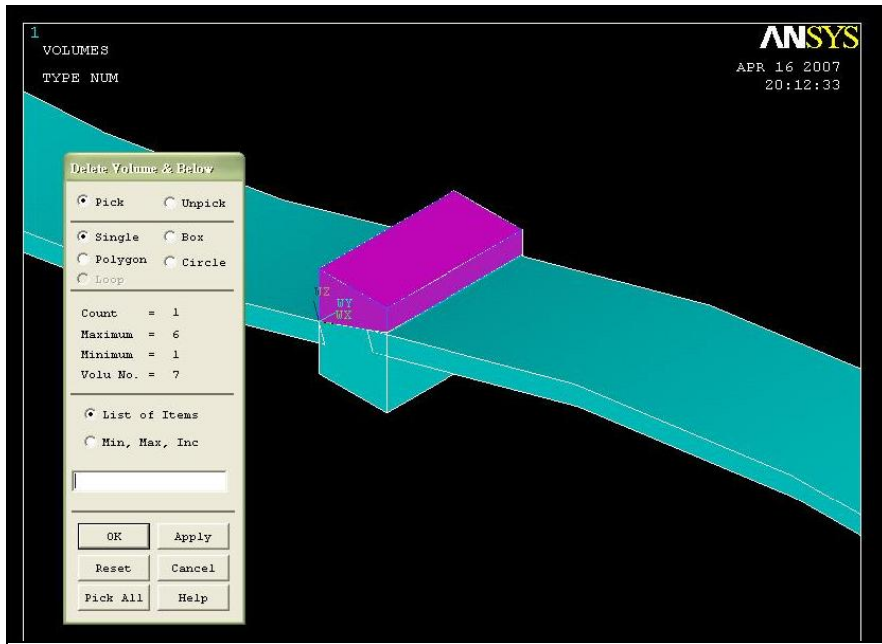


圖 5.19 點選欲清除部份

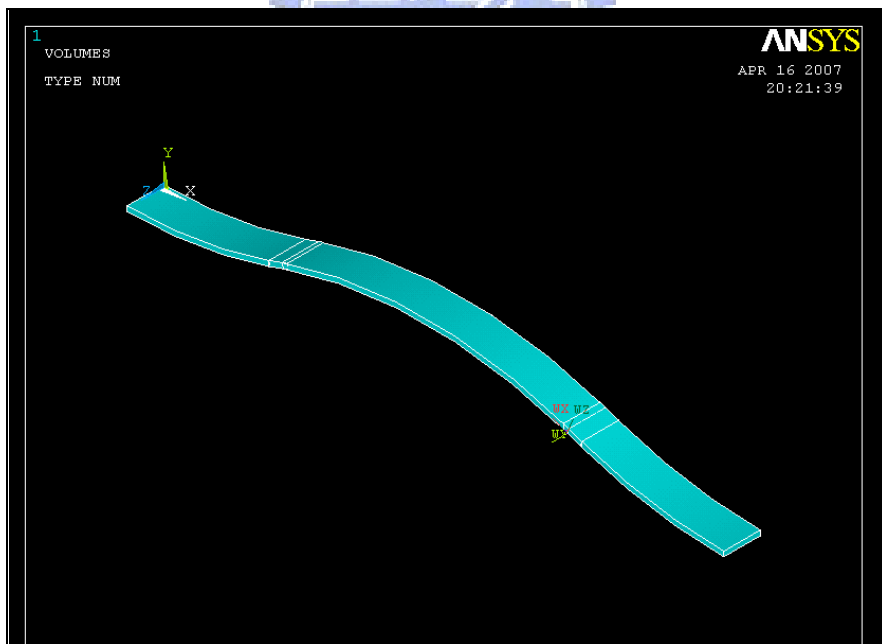


圖 5.20 多餘矩形塊清除後情形

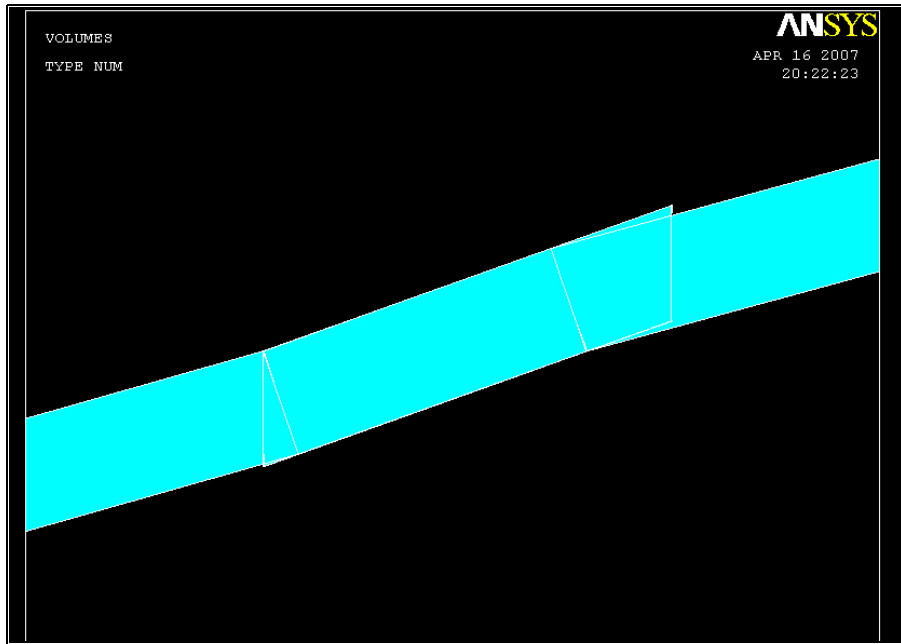


圖 5.21 檢視細部不平整處

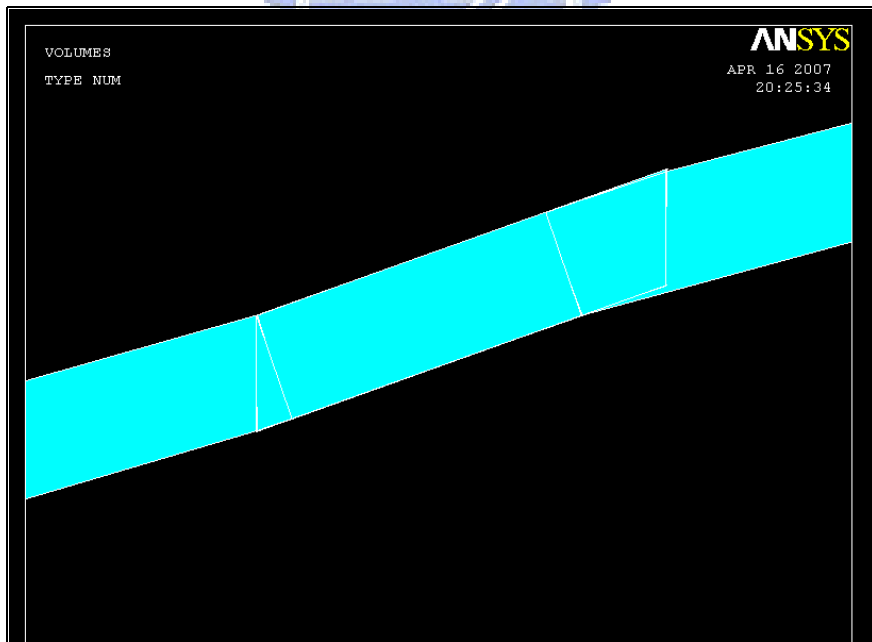


圖 5.22 利用 overlap 功能潤滑不平整處

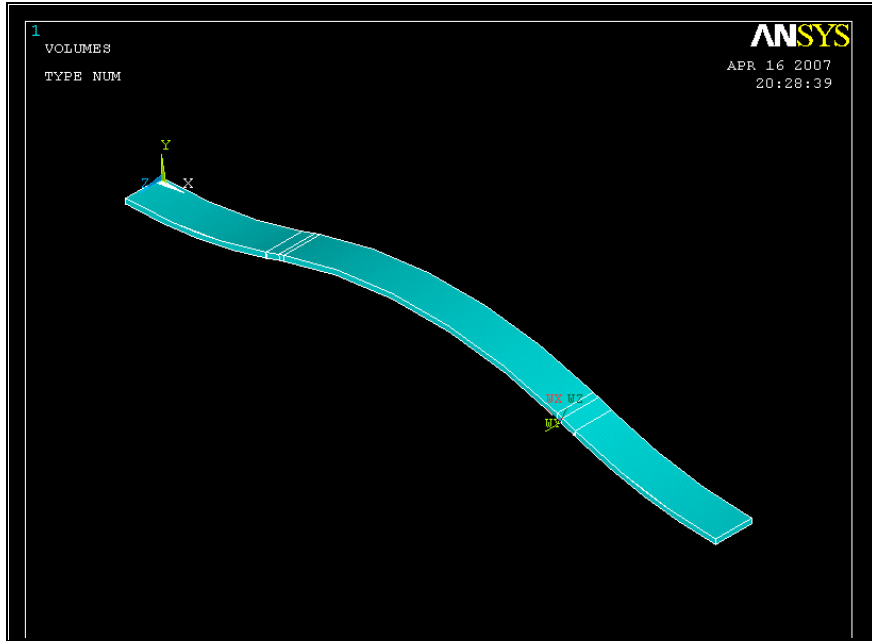


圖 5.23 建模完成（多餘部分清除）

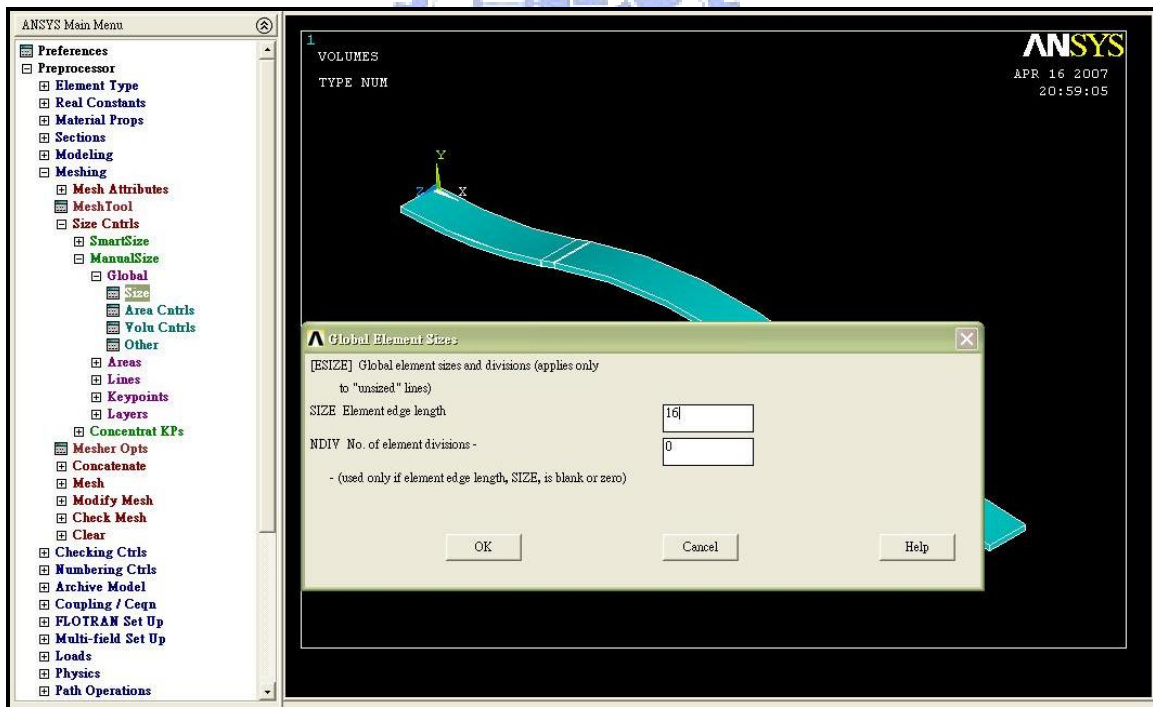


圖 5.24 網格劃分大小之設定

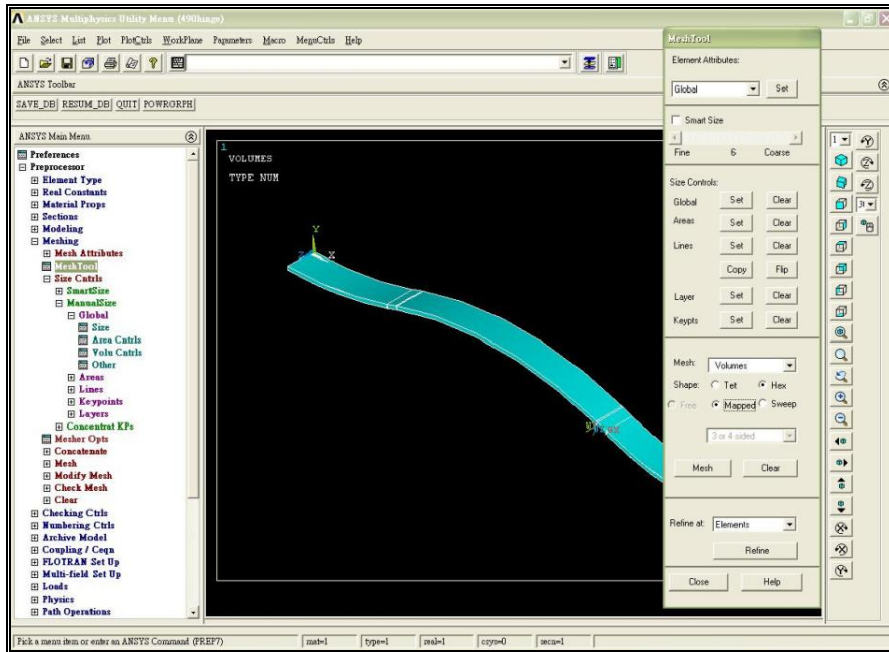


圖 5.25 採用規則網格法劃分

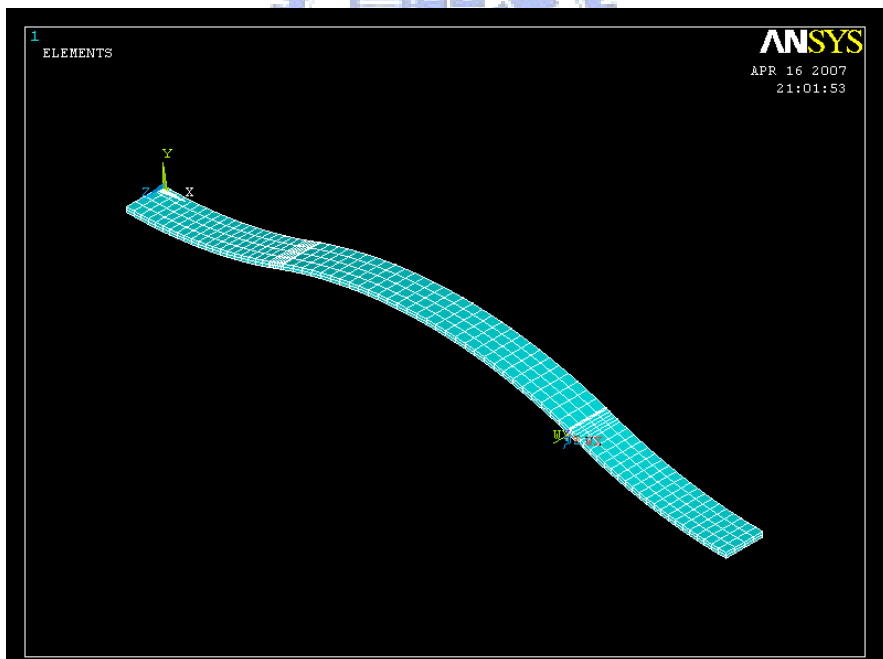


圖 5.26 完成網格化之連桿模型

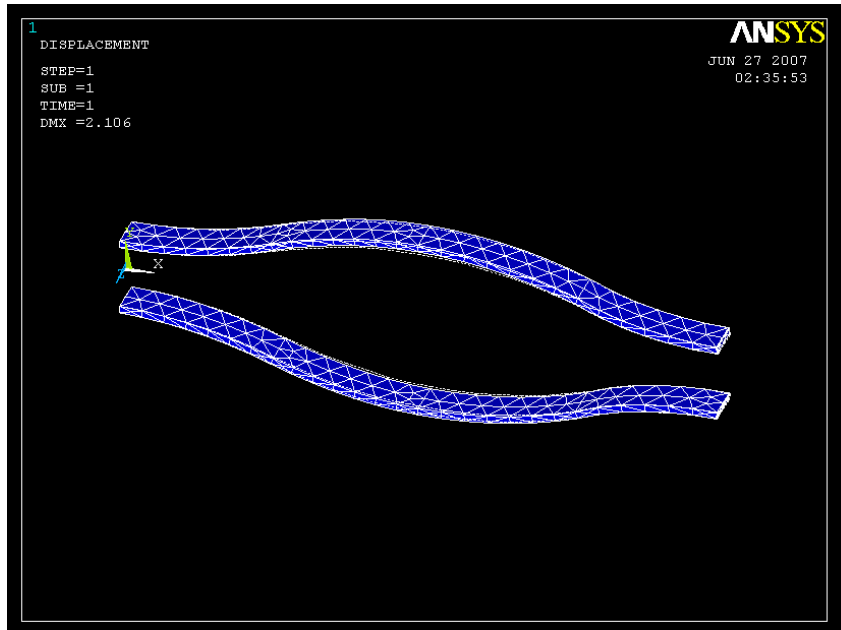


圖 5.27a 試體軸向受壓振幅 1mm 變形

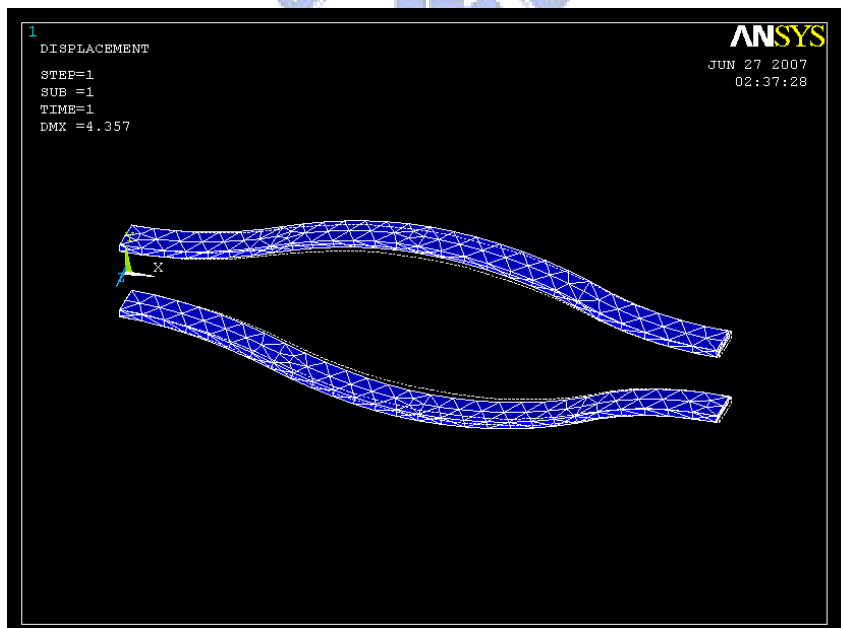


圖 5.27b 試體軸向受壓振幅 2mm 變形

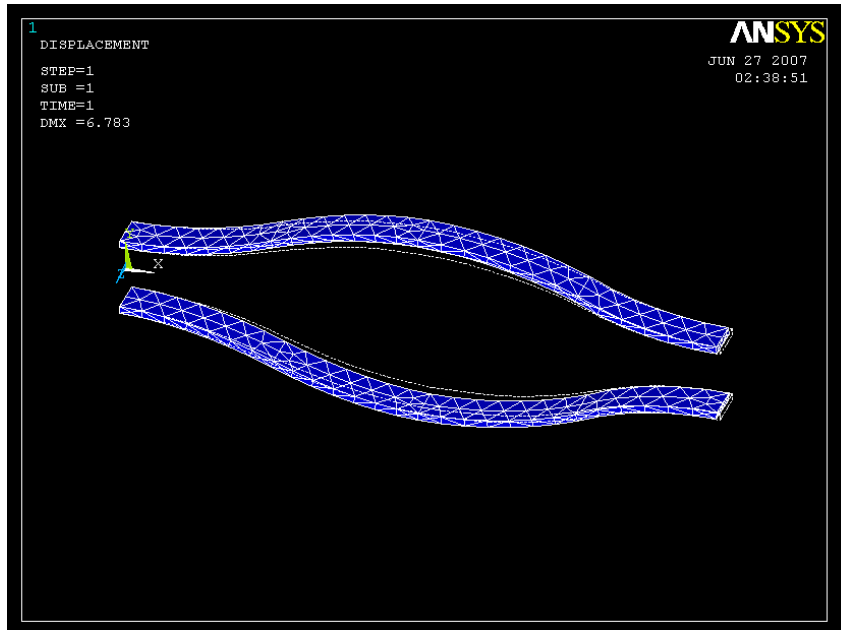


圖 5.27c 試體軸向受壓振幅 3mm 變形

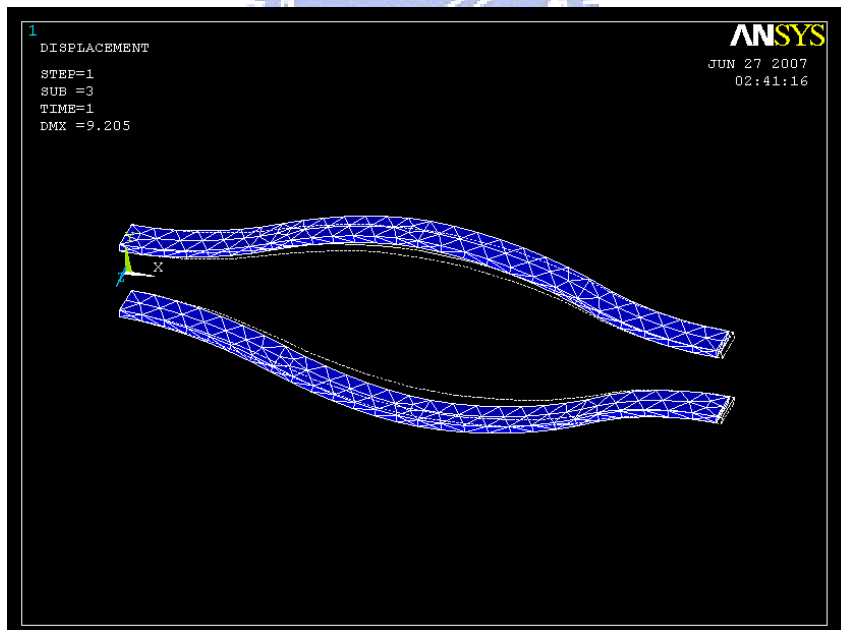


圖 5.27d 試體軸向受壓振幅 4mm 變形

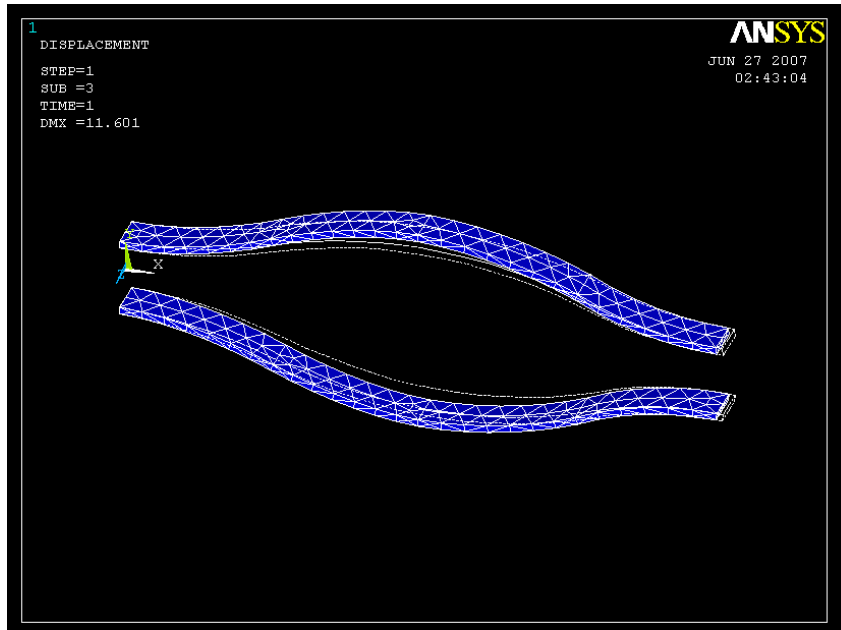


圖 5.27e 試體軸向受壓振幅 5mm 變形

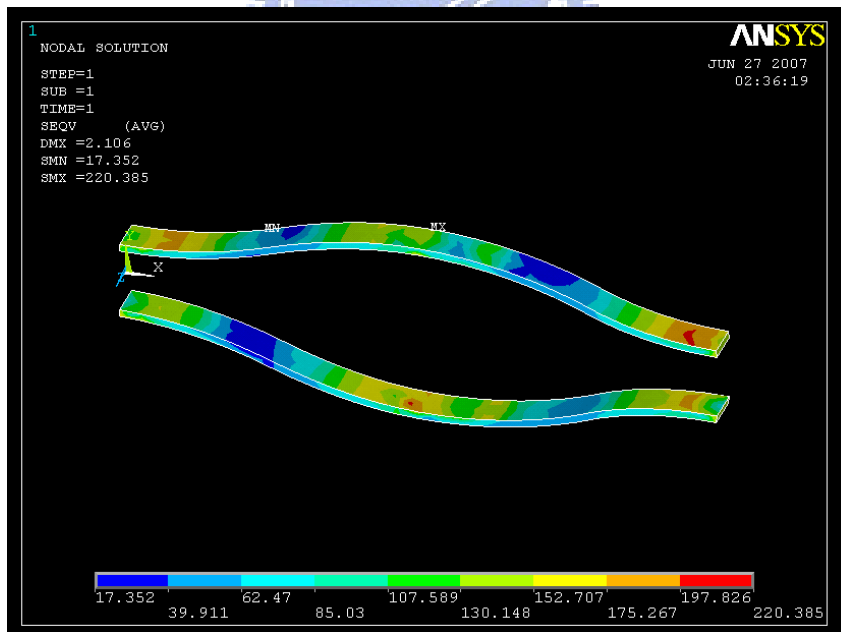


圖 5.28a 試體軸向受壓振幅 1mm 應力分佈

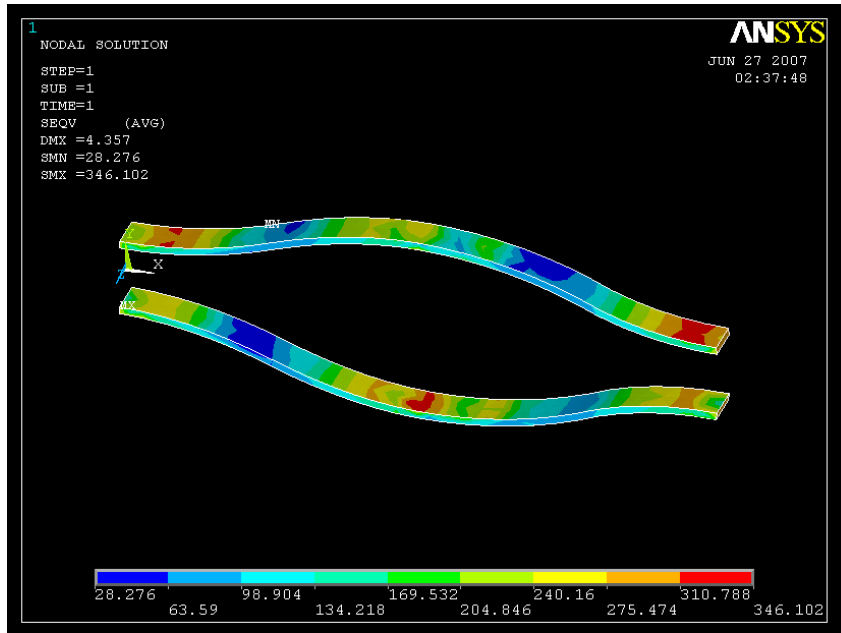


圖 5.28b 試體軸向受壓振幅 2mm 應力分佈

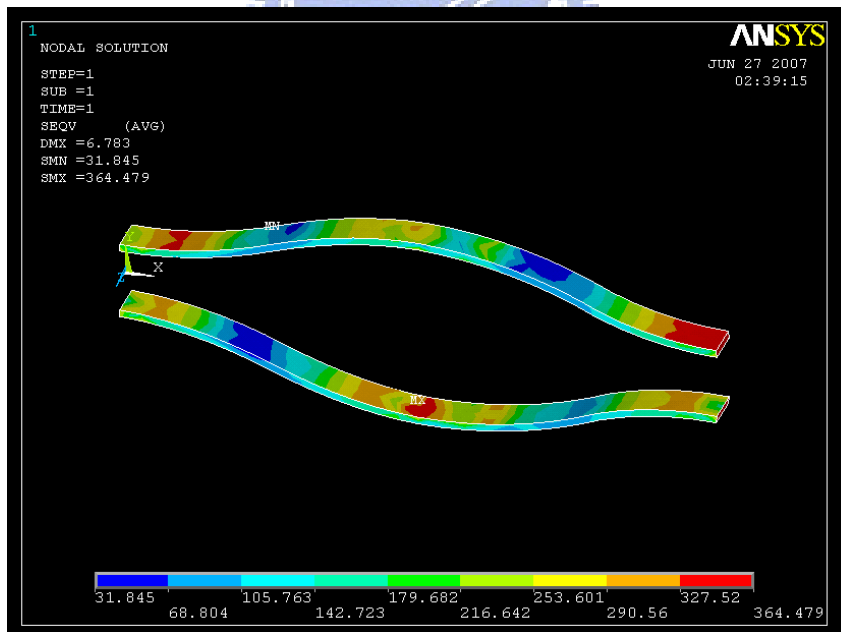


圖 5.28c 試體軸向受壓振幅 3mm 應力分佈

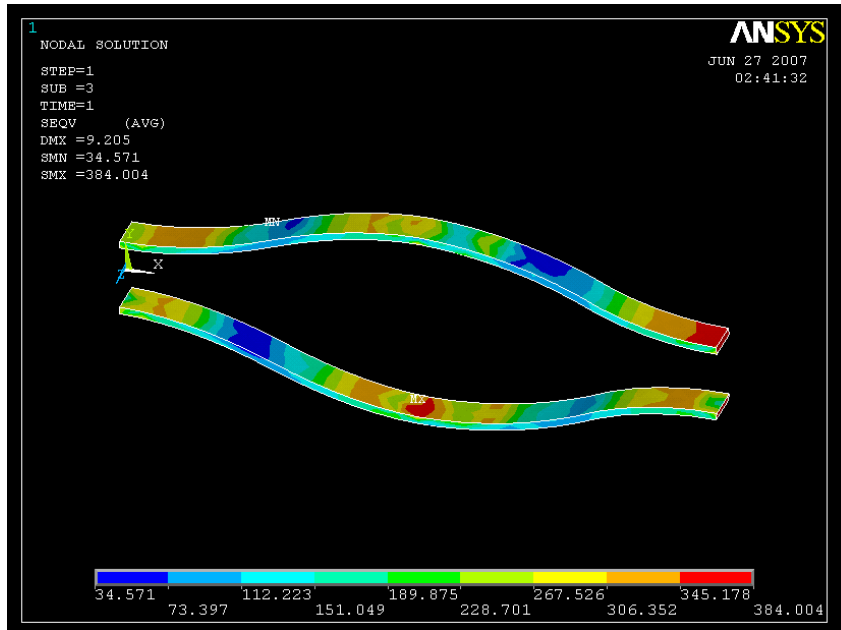


圖 5.28d 試體軸向受壓振幅 4mm 應力分佈

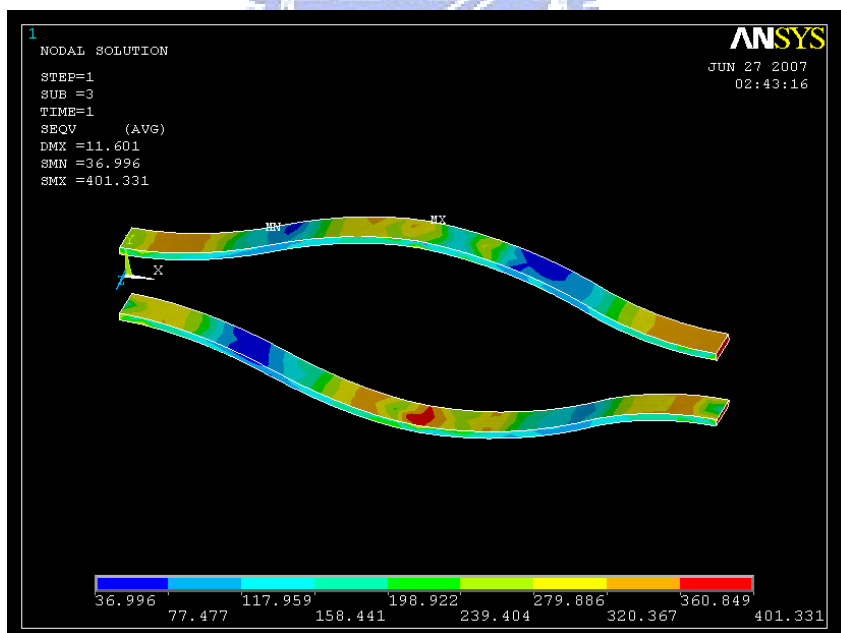


圖 5.28e 試體軸向受壓振幅 5mm 應力分佈

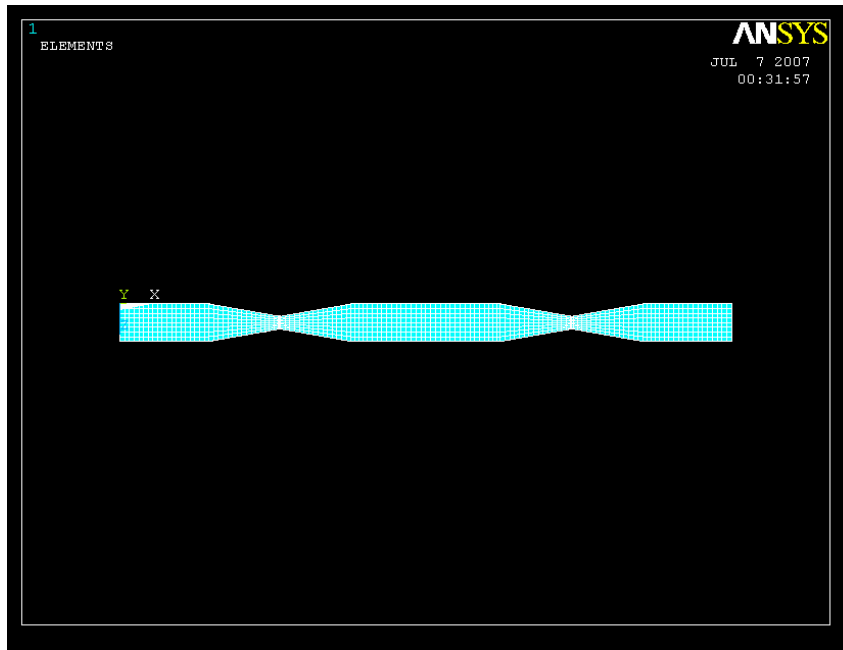


圖 5.29 型號 t6F490 元件俯視圖 (切削後)

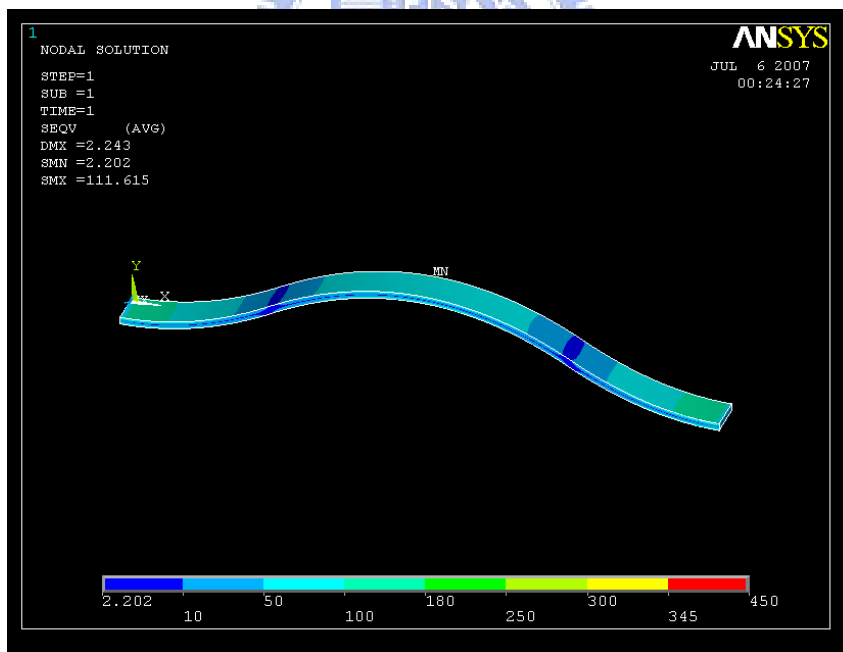


圖 5.30a 試體軸向受壓振幅 1mm 應力分佈 (切削前)

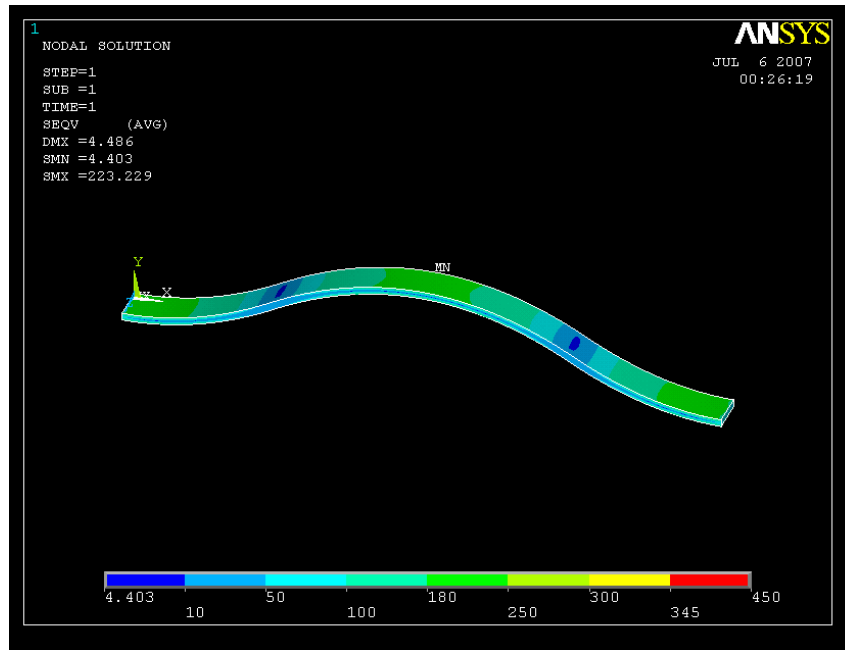


圖 5.30b 試體軸向受壓振幅 2mm 應力分佈 (切削前)

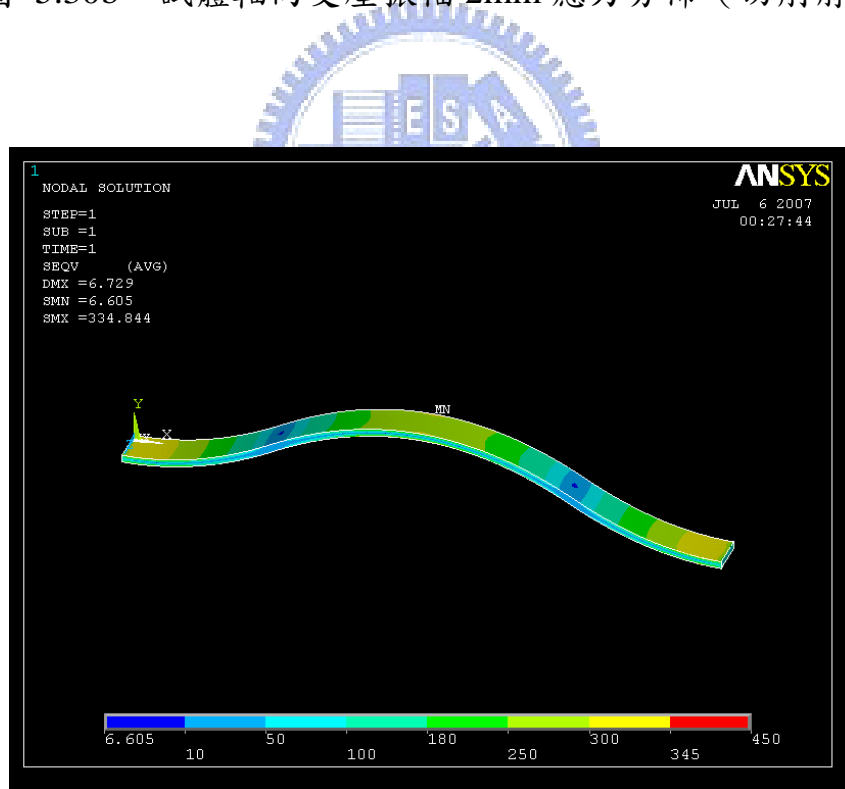


圖 5.30c 試體軸向受壓振幅 3mm 應力分佈 (切削前)

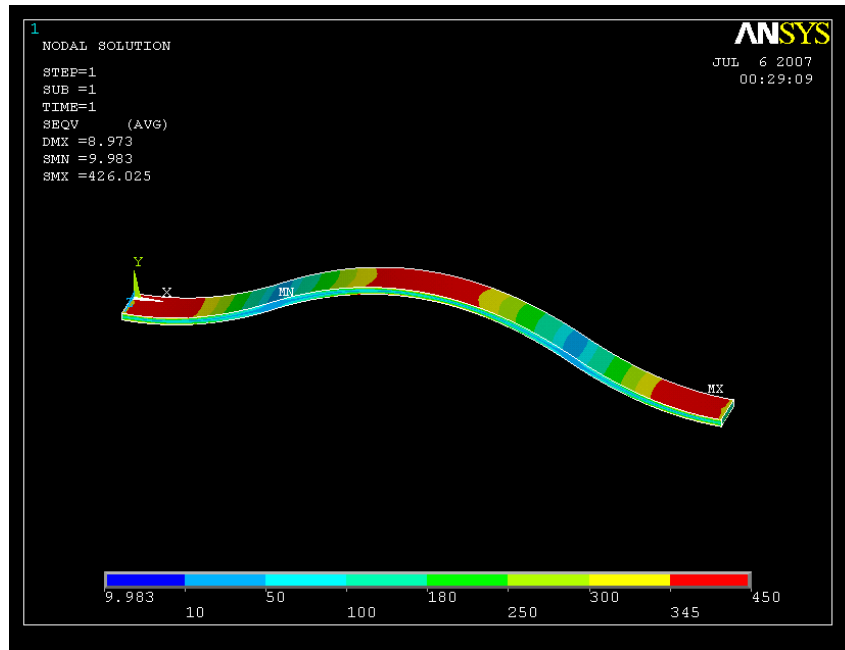


圖 5.30d 試體軸向受壓振幅4mm 應力分佈 (切削前)

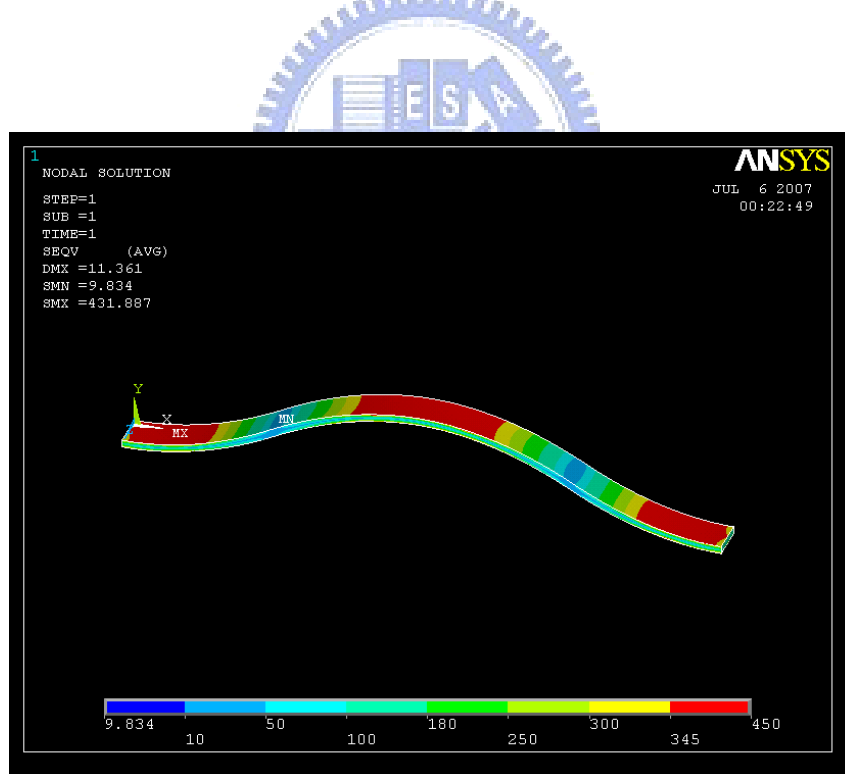


圖 5.30e 試體軸向受壓振幅5mm 應力分佈 (切削前)

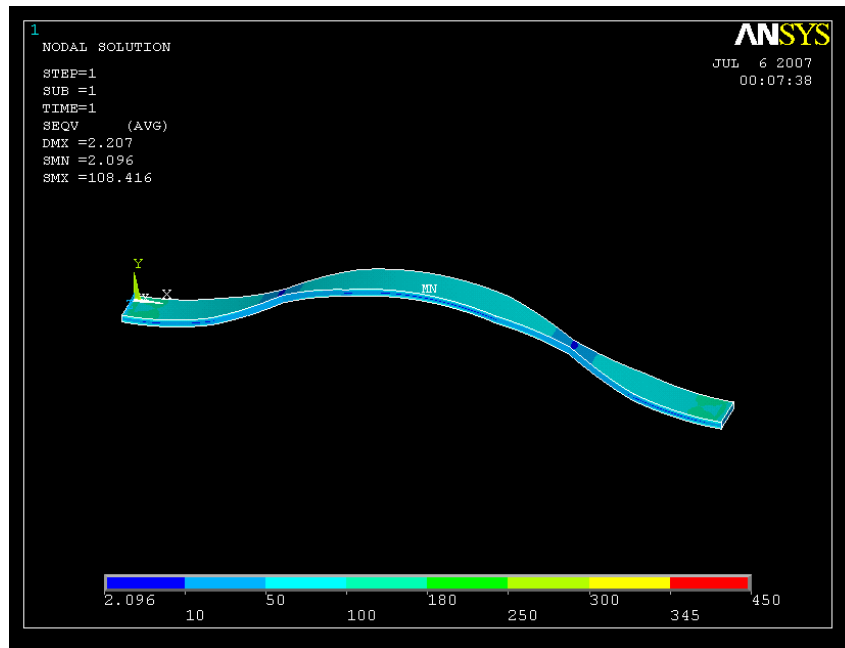


圖 5.31a 試體軸向受壓振幅1mm 應力分佈 (切削後)

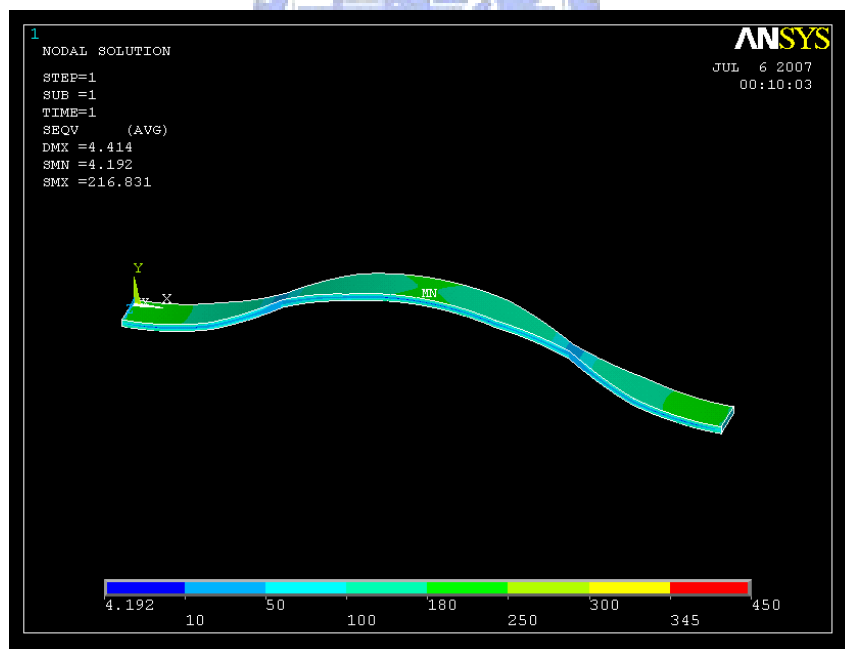


圖 5.31b 試體軸向受壓振幅2mm 應力分佈 (切削後)

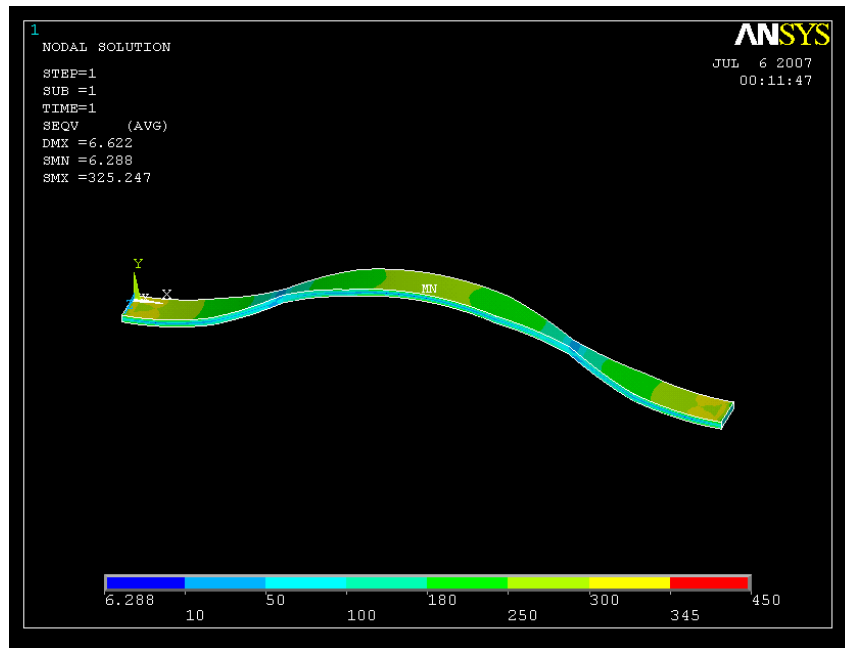


圖 5.31c 試體軸向受壓振幅3mm 應力分佈 (切削後)

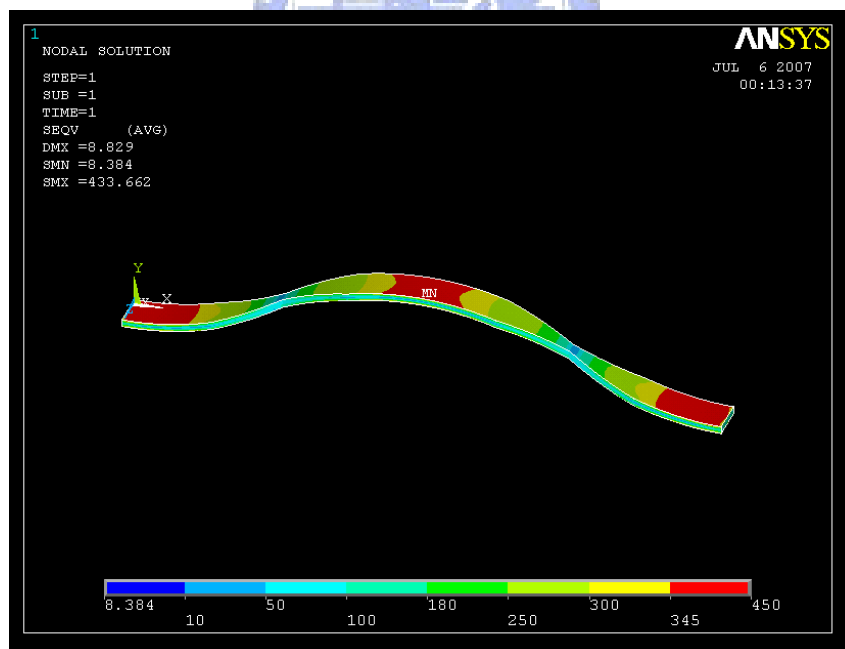


圖 5.31d 試體軸向受壓振幅4mm 應力分佈 (切削後)

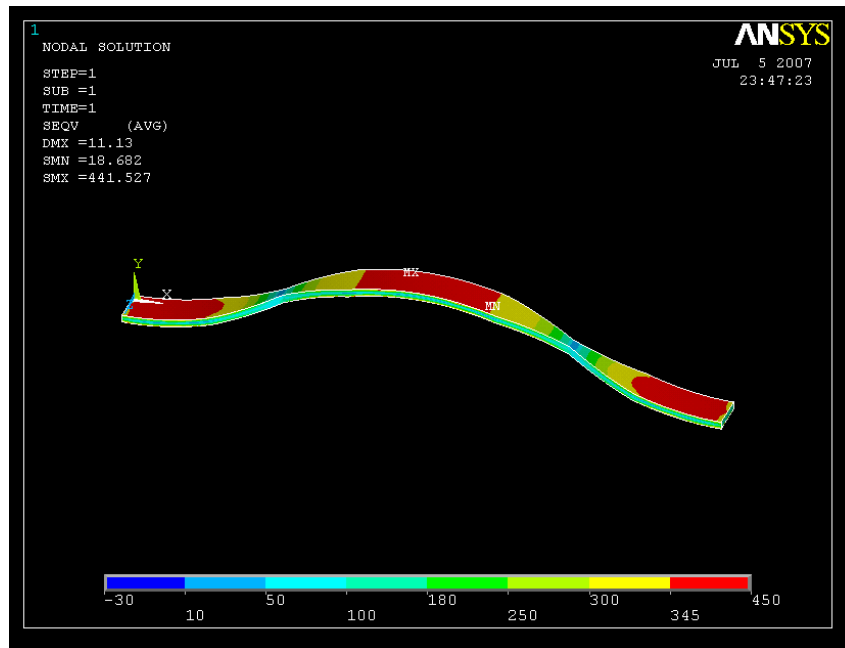


圖 5.31e 試體軸向受壓振幅5mm 應力分佈 (切削後)

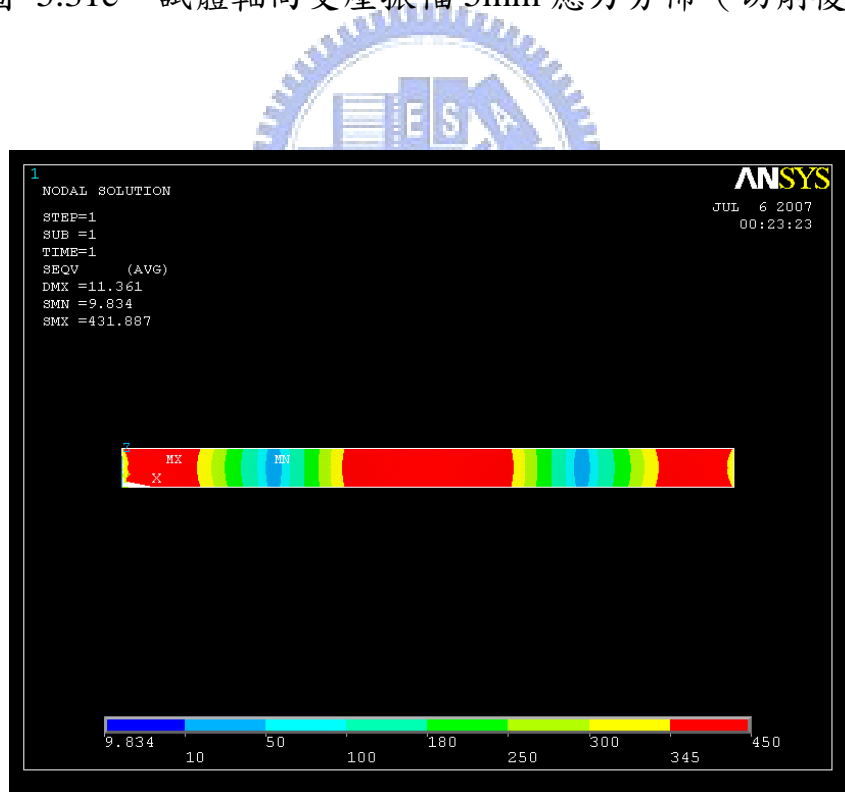


圖 5.32a 試體軸向受壓振幅5mm 之底部應力分佈 (切削前)

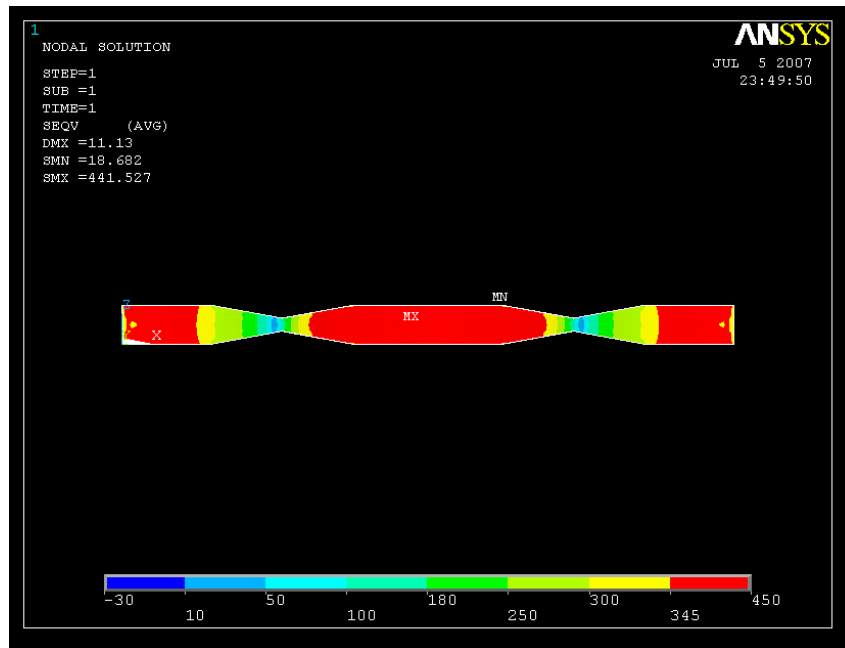


圖 5.32b 試體軸向受壓振幅 5mm 之底部應力分佈 (切削後)

