

沉箱頂版受垂直力及彎矩之應力分佈

研究生：簡國哲

指導教授：鄭復平 博士

國立交通大學土木工程學系

摘 要

在本文中，將以 3D 模型來模擬沉箱頂版在不同厚度、不同載重狀況以及上方柱子之不同長度半徑影響下，最大應力斷面內部之應力分佈情形，並且與工程界的設計方式進行比較。

由分析結果可以知道，沉箱頂版上方柱子長度增加時，頂部壓力區之正應力集中現象會變小，而底部拉力區正應力集中則會增大，進而變成由拉力區及壓力區平均分攤的分部情況，而剪應力也會由頂部的應力集中漸漸趨於沿斷面呈現較為均佈的狀態。頂版厚度的增加則會使斷面最大剪應力發生處由斷面中心往下偏移。柱子半徑小的話，斷面的應力集中現象會很高。由於混凝土抗拉強度不高，所以很有可能會在由於底部應力集中的現象而受拉開裂。

Stress Distribution of Cover Plate of Caisson Under Vertical Load and Moment

Student : Chien Kuo Che

Advisor : Dr. Fu-Ping Cheng

Department of Civil Engineering
College of Engineering
National Chiao Tung University

Abstract

In this study, 3D model is used to discuss the stress distribution at the cross-section of the maximum stress under variety of thickness of plate, loading condition and radius of column above plate. The results were compared with the design method used in industry.

By the result, we could know that if the length of the column above the cover plate increased, the phenomenon of normal stress concentration will decrease at the top and increase at the bottom. The shear stress will distribute more uniformly along the cross-section, and the position on which the maximum shear stress occurs will shift down from the center of cross-section as the thick of the cover plate increased. The lower tensile strength of concrete, probably produce cracks at the bottom of the cover plate due to the stress concentration.

致 謝

本論文得以完成，首先要感謝恩師鄭復平教授這兩年來的不厭其煩的悉心指導、激勵與鞭策，除了學業上的教導外，更在為人處事上啟發，令學生獲益良多，特此致上由衷的感謝與敬意。

論文口試期間，承蒙台灣大學 高健章教授與本校 趙文成教授、彭耀南教授提供寶貴的建議，使學生論文的內容更加完善，在此深表感謝。

論文研究期間感謝陳瑞益學長、黃洸駿學長、梁家銘學長、陳郁蕙學姊及鄒郁菁學姐，在日常生活及論文的指導，讓我在這個陌生的環境中倍感溫馨。更要感謝同窗好友：耿崧、純儀、佩珊、進華、季祥、冠華、思慧，學弟妹：熙威與即如，有了你們，使我的研究生生活更加多采多姿。

最後要感謝我最摯愛的父母及家人，感謝你們的栽培與養育之恩，由於你們在背後默默的支持與無怨無悔的付出，才有我今日的成就，在此獻上最崇高的敬意。

目 錄

摘 要.....	i
Abstract.....	ii
致 謝.....	iii
目 錄.....	iv
表 目 錄.....	vii
圖 目 錄.....	viii
第一章 緒論.....	1
1.1 前言.....	1
1.2 研究動機.....	2
1.3 研究目的及方法.....	2
第二章、文獻回顧.....	4
2.1 沉箱(Caisson)之簡介.....	4
2.1.1 沉箱之種類.....	4
2.1.2 沉箱之構造.....	5
2.1.3 頂版之設計.....	6
2.2 鋼筋混凝土簡支梁破壞模式.....	7
2.3 深梁.....	8



2.3.1 深梁受力行為.....	9
2.3.2 普通強度混凝土深梁.....	11
2.3.3 ACI規範有關深梁的條款.....	12
2.5 混凝土破壞的機制.....	12
2.5.1 混凝土抗壓破壞之機理.....	13
2-4-2 混凝土抗拉破壞的機理.....	14
第三章、程式分析與驗證方法	15
3.1 程式介紹.....	15
3.2 使用元素說明.....	16
3.3 分析模型的建立.....	18
3.3.1 假設條件.....	18
3.3.2 幾何模型.....	18
3.3.3 材料性質.....	19
3.3.4 受力形式.....	19
3.3.5 分析參數剖析.....	20
3.3.6 使用元素.....	21
3.3.7 收斂性分析.....	22
3.4 沈箱頂版在實務界的設計方法	23
第四章 結果與分析	26



4.1 楊氏係數變化的影響.....	27
4.2 承受彎矩大小的影響.....	29
4.3 圓柱半徑大小的影響.....	29
4.4 頂版受力後可能發生的情況	31
第五章、結論與建議	32
5.1、結論.....	32
5.2、建議.....	33
參 考 文 獻	34



表 目 錄

表 3-1、DIANA提供之分析種類表	36
表 3-2、DIANA提供之材料模型表	36
表 3-3、DIANA提供之元素種類表	36
表 3-4、分析模型參數表	37
表 3-5、詳細分析參數表	38
表 3-6、收斂性分析之尺寸分割表	41
表 3-7、不同圓柱半徑之收斂性分析元素切割表	42



圖 目 錄

圖 2-1、沉箱依其施工方式之分類	43
圖 2-2、沉箱之構造	43
圖 2-3、繫拱破壞	44
圖 2-4、剪張破壞	44
圖 2-5、剪壓破壞	44
圖 2-6、撓剪破壞	45
圖 2-7、撓曲破壞	45
圖 2-8、受集中載重之深梁	45
圖 2-9、單軸荷重下混凝土之應力—應變行為與微裂縫成長示意圖	46
圖 2-10、應力作用下，各階段之裂縫變化示意圖	46
圖 2-11、軸向應力與應變及體積應變之關係	46
圖 2-12、混凝土受拉力作用下之破裂模式	47
圖 3-1、沉箱頂版模型(a)立面圖(b)立面圖(簡化後)(c)頂視圖(d)底視圖	48
圖 3-2、分析模型之受力示意圖	49
圖 3-3、Brick elements-CHX60	49
圖 3-4、模型切割區域分配圖	49

圖 3-5、模型之元素切割狀況.....	50
圖 3-6a、R=1.00 之收斂曲線.....	50
圖 3-6b、R=1.25 之收斂曲線.....	51
圖 3-6c、R=1.50 之收斂曲線.....	51
圖 3-6d、R=1.75 之收斂曲線.....	52
圖 3-6e、R=2.00 之收斂曲線.....	52
圖 3-7、頂版設計示意圖.....	53
圖 4-1、最大應力斷面之斷面元素.....	54
圖 4-2、Case C1-1-1 之應力分佈圖.....	55
圖 4-3、Case C1-1-2 之應力分佈圖.....	55
圖 4-4、Case C1-1-3 之應力分佈圖.....	56
圖 4-5、Case C1-1-8 之應力分佈圖.....	56
圖 4-6、Case C1-2-1 之應力分佈圖.....	57
圖 4-7、Case C1-2-2 之應力分佈圖.....	57
圖 4-8、Case C1-2-3 之應力分佈圖.....	58
圖 4-9、Case C1-2-8 之應力分佈圖.....	58
圖 4-10、Case C1-3-1 之應力分佈圖.....	59
圖 4-11、Case C1-3-2 之應力分佈圖.....	59
圖 4-12、Case C1-3-3 之應力分佈圖.....	60

圖 4-13、Case C1-3-8 之應力分佈圖	60
圖 4-14、Case C1-4-1 之應力分佈圖	61
圖 4-15、Case C1-4-2 之應力分佈圖	61
圖 4-16、Case C1-4-3 之應力分佈圖	62
圖 4-17、Case C1-4-8 之應力分佈圖	62
圖 4-18、Case C2-1-1 之應力分佈圖	63
圖 4-19、Case C2-1-2 之應力分佈圖	63
圖 4-20、Case C2-1-3 之應力分佈圖	64
圖 4-21、Case C2-1-7 之應力分佈圖	64
圖 4-22、Case C2-2-1 之應力分佈圖	65
圖 4-23、Case C2-2-2 之應力分佈圖	65
圖 4-24、Case C2-2-3 之應力分佈圖	66
圖 4-25、Case C2-2-7 之應力分佈圖	66
圖 4-26、Case C2-3-1 之應力分佈圖	67
圖 4-27、Case C2-3-2 之應力分佈圖	67
圖 4-28、Case C2-3-3 之應力分佈圖	68
圖 4-29、Case C2-3-7 之應力分佈圖	68
圖 4-30、Case C2-4-1 之應力分佈圖	69
圖 4-31、Case C2-4-2 之應力分佈圖	69

圖 4-32、Case C2-4-3 之應力分佈圖	70
圖 4-33、Case C2-4-7 之應力分佈圖	70
圖 4-34、Case C3-1-1 之應力分佈圖	71
圖 4-35、Case C3-1-2 之應力分佈圖	71
圖 4-36、Case C3-1-3 之應力分佈圖	72
圖 4-37、Case C3-1-5 之應力分佈圖	72
圖 4-38、Case C3-2-1 之應力分佈圖	73
圖 4-39、Case C3-2-2 之應力分佈圖	73
圖 4-40、Case C3-2-3 之應力分佈圖	74
圖 4-41、Case C3-2-5 之應力分佈圖	74
圖 4-42、Case C3-3-1 之應力分佈圖	75
圖 4-43、Case C3-3-2 之應力分佈圖	75
圖 4-44、Case C3-3-3 之應力分佈圖	76
圖 4-45、Case C3-3-5 之應力分佈圖	76
圖 4-46、Case C3-4-1 之應力分佈圖	77
圖 4-47、Case C3-4-2 之應力分佈圖	77
圖 4-48、Case C3-4-3 之應力分佈圖	78
圖 4-49、Case C3-4-5 之應力分佈圖	78
圖 4-50、同一厚度下不同E值之正應力曲線(H=1.5m)	79

圖 4-51、同一厚度下不同E值之正應力曲線(H=3.0m)	79
圖 4-52、同一厚度下不同E值之剪應力曲線(H=1.5m)	80
圖 4-53、同一厚度下不同E值之剪應力曲線(H=3.0m)	80
圖 4-54、正規化之同樣E值下不同厚度正應力曲線(E=E1).....	81
圖 4-55、正規化之同樣E值下不同厚度正應力曲線(E=70E1)	81
圖 4-56、正規化之同樣E值下不同厚度剪應力曲線(E=E1).....	82
圖 4-57、正規化之同樣E值下不同厚度剪應力曲線(E=70E1)	82
圖 4-58、同一厚度下不同M值之剪應力曲線(H=1.5m)	83
圖 4-59、同一厚度下不同M值之剪應力曲線(H=3.0m)	83
圖 4-60、同一厚度下不同M值之剪應力曲線(H=1.5m)	84
圖 4-61、同一厚度下不同M值之剪應力曲線(H=3.0m)	84
圖 4-62、正規化之同樣M值下不同厚度正應力曲線(M=0).....	85
圖 4-63、正規化之同樣M值下不同厚度正應力曲線(M=10P)	85
圖 4-64、正規化之同樣M值下不同厚度剪應力曲線(M=0).....	86
圖 4-65、正規化之同樣M值下不同厚度剪應力曲線(M=10P)	86
圖 4-66、正規化之同樣厚度下不同R值正應力曲線(H=1.5m)	87
圖 4-67、正規化之同樣厚度下不同R值正應力曲線(H=3.0m)	87
圖 4-68、沉箱頂版內部之斜壓桿行為	88

第一章 緒論

1.1 前言

台灣地區自民國六十二年十大建設實施後，公路運輸型態產生顯著變化，隨著城際運輸的急速成長和市區道路高架化，一旦橋樑受到損壞，對於人們交通的安全及物資的配送皆有重大的影響，因此，不得不注意其安全上的問題。

橋樑下部結構包括兩端橋台與跨度中間所設之橋墩，在橋墩與地面接觸的地方，如果地質屬於堅硬土層，承载力强度高且不易沉陷或者不位於被沖刷之處，可以設計為直接基礎亦即淺基礎。若土層條件軟弱而且容易被沖刷之處，則設置沉箱或樁基礎以達到堅硬地層，以得到安全之目的，亦即深基礎。

橋樑基礎位於橋樑下部結構之最底部，承受橋樑由上部結構與下部結構之荷重，其良窳關係到整座橋樑之穩定性，對橋樑工程而言，基礎即是將來自橋樑上部結構之荷重傳遞於地盤之結構體。

1.2 研究動機

由於台灣河流坡度陡峻且沖刷劇烈，河床多為卵礫石夾雜砂質地層，在全套管樁問世之前，大部份過河橋梁皆以沉箱做為基礎，一般多採用開口式沉箱來進行設計，但是在經過民國八十九年之九二一地震後，許多老舊的橋樑受到嚴重的損害，因此在規範中有關地震力的設計值大幅提高，造成老舊的橋樑抵抗地震力的不足，恐怕會有破壞之虞。尤其是沉箱頂版，它位於沉箱基礎頂部，來自上部結構極大之力量皆靠此頂版傳遞到沉箱基礎上，一旦沉箱頂版破壞則整個橋墩會就此崩塌，但很不幸的是此版要進行補強相當困難。由於頂版應力分佈情形較為複雜，目前均以簡易公式分析設計，於是，我們想藉由程式的模擬來分析沉箱頂版的實際應力分佈行為，以判斷此簡易設計是否過於保守，如此可免於補強之困難。

1.3 研究目的及方法

由於我們想知道工程界在設計沉箱頂版時所使用之應力分佈模式與實際上的狀況有無不同，如果有的話，不同處在那，該不該做補強的動作，因此想藉由 DIANA 這套軟體來以 3D 立體元素模擬此沉箱頂版，分析不同尺寸之沉箱頂版在不同的受力下，其最大應力斷面內之應力分佈，以決定其設計及配筋方式，並且與現今工程界的作法

相比較，判斷其是否有過量設計或強度不足之疑慮。本研究之流程如下：

1. 相關文獻收集
2. 收斂性探討與沉箱頂版之分析模式
3. 分析應力分佈曲線
4. 和實務界設計方式做比較



第二章、文獻回顧

2.1 沉箱(Caisson)之簡介

沉箱與樁基皆屬結構之深基礎，但兩者在設計與施工方法上卻有很大的差異。沉箱基礎為一單元性大型基礎，並為剛性大、撓度位移極少以致不予計入位移變化之結構物。將沉箱沉入土層至預定深度，以承受上、下部結構物的所有載重。一般來說其承载力之可信度比任何基樁施工法更為可靠。在大型的橋梁基礎工程遇有河床沖刷非常嚴重之處，為求基礎穩固與施工便捷，多採用沉箱基礎。



2.1.1 沉箱之種類

沉箱其類別依施工方法可分為三種，如圖(2-1)所示：

- (1) 開口沉箱 (Open Caissons)
- (2) 氣壓沉箱 (Pneumatic Caissons)
- (3) 浮動沉箱 (Floating Caissons)

目前國內所使用之開口沉箱大部份為鋼筋混凝土之筒狀體，其頂部及底部保持開放，施工時以人工或抓斗挖掘並排出沉箱底下之土石方，使沉箱靠其重量下沉至預定之承載地層中，底部清理完成後再構築底版封底，箱內則填砂石或灌水，最後進行蓋版之施築。

壓氣沉箱之施工亦由底部挖掘並排出土方使其下沉，但其作業方式不同，整個挖掘作業係在壓氣環境下進行，施工前須先於沉箱刃口上方設置水平隔板做為工作室(壓氣艙)之頂版，施工時則須輸入壓縮空氣於工作室以防止浸水，並確保開挖作業得以順利進行，台灣因地層條件特殊，加以壓氣沉箱之施工設備繁雜，工程費昂貴，故較少採用。[10]

2.1.2 沉箱之構造

一般沉箱之構造約略可分為三部分，如圖(2-2)所示，概述如下：

(1) 鐵腳

鐵腳是位於沉箱最底部銳緣又口之尖端，由厚鋼版鑄造而成。其作用可以幫助沉箱加速下沉入土外，同時多少有保護沉箱之功能。

(2) 箱身

係由鋼筋混凝土分節製成，沉箱斷面形狀可自由設計，採對稱式，以免於施工時，因偏心載重，使沉箱歪斜，影響工程進度。箱身長度的可任意增減之。

(3) 頂版

沉箱主要在支持上下部結構物的載重，故需和下部結構連成一體以發揮其功能，但因箱壁厚度有限，為解決此一問題，需將箱頂以頂

版加以封閉，使沉箱頂版與沉箱相接，將其載重傳遞於沉箱。一般沉箱頂版厚度約在 1 公尺以上。[12]

2.1.3 頂版之設計

根據建築物基礎構造設計規範[10]，沉箱頂版設計至少應考量下列兩種載重狀況：

(1) 第一種狀況

柱混凝土澆置後強度尚未發展前之狀況，頂版自重及其上澆置之柱混凝土重完全作用於頂版，需將其當作支承於側牆或隔牆之簡支版或連續版分析。



(2) 第二種狀況

完工後柱與頂版連成一體，頂版承受側牆支承處之反力作用，得視頂版為固定於柱體之懸臂版分析。

頂版厚度大於跨度二分之一以上時，其配筋應依混凝土工程設計規範之深梁相關規定設計。支承頂版之側牆部位應依牛腿規定設計，並應檢核支承部承壓、滑動之安全性及錨碇鋼筋量。抗張之錨碇鋼筋，其面積至少應為頂版支承面積之 0.2%，且鋼筋直徑不得小於 16mm。

2.2 鋼筋混凝土簡支梁破壞模式

受到載重作用下的梁，其破壞模式可依剪跨比 $\frac{a}{d}$ 的變化，分成下

列四種的破壞模式：

(1) 深梁， $\frac{a}{d} \leq 1$

斜裂縫發生後，剪支梁即成為一繫拱，而繫拱的破壞包含：

1. 錨定破壞，支承處之拉力鋼筋拔出。
2. 支承處混凝土壓碎。
3. 拱頂混凝土壓碎或梁底拉力鋼筋降伏。
4. 拱肋混凝土壓碎。

如圖(2-3)所示。



(2) 短梁， $1 \leq \frac{a}{d} \leq 2.5$

腹剪破壞，包括剪張及剪壓破壞。

剪張破壞：其破壞模式類似深梁，在剪力跨距區內發生斜張力裂縫，隨著荷重的增加而產生主筋位置的水平開裂(二次裂縫)，造成主筋裹力的破壞稱為剪張破壞，如圖(2-4)所示。

剪壓破壞：為在剪力跨距區所產生之斜張裂縫，其隨載重增加而向上方壓力區發展，到達極限載重時，直接在斜裂縫上方發生混凝土之壓碎，則稱剪壓破壞，如圖(2-5)所示。

(3) 中長梁， $2.5 \leq \frac{a}{d} \leq 6$

撓剪破壞：最初發生於剪力跨距區的撓區裂縫，在荷重增加至某一程度時，由於剪力與彎矩之聯合作用，使裂縫由直裂縫發展為斜裂縫，往上指向載重點，最後在載重點附近混凝土壓碎而破壞，如圖(2-6)所示。

(4) 細長梁， $\frac{a}{d} > 6$

彎曲破壞：當斷面拉應力超出破裂模數時，即產生彎曲裂縫，裂縫形成後便迅速地向上往中性軸延伸，所以最初的開裂均位於梁最大彎矩的斷面附近。最後由於直裂縫的大開裂，使壓力區混凝土壓碎而破壞，如圖(2-7) 所示。[1]



2.3 深梁

在一般結構物中，如橋樑、建築物之支承梁或基礎梁等，常因實際需要，而設計成梁深較大或梁跨較短，主要的載重與反力作用在構件的平面內，混凝土接近於平面應力狀態，當梁的跨深比等於或小於5，或其剪跨 a 小於約梁深的2倍時此類型的構件就可定義為深梁 (deep beams)。由於尺寸的關係，深梁的強度大部分由剪力所控制，加上剪力破壞常偏向於脆性，因此更顯剪力設計之重要。

2.3.1 深梁受力行爲

深梁開裂前的應力可用一維的彈性力學或有限元素法來進行分析。研究證明，彎曲前斷面為平面在彎曲後仍保持為平面這種常用的假說對深梁而言並不適用。由於高的剪應力使斷面發生明顯的翹曲。因此，即使在彈性範圍內，撓曲應力也不會呈線性分佈，計算斷面的性質和應力的常用方法不再適用。

另一方面，因為這類構件在使用載重下撓度並不大，彈性應力分析的意義有限，彈性分析主要的目的為預估撓曲裂縫和剪力裂縫的位置及方向。以強度分析來確定其深梁構件之極限載重是比較重要的，經試驗證實的理論顯示，採用於普通尺寸梁的相同計算方法能足夠精確地計算深梁的撓曲強度。等值應力塊及其相關的參數可不加改變地予以應用。深梁的抗剪強度可能比慣用的 ACI 規範對普通尺寸構件建立的公式，即式(2-3-1)計算所得的結果高 2 或 3 倍。

$$V_c = \left(1.9\sqrt{f'_c} + 2500\rho_w \frac{V_u d}{M_u} \right) b_w d \quad (2-3-1)$$

剪力在斜向開裂梁內的傳遞通常發生 4 個機構：(a)通過未開裂的混凝土受壓區直接傳遞；(b)骨材的互鎖作用；(c)主要撓曲鋼筋的插接作用(dowel action)以及 (d)腹筋的直接受拉。然而，如圖(2-8)所示，深梁構件所承受的載重大部份是從載重作用點到支承由斜壓桿

直接傳遞的，大約平行於載重作用點至支承連線方向形成的斜裂縫分割出斜向壓桿，它與混凝土的水平壓力和主筋拉力共同作用來平衡載重。這一機構的幾何形狀和壓拉桿件對抗剪強度貢獻的相對重要性，顯然取決於構件的尺寸及載重和反力的位置。

圖(2-8)所示的參數有很重要的意義。對於載重沿頂面分佈的深梁，參數 $\frac{a}{d}$ 可以等效參數 $\frac{V_u d}{M_u}$ 來取代。如圖(2-8)所示受集中載重作用的梁，其等效性是容易證明的。由於上述特性的支配，導致深梁的配筋與普通梁不同。雖然由於深梁具有較深的受拉區可以將主筋合理地配置在構件的下部，例如三分之一深度範圍內，但是主筋卻仍照常佈置在受拉邊附近。這是因為深梁的極限強度，取決於壓桿與拉桿之作用(strut-and-tie action)，主筋幾乎沿全長承受應力，而不僅是在最大彎矩斷面內，必須特別注意的是這些主筋的錨定。由於當斜裂縫發生時，在大多數的情況下，深梁內主應力方向的傾角比45度還陡。因此，雖然配置垂直箍筋是很重要的，但其功效往往小於所配置的水平腹筋。水平鋼筋之所以抗剪效用較大，不僅因為其在垂直於斜裂縫方向的作用更大，從而改進了骨材互鎖作用的剪力傳遞，此外因為它們的插接作用有助於剪力傳遞。[6]

2.3.2 普通強度混凝土深梁

根據在 1982 年，K. N. Smith 與 A. S. Vantsiotis，針對 52 根普通強度混凝土深梁試體，承受一組對稱集中荷重之試驗結果，探討 $\frac{a}{d}$ 、 f'_c 、 ρ_v 、 ρ_{vh} 及裂縫寬度對剪力強度之影響，並與 ACI 規範進行比較得到以下結論[8]：

1. 剪力筋之加入對於剪力開裂強度沒有影響，對於極限載重則有影響。
2. 水平及垂直剪力筋能有效的減少裂縫寬度和撓度。
3. 當 $\frac{a}{d} < 1.0$ 時，垂直剪力筋之效用減少，但水平剪力筋的貢獻則變得顯著。
4. 極限載重隨混凝土抗壓強度的增加而增加，尤其於 $\frac{a}{d}$ 減少時更為明顯。
5. ACI 規範對剪力開裂強度之規定非常保守；而對於極限剪力強度，則低估了混凝土強度，高估水平及垂直剪力筋之貢獻。
6. 對於無剪力筋之深梁，開裂強度約為極限剪力強度之 40%~45%，即 $V_{cr} = 0.4 \sim 0.5V_u$

2.3.3 ACI 規範有關深梁的條款

依據ACI 規範11.8 條[2]，抗剪的特殊條款適用於梁的跨深比 l_n/d 小於5，而且載重與支承分別位於梁的兩個相對面，從而在載重與支承間能形成斜壓桿的情況。如果載重作用於構件的側面或底面則採用普通梁的設計條款。特殊抗剪條款適用於簡支深梁，但不適用於連續深梁。對於後一種情況，構件依據普通梁的設計方法進行抗剪設計，或者用另一種方法，依據壓桿和拉桿(strut-and-tie)的觀念來設計連續深梁。



2.5 混凝土破壞的機制

透過對破壞力學的瞭解，及對混凝土材料巨微觀特性的認知，混凝土破壞的特性漸漸被熟悉。由於混凝土為水泥、水、骨材、摻料所組合而成的「複合材料」，其受力反應的行為，不像只有單一晶相或均質脆性材料表現的性質。在外力作用下，內部各別材料，或各組成元素體均會產生不同的反應，這些反應多少，都會產生變形不一致，或反應不一的行為出現，以致在二種材質間，產生差異變形或應力，如果是脆性材料，這些不一致性就會產生界面裂縫或缺陷，後造成應力集中或破裂的症狀，進而加速材料的毀損。[8]

2.5.1 混凝土抗壓破壞之機理

如果仔細的觀察混凝土試體的應力—應變行為，見圖 2-9，應該可以發覺屬「脆性材料」之混凝土破壞毀損的過程，即(1)裂縫開始發生(2)裂縫緩慢成長及蔓延(3)裂縫快速成長。

當荷重應力低於 $0.3f_c'$ ，圖 2-9 上之(1)階段(白色部份)，應力—應變曲線為線性關係。原來因施工、環境變化所造成的泌水、析離、裂隙等缺陷，部份受到壓縮而密合，則裂縫蔓延的機率很低；在骨材—混凝土界面之處，由於應力集中現象，可能產生新的破裂痕跡，但亦相當穩定；不過新裂痕的產生，致使混凝土應力—應變曲線呈非線性現象。

當荷重應力介於 $0.3f_c' \sim 0.5f_c'$ 之間，如圖 2-9 上之(2)階段(白色部分)，裂縫尖端受到局部應力集中現象，使其所受應力超過 f_c' ，或側向應變超出容許應變量，而致局部破壞的發生；裂縫遂漸循著破壞線開始緩慢的「蔓延」，此時裂縫在界面處大量發生，而水泥漿體及骨材甚少產生裂縫，此時裂縫以穩定成長的方式進行。由應力—應變曲線可看出開始有較大彎曲現象。

當荷重應力超過 $0.5f_c'$ ，而低於「靜止疲勞」的範圍時，圖 2-9 上之(3)階段，原有界面裂縫開始延伸入水泥漿體內，造成大量水泥漿體母體連續(白色部份連接)，且擴張的裂縫，然後與界面蔓延的裂

縫相互連接。在荷重應力為 $0.75f_c'$ 時，連續的大裂縫已逐漸形成。

當荷重應力超過 $0.75f_c'$ 時，見圖 2-9 上之(4)階段，外界作用能量遠超過產生破裂面所釋放之能量，裂縫遂以快速成長方式蔓延，這時候裂隙呈系統連續而不穩定，終至破壞。

這些破壞的機理應用在抗壓試體上，則顯現如圖 2-10 之裂縫模式，到達圖 2-10d 階段裂縫大量形成，此刻體積應會明顯增加，當然波松比亦會大為增大，直到破壞為止，見圖 2-11

圖 2-14 所示為應力作用下，相對應各階段之裂縫變化示意圖(a)垂直於作用力方向之既存裂縫的密合;(b)無裂縫成長發生，彈性表現;(c)最弱點形成鍵結的破壞;(d)鍵結裂縫慢速蔓延，母體裂縫開始發展;和(e)裂縫快速蔓延且大量產生，最後破壞[8]

2-4-2 混凝土抗拉破壞的機理

混凝土在拉應力作用下，並不像受壓時有裂縫密合的機率，而係直接在裂縫及骨材邊界裂縫處產生應力集中現象。裂縫很快即蔓延至鄰近之裂縫，一旦裂縫連接成線時，一分而二的破壞即刻發生。其破壞模式如圖 2-12 所示，相當單純的只有「斷裂」一種。[8]

第三章、程式分析與驗證方法

3.1 程式介紹

本研究中所採用的分析軟體為由荷蘭 TNO Building and Construction Research 公司所研發之有限元素分析軟體—DIANA (Displacement method ANalyzer)。此軟體自 1972 年開始使用，至今已發展到 8.2 版。不同於其他分析軟體地方是，DIANA 是專為土木工程而研發的，所以它在混凝土(Concrete)和土壤(Soil)的模擬方面都遠比其他軟體來得優秀。



標準版 DIANA 能夠分析的問題有很多，包括混凝土裂縫 (Concrete Cracking)、開挖 (Excavations)、隧道 (Tunneling)、混凝土冷卻 (Cooling of Concrete)、塑性分析 (Engineering Plastic)、地下水分析 (Groundwater Analysis)、熱傳導 (Heat Conduction)、穩定性分析 (Stability Analysis)、挫曲 (Buckling)、地震分析 (Earthquake Analysis) 以及次結構分析 (Substructure) 等。

Diana 提供了十種分析之種類(Analysis Type)、11 種材料模型 (Material Models) 與近 200 種之結構與流體元素種類(Element

Library)以供使用，其詳細資料如表(3-1)、表(3-2)、表(3-3)所示。

另外，Diana 提供 3 種求解的方式(Solution Procedure)：

(1) 解聯立方程式(Solve System of Equations)有兩種方法：

(1) Direct Gauß Decomposition method

(2) Iteration Method

(2) 特徵值分析 (Eigenvalue Analysis)

(3) 次結構分析 (Structuring Analysis)

3.2 使用元素說明

在 DIANA 這套分析中，立體元素(Solid Element)是一種用於普通狀況的元素，但是呢，由於它在分析時會產生大量的求解方程式，所以通常在其它元素不適用、亦或是須要較精準的分析結果的情形下才會被考慮使用，立體元素所具有的特點如：其應力狀況是三維的；受力狀況可為任意方向。其主要用來分析如混凝土基礎(concrete foundations)、海洋平台(off-shore)、厚牆(thick walls)、樓版(floors)及土壤塊(soil masses)此類的結構物。

座標軸方面，元素的三個座標軸 x ， y 和 z 內定為平行於世界座標系的 X ， Y 及 Z ，因使用者不用特地輸入資料來進行設定的工作。

對於立體元素節點來說最主要的變數為分別為局部座標系

(location coordinate)上 xyz 三個方向的位移 u_x 、 u_y 及 u_z ：

$$u_e = \begin{Bmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \end{Bmatrix} \quad (3-2-1)$$

在一個大小為 dx, dy, dz 之極小的單元中，其變形為 du_x, du_y 和 du_z ，從這

些變形來導出以下的 Green-Lagrange 應變方程式：

$$\varepsilon = \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} \quad (3-2-2)$$

其中

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial u_x}{\partial x}, \quad \varepsilon_{yy} = \frac{\partial u_y}{\partial y}, \quad \varepsilon_{zz} = \frac{\partial u_z}{\partial z}$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x}, \quad \gamma_{yz} = \frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y}, \quad \gamma_{zx} = \frac{\partial u_z}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial z} \quad (3-2-3)$$

從基本的應力公式(3-2-3)中我們可以計算並且列出所有立體元

素的柯西應力(Cauchy Stress)值：

$$\sigma = \begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{xy} = \sigma_{yx} \\ \sigma_{yz} = \sigma_{zy} \\ \sigma_{zx} = \sigma_{xz} \end{Bmatrix} \quad (3-2-4)$$

3.3 分析模型的建立

在本節中我們將分析沉箱頂版在不同厚度下，受到來自上方柱子所傳遞之不同力量和彎矩時，沉箱頂版剖面的應力變化，並且會在下一個章節中與實務界的頂版設計方式作一比較。

3.3.1 假設條件

以 3D 來模擬沉箱頂版時，我們假設其為一均質(Homogeneous)及等向性(Isotropic)材料構成之混凝土圓版，內部不加入任何鋼筋，純粹以混凝土來承受外力，受力狀況皆在線彈性範圍內，並且不考慮裂縫之產生。



3.3.2 幾何模型

原本我們所建立的沉箱頂版模型應該如(圖 3-1a)所示為固定半徑 R_s ，厚度 H 的純混凝土圓形版，上方為一長 L 、半徑 R_c 之圓柱，底部混凝土版外緣自 R_b 至 R_s 之圓環區域用滾支承固定。但是由於我們在意的沉箱頂版的受力行為，若把上部份的柱也分析進去的話，只會增加系統的負擔，所需用的時間也會大幅增加，不符合經濟效益。所以，我們將柱子的部份去掉，改以將柱子在沉箱頂版裡的部份的 E 值放大來模擬不同長度之柱子 I 值所造成的影響，如(圖 3-1b)所示。

3.3.3 材料性質

在混凝土性質部分，混凝土強度 $f'_c=210\text{kgf/cm}^2$ ，楊式係數 (Young's Modulus) $E=2\times 10^7\text{kN/m}$ ，包松比(Poisson Ratio) $\nu=0.2$ ，自重不計（由於自重和柱重相較之下可忽略不計）。

3.3.4 受力形式

之前提到說沈箱頂版之載重型態應有兩種考慮模式，第一種為橋墩混凝土澆灌後尚未凝固以前，以橋墩軀體重量作用於簡支承之頂版加以考慮。第二種為竣工之後，考慮蓋版與橋墩軀體為整體結構，而蓋版為固定於墩體之懸臂版，受沈箱壁支承處之外力作用。在本研究中考慮第二種種狀況，由於我們想把柱子在頂版上方的部份和頂版內的部份視為一體，因此假設柱子所傳遞之垂直載重 P 與彎矩 M 由頂版上方圓柱半徑 R_c 的圓週均勻承受，並且力量由此傳遞至周圍的沈箱頂版，如圖(3-2)所示。

3.3.5 分析參數剖析

在這個分析中我們最主要把頂版分成 4 種厚度， $H=1.5\text{m}$ 、 2.0m 、 2.5m 及 3.0m ，並以此為主軸討論：

1、頂版厚度(H)與圓柱長度(L)的關係：

由於我們想把頂版上方的柱子去掉以減少計算量，但又不能忽略柱子的效應，又我們知道說柱子之勁度與其 EI 值有關係，所以在 I 值無法改變的情況下，我們只好以柱子在沉箱頂版內部份的楊氏係數 (E) 的改變來模擬不同長度柱子慣性矩 (I) 之變化，在此節中將圓柱半徑固定為 2.0m 、軸力 10000kN 及承受彎矩 $50000\text{kN}\cdot\text{m}$ ，針對 E 值增加為 1 倍、10 倍、20 倍、30 倍、40 倍、50 倍、60 倍及 70 倍之情況，並針對四種不同厚度進行探討。

2、頂版厚度(H)與圓柱所傳遞之彎矩(M)之間的關係：

橋樑上部結構傳入於沉箱頂版之彎矩與垂直力之比例常有所不同，為探討其比例不同所造成的影響，本節固定圓柱半徑為 2.0m ，楊氏係數 $E=70 \times E_1 = 1.4 \times 10^9 \text{kN}/\text{m}^2$ ，軸力 10000kN ，頂版所承受彎矩和軸力之比值為 0、0.5、1、2、3、5 及 10，同樣針對四種版厚來進行討論。

3、頂版厚度(H)與圓柱半徑(R)之間的關係：

由於柱半徑常會有所不同，本節將固定楊氏係數(即固定圓柱長度) $E=70E1=1.4 \times 10^9 \text{ kN/m}$ ，軸力 10000kN，承受彎矩 5000kN/m，探討柱子尺寸為 1m、1.25m、1.5m、1.75m 及 2m 等不同直徑時與不同版厚之變化。

詳細的參數設置如表(3-4)和表(3-5)所示。

3.3.6 使用元素

在此分析模型中，我們採用 DIANA 中之 CHX60 元素來進行分析(圖 3-3)，CHX60 為一 20 個節點之同參立體塊狀元素元素(isoparametric solid brick element)，它是基於二次內插以及高斯積分的方式來求解，其形狀函數如下：

角點(Corner nodes)

$$N_i = \frac{1}{8}(1 + \xi_0)(1 + \eta_0)(1 + \zeta_0)(\xi_0 + \eta_0 + \zeta_0 - 2)$$

中間點(Mid-side nodes)

$$\xi_i = 0 \quad \eta_i = \pm 1 \quad \zeta_i = \pm 1$$

$$N_i = \frac{1}{4}(1 - \xi^2)(1 + \eta_0)(1 + \zeta_0)$$

3.3.7 收斂性分析

在進行分析之前，應先對模型之元素大小(Element Size)進行收斂性的探討，以確保結果之正確性。本節中，我們把沉箱頂版模型中由中心算起圓柱半徑內的區域稱之為 Body1，圓柱半徑外到支承的區域我們稱之為 Body2，支承到頂版外緣的區域我們稱為 Body3，分成這三個區域來進行切割的動作，並藉著改變圓柱的半徑大小及厚度來討論切割的元素大小。

由圖(3-4a)和圖(3-4b)我們可以知道，這三個區域的大小分佈會受到圓柱半徑尺寸(X, Y 方向)的影響，而厚度的變化(Z 方向)對三者的影響是一樣的，為了使這三個區域有較均勻的元素切割大小，我們根據 Body1、Body2、Body3 在 X, Y 方向的大小比例來決定不同的元素切割方式，並施加 Z 方向之垂直均佈力 P 在 Body1 上，見圖(3-4b)。切割元素的方式為 $D1 \times D2 \times D3$ ，D1 代表沿半徑方向所切割的份數，D2 為沿圓周方向所切割的份數，D3 為沿厚度方向所切割的份數，切割後的情況如圖(3-5)所示。藉此我們來探討其對應力反應之收斂性，分割尺寸如表(3-6)所示，圖(3-6a)~圖(3-6e)則為收斂性分析的結果。經由這個結果可以知道每一條曲線在後半段幾乎已呈水平狀態沒有變化，因此我們取最後水平階段的第一個點的切割方式來做分析，本文選用之切割方式如表(3-7)所示。

3.4 沉箱頂版在實務界的設計方法

由於沉箱頂版的尺寸及外型有分很多種類，其受力之後的行為也非常複雜，我們很難找到一個較為精準的設計方式，只能加以簡化計算之。於是，在工程實務上大多以懸臂梁來模擬沉箱頂板的受力狀況。本文中，我們以圓形的頂版及圓柱來作例子，大致上的情況是將中間圓柱的外緣當做固定端，取 1m 寬、頂版厚度深，向外延伸至外圍支承處之懸臂梁，以支承所受到的應力來當做懸臂梁所受的外力，藉此來分析固定端處斷面的應力分佈狀況。

但是，需注意到一點，由於沉箱頂版的厚度至少都在 1m 以上，所以，大部份的情況下我們皆需以深梁來考慮之，而根據 2.3.1 節所說的，深梁撓曲應力方面仍可以一般的工程梁來進行設計。關於頂版的設計略述如下：

如圖 3-7a 及 3-7b 所示，中央為半徑 R_1 的圓柱部分，底部外環由半徑 $R_2 \sim R_3$ 間為支承的部分，中央的柱子會傳遞沉箱頂版一垂直力 F 和彎矩 M ，在設計時，從半徑 R_1 的部分(a 點)到半徑 R_3 的部份(c 點)視為一個寬 1m，長 $(R_3 - R_1)$ ，深 H 之懸臂梁，a 點處為固定端，其固定端的彎矩由垂直軸向力 F 和彎矩 M 所造成的影響疊加而成，其狀況分述如下：

(1) 由垂直軸向力 F 造成的部份

將 F 力由視為由面積 A 之外環均勻承受，其上的均佈應力為

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (3-4-1)$$

其中，

$$A = \text{支承處之環面積} = \pi(R_3^2 - R_2^2)$$

(2) 由彎矩 M 造成的部分

將彎矩 M 視為全由外環承受，其上的應力為

$$\sigma = \frac{Mc}{I} \quad (3-4-2)$$

其中，

c 為自頂版中心(O 點)至圓環上之點的距離

$$I \text{ 為圓環的慣性矩} = \frac{1}{4}\pi(R_3^4 - R_2^4)$$

將式(3-4-1)和式(3-4-2)疊加起來可以得到 b 點和 c 點的應力 σ_2 和 σ_1

$$\sigma_1 = \frac{P}{A} + \frac{Mc_1}{I}, \quad c_1 = R_3 - R_1 \quad (3-4-3)$$

$$\sigma_2 = \frac{P}{A} + \frac{Mc_2}{I}, \quad c_2 = R_2 - R_1 \quad (3-4-4)$$

如圖 3-7c 所示。由此可計算出固定端的彎矩為

$$M_{design} = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_2) \cdot (R_3 - R_2) \cdot 1 \cdot x \quad (3-4-5)$$

其中， x 為由分佈應力之合力中心到懸臂梁固定端 a 點的距離，由此我們可以得到懸臂梁固定端處斷面的由撓曲所產生之應力變化曲線，並藉以進行設計之工作。

在剪應力的設計方面，如(2.3.1)節所述，由於大的剪應力使斷面發生明顯的翹曲，彎曲前斷面為平面在彎曲後仍保持為平面這種常用的假說對深梁而言並不適用。因此，計算斷面的性質和應力的常用方法不再適用。Timoshenko 梁理論為一種以很簡單的方法來考慮剪切效應的理論，較適合應用於深梁上。在其梁理論中，假設斷面裡各點的剪應力值相等，其值為

$$\sigma_{xz} = \frac{V_z}{A}$$



(3-4-6)

第四章 結果與分析

為了探討沉箱頂版內的力學行為，由分析的結果中找出最大應力斷面的應力分佈圖是必需的，如此才能決定混凝土受力的狀況。由於分析時假設沉箱頂版只有承受 Z 方向的垂直載重和 Y 方向的彎矩，所以最大應力斷面在 X-X 剖面之圓柱外面邊緣處，因此我們從這裡取出一組元素來做討論，如圖(4-1)所示，這組元素在各種情況下的應力分佈如圖(4-2)至圖(4-49)所示。並且由於我們將配合工程界的設計方式來討論各個參數間之影響，所以亦將設計時之應力分佈曲線(簡稱設計曲線)合併於上述之分析應力分佈圖中，以探討每一個案例之可行性。

我們所建置的模型，其厚度為 $H=1.5、2.0、2.5$ 及 3.0 ，相對應之跨深比 (l_n/d) 為 $3.6、2.7、2.16$ 及 1.8 皆小於 5 ，適合用深梁的設計方式來做考量。又從 2.3.1 節的討論得知，深梁內部之撓曲應力可以普通梁之設計方法為之；在剪應力方面，由於分佈情形十分複雜，所以我們僅以 Timoshenko 梁來做一個趨勢的探討，即假設斷面剪應力成均佈狀態，其值為斷面設計剪力除上梁斷面面積，如(3-4-6)式所示。

4.1 楊氏係數變化的影響

之前我們提過，改變楊氏係數 E 值的大小是為了要模擬柱子長度所造成的 I 值的影響，換句話說 E 值越大表示柱子的長度也越大。

由圖(4-2)~圖(4-17)的應力分佈曲線我們可以知道，同一個厚度下， E 值越大，斷面中同一個深度的點，其正應力之分析值會越來越接近設計值。剪應力的分佈狀態方面，在 E 值小的時候，斷面中間的區域符合 Timoshenko 梁所假設之平均斷面剪應力狀態，即式(3-4-6)所計算出來的結果，隨著厚度越大，此一現象會越顯著。

為了更明白顯示出不同 E 值間應力曲線變化的趨勢，我們將同一厚度不同 E 值的分析應力曲線放在一起，並將厚度調整為 $-1 \sim 1$ ，繪於圖(4-50)~圖(4-53)。由圖(4-50)及圖(4-51)可知，在 E 值小的時候，沉箱頂部壓力區有很大的應力集中現象，隨著 E 值的放大(即柱子增長)此現象會慢慢減少，底部拉力區的應力集中增加。所以，當 E 值越大時越要考慮到底部拉力區開裂的問題，但是在當 E 值放大至 20 倍後，曲線變化已不再那麼明顯，漸漸有穩定下來的趨勢。

關於剪應力方面，由圖(4-52)與圖(4-53)可知， E 值小的時候，沉箱頂部會發生極高的剪應力集中現象，導致底部剪應力很小。而隨著 E 值的放大，這種剪應力集中會慢慢降低，曲線會漸漸趨向較為均佈的狀況，伴隨而來的是整個斷面的剪應力增大的問題。

而在不同的厚度間，由於尺寸大小不同以致無法進行比較，所以我們將相同 E 值不同厚度之分析應力值，除上相對應設計曲線之最大值，並且將各個不同的厚度調整成-1~1 來進行正規化。如此一來，即可在相同的條件之下比較其曲線的趨勢和走向，調整後的曲線如圖(4-54)~圖(4-57)所示。

由圖(4-54)及圖(4-55)可看出，E 值較低的時候，應力分佈曲線在不同厚度間：斷面中間區域的曲線斜率是差不多的；頂部壓力區應力集中現象隨厚度增加而明顯增大，底部拉力區相較之下增大的幅度就沒那麼明顯。E 值較高的時候，隨著厚度的增大，斷面中間區域的曲線斜率會變陡，應力變化越小；在應力集中現象方面則是與 E 值小的時候完全相反，底部拉應處之應力集中隨厚度放大而大幅增加，頂部壓應力處反而沒什麼改變。

再根據圖(4-56)及圖(4-57)，由 E 值小的時候，斷面頂部曲線斜率隨厚度增加而變得緩和，可知剪應力集中現象也會隨厚度增加而提高。在 E 值大的時候，若不考慮斷面頂部的應力集中，斷面內最大剪應力發生處會隨著厚度的增加而由斷面中央往下偏移，由圖(4-17)可知其值甚至會與最大設計正應力值差不多。

另外，由圖(4-5)及圖(4-17)比較可知，在 E 值很大的情況下，厚度小的最大分析拉應力和相對應之最大設計拉應力其比值約為

1.32，厚度大的約為 2.44，明顯的就比厚度小的時候大出很多，因此，縱使我們知道厚度越大會使頂版內部應力越小，在設計時也不能忽略這個問題，以免低估了沉箱頂版所需要的強度。

4.2 承受彎矩大小的影響

由圖(4-18)~圖(4-33)可知，由於我們假設混凝土為一均質等向性材料，並且只討論線彈性下的情況，所以，理所當然同一厚度時，隨著承受彎矩 M 的增加，斷面內應力也會以一定的比例成長，如圖(4-58)~圖(4-61)所示。而在不同厚度間，如同上面所述，我們用設計應力之最大值來將其正規化，比較圖(4-62)及圖(4-63)可知，當彎矩大小改變時，不同厚度間斷面之應力分佈也一樣沒有明顯的變化，純粹只是數字的放大而已。

4.3 圓柱半徑大小的影響

我們都知道當一個結構物在承受同樣的載重下，其受力面積越大，斷面內的應力也會隨之變小，因此在本節中，我們不詳細計算其數值的大小，而僅以改變受力面積的方式來討論最大應力斷面應力分佈之趨勢。

由圖(4-34)至圖(4-49)我們可發現，在同一厚度時，圓柱半徑 R

越小的話，斷面中間的正應力分佈越接近設計時直線的狀況。並且在厚度小的時候，底部最大分析拉應力與最大設計拉應力的比值會隨著圓柱半徑 R 的放大而減少。但是，這種現象會隨著斷面深度的增加而漸漸消失，其比值會趨近一個定值。

在剪應力方面，圓柱半徑 R 越小，斷面剪應力的分佈狀態越接近直線，即接近均佈狀況。之前說過厚度小的時候，最大剪應力最大值發生在斷面中心附近，並且隨著厚度的增大，斷面剪應力最大值會漸漸的往下移，這種現象在圓柱半徑大的時候會更加顯著。

再由圖(4-34)~圖(4-37)可看出，最大剪應力會隨半徑 R 的增大而減小的幅度，從 $R=1.0$ 時其值為最大設計剪應力的 3 倍減少到 $R=2.0$ 時的 2 倍，並且這個倍數關係不會因厚度的改變而受到影響，如此一來我們便可用內插的方式來計算出不同圓柱半徑時，其最大應力斷面之最大剪應力為何。

為了更明白顯示出在不同圓柱半徑時，最大應力斷面應力分佈的趨勢，我們以將各個撓曲正應力曲線除以一个相對應之 x 值的方式來正規化半徑 R 值的影響，這個地方的 x 即當初以懸臂梁模擬沉箱頂版來計算設計應力時，載重合力中心至固定端的距離，得到的結果如圖(4-66)及圖(4-67)所示，並且由此可知，同一厚度時，圓柱半徑越小，撓曲應力曲線斜率越小，代表應力集中越大。

4.4 頂版受力後可能發生的情況

根據上面的討論我們可以發現，頂版的頂部跟底部都會有應力集中的現象，頂部為壓應力集中，底部為拉應力集中。由於混凝土抗拉強度不高，所以，很有可能會在底部受拉開裂。再加上，沉箱頂版的行為很類似深梁，所以很有可能會發生壓桿和拉桿的狀況，即載重與支承間形成一斜壓桿，如圖(4-68)所示。但是，由於我們分析時並未把鋼筋加進去，所以無拉桿的現象產生，此為與現實狀況不合之處。



第五章、結論與建議

由於本研究是依據我們所假設之載重狀況及外觀尺寸來做數值分析的模擬，許多參數的變化皆經過簡化處理，與真實現況難免會有些出入，因此，僅能對於各個案例做趨勢的探討和一些簡單量化的成果。以下將對於本研究所得到的成果做出一些結論，希望能對於後繼研究者提供有用之意見。



5.1、結論

- 1、沉箱頂版上方柱子長度的增長，會使正應力集中現象由單純壓力區承受轉而變成由壓力區及拉力區較為平均的分攤。頂部剪應力集中的現象則會變成沿斷面均佈的狀況。
- 2、沉箱頂版厚度的增加會使底部拉力區正應力集中現象提高，並且使斷面最大剪應力發生的位置往下偏移
- 3、彎矩的增加並不會對應力分佈情形造成很大的影響，純粹只是數字的增大而已。
- 4、不同柱子半徑中，最大應力斷面之最大剪應力，其值與 Timoshenko 梁所假設的平均斷面剪應力成某些倍數關係，並且這倍數不受厚度的

影響，僅和柱子半徑有關

5、由於混凝土抗拉強度不高，所以很有可能會在由於底部應力集中的現象而受拉開裂。

5.2、建議

1、由於實際上沉箱頂版底部會因應力集中現象而開裂，拉力轉而由鋼筋完全承受，因此，用壓桿及拉桿(strut-and-tie)的模式來探討可說是非常恰當，所以建議在分析中加入鋼筋和裂縫因素，如此一來，沉箱頂版的行為跟實際上的情況應該就會比較接近，得到的結果也會比較合理。

2、在這個研究中我們把頂版外環支承處設定為鉸接的狀態，但是實際上的情況應該是介於鉸接跟固接之間較為合理，因此建議可再進行固接支承的分析來做一個比較。

參 考 文 獻

- 1、ACI-ASCE Committee 426, “The Shear Strength of Reinforced Concrete Members : Chapter 1 to 4,” ASCE, Proceeding, V. 99, ST6, June, 1973, pp. 1091-1187.
- 2、ACI Committee 318, “Building Code Requirement for Reinforced Concrete,” American Concrete Institute, 1995.
- 3、Arthur H. Nilson, “Design of Concrete Structures”, McGraw-Hill, Inc.
- 4、Frits C. de Witte and Wijtze Pieter Kikstra, “DIANA User’s Manul” , TNO Building and Construction Research
- 5、Kong, F. K., Robins, P. J. and Sharp, G. R., .The Design of Reinforced Concrete Deep Beams in Current Practice,. The Structural Engineering(London), V. 53, No. 4, Apr. 1975, pp. 173-180.
- 6、Nilson, A. H., “Design of Concrete Structure,” McGraw-Hill,1997.
- 7、Roy R. Craig, JR , “Mechanics of Materials”
- 8、Smith, K. N. and Vantsiotis, A. S., “Shear Strength of DeepBeams”, ACI Journal, Proceedings V. 79, No. 3, May-June, 1982,pp.201-213.
- 9、中國土木工程學會 , “混凝土工程設計規範之應用” , 科技圖書有限公司
- 10、內政部營建署 , “建築物基礎構造設計規範” , 內政部營建署

- 11、王權銘等人，“鋼筋混凝土設計”，東華出版社
- 12、台灣省政府住宅及都市發展局，“施工手冊第二篇 道路與橋樑工程”，臺灣省政府住宅及都市發展局
- 13、張嘉德，“漫談沉箱設計法在日本工程界之變遷及現在通用之設計方法”，台灣公路工程月刊專輯之橋梁工程類
- 14、朱紹鎔，“基礎工程分析與設計”，東華出版社
- 15、徐耀賜，“橋樑結構之基本功能”，全威書局
- 16、徐耀賜，“樑結構”，全華科技圖書
- 17、凌合等人，“鋼筋混凝土設計”，高立圖書有限公司
- 18 陳文雄，“結構混凝土-力學行為與設計”，新文京開發出版社
- 19、黃兆龍，“混凝土性質與行為”，詹氏書局
- 20、蔡榮聰，陳振川，“超高性能混凝土深梁之剪力行為”，台灣大學土木工程學研究所碩士論文，民國 91 年 8 月
- 21、蕭仲光、沈孝邦，“鋼筋混凝土結構設計”，滄海書局
- 22、蕭振士，“建築技術規則”，博遠書局

表 3-1、DIANA 提供之分析種類表

Analysis Type	
1. Linear Static Analysis	6. Coupled Flow-Stress Analysis
2. Nonlinear Analysis	7. Phase Analysis
3. Dynamic Analysis	8. Parameter Estimation
4. Euler Stability Analysis	9. Lattice Analysis
5. Potential Flow Analysis	10. Pipeline Analysis

表 3-2、DIANA 提供之材料模型表

Material Model	
1. Elastic	7. Soil Specials
2. Plasticity	8. Shrinkage Strains
3. Viscoplasticity	9. Hyperelasticity
4. Cracking	10. Interface Non-linearity
5. Viscoelasticity	11. User-supplied Material Model
6. Fraction	

表 3-3、DIANA 提供之元素種類表

Element Library	
1. Truss Element	8. Curved Shell Element
2. Beam Element	9. Solid Element
3. Plane Stress Element	10. Interface Element
4. Plane Strain Element	11. Spring Element
5. Axisymmetric Element	12. Point Mass Element
6. Plate Bending Element	13. Embedded Reinforcement Element
7. Flat Shell Element	14. Flow Element

表 3-4、分析模型參數表

第一類

H (m)	R (m)	E (kN/m ²)	M (kN-m)
1.5	2.00	2.00E+7	5.00E+03
2.0		2.00E+8	
2.5		4.00E+8	
3.0		6.00E+8	
		8.00E+8	
		1.00E+9	
		1.20E+9	
		1.40E+9	

第二類

H (m)	R (m)	E (kN/m ²)	M (kN-m)
1.5	2.00	1.40E+9	0.00E+00
2.0			5.00E+03
2.5			1.00E+04
3.0			2.00E+04
			3.00E+04
			5.00E+04
			1.00E+05

第三類

H (m)	R (m)	E (kN/m ²)	M (kN-m)
1.5	1.00	1.40E+9	5.00E+03
2.0	1.25		
2.5	1.50		
3.0	1.75		
	2.00		

表 3-5、詳細分析參數表

第一類、頂版厚度(H) vs. 楊式係數(E)

	H (m)	R (m)	E (kN/m ²)	M (kN-m)
C1-1-1	1.50	2.00	2.00E+07	5.00E+03
C1-1-2	1.50	2.00	2.00E+08	5.00E+03
C1-1-3	1.50	2.00	4.00E+08	5.00E+03
C1-1-4	1.50	2.00	6.00E+08	5.00E+03
C1-1-5	1.50	2.00	8.00E+08	5.00E+03
C1-1-6	1.50	2.00	1.00E+09	5.00E+03
C1-1-7	1.50	2.00	1.20E+09	5.00E+03
C1-1-8	1.50	2.00	1.40E+09	5.00E+03
C1-2-1	2.00	2.00	2.00E+07	5.00E+03
C1-2-2	2.00	2.00	2.00E+08	5.00E+03
C1-2-3	2.00	2.00	4.00E+08	5.00E+03
C1-2-4	2.00	2.00	6.00E+08	5.00E+03
C1-2-5	2.00	2.00	8.00E+08	5.00E+03
C1-2-6	2.00	2.00	1.00E+09	5.00E+03
C1-2-7	2.00	2.00	1.20E+09	5.00E+03
C1-2-8	2.00	2.00	1.40E+09	5.00E+03
C1-3-1	2.5	2.00	2.00E+07	5.00E+03
C1-3-2	2.5	2.00	2.00E+08	5.00E+03
C1-3-3	2.5	2.00	4.00E+08	5.00E+03
C1-3-4	2.5	2.00	6.00E+08	5.00E+03
C1-3-5	2.5	2.00	8.00E+08	5.00E+03
C1-3-6	2.5	2.00	1.00E+09	5.00E+03
C1-3-7	2.5	2.00	1.20E+09	5.00E+03
C1-3-8	2.5	2.00	1.40E+09	5.00E+03
C1-4-1	3.00	2.00	2.00E+07	5.00E+03
C1-4-2	3.00	2.00	2.00E+08	5.00E+03
C1-4-3	3.00	2.00	4.00E+08	5.00E+03
C1-4-4	3.00	2.00	6.00E+08	5.00E+03
C1-4-5	3.00	2.00	8.00E+08	5.00E+03
C1-4-6	3.00	2.00	1.00E+09	5.00E+03
C1-4-7	3.00	2.00	1.20E+09	5.00E+03
C1-4-8	3.00	2.00	1.40E+09	5.00E+03

第二類、頂版厚度(H) vs. 承受彎矩(M)

	H (m)	R (m)	E (kN/m ²)	M (kN-m)
C2-1-1	1.50	2.00	1.40E+09	0.00E+00
C2-1-2	1.50	2.00	1.40E+09	5.00E+03
C2-1-3	1.50	2.00	1.40E+09	1.00E+04
C2-1-4	1.50	2.00	1.40E+09	2.00E+04
C2-1-5	1.50	2.00	1.40E+09	3.00E+04
C2-1-6	1.50	2.00	1.40E+09	5.00E+04
C2-1-7	1.50	2.00	1.40E+09	1.00E+05
C2-2-1	2.00	2.00	1.40E+09	0.00E+00
C2-2-2	2.00	2.00	1.40E+09	5.00E+03
C2-2-3	2.00	2.00	1.40E+09	1.00E+04
C2-2-4	2.00	2.00	1.40E+09	2.00E+04
C2-2-5	2.00	2.00	1.40E+09	3.00E+04
C2-2-6	2.00	2.00	1.40E+09	5.00E+04
C2-2-7	2.00	2.00	1.40E+09	1.00E+05
C2-3-1	2.50	2.00	1.40E+09	0.00E+00
C2-3-2	2.50	2.00	1.40E+09	5.00E+03
C2-3-3	2.50	2.00	1.40E+09	1.00E+04
C2-3-4	2.50	2.00	1.40E+09	2.00E+04
C2-3-5	2.50	2.00	1.40E+09	3.00E+04
C2-3-6	2.50	2.00	1.40E+09	5.00E+04
C2-3-7	2.50	2.00	1.40E+09	1.00E+05
C2-4-1	3.00	2.00	1.40E+09	0.00E+00
C2-4-2	3.00	2.00	1.40E+09	5.00E+03
C2-4-3	3.00	2.00	1.40E+09	1.00E+04
C2-4-4	3.00	2.00	1.40E+09	2.00E+04
C2-4-5	3.00	2.00	1.40E+09	3.00E+04
C2-4-6	3.00	2.00	1.40E+09	5.00E+04
C2-4-7	3.00	2.00	1.40E+09	1.00E+05

第三類、頂版厚度(H) vs. 圓柱半徑(R)

	H (m)	R (m)	E (kN/m ²)	M (kN-m)
C3-1-1	1.50	1.00	1.40E+09	5.00E+03
C3-1-2	1.50	1.25	1.40E+09	5.00E+03
C3-1-3	1.50	1.50	1.40E+09	5.00E+03
C3-1-4	1.50	1.75	1.40E+09	5.00E+03
C3-1-5	1.50	2.00	1.40E+09	5.00E+03
C3-2-1	2.00	1.00	1.40E+09	5.00E+03
C3-2-2	2.00	1.25	1.40E+09	5.00E+03
C3-2-3	2.00	1.50	1.40E+09	5.00E+03
C3-2-4	2.00	1.75	1.40E+09	5.00E+03
C3-2-5	2.00	2.00	1.40E+09	5.00E+03
C3-3-1	2.50	1.00	1.40E+09	5.00E+03
C3-3-2	2.50	1.25	1.40E+09	5.00E+03
C3-3-3	2.50	1.50	1.40E+09	5.00E+03
C3-3-4	2.50	1.75	1.40E+09	5.00E+03
C3-3-5	2.50	2.00	1.40E+09	5.00E+03
C3-4-1	3.00	1.00	1.40E+09	5.00E+03
C3-4-2	3.00	1.25	1.40E+09	5.00E+03
C3-4-3	3.00	1.50	1.40E+09	5.00E+03
C3-4-4	3.00	1.75	1.40E+09	5.00E+03
C3-4-5	3.00	2.00	1.40E+09	5.00E+03

表 3-6、收斂性分析之尺寸分割表

圓柱半徑(m)	R=1.0	R=1.25	R=1.5	R=1.75	R=2.0
Case1	12x12x12 12x12x12 12x 6x12	12x12x12 12x12x12 12x 8x12	12x12x12 12x 6x12 12x 6x12	12x12x12 12x 4x12 12x 4x12	12x12x12 12x 4x12 12x 4x12
Cas2	16x16x16 16x16x16 16x 8x16	18x18x18 18x18x18 18x12x18	16x16x16 16x 8x16 16x 8x16	18x18x18 18x 6x18 18x 6x18	18x18x18 18x 6x18 18x 6x18
Case3	20x20x20 20x20x20 20x10x20	24x24x24 24x24x24 24x16x24	20x20x20 20x10x20 20x10x20	24x24x24 24x 8x24 24x 8x24	24x24x24 24x 8x24 24x 8x24
Case4	24x24x24 24x24x24 24x12x24	30x30x30 30x30x30 30x20x30	24x24x24 24x12x24 24x12x24	30x30x30 30x10x30 30x10x30	30x30x30 30x10x30 30x10x30
Case5	28x28x28 28x28x28 28x14x28	36x36x36 36x36x36 36x24x36	28x28x28 28x14x28 28x14x28	36x36x36 36x12x36 36x12x36	36x36x36 36x12x36 36x12x36
Case6	32x32x32 32x32x32 32x16x32	42x42x42 42x42x42 42x28x42	32x32x32 32x16x32 32x16x32	42x42x42 42x14x42 42x14x42	42x42x42 42x14x42 42x14x42
Case7	36x36x36 36x36x36 36x18x36	48x48x48 48x48x48 48x32x48	36x36x36 36x18x36 36x18x36	48x48x48 48x16x48 48x16x48	48x48x48 48x16x48 48x16x48
Case8	40x40x40 40x40x40 40x20x40		40x40x40 40x20x40 40x20x40	54x54x54 54x18x54 54x18x54	54x54x54 54x18x54 54x18x54
Case9			44x44x44 44x22x44 44x22x44		
Case10			48x48x48 48x24x48 48x24x48		

表 3-7、不同圓柱半徑之收斂性分析元素切割表

圓柱半徑 R(m)		1	1.25	1.5	1.75	2
元素切割方式	Body1	32x32x32	36x36x36	40x40x40	42x42x42	42x42x42
	Body2	32x32x32	36x36x36	40x20x40	42x14x42	42x14x42
	Body3	32x16x32	36x24x36	40x20x40	42x14x42	42x14x42
節點數目		121697	188353	168521	143452	143452
元素數目		28672	44712	40000	33957	33957



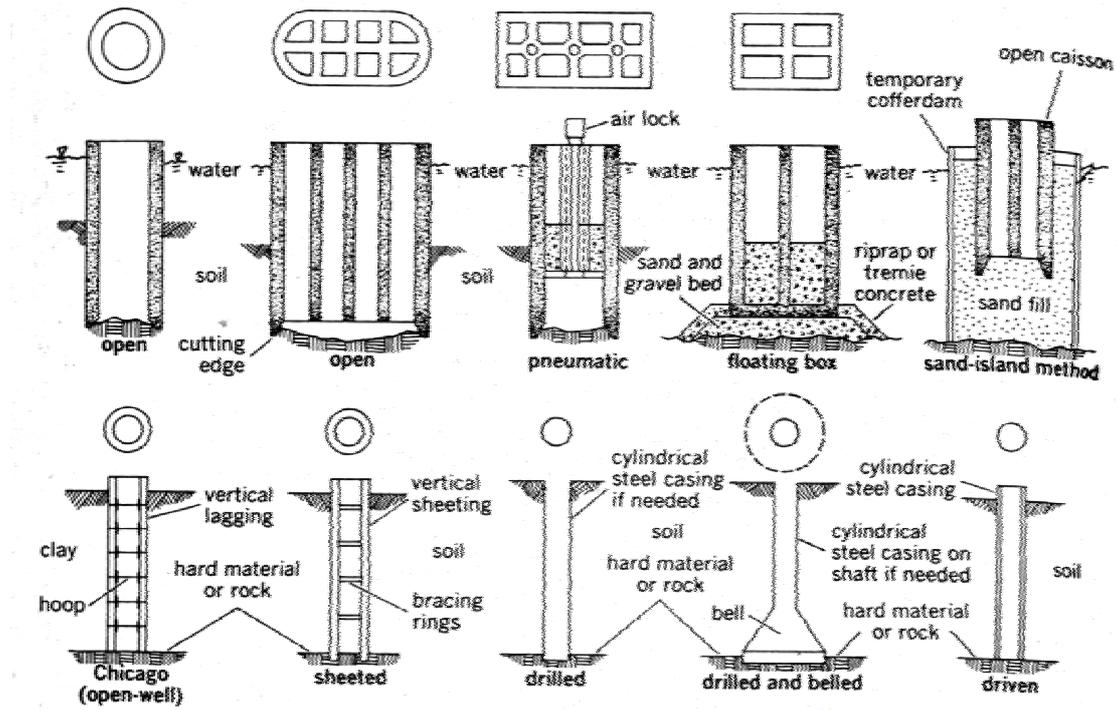


圖 2-1、沉箱依其施工方式之分類

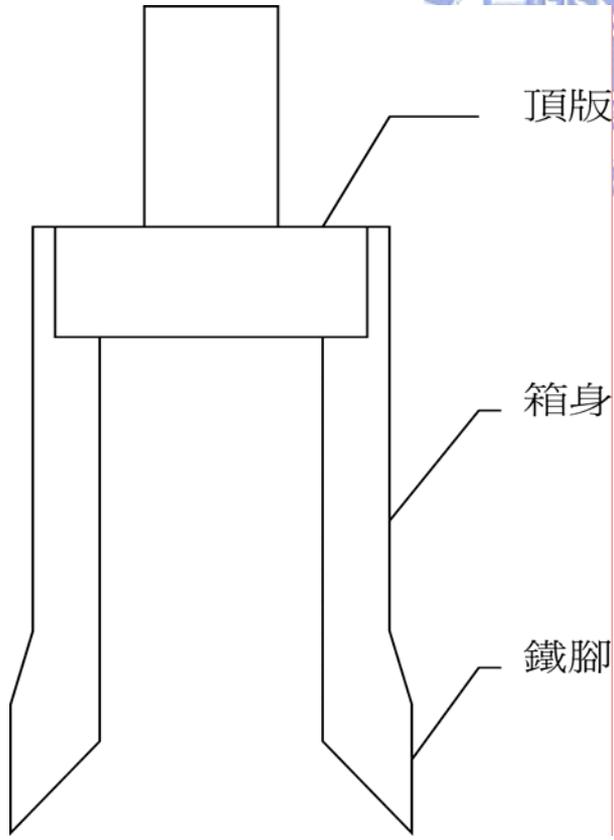


圖 2-2、沉箱之構造

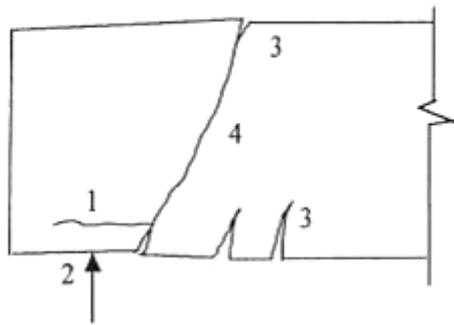


圖 2-3、繫拱破壞

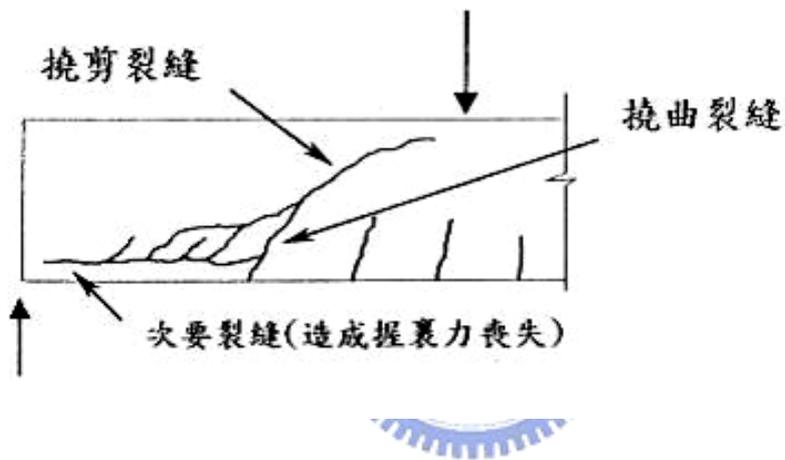


圖 2-4、剪張破壞

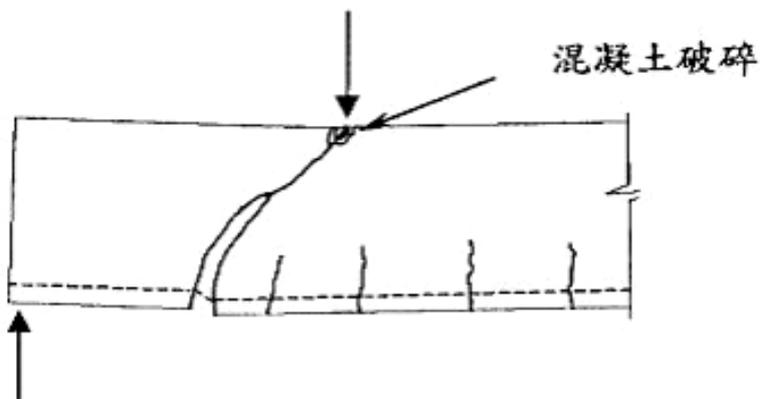


圖 2-5、剪壓破壞

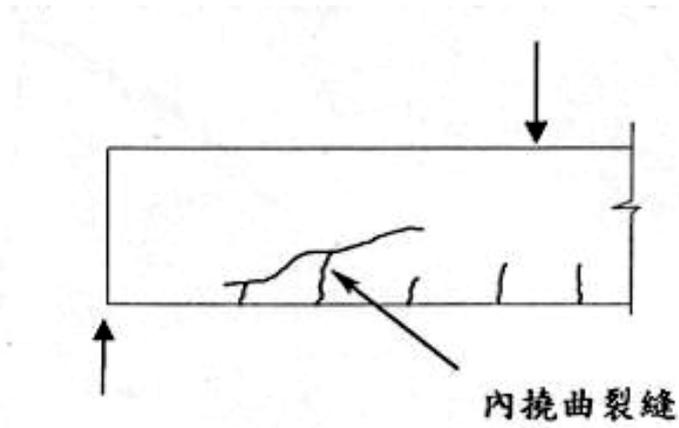


圖 2-6、撓剪破壞

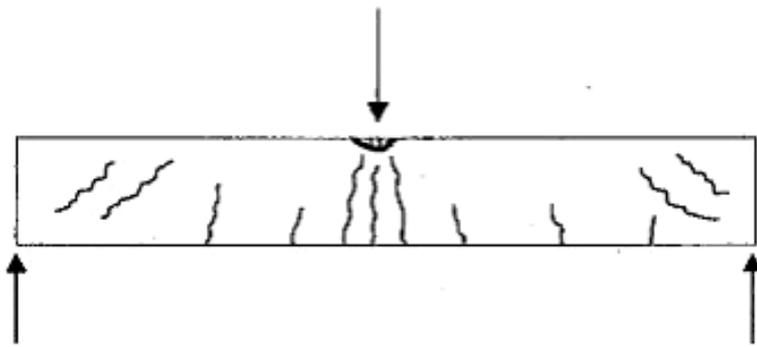


圖 2-7、撓曲破壞

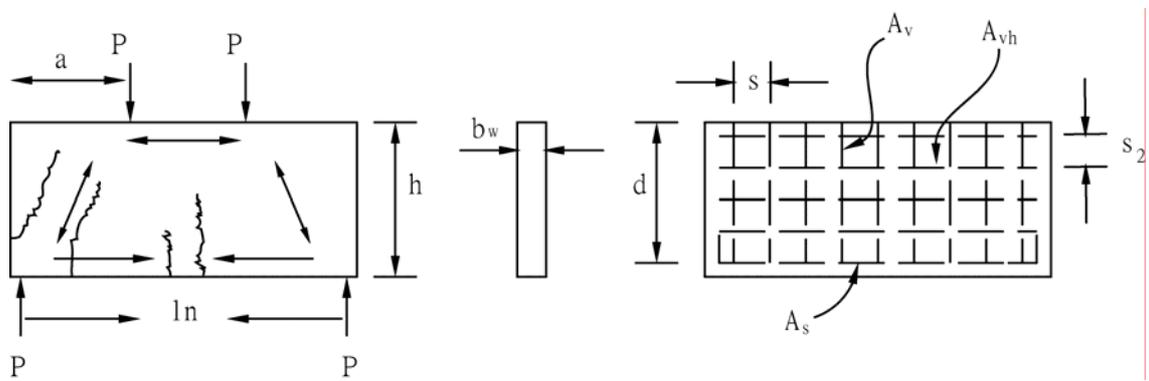


圖 2-8、受集中載重之深梁

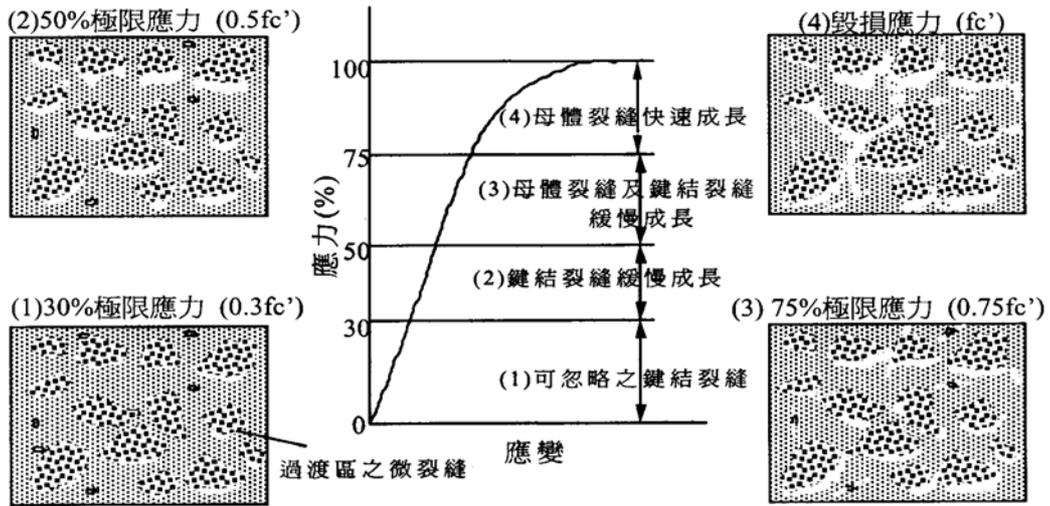


圖 2-9、單軸荷重下混凝土之應力—應變行為與微裂縫成長示意圖

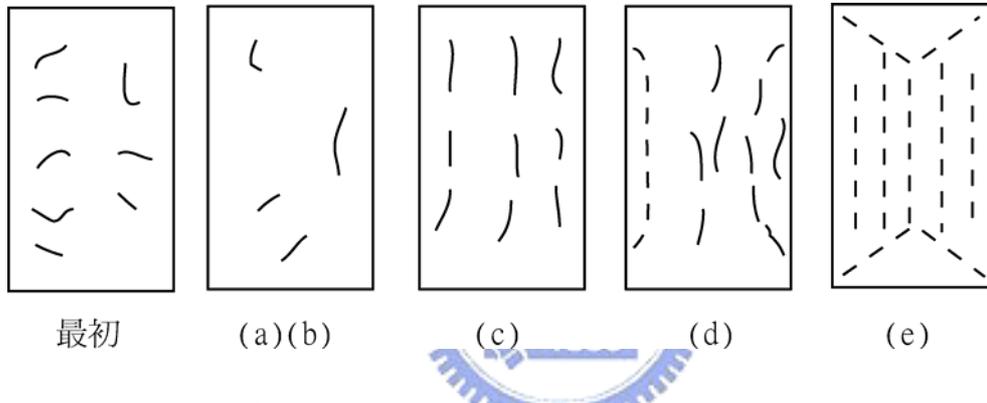


圖 2-10、應力作用下，各階段之裂縫變化示意圖

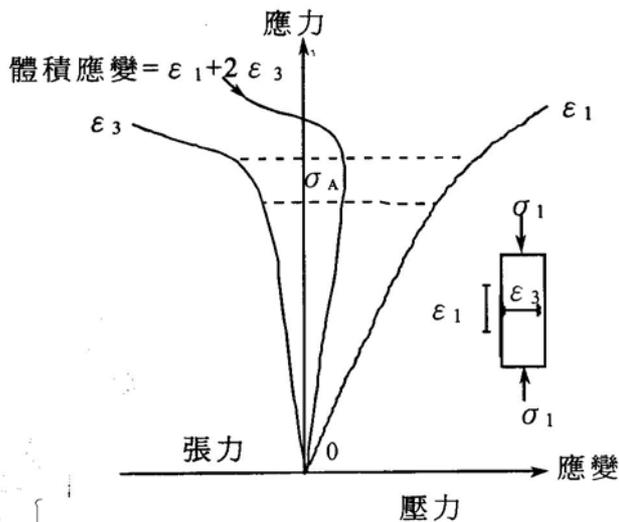


圖 2-11、軸向應力與應變及體積應變之關係

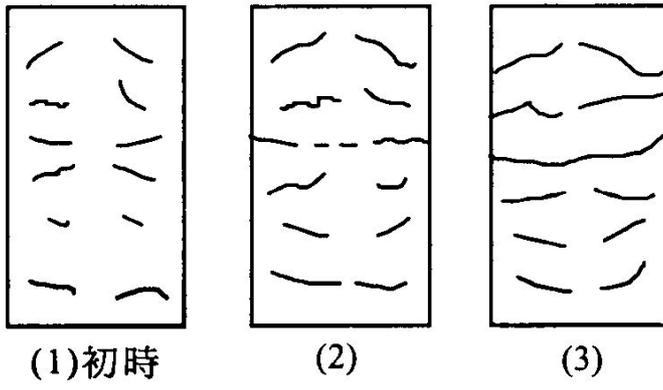


圖 2-12、混凝土受拉力作用下之破裂模式



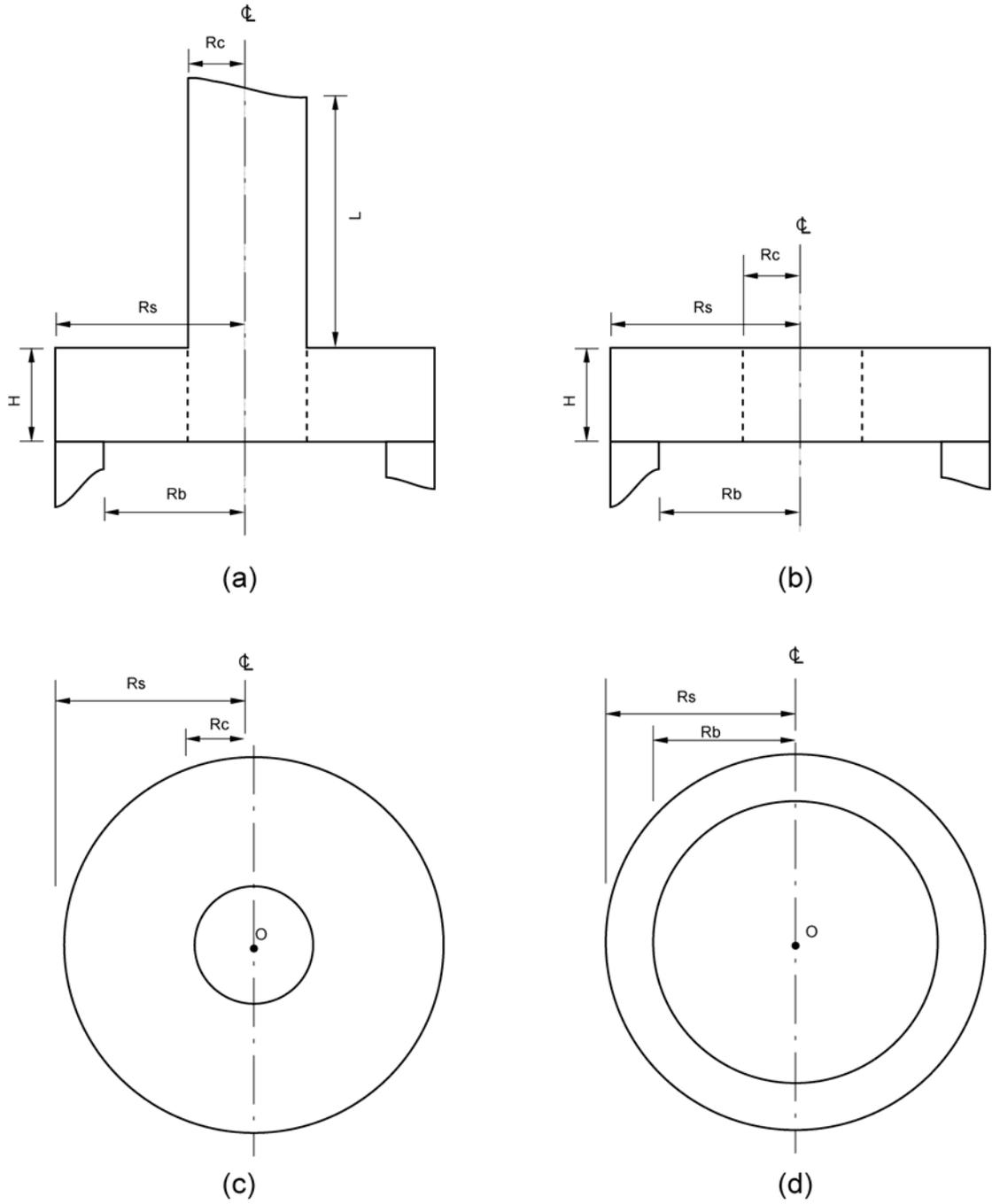


圖 3-1、沉箱頂版模型(a)立面圖(b)立面圖(簡化後)(c)頂視圖(d)底視圖

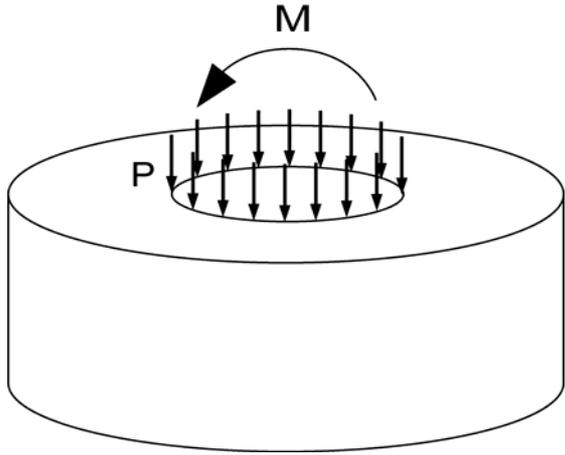


圖 3-2、分析模型之受力示意圖

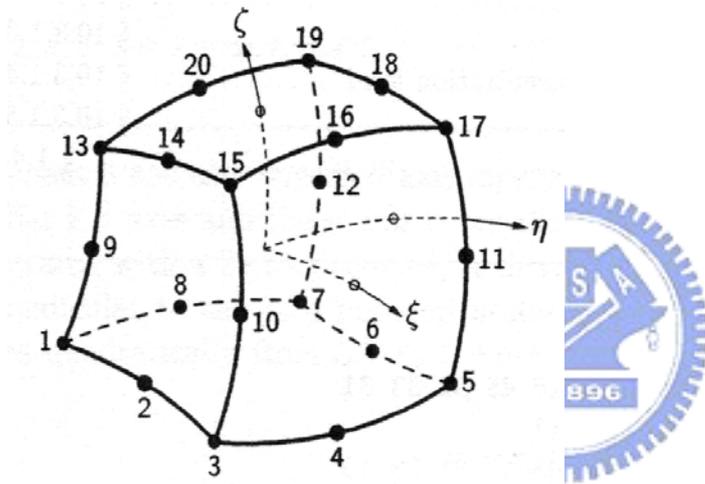


圖 3-3、Brick elements-CHX60

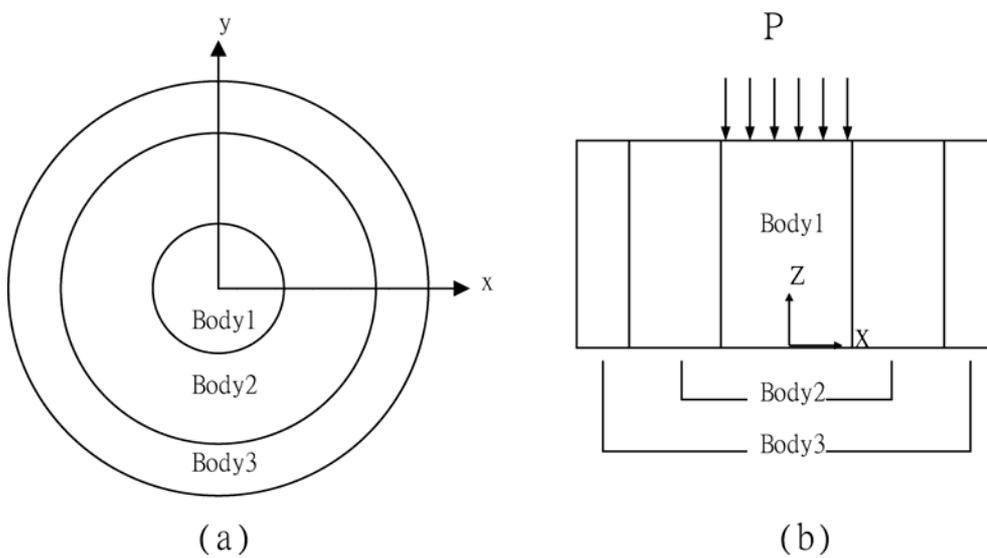


圖 3-4、模型切割區域分配圖

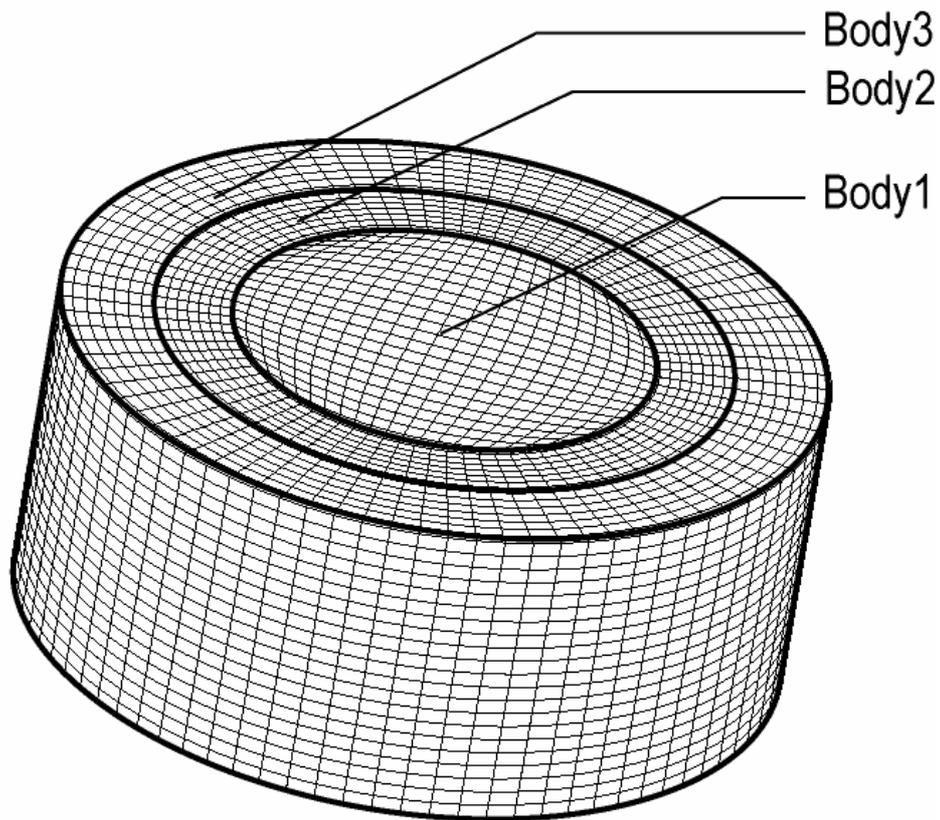


圖 3-5、模型之元素切割狀況

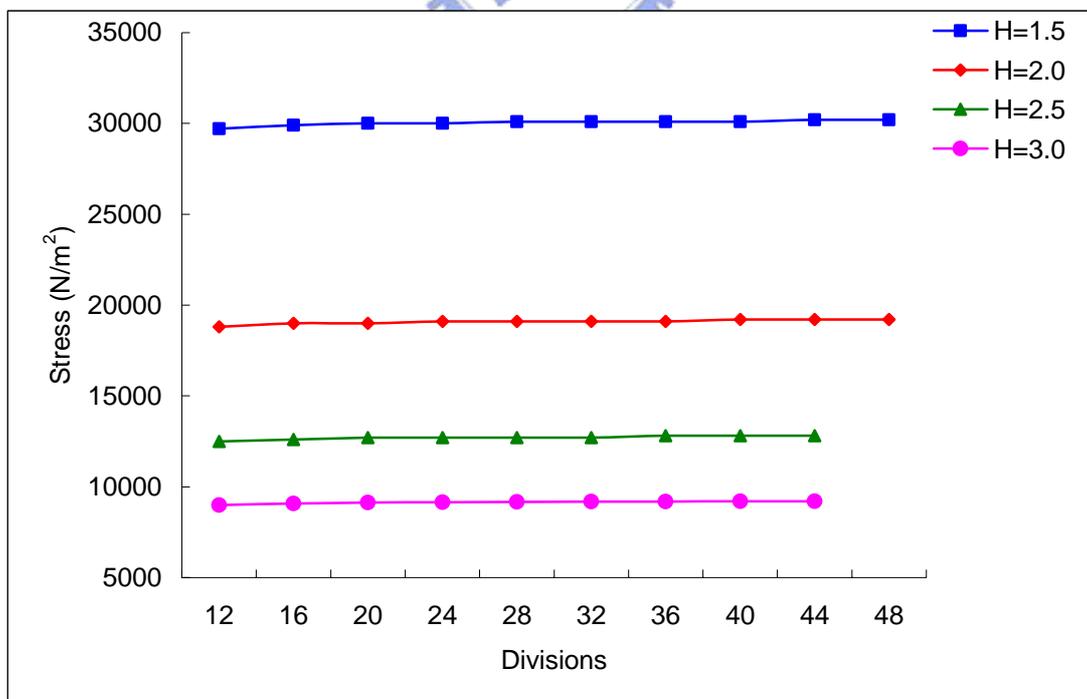


圖 3-6a、R=1.00 之收斂曲線

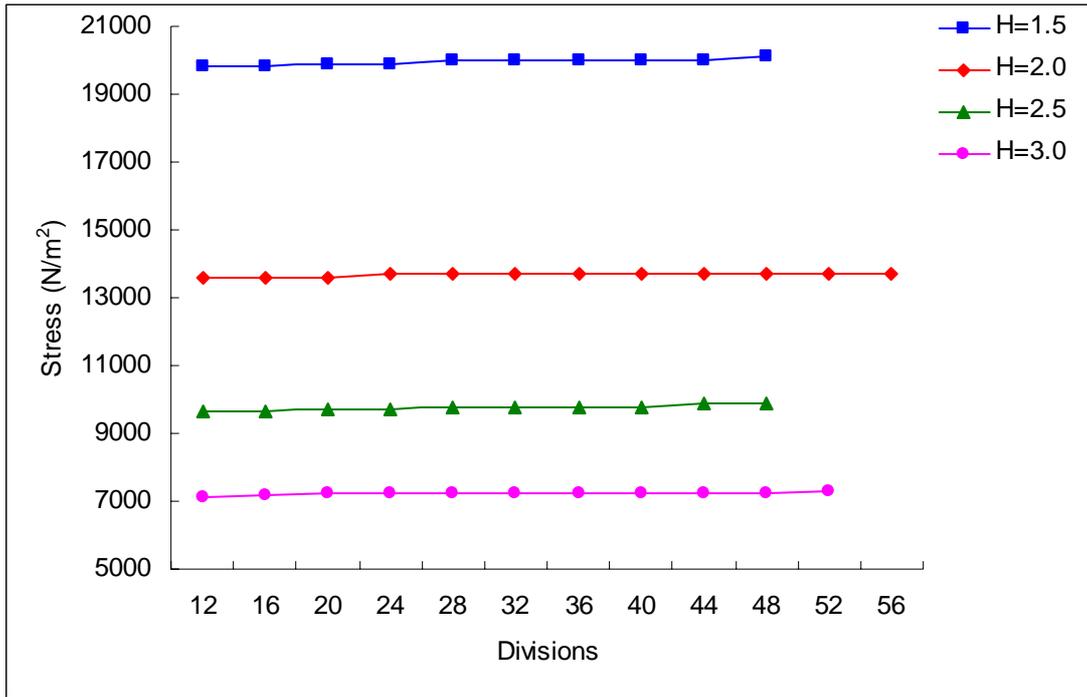


圖 3-6b、R=1.25 之收斂曲線

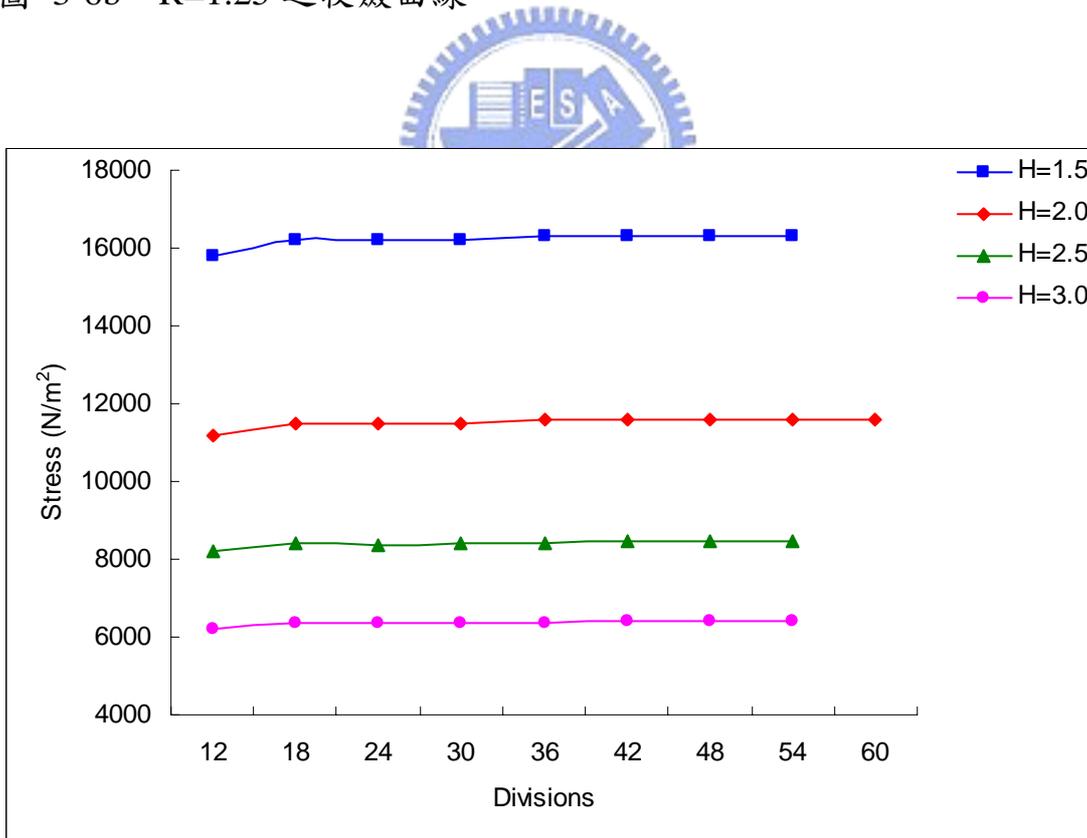


圖 3-6c、R=1.50 之收斂曲線

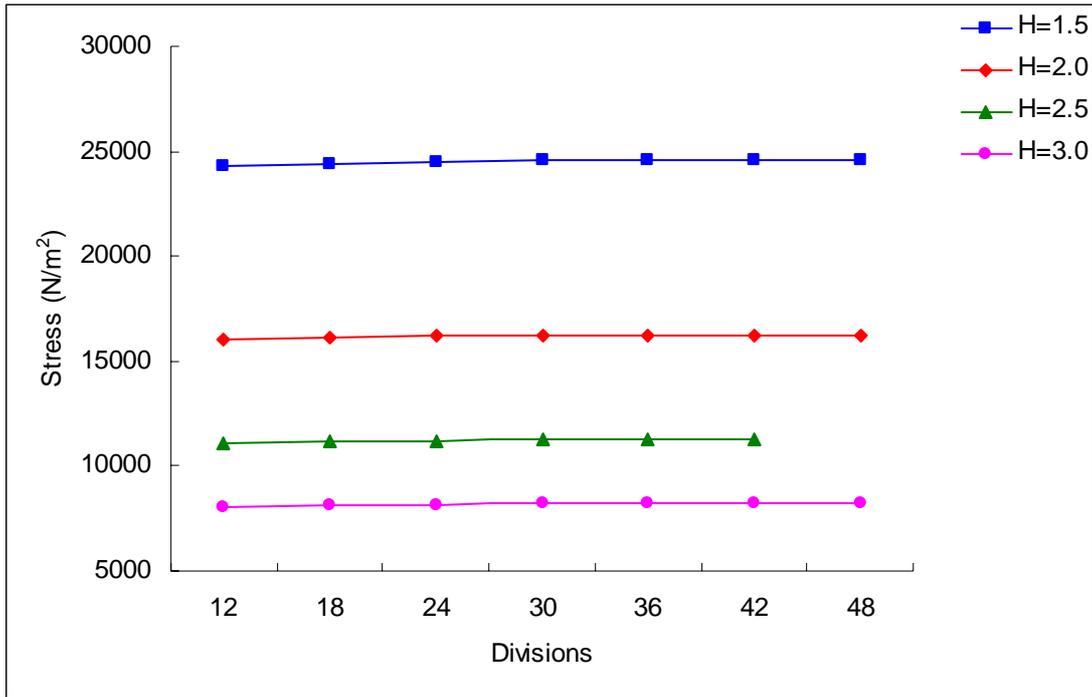


圖 3-6d、R=1.75 之收斂曲線

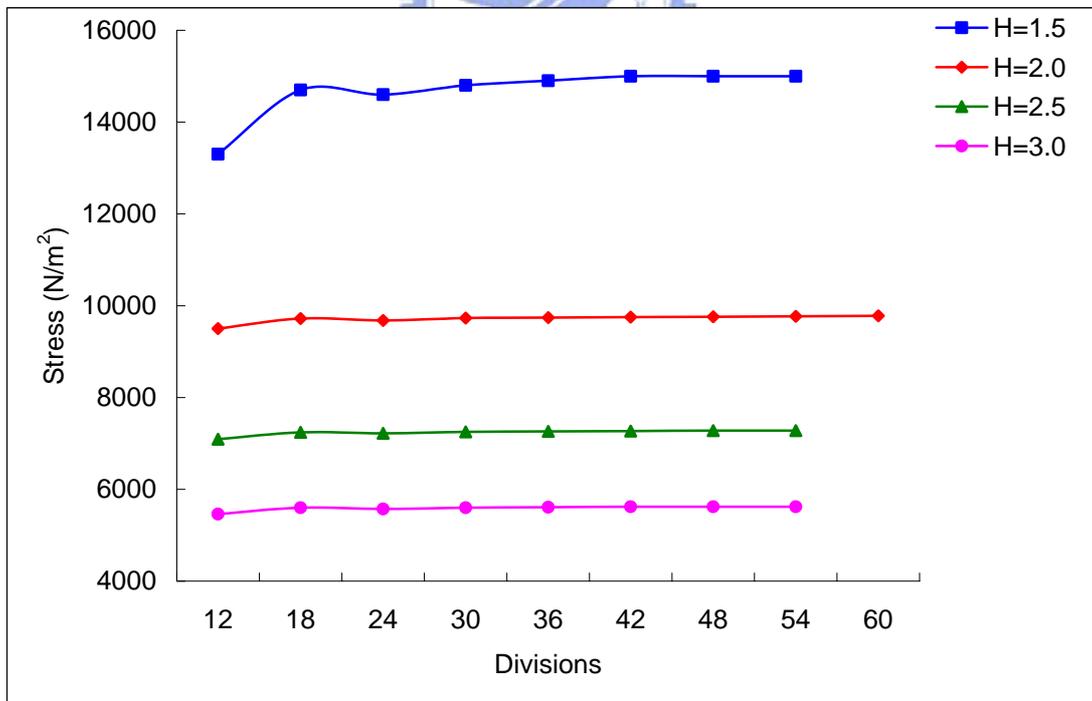


圖 3-6e、R=2.00 之收斂曲線

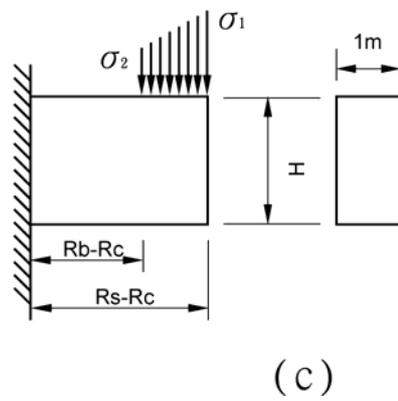
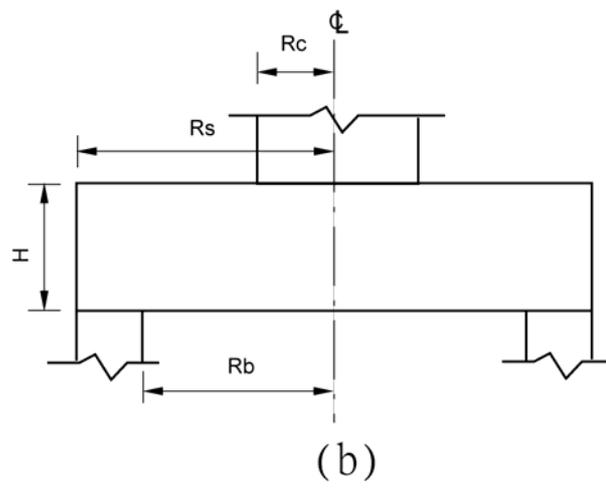
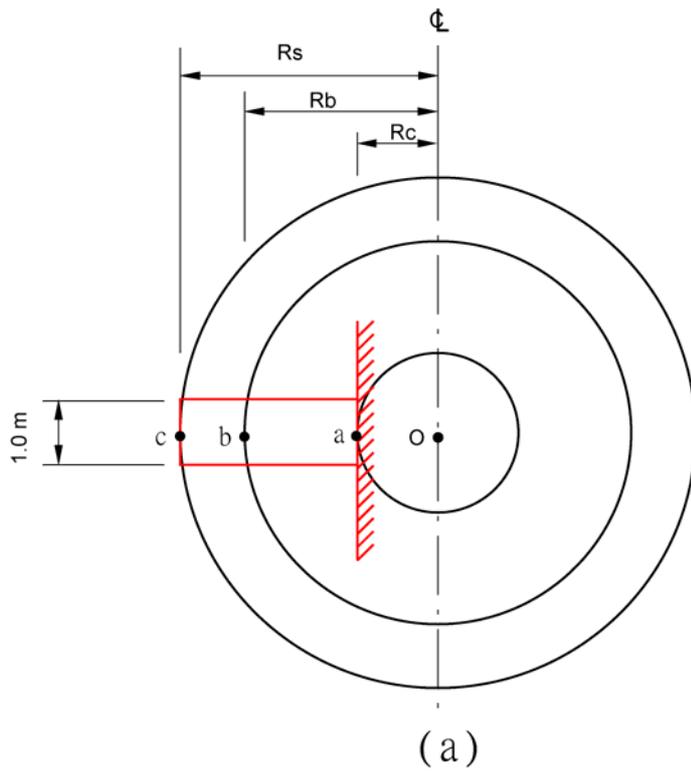


圖 3-7、頂版設計示意圖

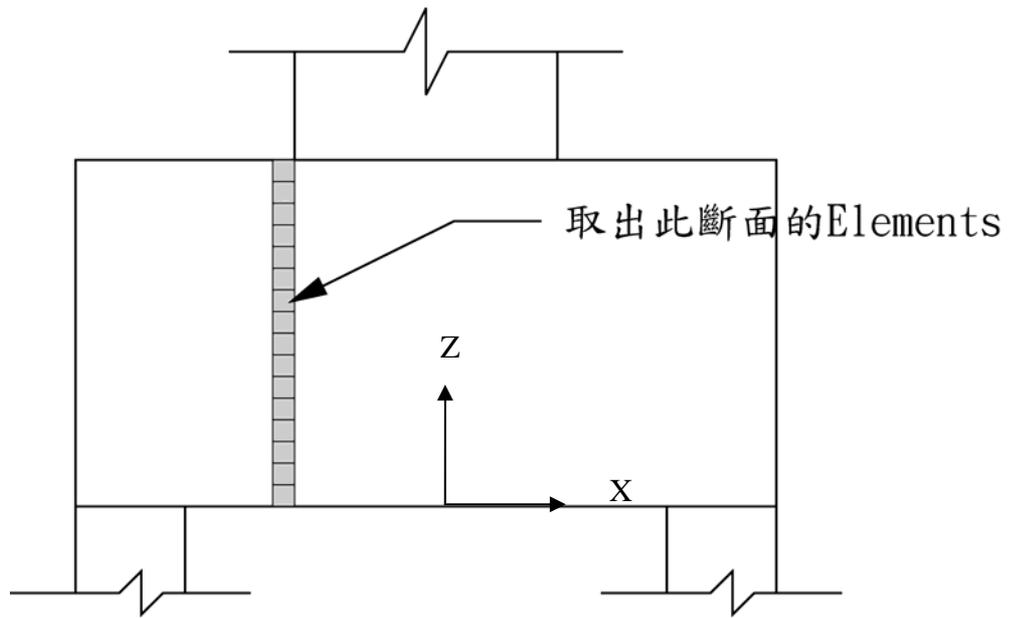


圖 4-1、最大應力斷面之斷面元素



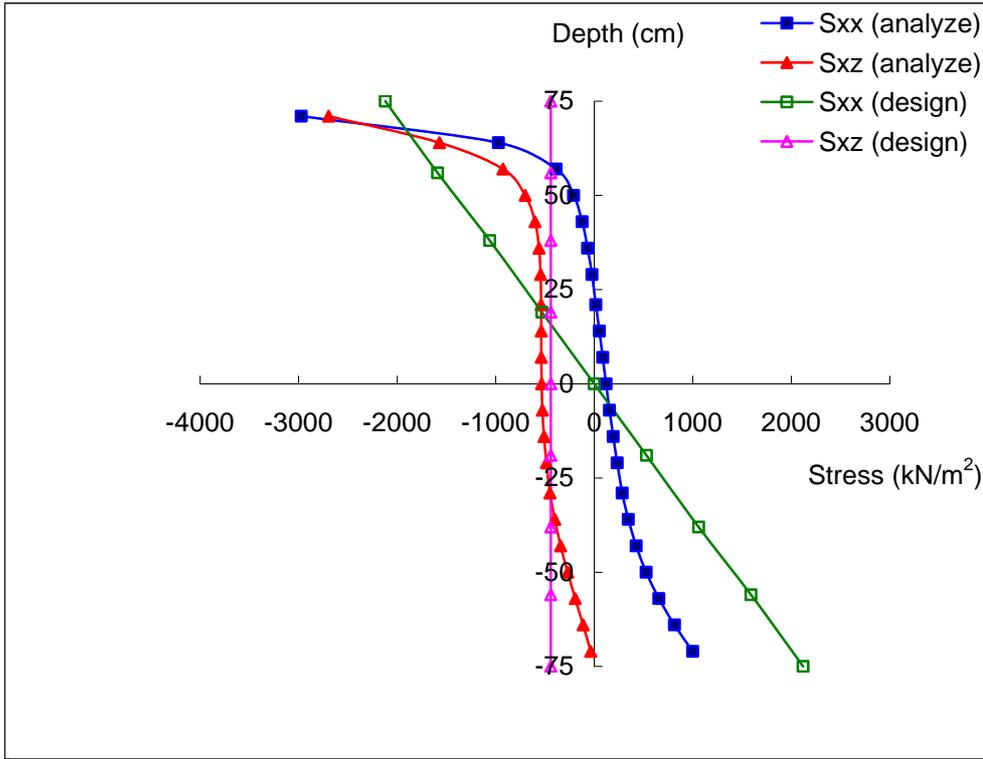


圖 4-2、Case C1-1-1 之應力分佈圖

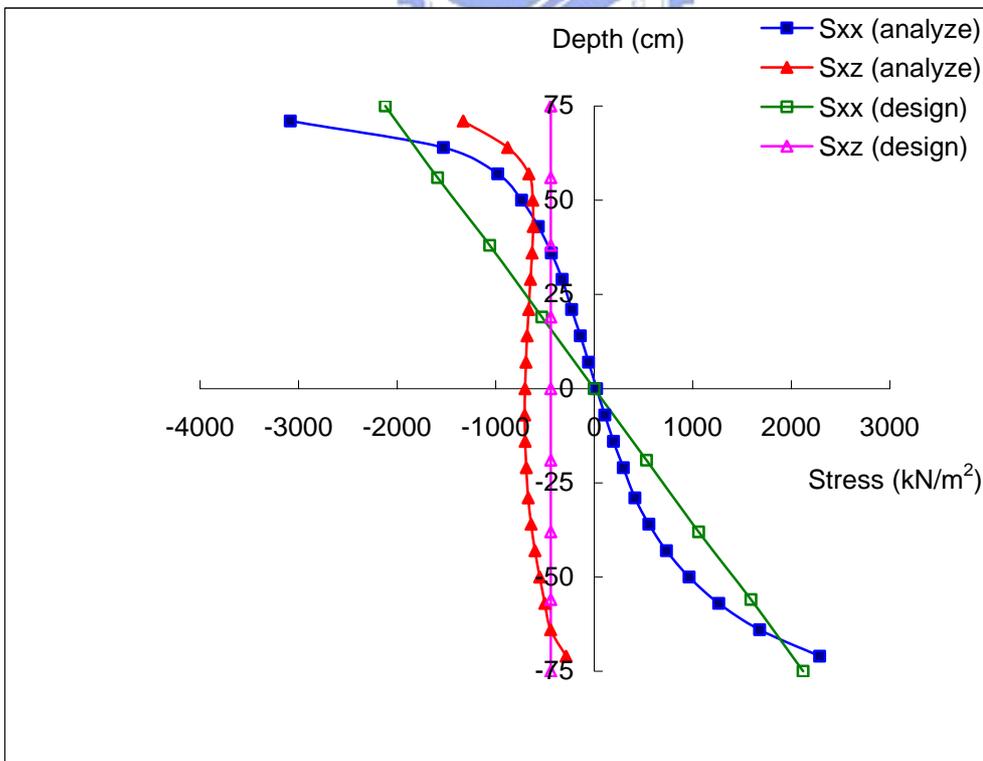


圖 4-3、Case C1-1-2 之應力分佈圖

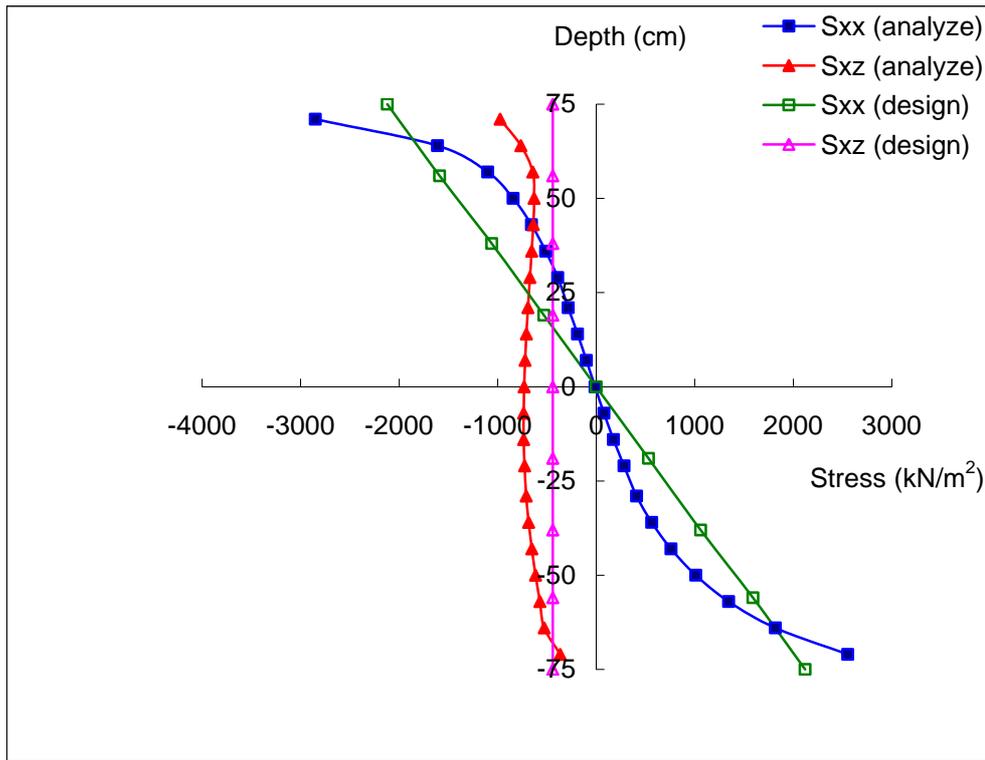


圖 4-4、Case C1-1-3 之應力分佈圖

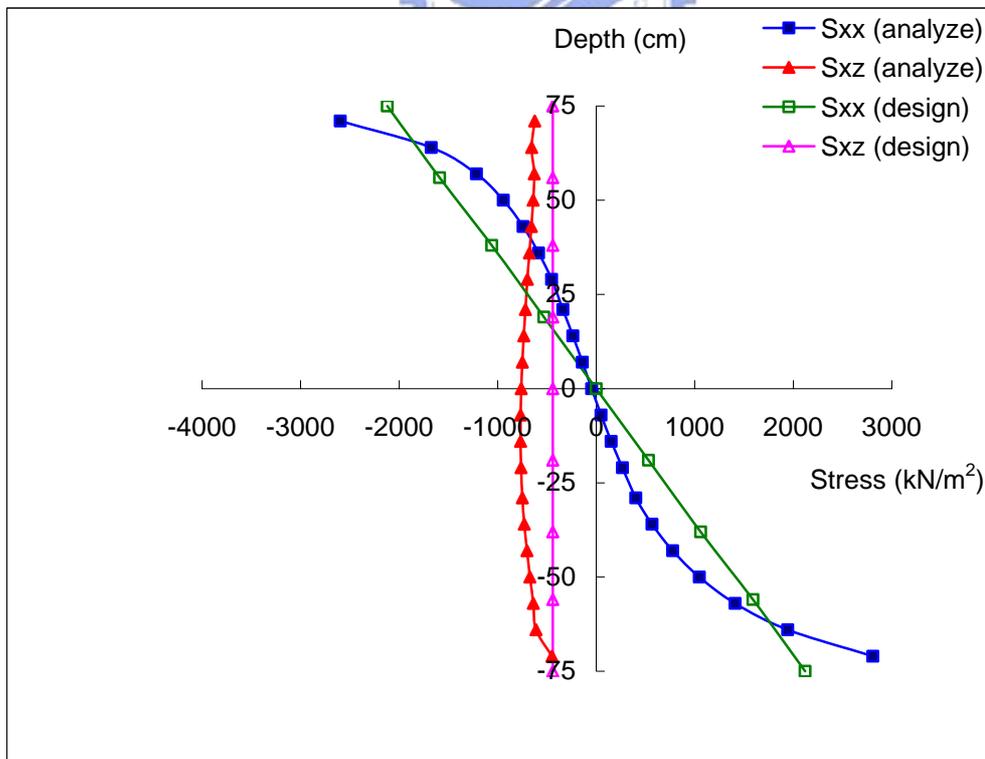


圖 4-5、Case C1-1-8 之應力分佈圖

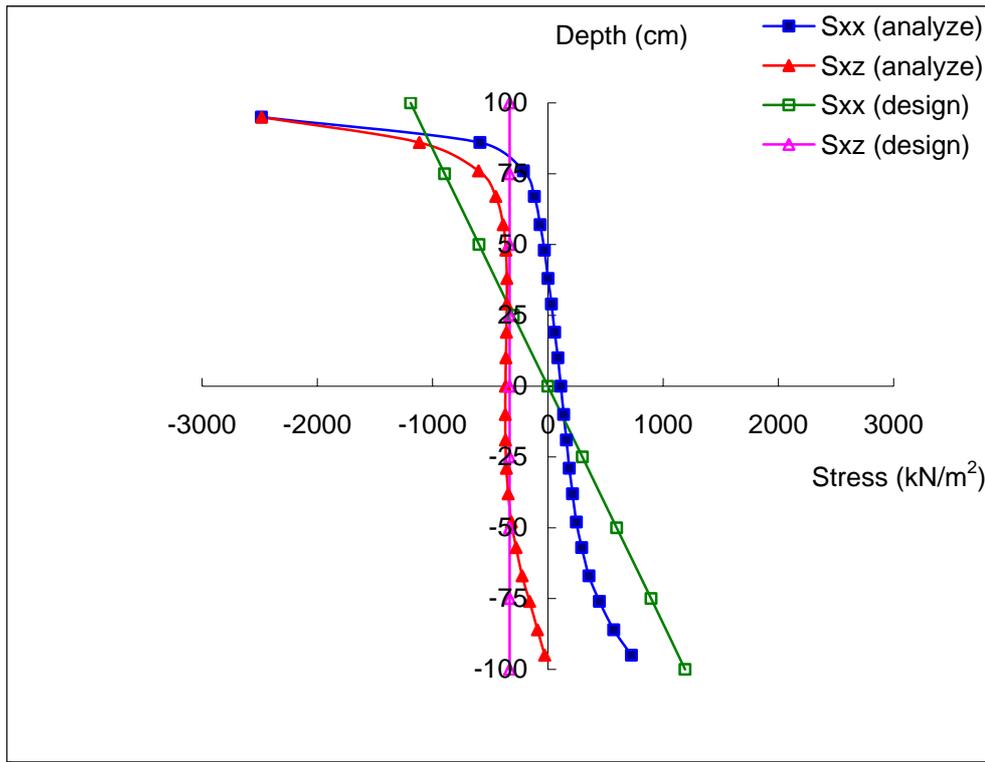


圖 4-6、Case C1-2-1 之應力分佈圖

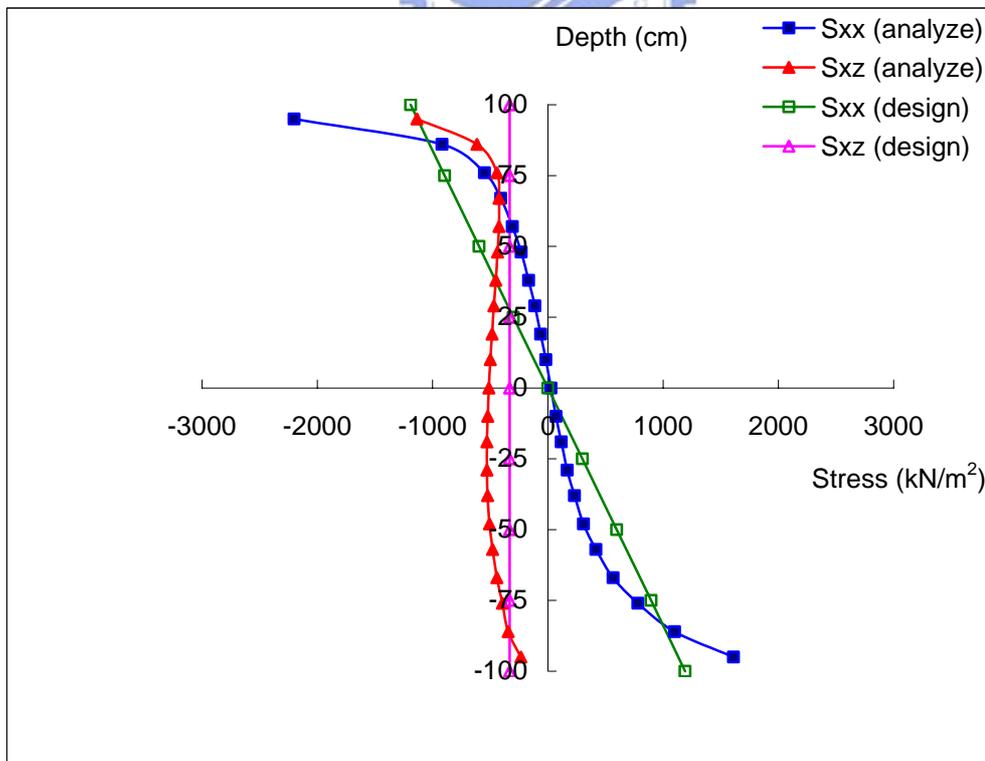


圖 4-7、Case C1-2-2 之應力分佈圖

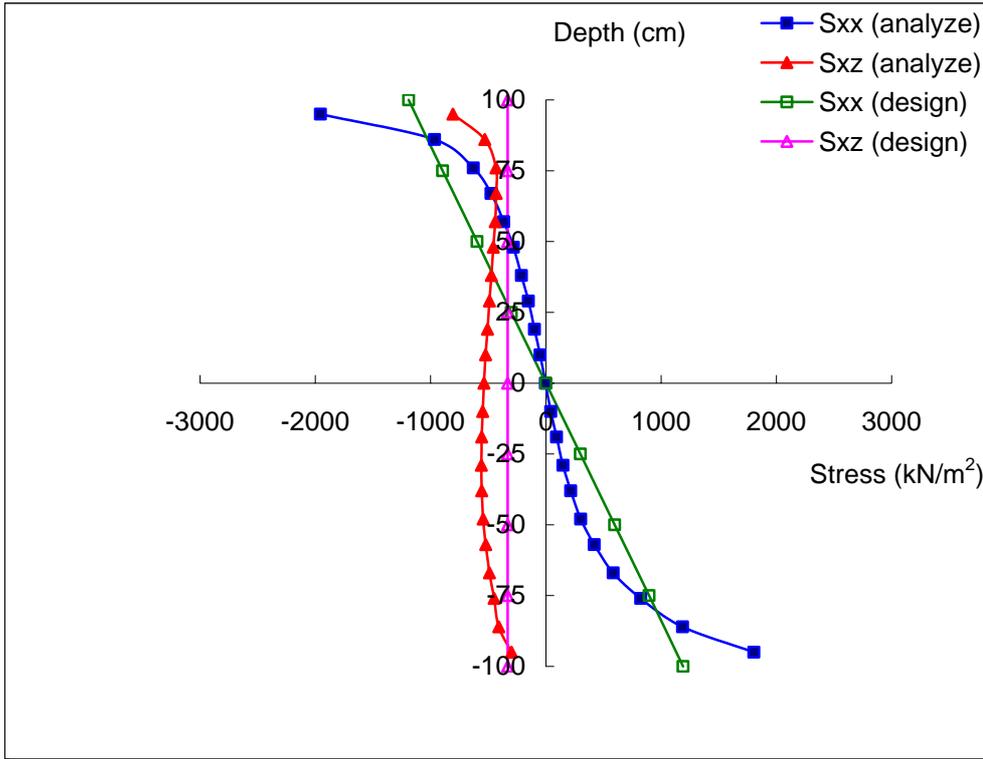


圖 4-8、Case C1-2-3 之應力分佈圖

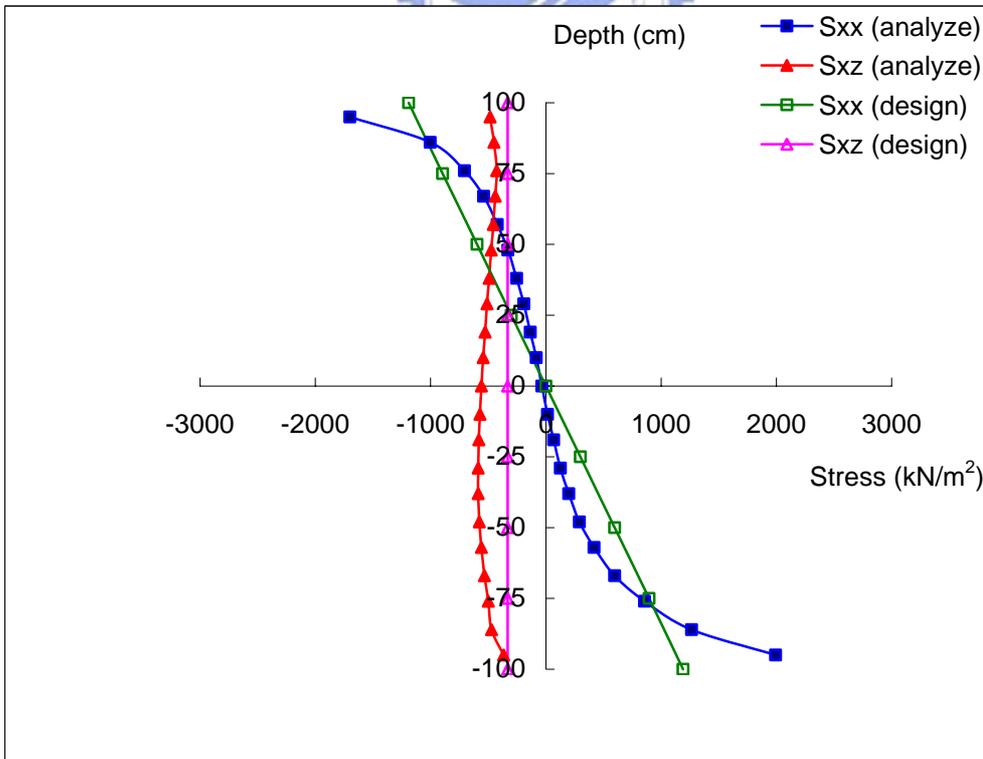


圖 4-9、Case C1-2-8 之應力分佈圖

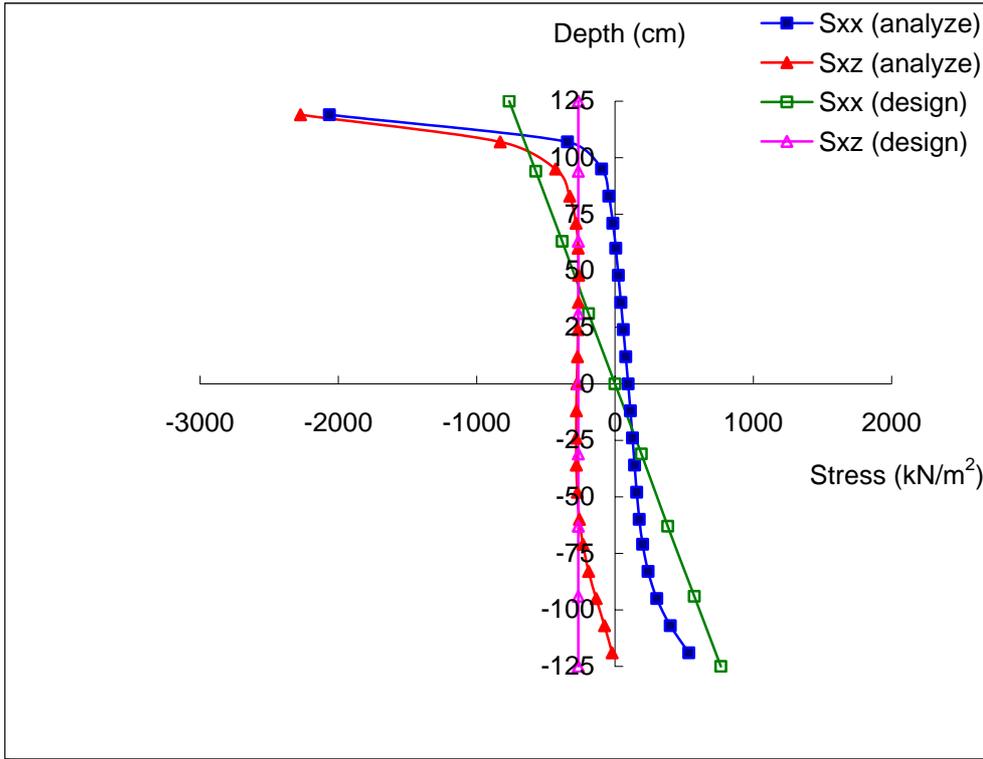


圖 4-10、Case C1-3-1 之應力分佈圖

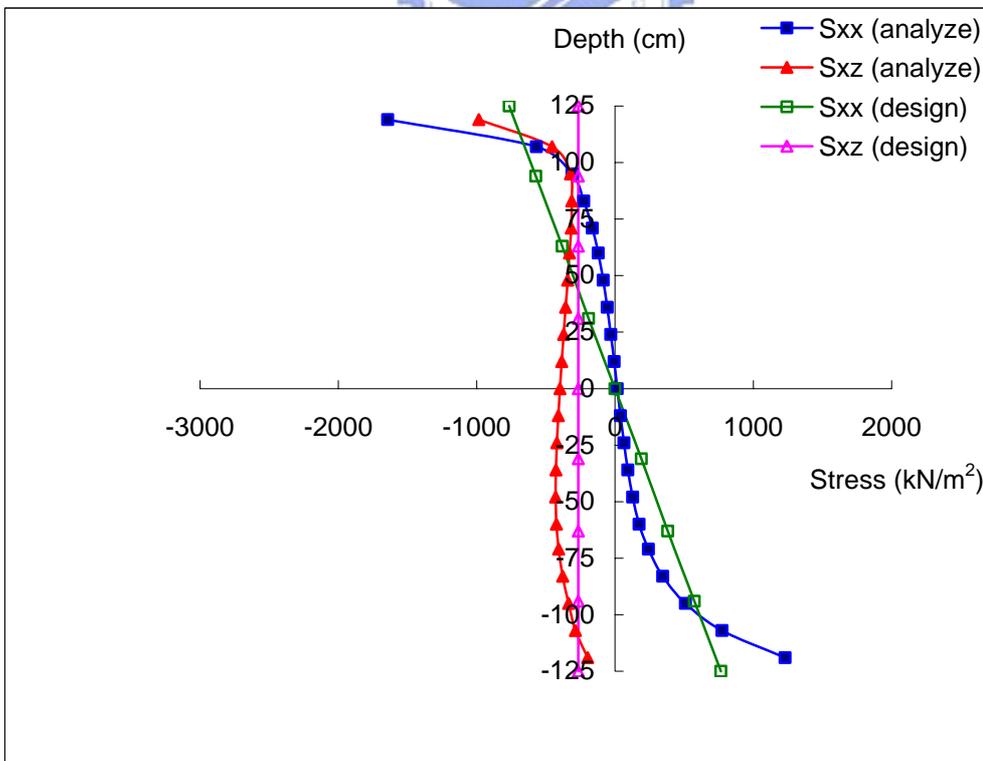


圖 4-11、Case C1-3-2 之應力分佈圖

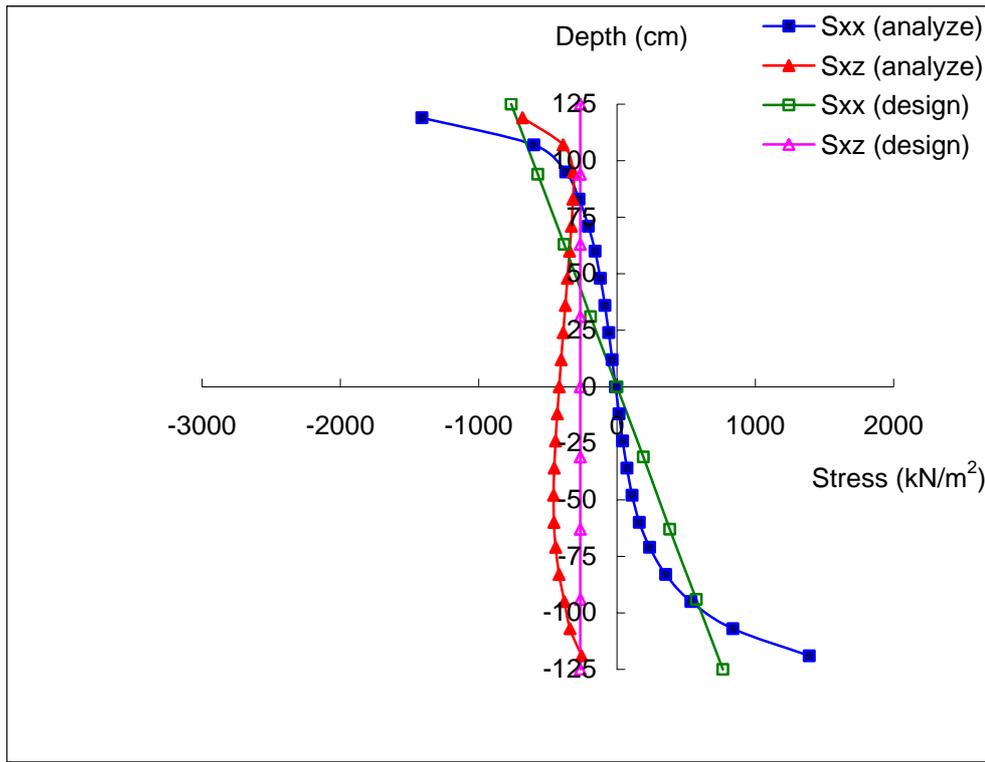


圖 4-12、Case C1-3-3 之應力分佈圖

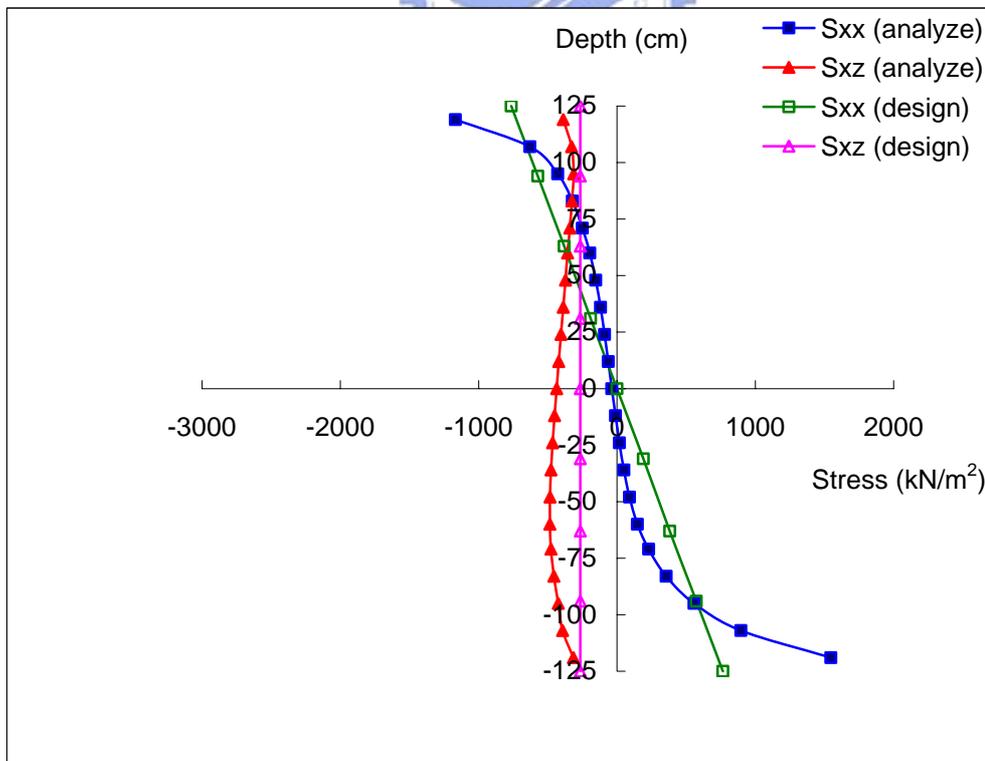


圖 4-13、Case C1-3-8 之應力分佈圖

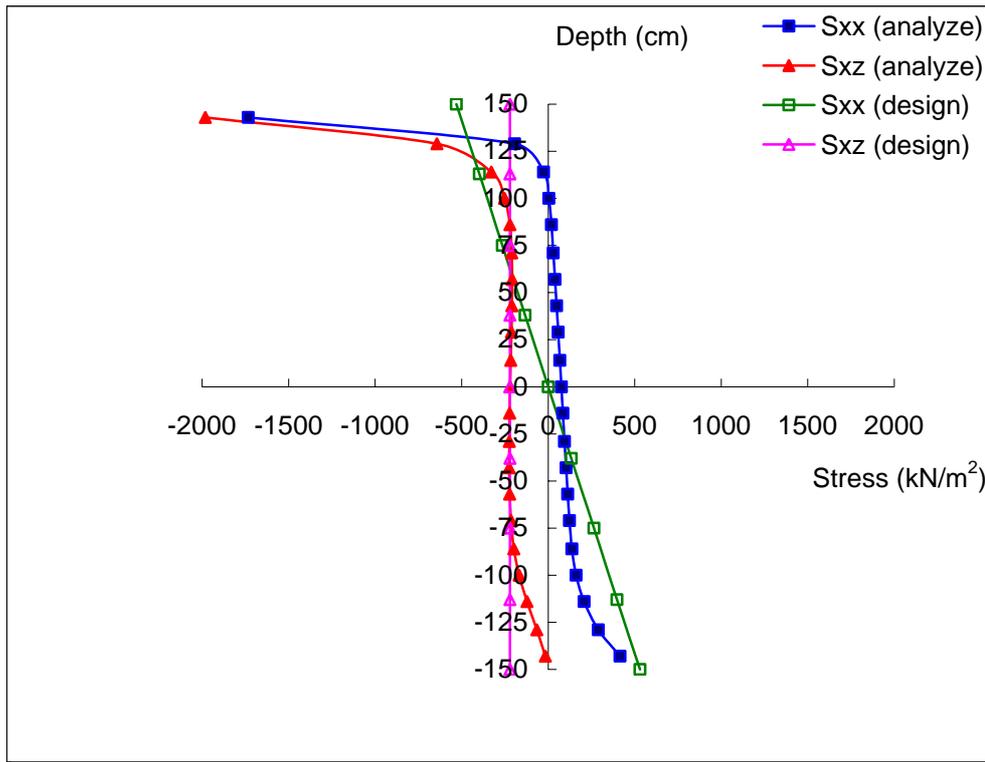


圖 4-14、Case C1-4-1 之應力分佈圖

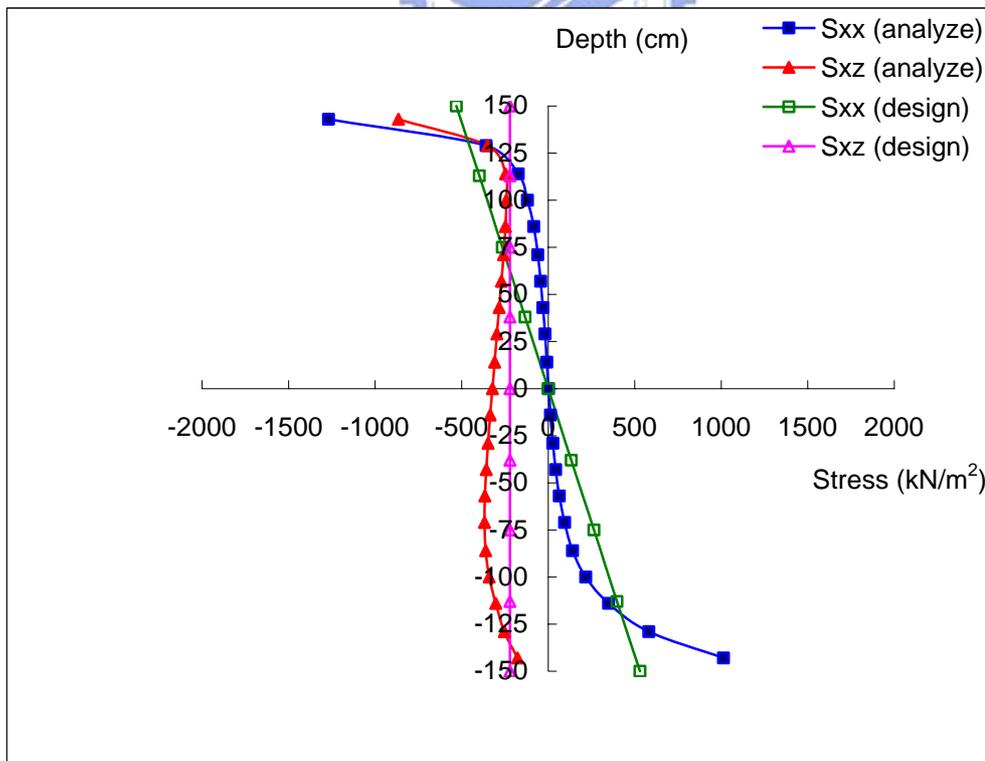


圖 4-15、Case C1-4-2 之應力分佈圖

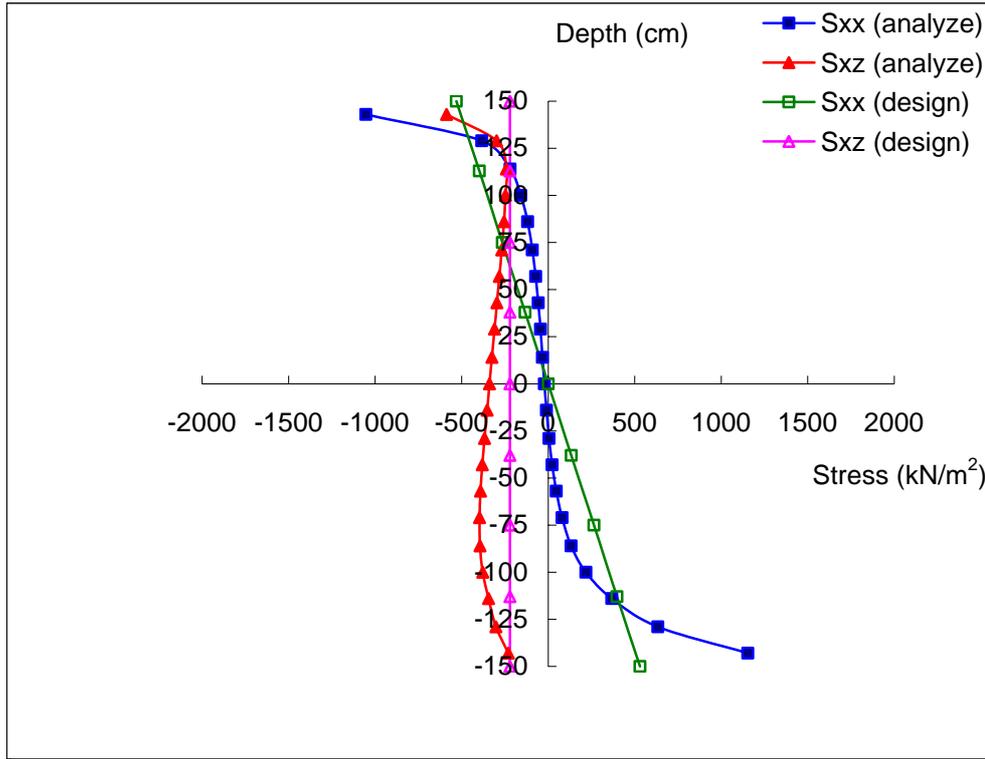


圖 4-16、Case C1-4-3 之應力分佈圖

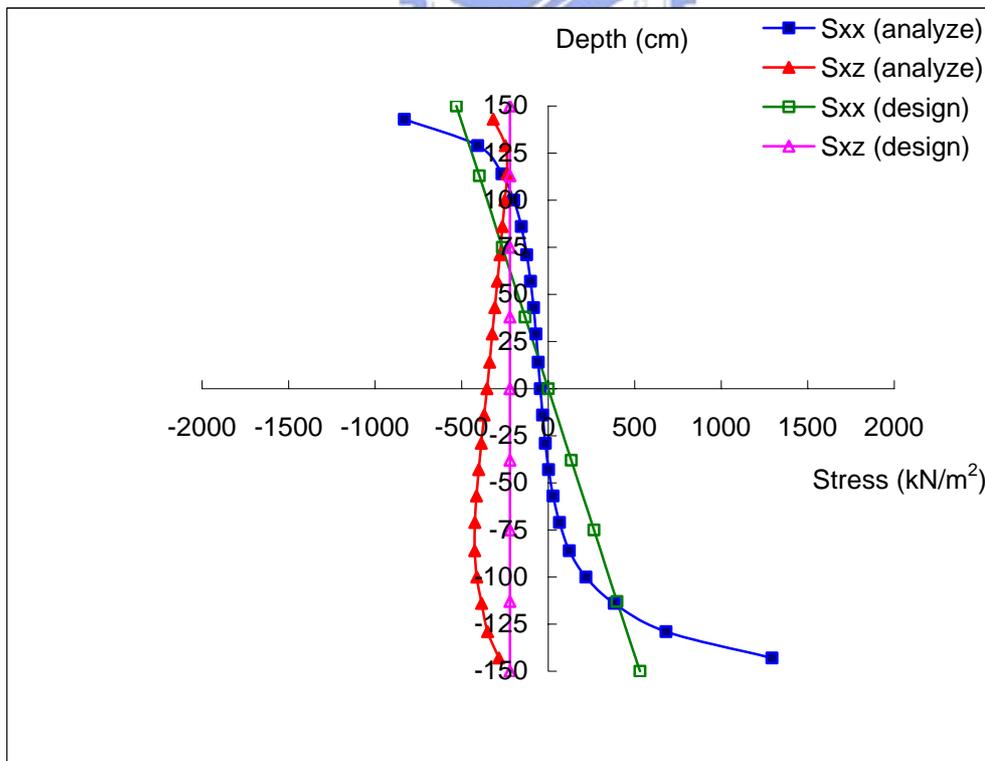


圖 4-17、Case C1-4-8 之應力分佈圖

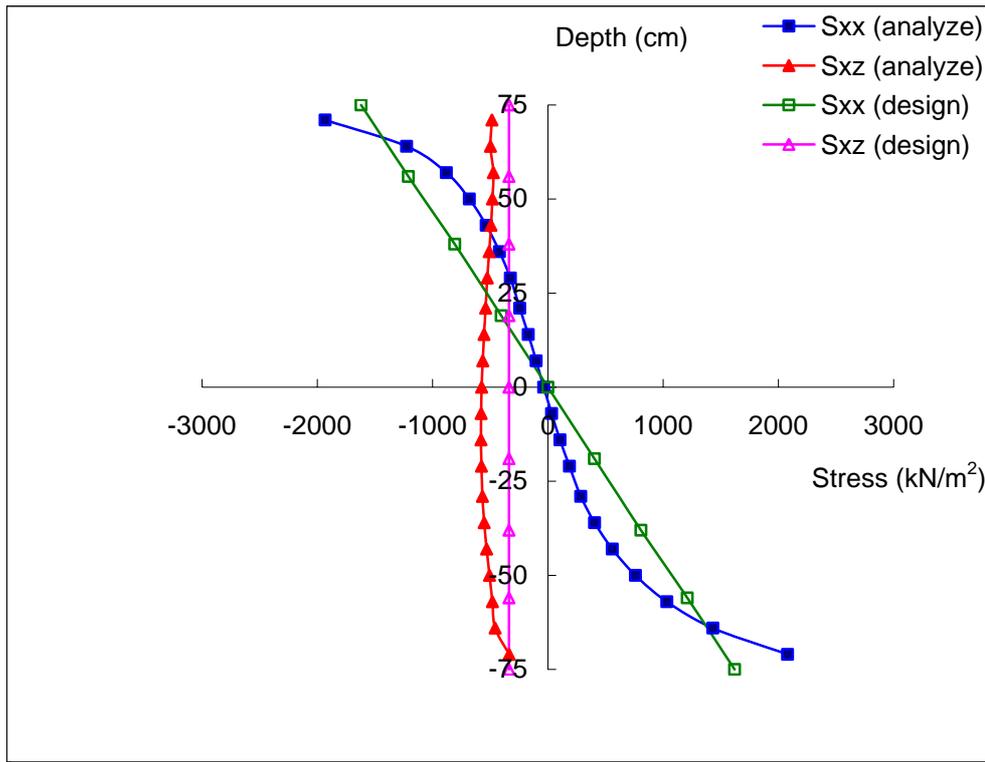


圖 4-18、Case C2-1-1 之應力分佈圖

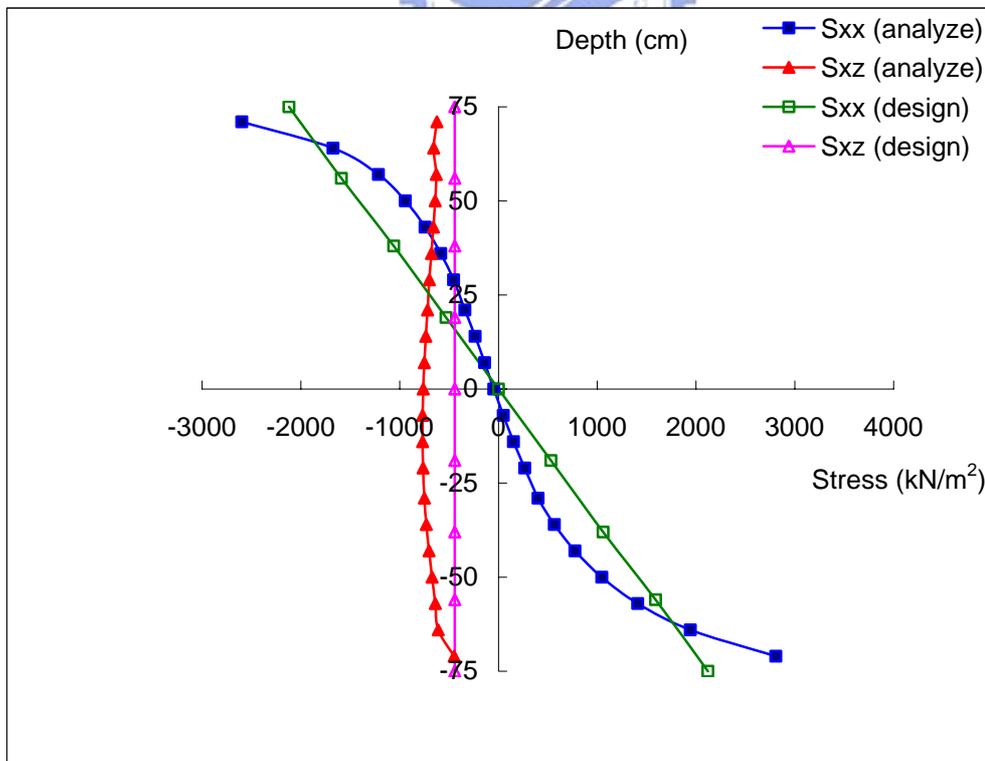


圖 4-19、Case C2-1-2 之應力分佈圖

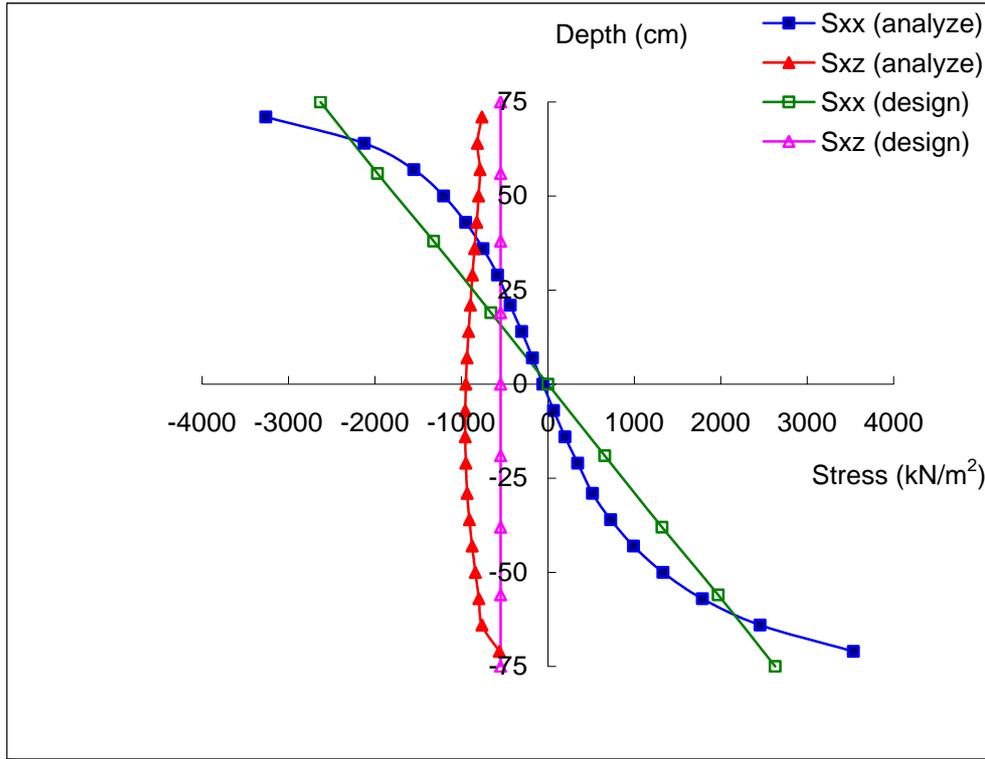


圖 4-20、Case C2-1-3 之應力分佈圖

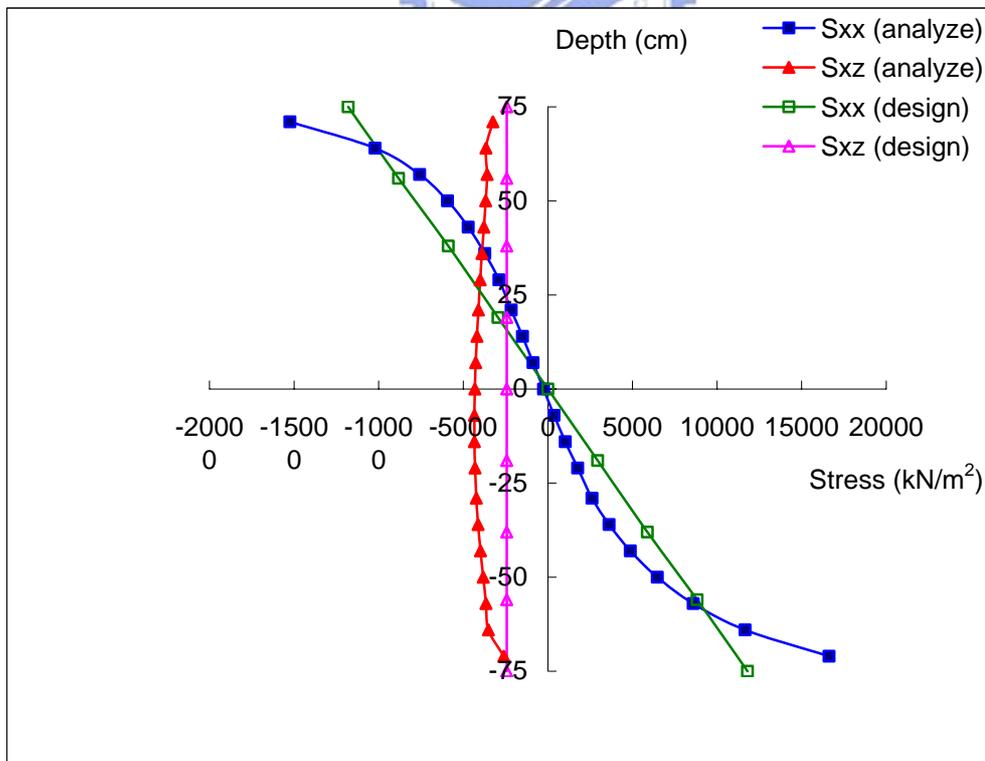


圖 4-21、Case C2-1-7 之應力分佈圖

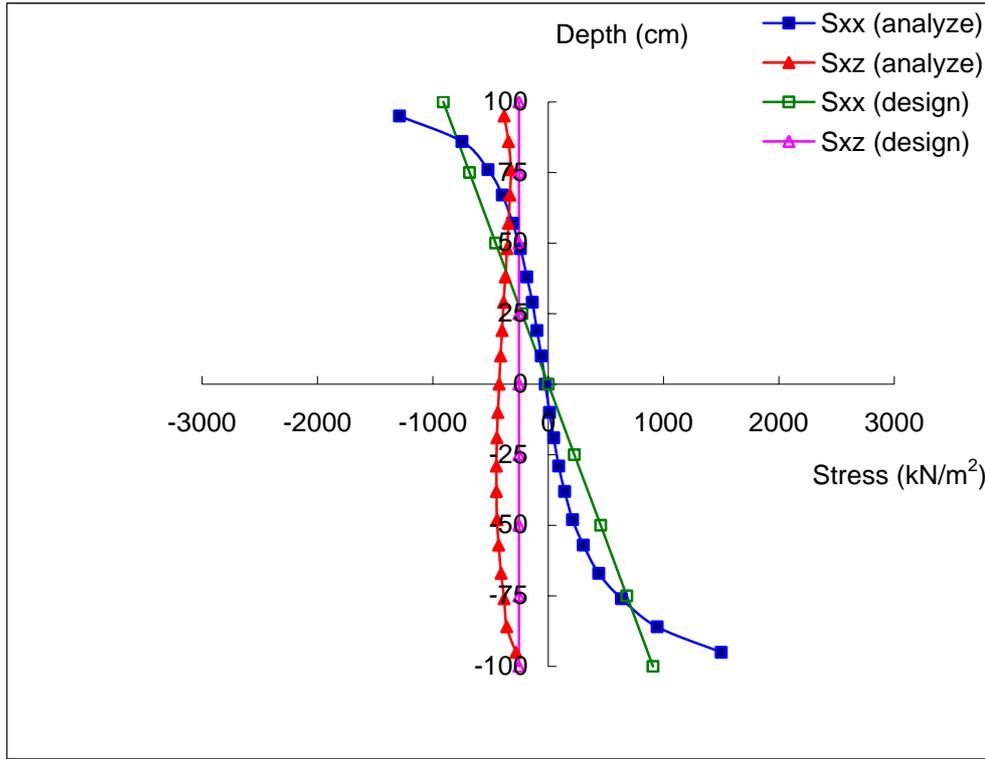


圖 4-22、Case C2-2-1 之應力分佈圖

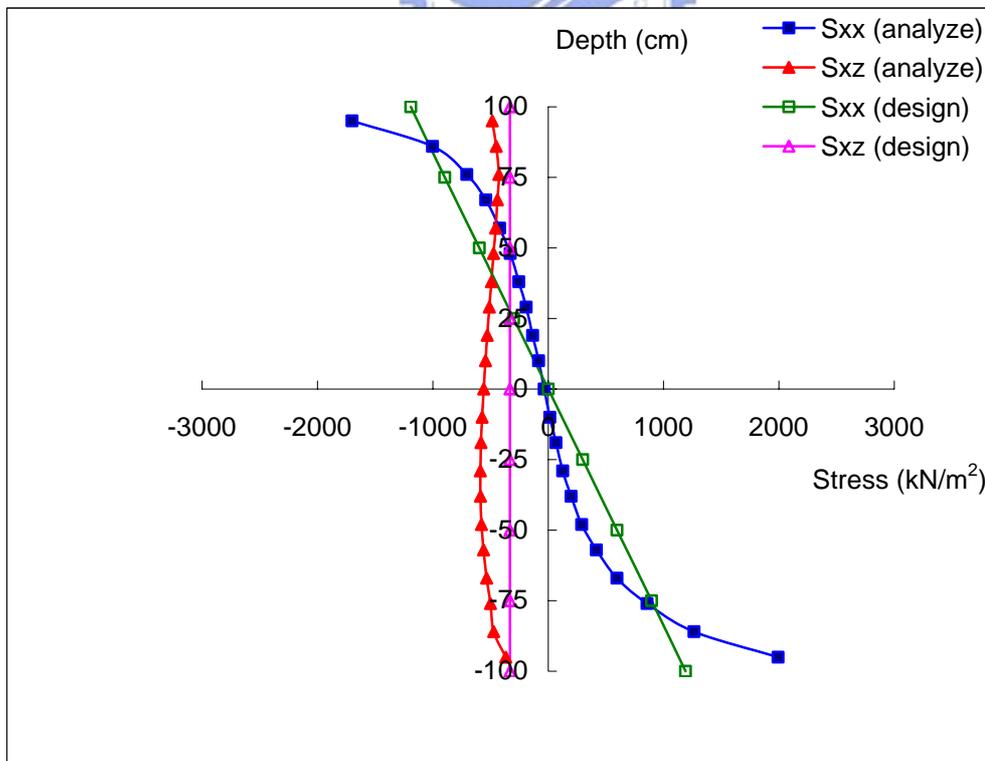


圖 4-23、Case C2-2-2 之應力分佈圖

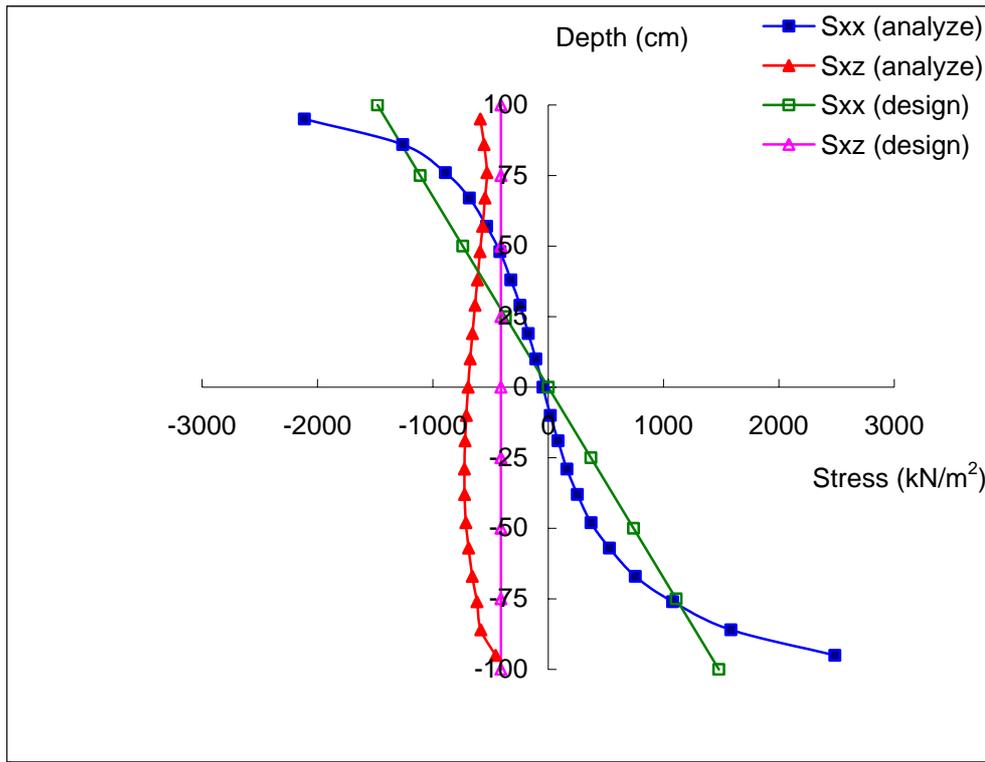


圖 4-24、Case C2-2-3 之應力分佈圖

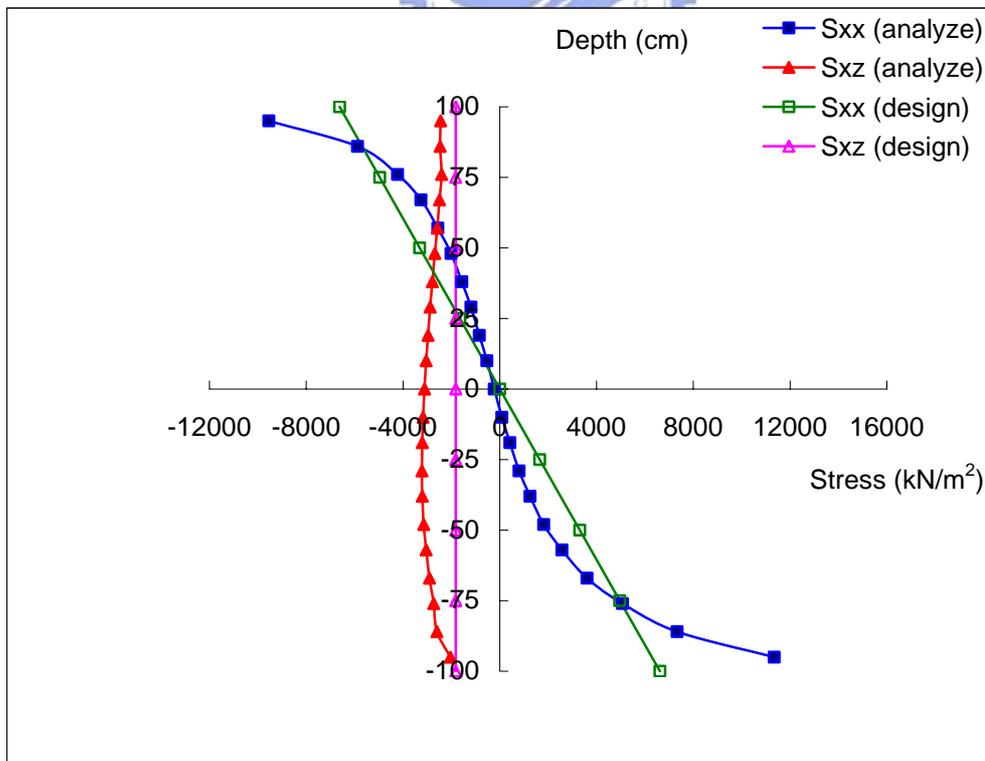


圖 4-25、Case C2-2-7 之應力分佈圖

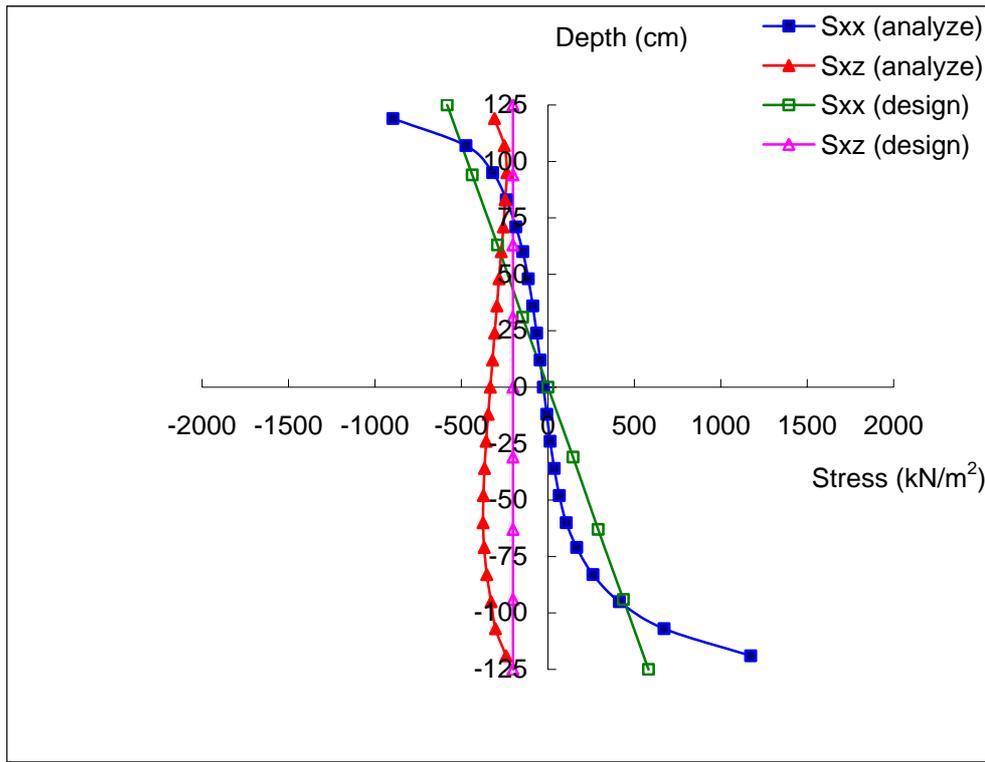


圖 4-26、Case C2-3-1 之應力分佈圖

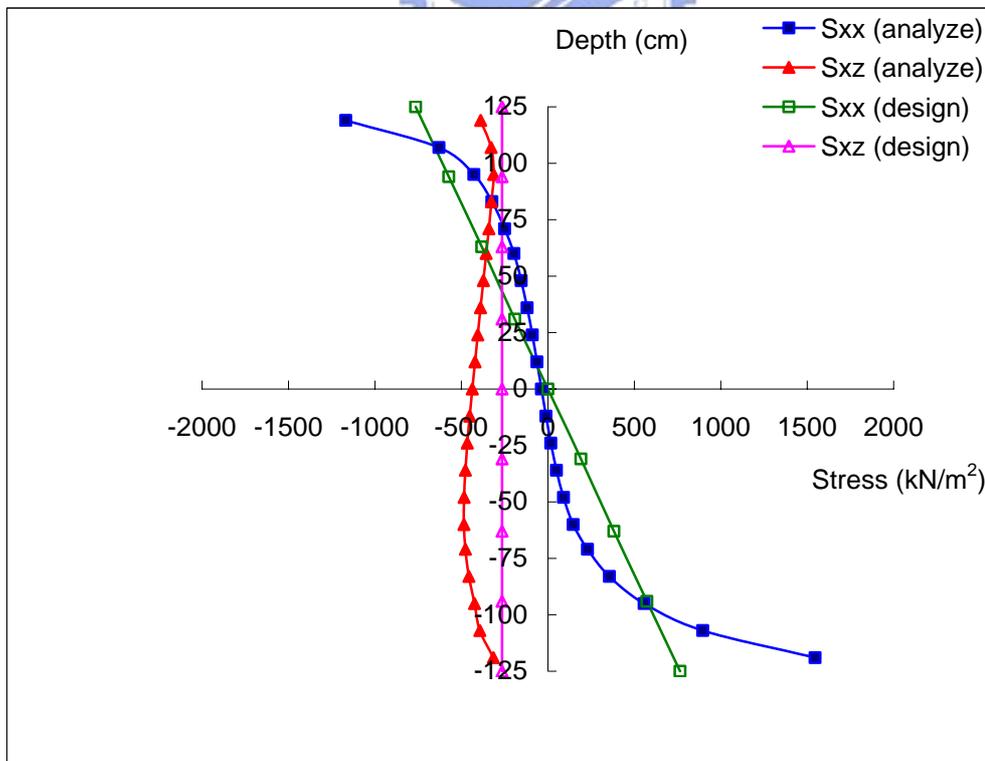


圖 4-27、Case C2-3-2 之應力分佈圖

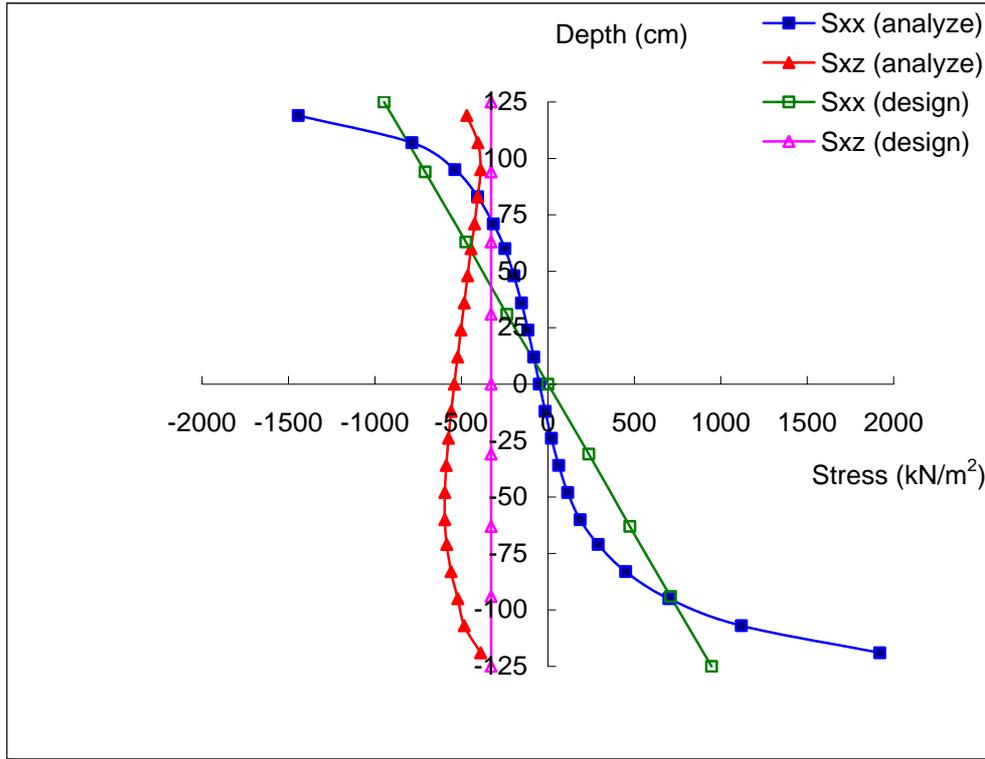


圖 4-28、Case C2-3-3 之應力分佈圖

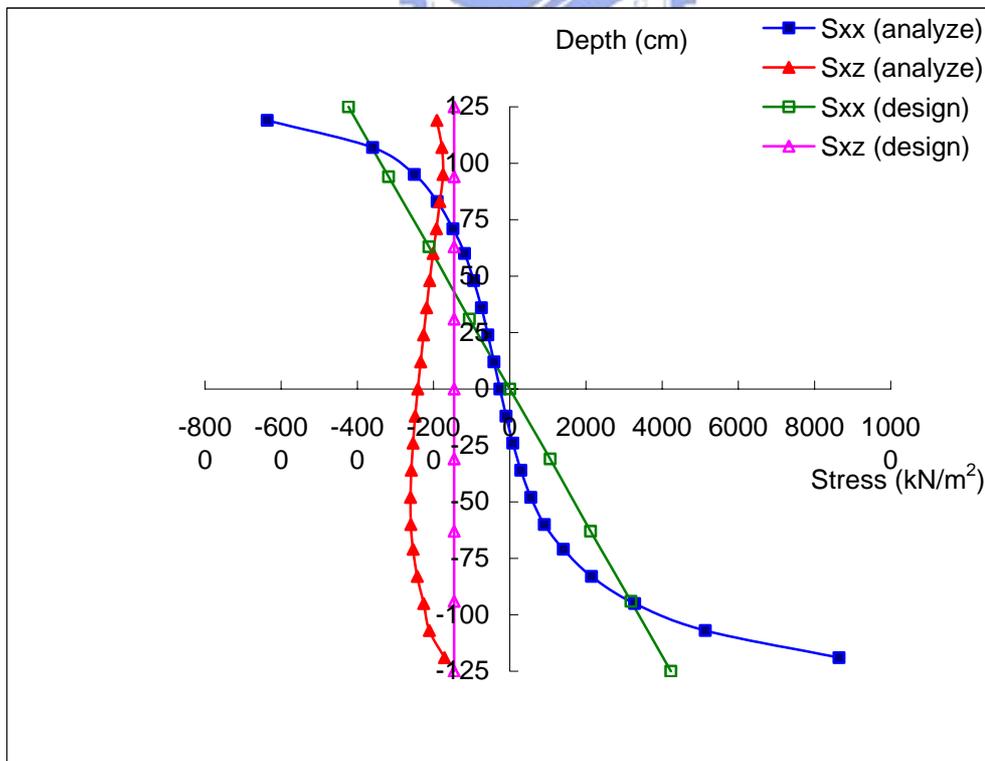


圖 4-29、Case C2-3-7 之應力分佈圖

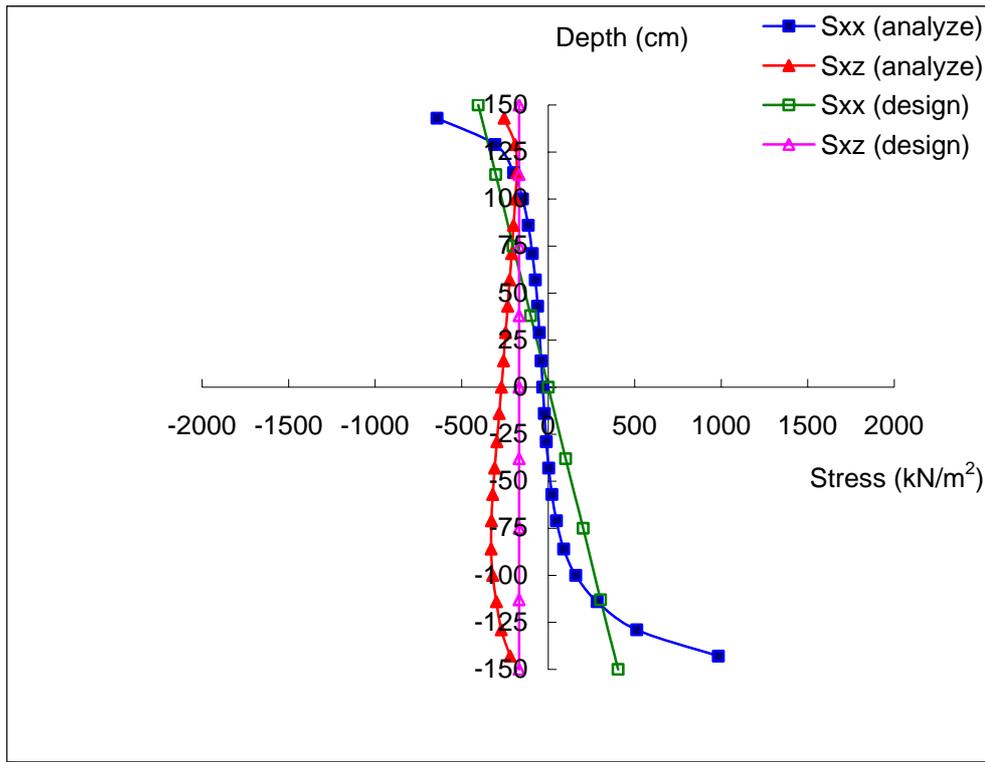


圖 4-30、Case C2-4-1 之應力分佈圖

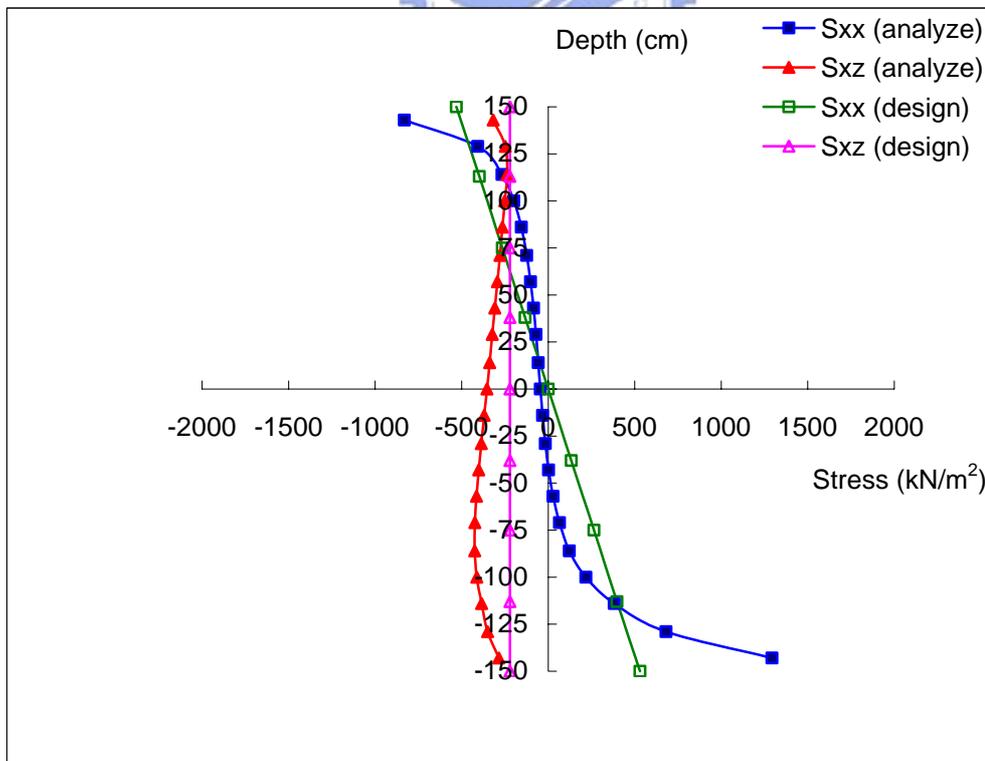


圖 4-31、Case C2-4-2 之應力分佈圖

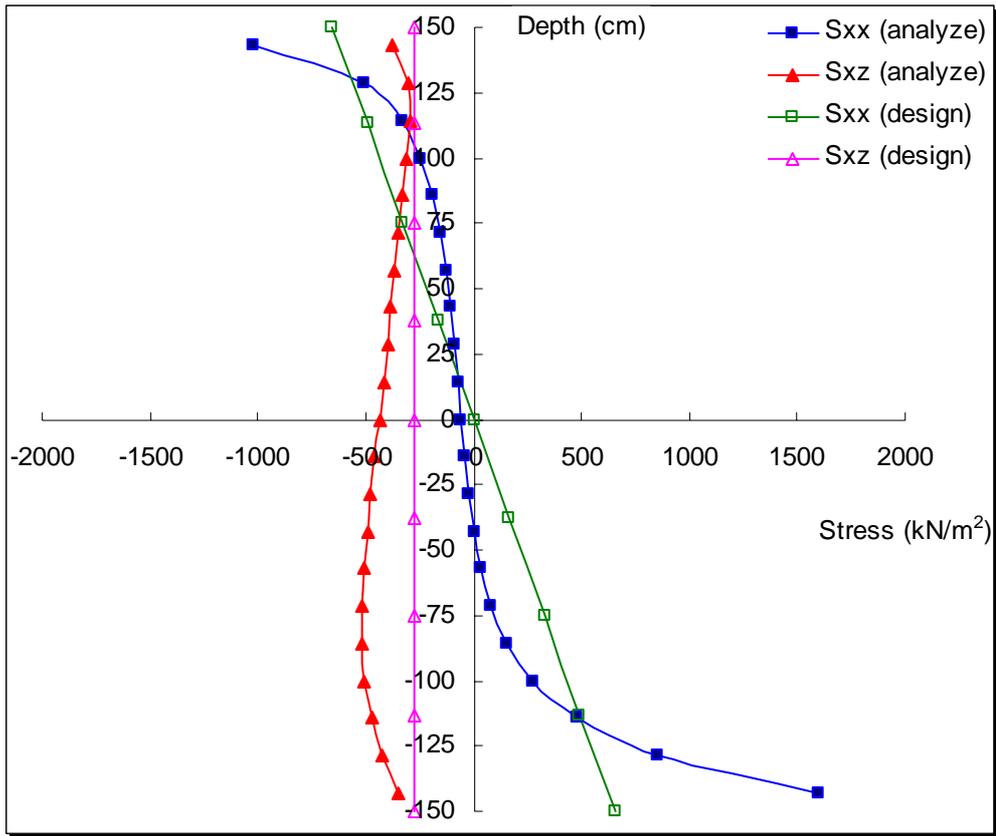


圖 4-32、Case C2-4-3 之應力分佈圖

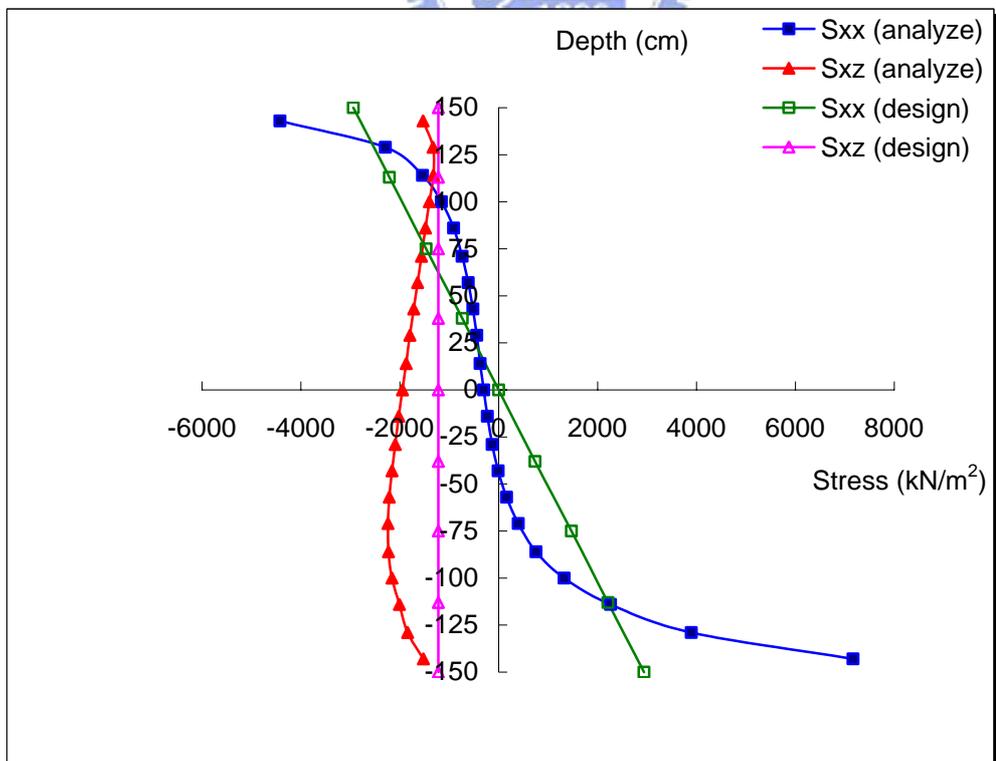


圖 4-33、Case C2-4-7 之應力分佈圖

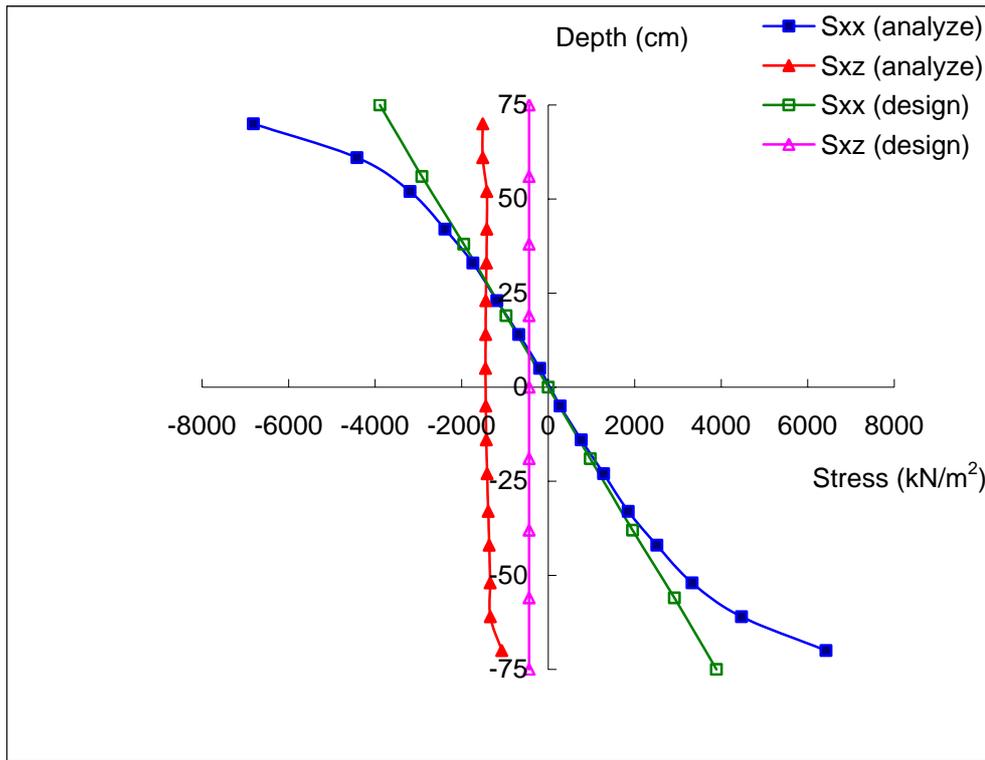


圖 4-34、Case C3-1-1 之應力分佈圖

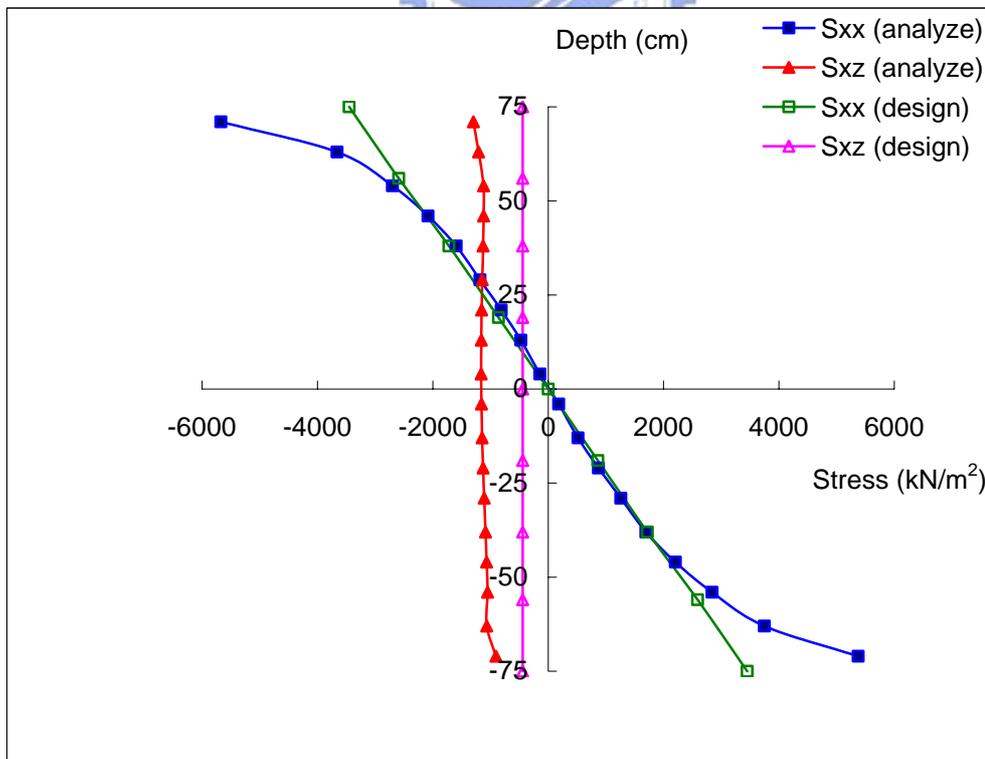


圖 4-35、Case C3-1-2 之應力分佈圖

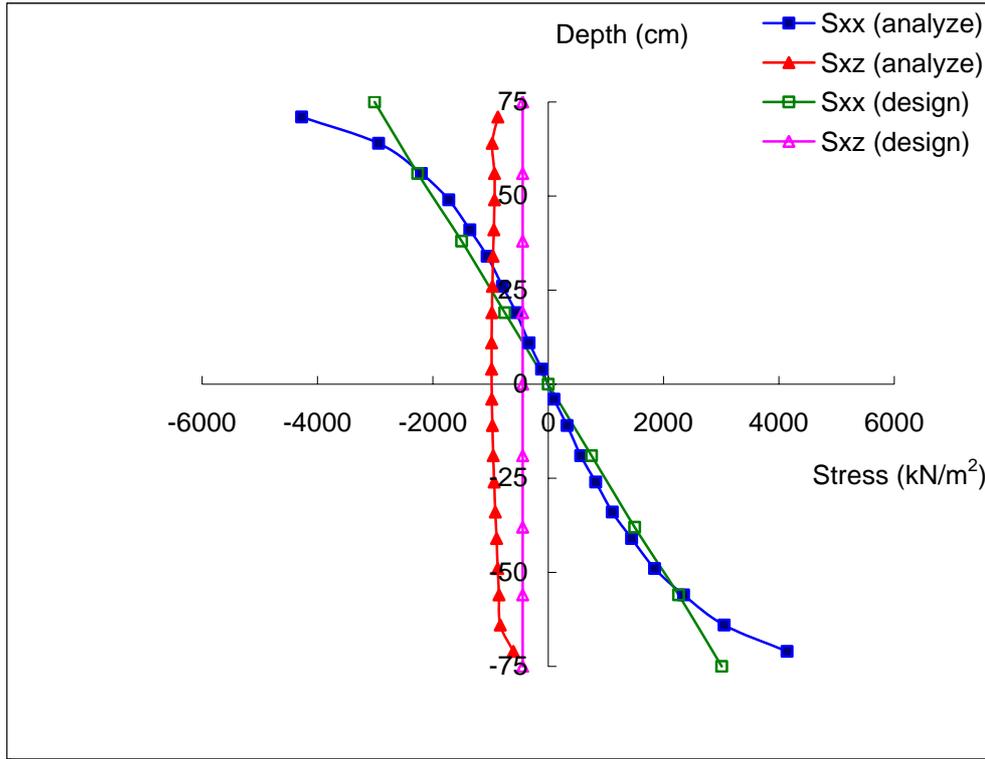


圖 4-36、Case C3-1-3 之應力分佈圖

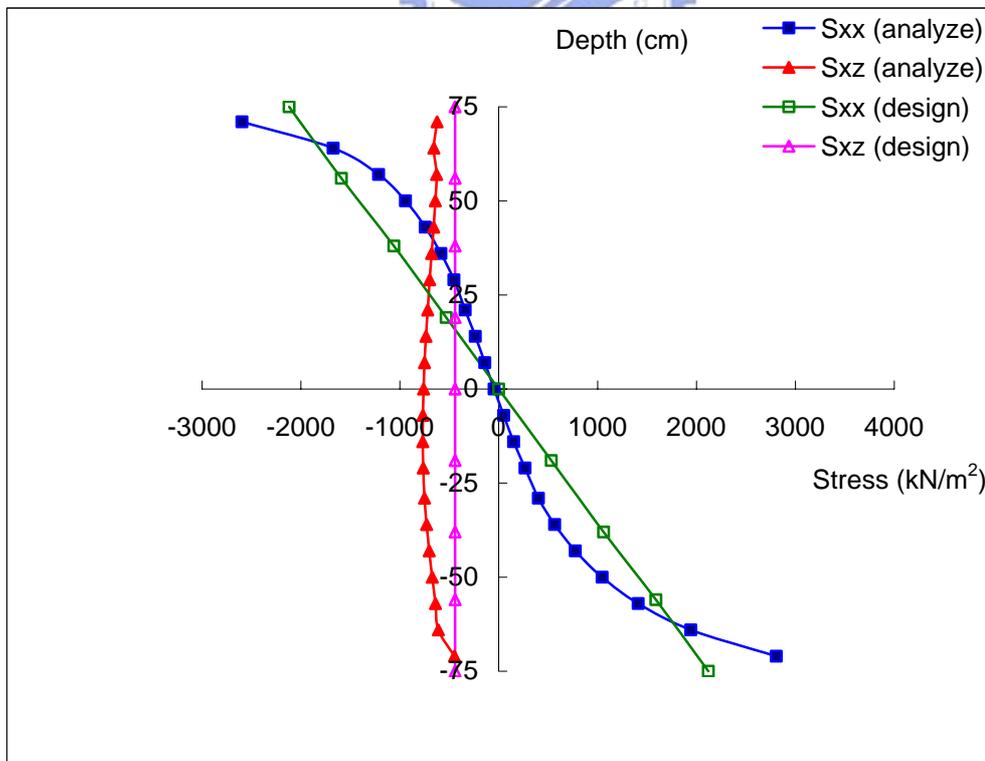


圖 4-37、Case C3-1-5 之應力分佈圖

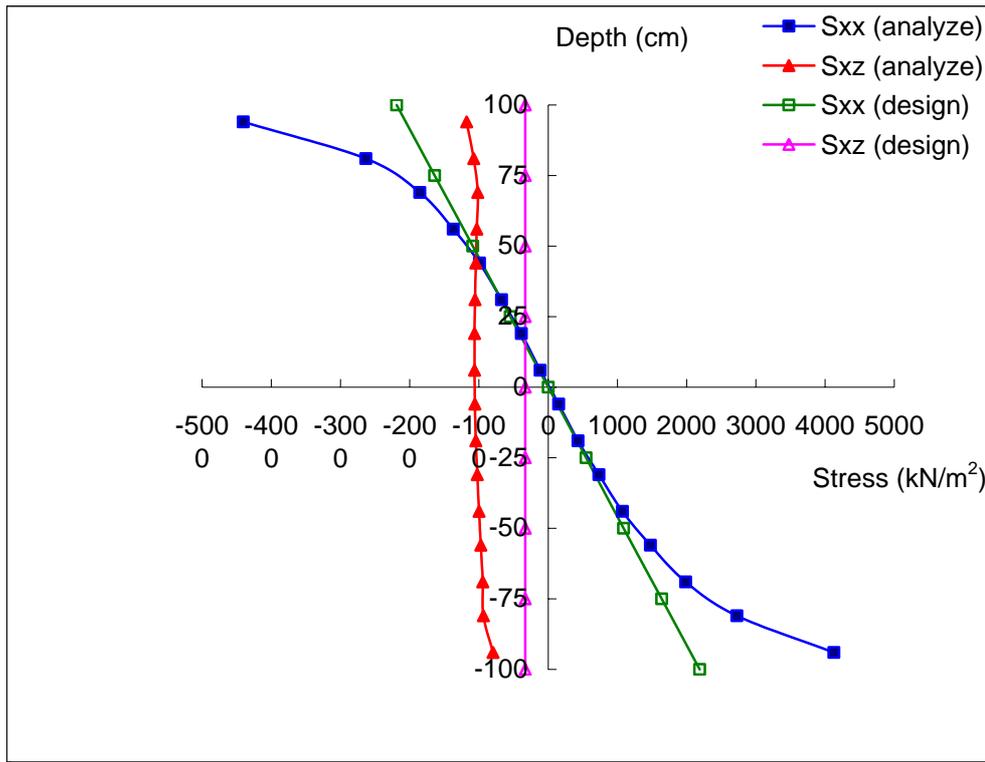


圖 4-38、Case C3-2-1 之應力分佈圖

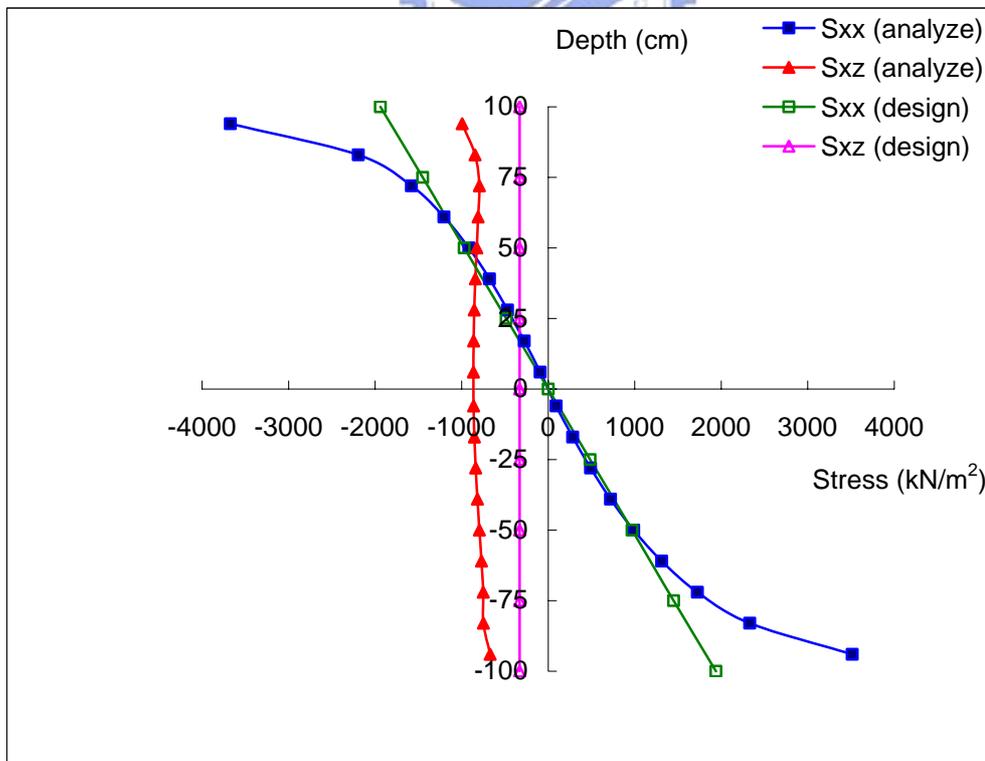


圖 4-39、Case C3-2-2 之應力分佈圖

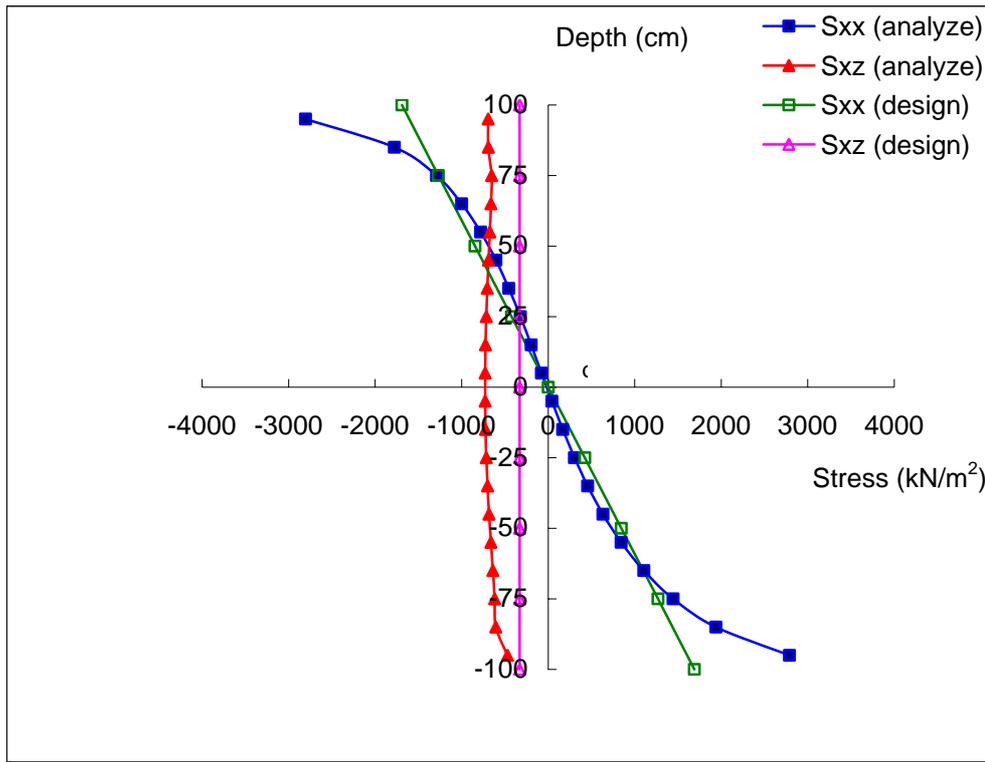


圖 4-40、Case C3-2-3 之應力分佈圖

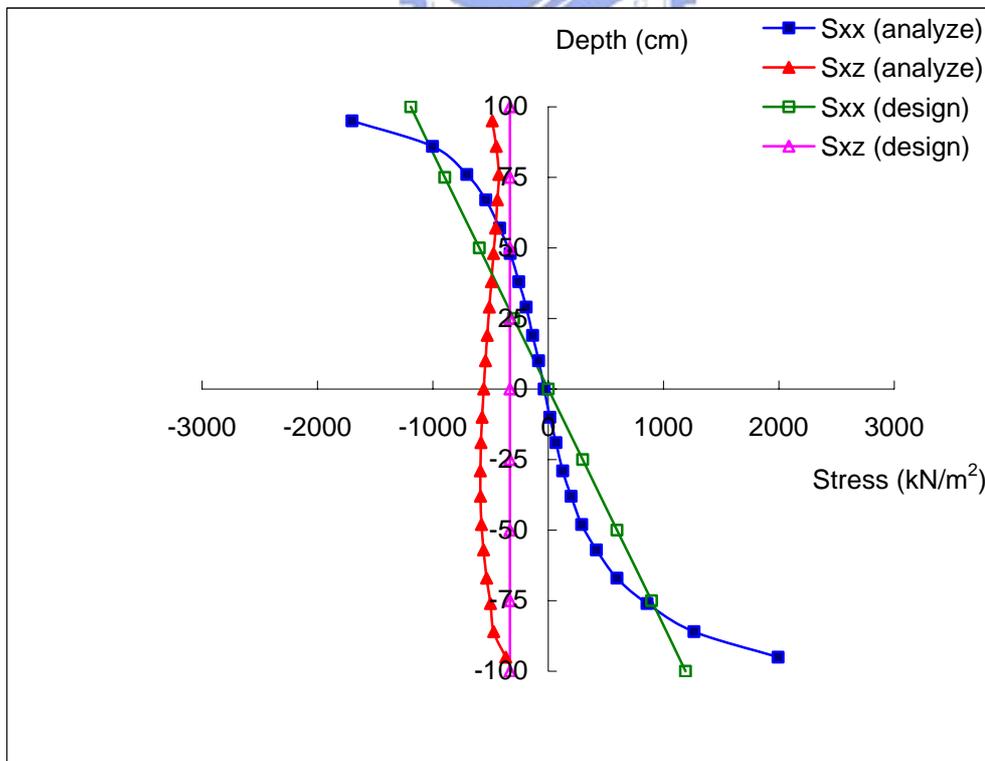


圖 4-41、Case C3-2-5 之應力分佈圖

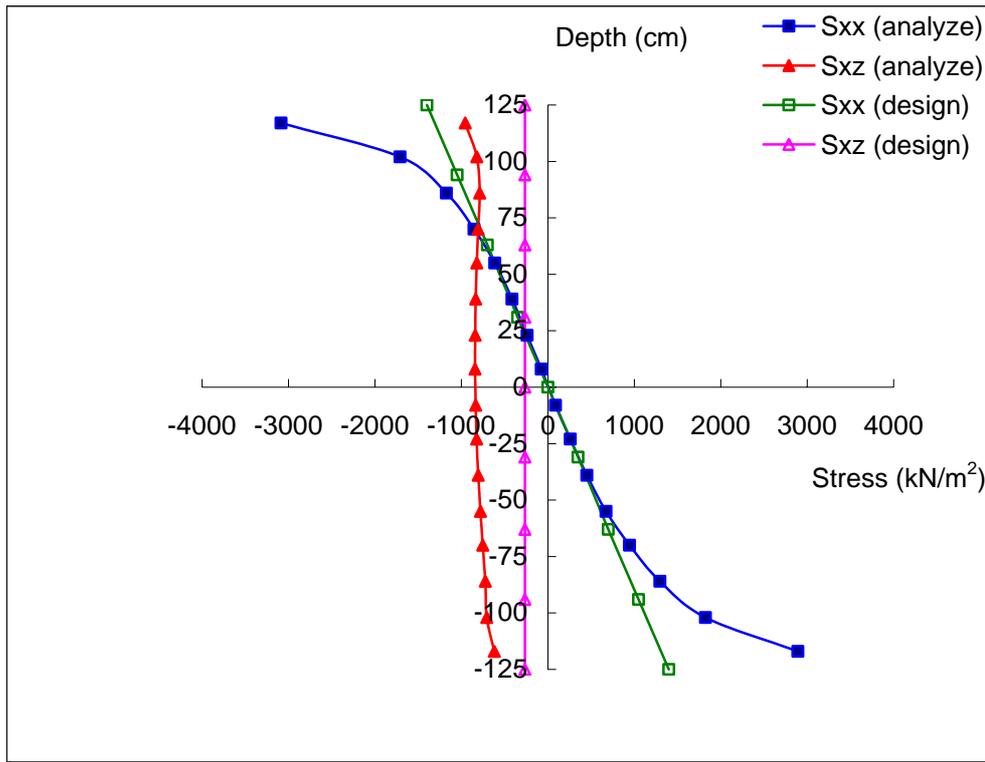


圖 4-42、Case C3-3-1 之應力分佈圖

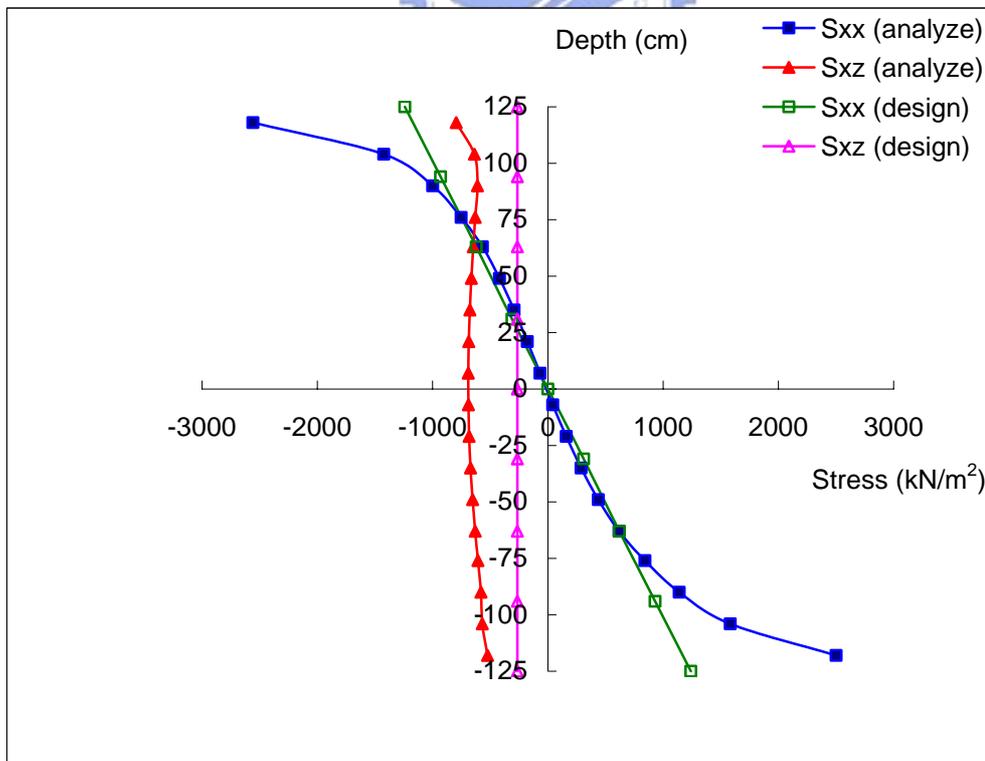


圖 4-43、Case C3-3-2 之應力分佈圖

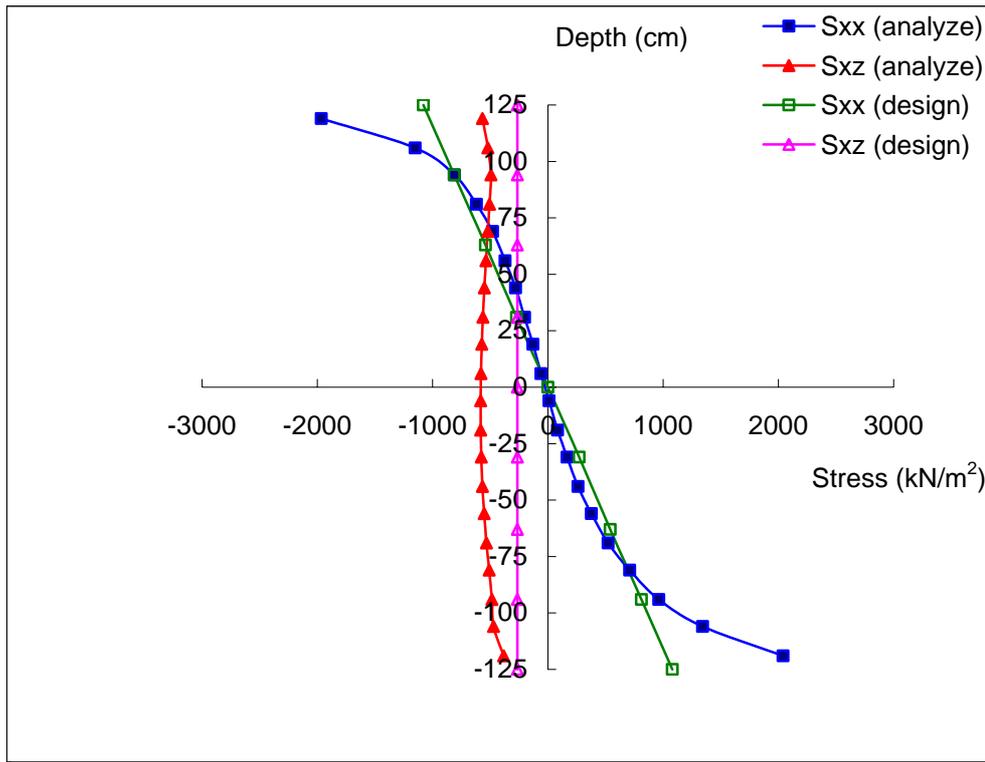


圖 4-44、Case C3-3-3 之應力分佈圖

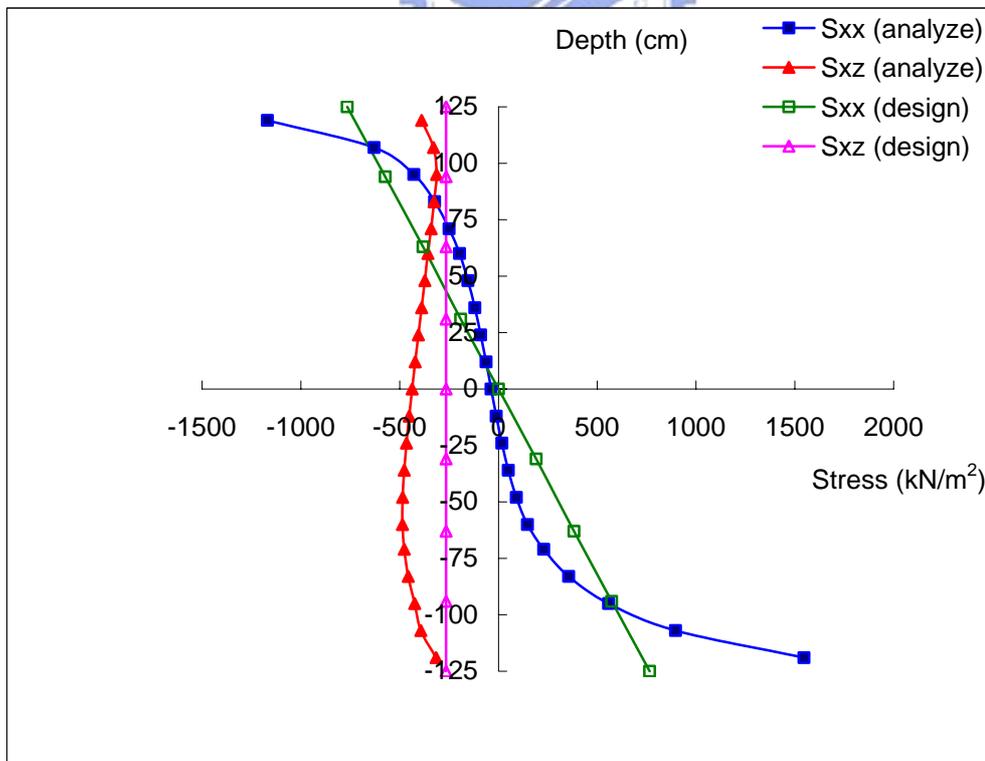


圖 4-45、Case C3-3-5 之應力分佈圖

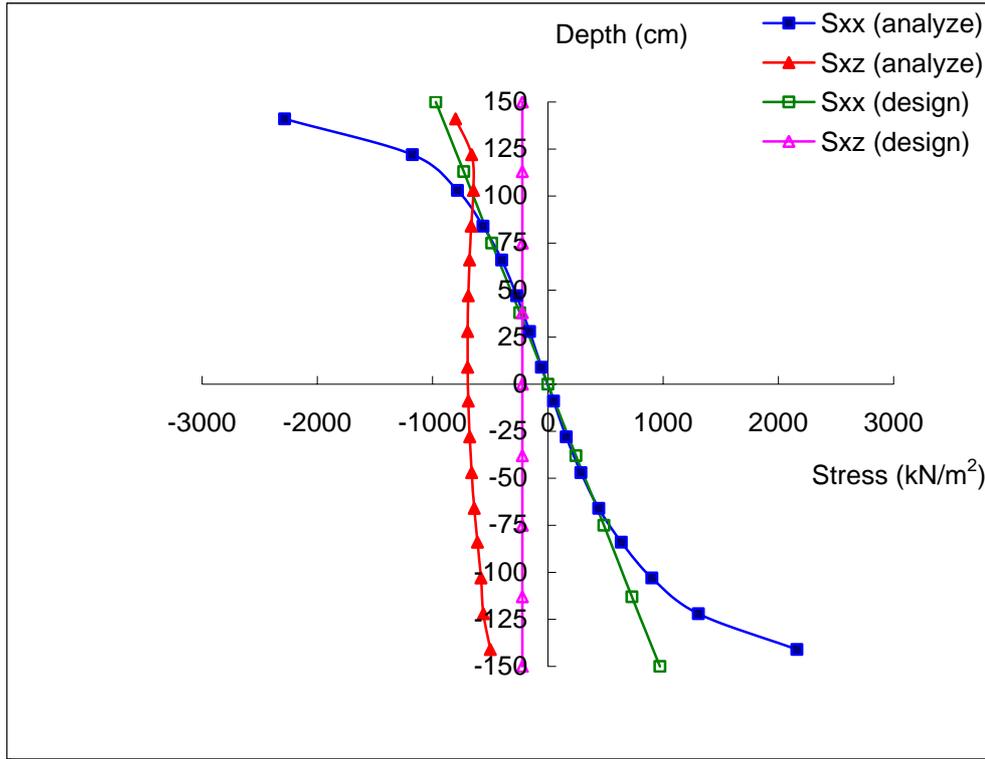


圖 4-46、Case C3-4-1 之應力分佈圖

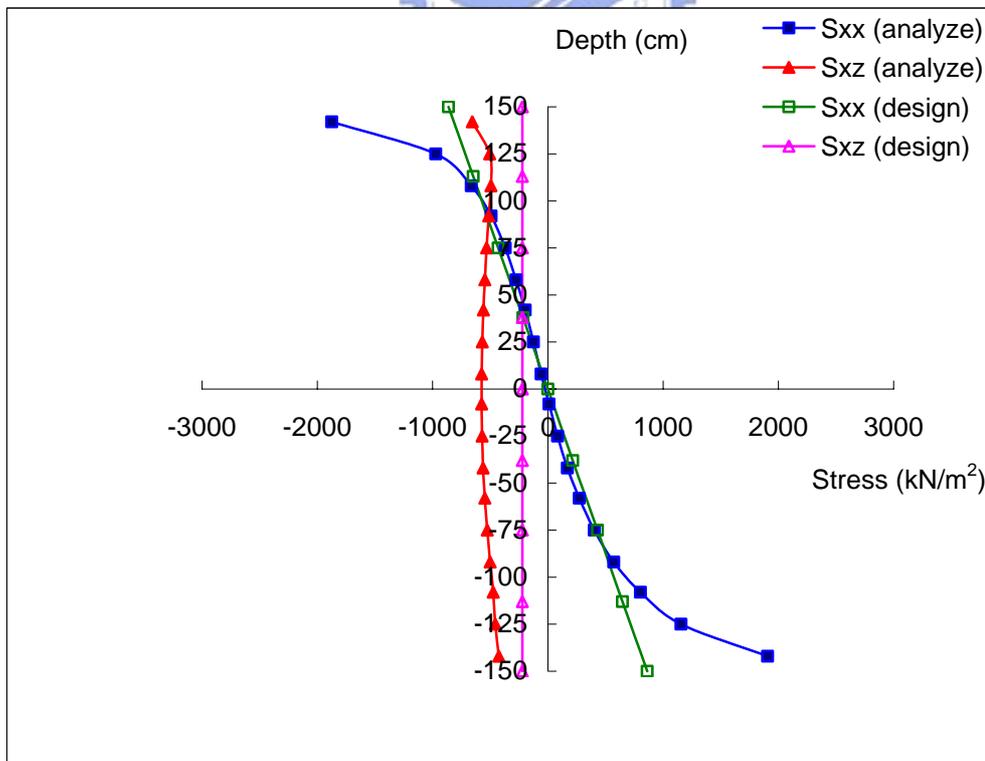


圖 4-47、Case C3-4-2 之應力分佈圖

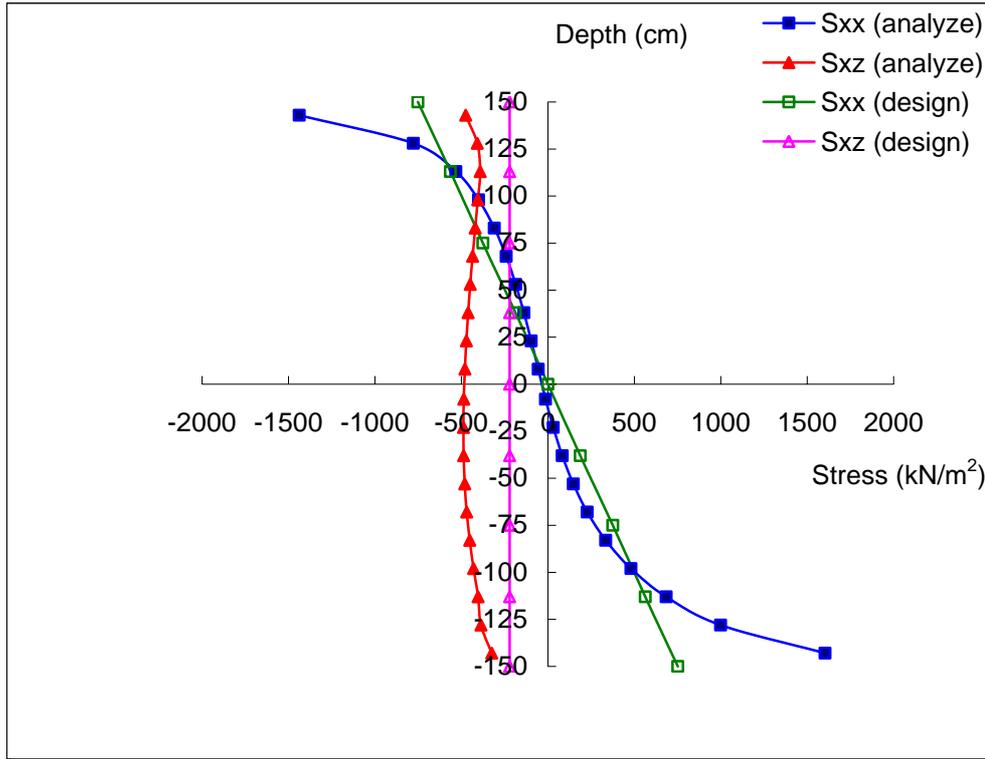


圖 4-48、Case C3-4-3 之應力分佈圖

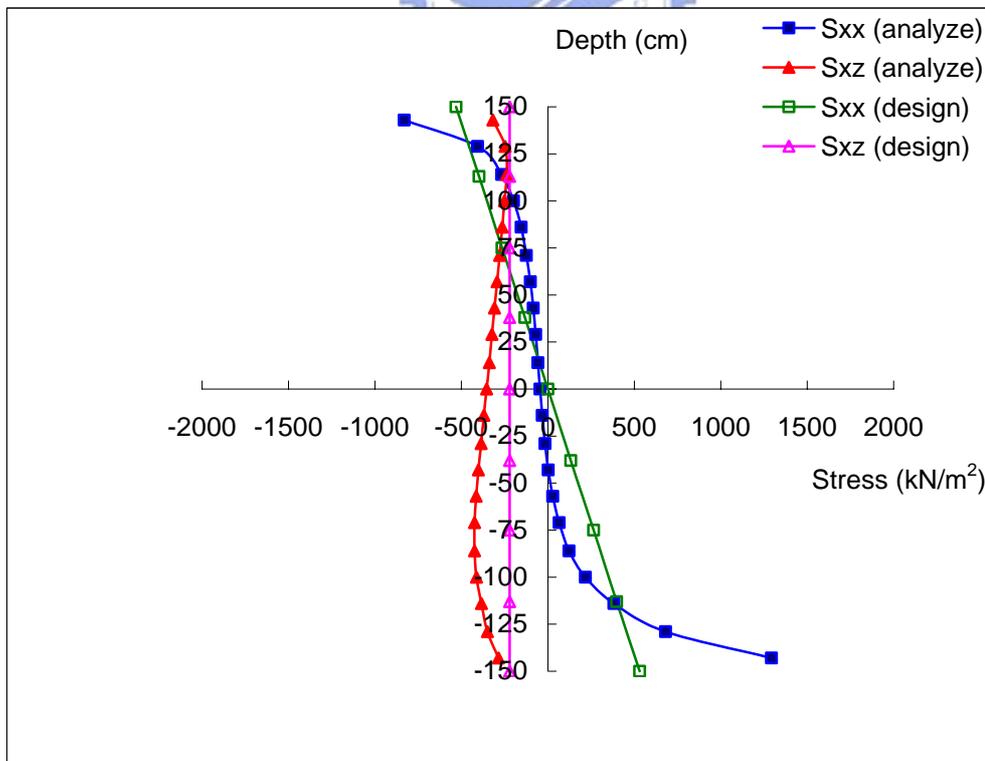


圖 4-49、Case C3-4-5 之應力分佈圖

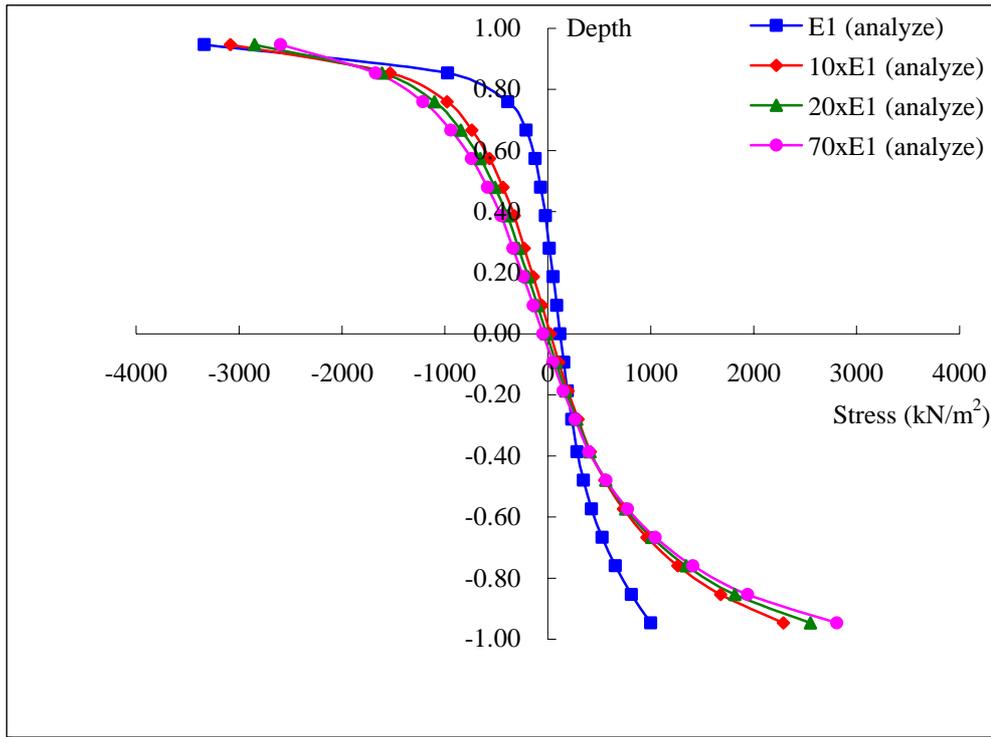


圖 4-50、同一厚度下不同 E 值之正應力曲線(H=1.5m)

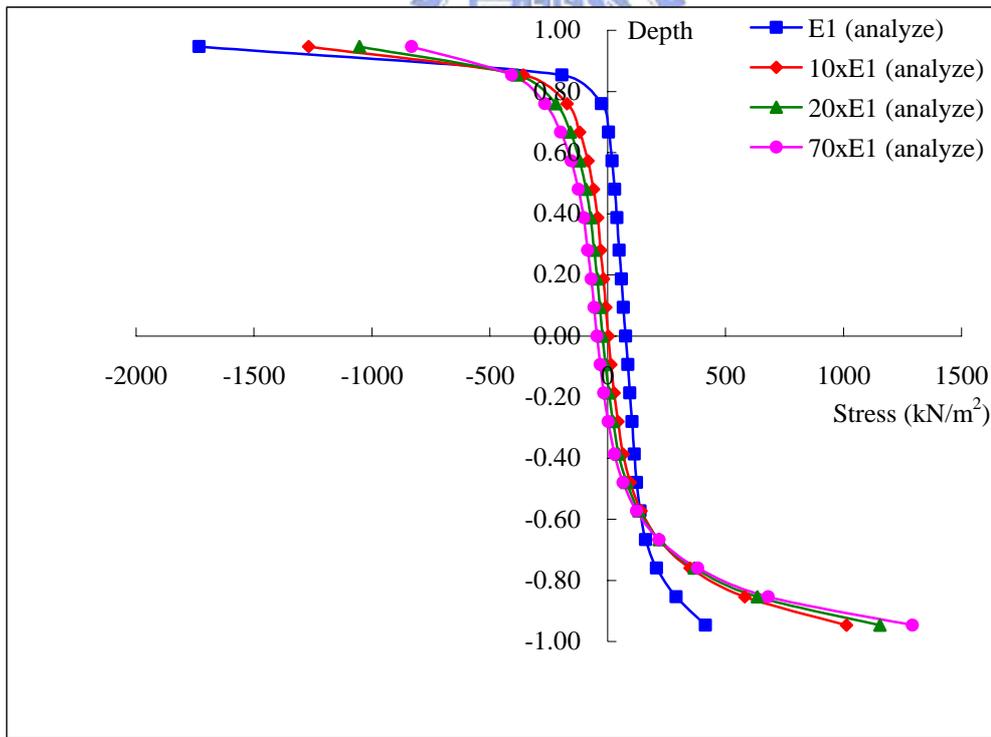


圖 4-51、同一厚度下不同 E 值之正應力曲線(H=3.0m)

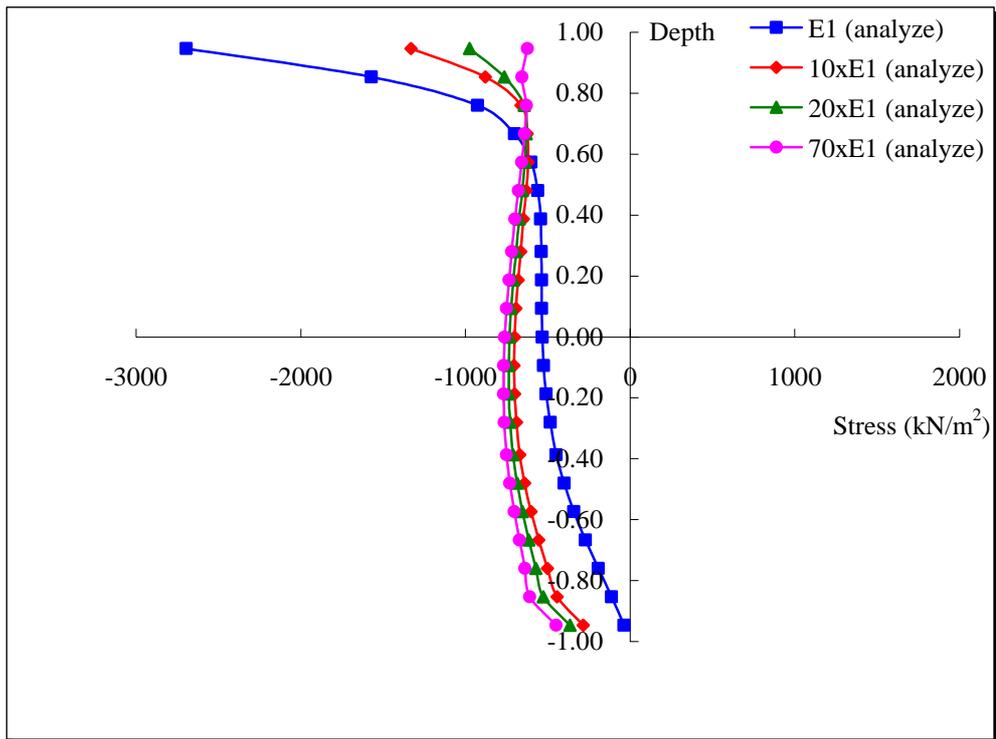


圖 4-52、同一厚度下不同 E 值之剪應力曲線(H=1.5m)

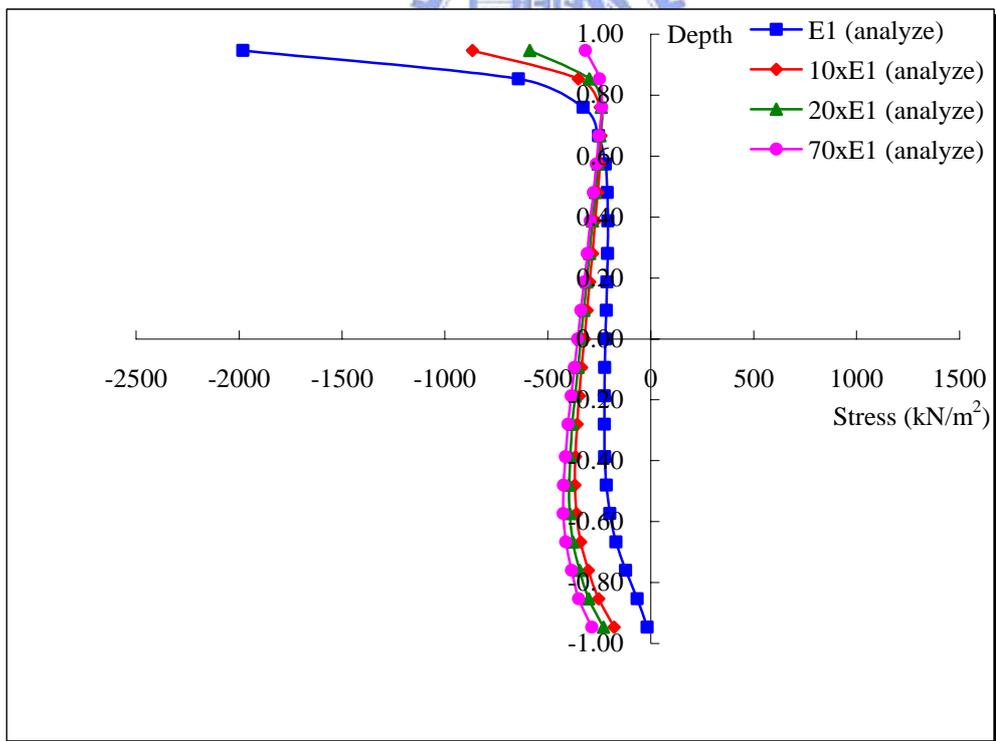


圖 4-53、同一厚度下不同 E 值之剪應力曲線(H=3.0m)

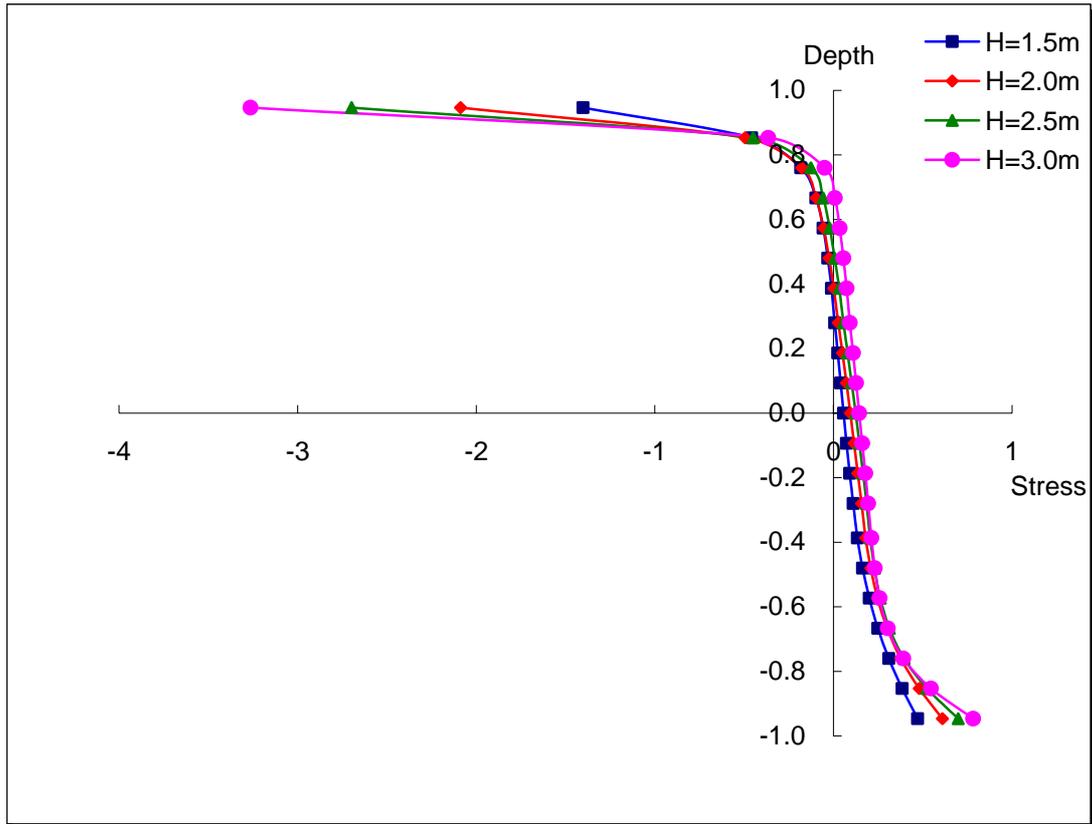


圖 4-54、正規化之同樣 E 值下不同厚度正應力曲線($E=E1$)

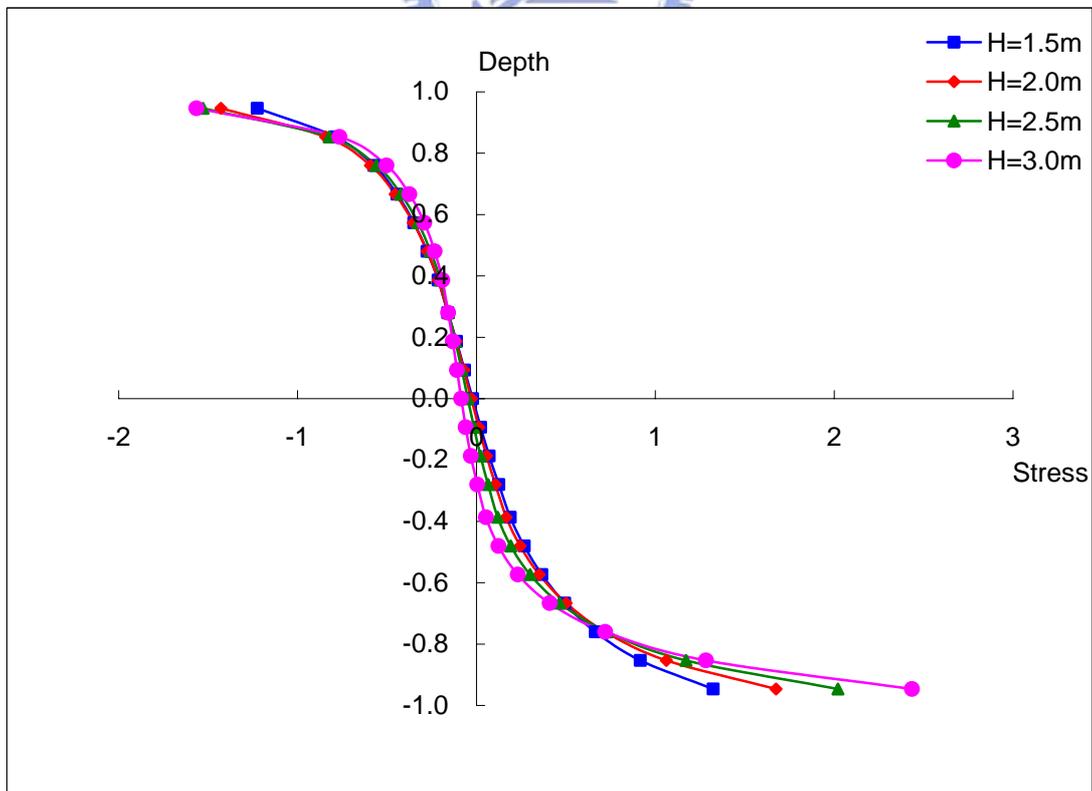


圖 4-55、正規化之同樣 E 值下不同厚度正應力曲線($E=70E1$)

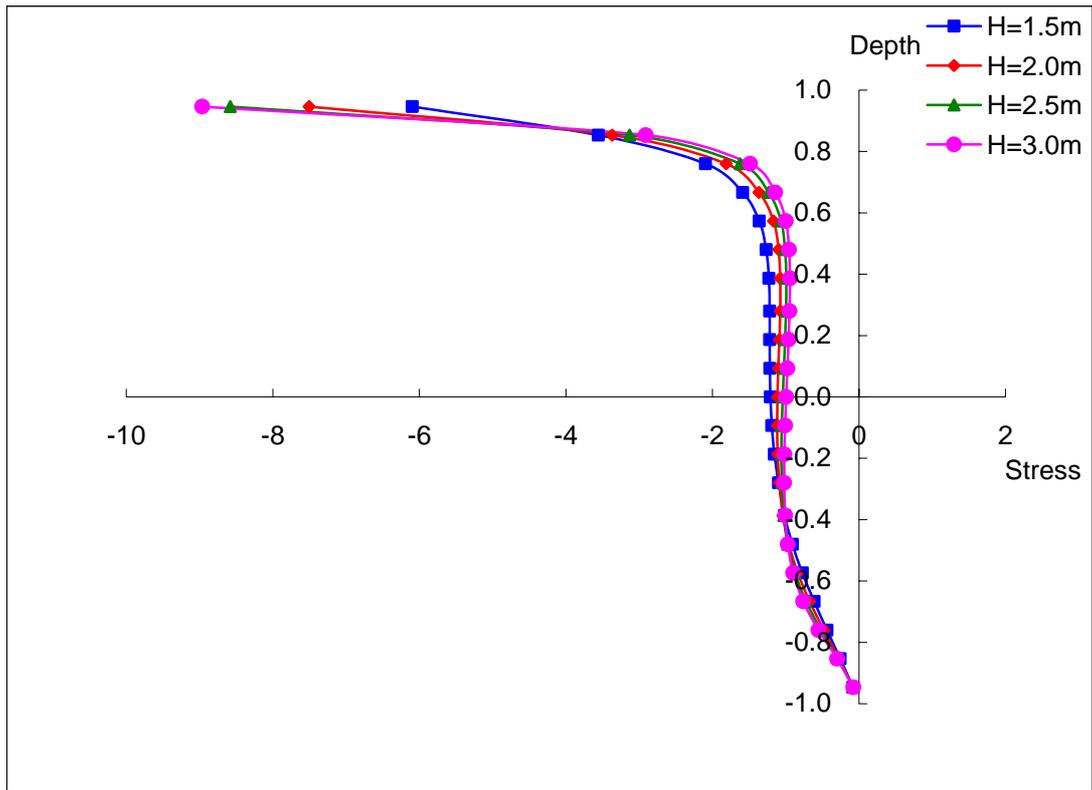


圖 4-56、正規化之同樣 E 值下不同厚度剪應力曲線($E=E_1$)

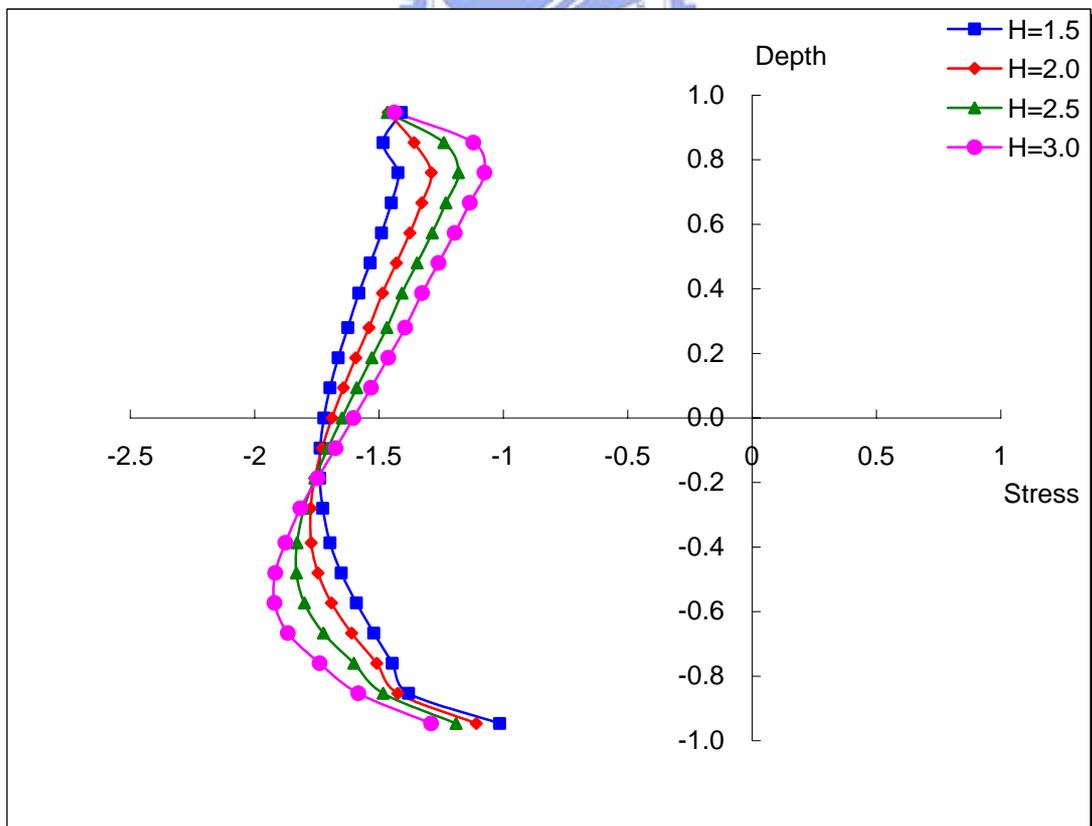


圖 4-57、正規化之同樣 E 值下不同厚度剪應力曲線($E=70E_1$)

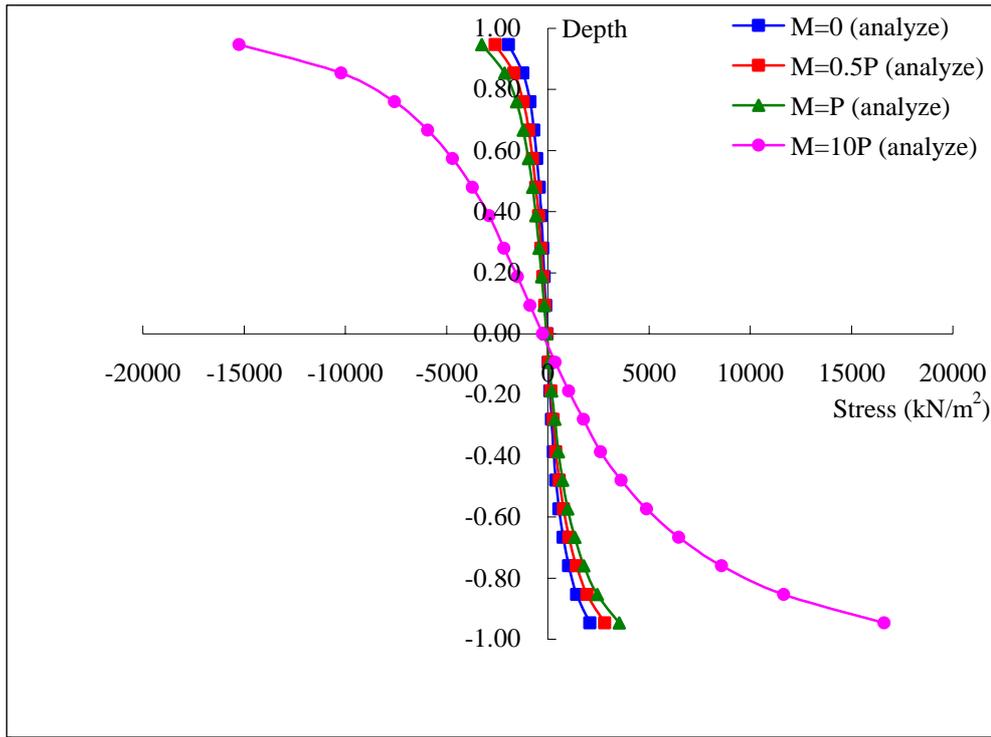


圖 4-58、同一厚度下不同 M 值之剪應力曲線(H=1.5m)

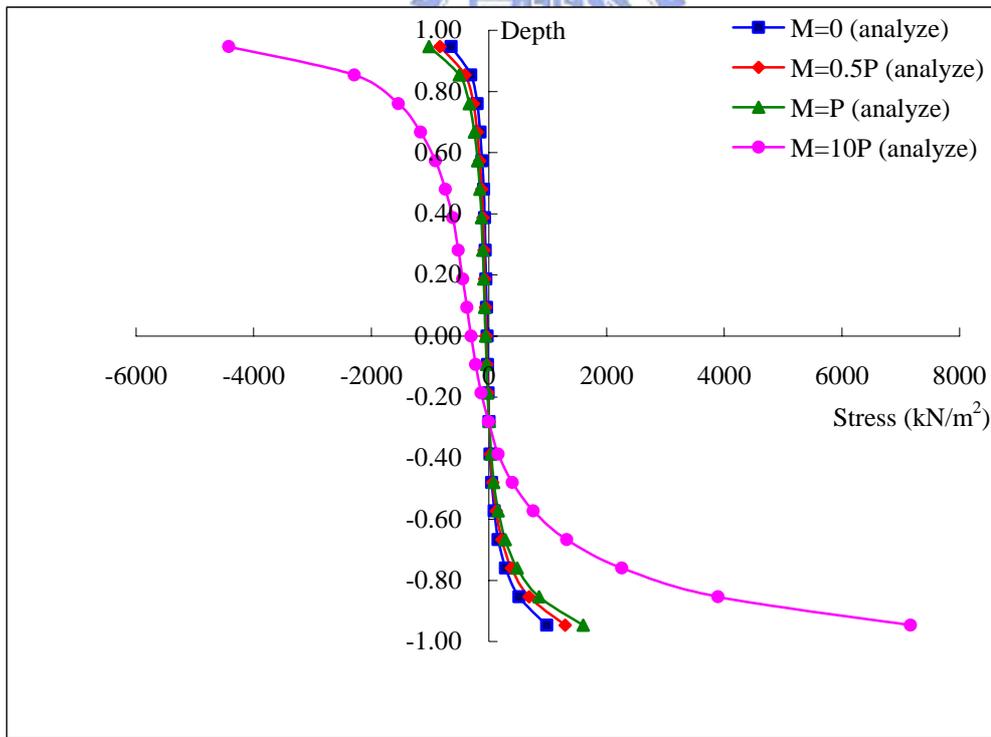


圖 4-59、同一厚度下不同 M 值之剪應力曲線(H=3.0m)

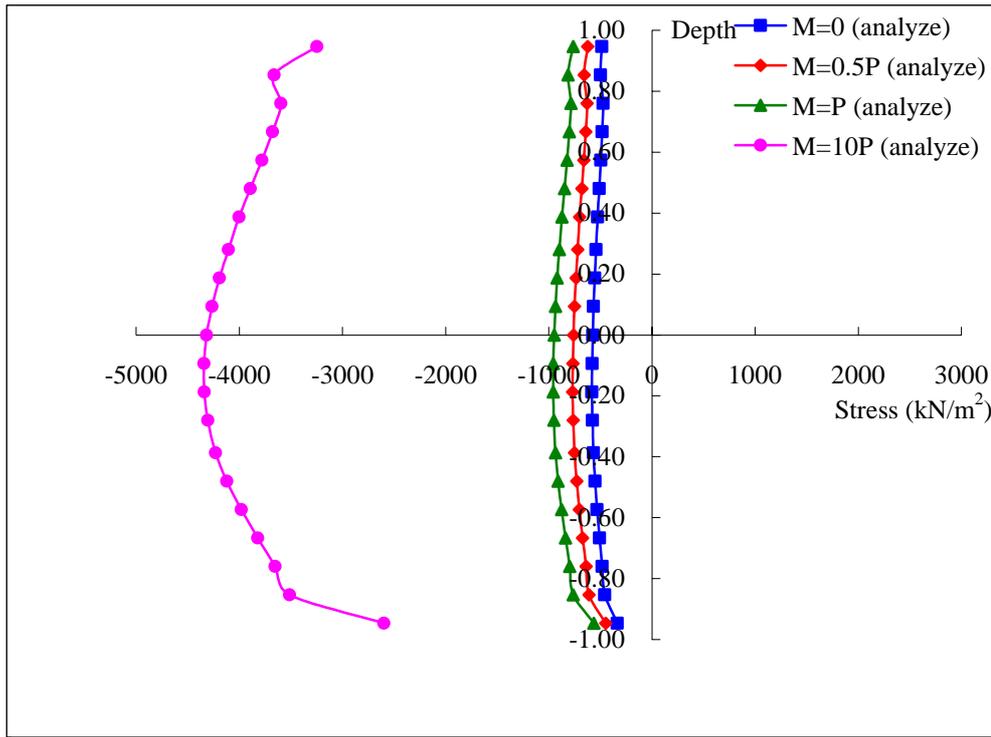


圖 4-60、同一厚度下不同 M 值之剪應力曲線(H=1.5m)

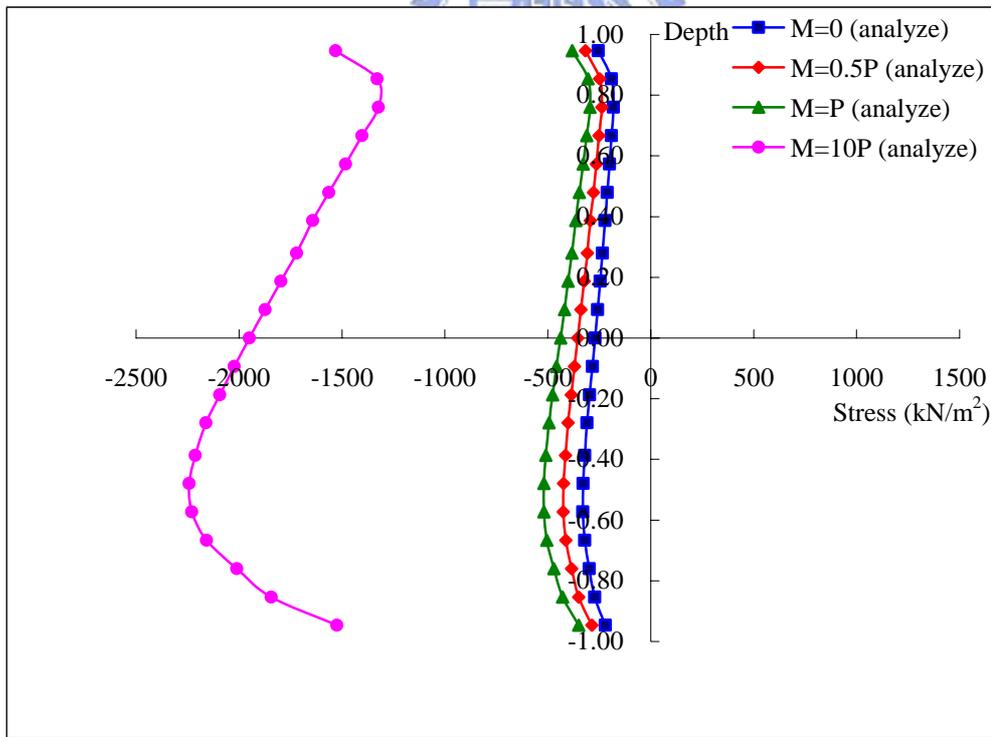


圖 4-61、同一厚度下不同 M 值之剪應力曲線(H=3.0m)

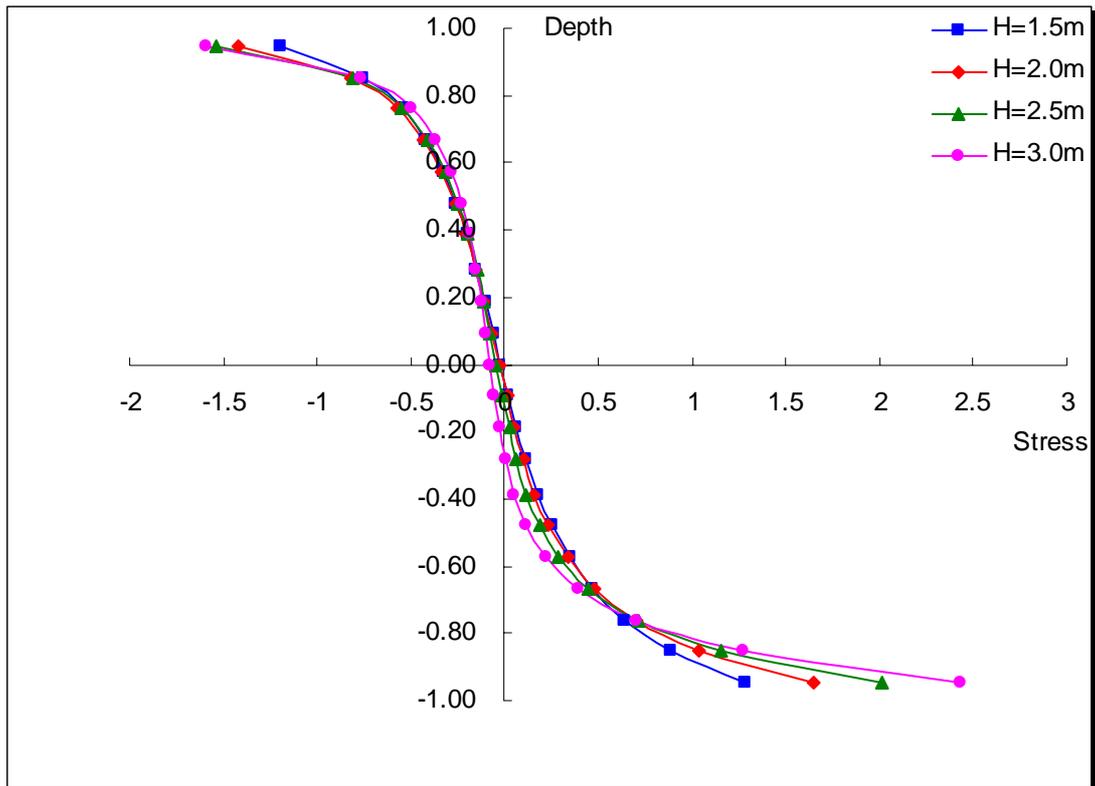


圖 4-62、正規化之同樣 M 值下不同厚度正應力曲線(M=0)

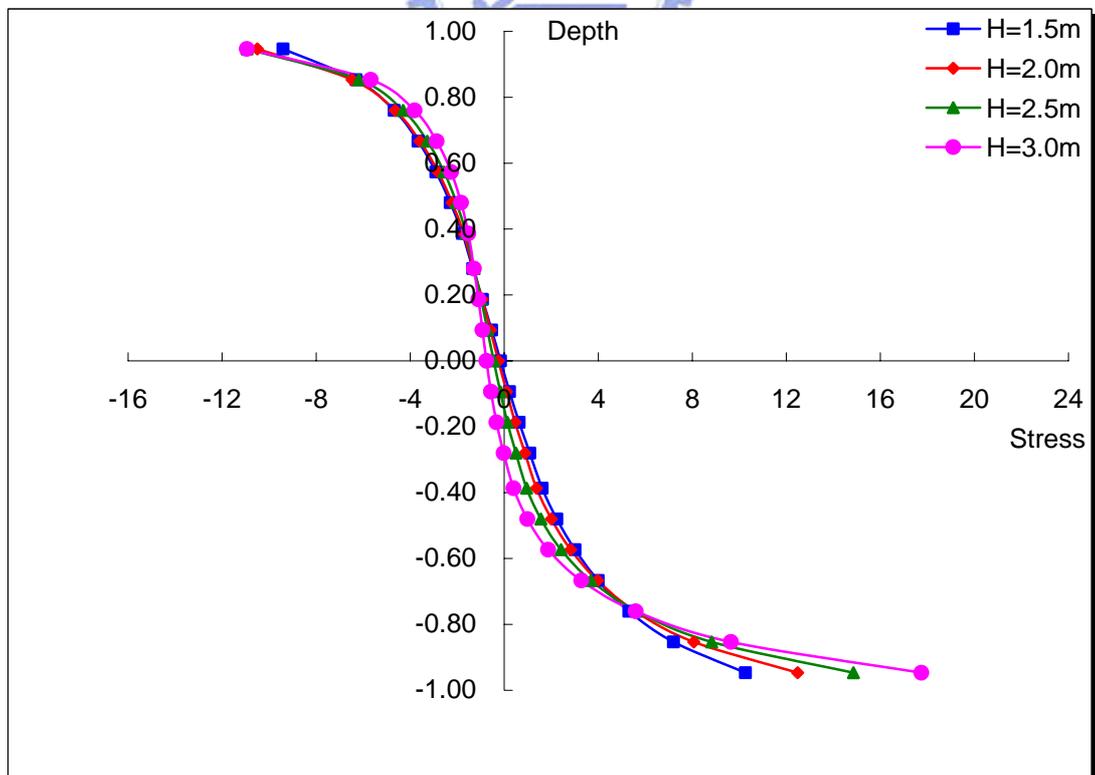


圖 4-63、正規化之同樣 M 值下不同厚度正應力曲線(M=10P)

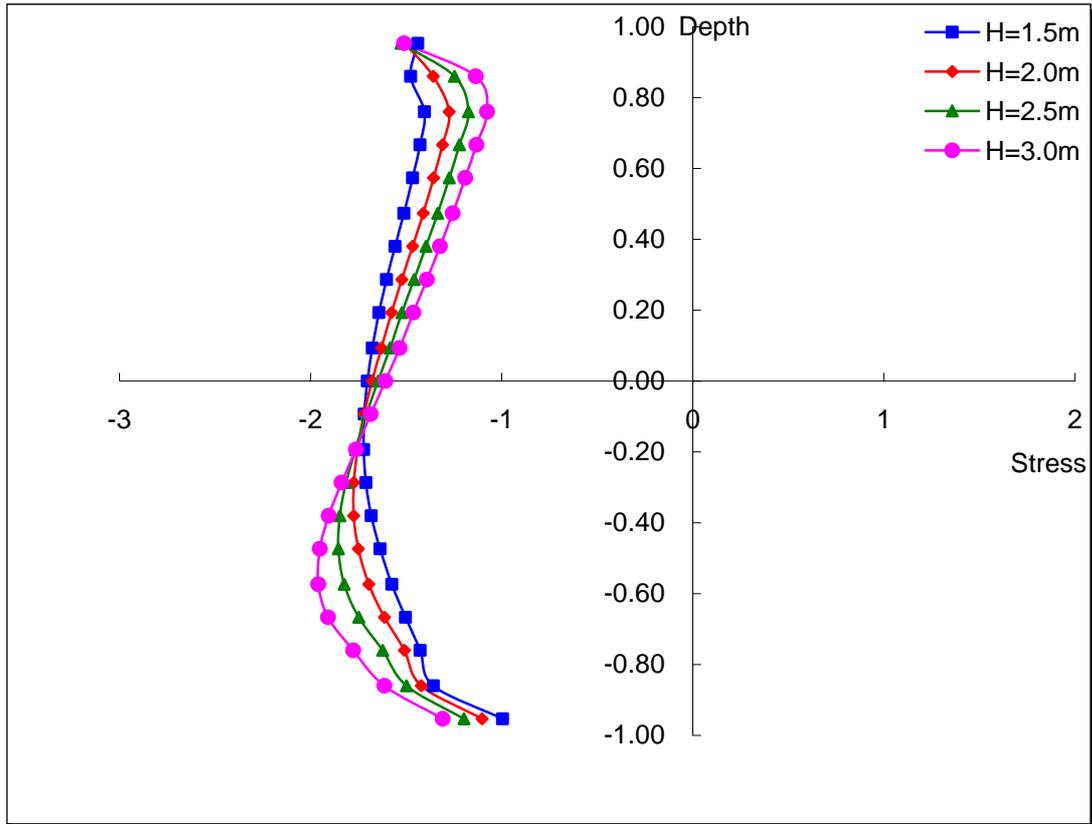


圖 4-64、正規化之同樣 M 值下不同厚度剪應力曲線($M=0$)

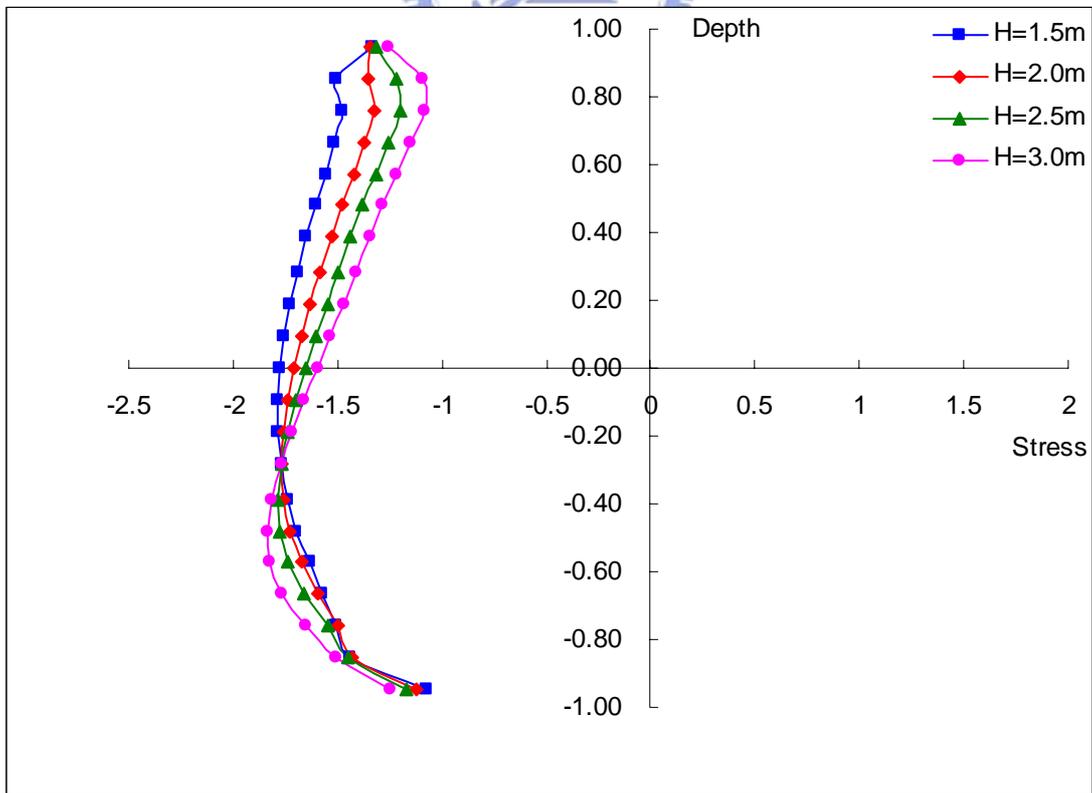


圖 4-65、正規化之同樣 M 值下不同厚度剪應力曲線($M=10P$)

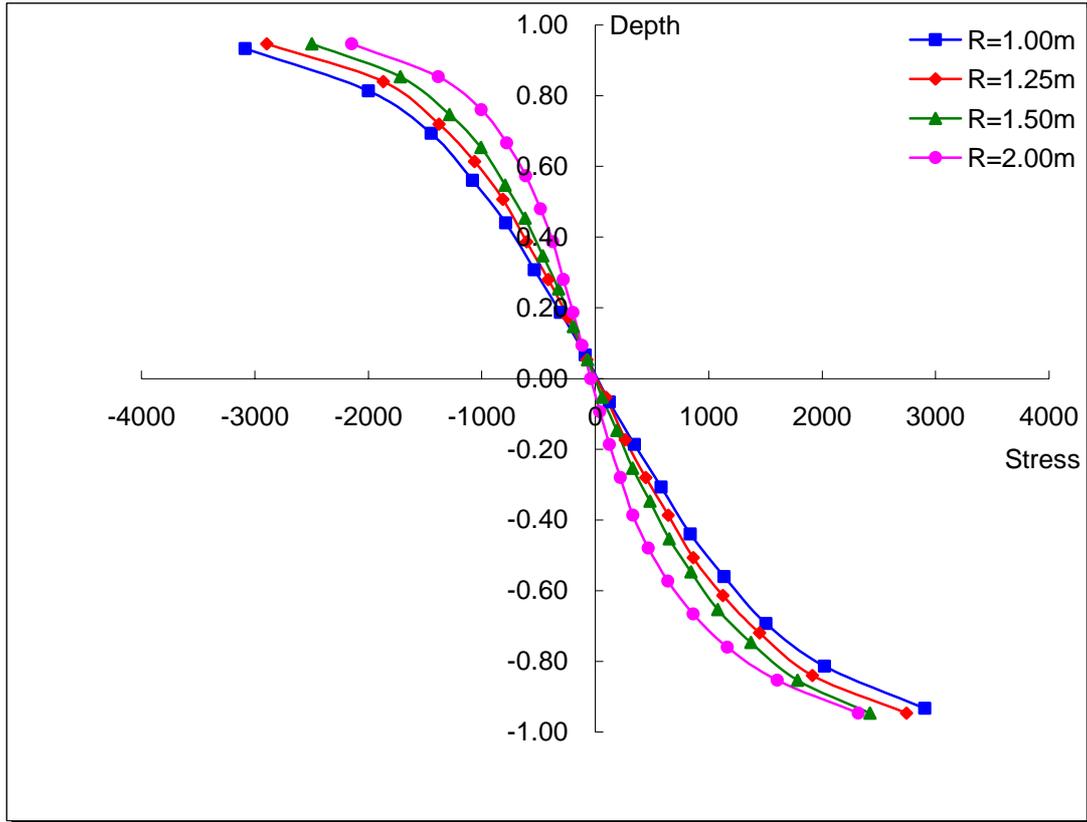


圖 4-66、正規化之同樣厚度下不同 R 值正應力曲線(H=1.5m)

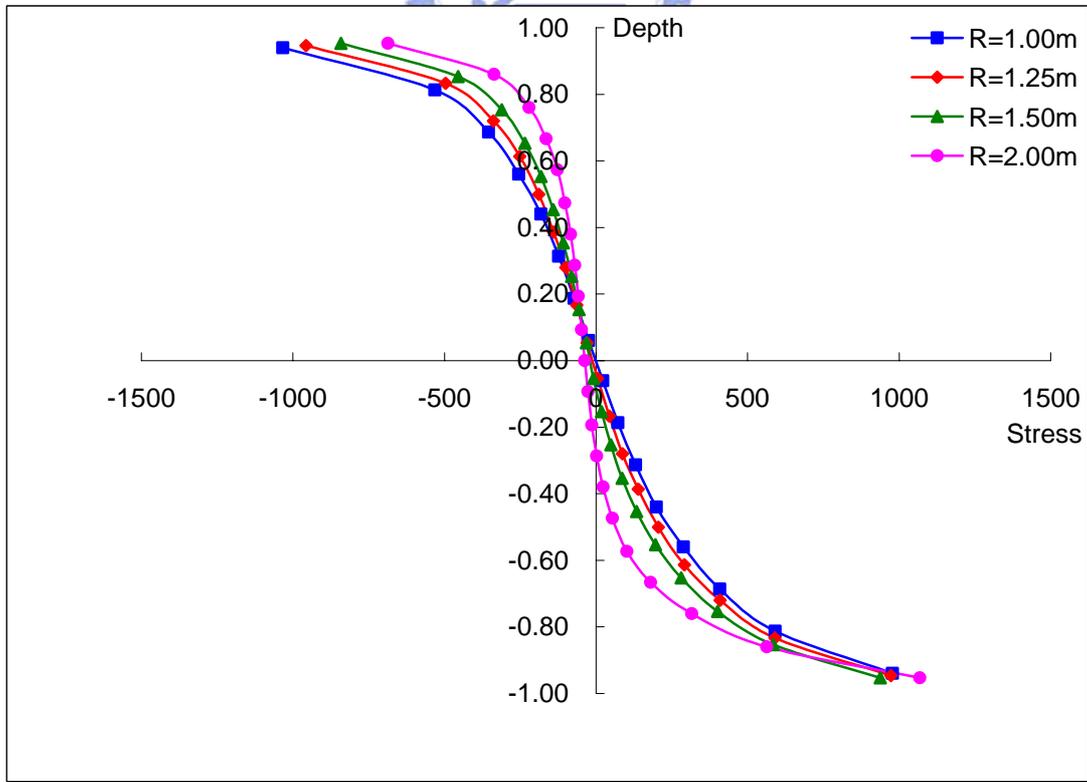


圖 4-67、正規化之同樣厚度下不同 R 值正應力曲線(H=3.0m)

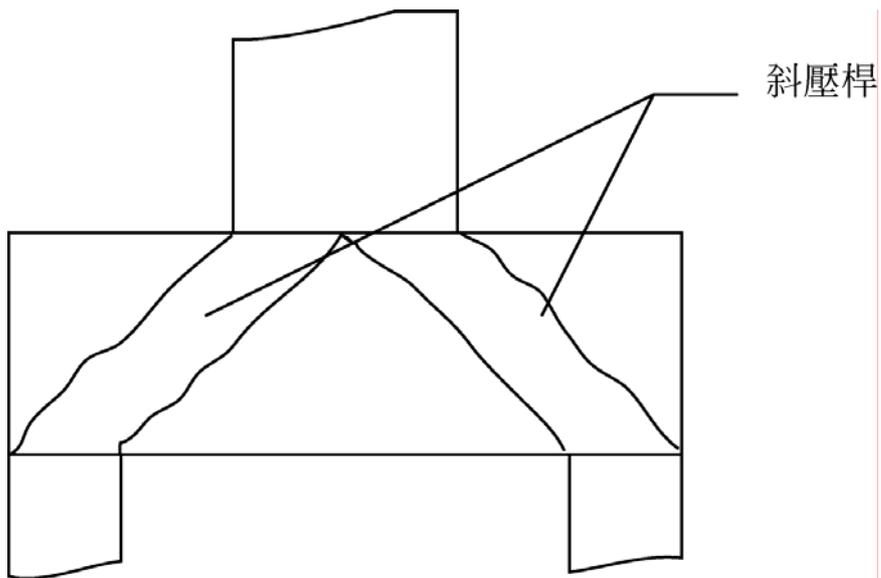


圖 4-68、沉箱頂版內部之斜壓桿行為

