

粉土細砂之動態行為研究

Dynamic behavior of silty fine sand

計畫編號：89-2218-E-009-099

執行期限：89 年 08 月至 90 年 07 月

主持人：黃安斌 國立交通大學土木工程系 教授

一、中文摘要（砂土液化、冰凍取樣、動態試驗、殘餘強度）

台灣中西部地區之部分砂土在集集地震期間有明顯液化之跡象，並導致附近結構物之破壞。本研究計畫屬於『集集地震土壤液化總評估研究 - 總計畫』其中十三個子計畫之一。此一整合型計畫之目的是對台灣地區顆粒性土壤液化之行為與潛能做一綜合評估研究，並對現有分析之方法提出必要改進之建議。本子計畫之主要任務是在位於台灣中西部之粉土細砂層中進行一系列之非擾動性取樣，並對這些試樣進行相關之試驗以決定其土壤液化行為之參數。非擾動性取樣將使用 Laval Sampler 以及 Slush Sampler 等方法。室內試驗之目的是決定粉土細砂之抗液化強度、阻泥係數、彈性模數遞減特性、以及殘餘強度等。將使用應力控制之往復式三軸試驗以決定砂土試體之抗液化強度。彈性模數以及阻泥係數與應變間之關係將使用局部應變量測，應變控制之往復式三軸試驗來決定而不採用傳統共振柱試驗之方法。殘餘強度之決定將使用不排水單壓三軸試驗來量測。本報告簡述計畫執行現況。

英文摘要（sand liquefaction, frozen sampling, dynamic test, residual strength）

Soil deposits in the central western regions of Taiwan showed evidence of liquefaction during the Chi-Chi earthquake. This proposed project is part of a coordinated group research effort on "Evaluation of Soil Liquefaction during Chi-Chi Earthquake" that includes 13 sub-projects. The objectives of this group research are to perform an overall evaluation on the liquefaction behavior of granular materials in Taiwan and to make necessary modifications in our current practice in assessing the potential of sand liquefaction. Tasks assigned to this sub-project are to obtain

undisturbed soil samples from the silty fine sand deposit in central western Taiwan and to perform laboratory tests on the undisturbed samples. Laval sampler and slush sampler will be used to take undisturbed silty sand samples from below the ground water table. Cyclic strength, damping characteristics, modulus degradation and residual strength of the undisturbed samples will be measured. Pneumatic cyclic triaxial tests will be performed to determine the cyclic strength. Dynamic characteristics that include damping ratio and modulus degradation will be determined using a strain controlled cyclic triaxial device. The triaxial cell is capable of measuring local strains with extremely fine resolution during the test. The conventional resonant column test method will not be used in this project. Residual strength will be determined from undrained triaxial compression tests on the undisturbed samples. This report briefly describes the status of the research.

二、計畫緣由與目的

台灣中西部地區之部分砂土，包括礫石與粉土細砂，在集集地震期間有明顯液化之跡象，並導致附近結構物之破壞。美國與日本於 60 年代即對砂土液化相關之議題從地質與大地工程之角度進行密集之研究。大地工程方面之研究基本上可以分成兩個方向。其一是採用取樣與室內動態剪力試驗來決定砂土在液化潛能與行為分析中所需之參數，另一種研究方法則是採用現地試驗。本研究將專注於室內動態剪力試驗。

砂土重要之動態參數包括抗液化強度、阻泥係數、彈性模數遞減特性、以及殘餘強度等。研究指出這些砂土之參數受砂土顆粒之結構、粒徑分佈、礦物含量與年歲等因素之影響非常明顯（Ishihara, 1993）。

本研究之主要目的是嘗試使用 Laval Sampler 與類似 Slush Sampler 之方法在指定之試驗站取樣，然後進行一系列之室內應力與應變控制之三軸試驗。這些試驗之目的在確定天然砂土勁度（剪力模數）及阻尼係數與應變之關係、飽和情況下往復受力抗液化之強度、穩定狀態曲線、以及其殘餘強度之特性。結果之分析將注重粉土含量、試體擾動、顆粒結構、粉/黏土與細砂微小互層（microlayering）對粉土細砂行為之影響，為台灣西部粉土細砂建立一套完整之數據做為未來分析之用。本研究之結果將與子計畫十二『台灣西部粉土質砂液化行為及評估準則之研究』比較，評估不同取樣方法對試體品質之影響。室內試驗之結果與現地試驗 SPT 與 CPT 之結果對應，建立 N 或 q_c 與抗液化強度間之關係。本系列之試驗結果為其他子計畫所執行之現地試驗如 DMT、PMT 以及剪力波速試驗提供參考數據。

本計畫進行之步驟與總計畫配合，將分三階段執行。第一階段（89 年 8 月至 90 年 7 月）以彙整集集地震期間土壤液化之紀錄以及相關探勘、調查結果資料為主，選擇試驗站場址並規劃鑽探取樣之數量與位置，確認其後第二階段試驗與分析研究內容之細節。本研究所需之試驗設備之購置、租用，初步之鑽探測試以及儀器設備必要之維修也將於第一階段內完成。

三、計畫執行狀況

在本研究之總計畫中已選定三所試驗站，兩處在員林一處在南投，這些試驗站之細節在總計畫報告中敘述。本報告接專注於試驗儀器之發展狀況。

土壤模數（剪力或楊式）與阻尼係數為大地工程動態行為分析中重要之參數，試驗結果通常以割線模數或阻尼係數與應變之關係來展示，這些關係可以統稱為土壤非線性動力性質。為了分析的需求，非線性動力性質試驗所必須涵蓋之應變範圍通常在 $10^{-4}\%$ 至 1.0% 之間。早期因受限於試驗儀器之功能，應變 $10^{-2}\%$ 以下之動態土壤行為以共振柱試驗來量測，當應變大於 $10^{-2}\%$ 時則使用另一試體進行動態扭剪、單剪或三軸試驗。由於應力路徑或/和試體間之差異，

此一程序不但需要許多昂貴之試驗設備而且其模數和阻尼係數與應變之關係曲線常在試驗方法更換之處發生不連續的現象。因此使用單一試體在所需之大應變範圍下以同樣之受剪模式來進行土壤非線性動力性質試驗，可以避免前述之問題並可改進試驗之品質。作者採用高精密度、高扭力輸出之步進馬達作為載重單元輸出及控制，並將載重原移入三軸室內基座上直接量測受測試體所承受之載重，配合非接觸式趨近儀作為微小位移之量測以求得局部應變量，進而求得大應變範圍下之連續土壤動態參數。本文敘述作者所發展之試驗儀器與使用方法並展示其結果。Toki et al. (1995) 綜合過去十多年歐洲、美國及日本使用局部應變量測技術之經驗而提出充分之證據指出，只要應變量相似，大地工程材料之彈性模數不會因為靜態或動態受力而有所差別。Toki et al. (1995) 因此建議，以局部應變量測之往復式三軸試驗完全的取代傳統共振柱試驗。

綜觀現有單一試體大應變範圍下土壤動態試驗之方法，必須包含以下幾個要素：

- A. 載重與位移監測儀器必須直接與試體結合，也就是做局部（local）之量測，而不能將這些儀器安裝在三軸室外。否則在極小應變之情況下，監測儀器之誤差可能使得土壤勁度之量測數值產生數倍乃至於數十倍之誤差（Burland, 1989）。
- B. 位移監測儀器必須有足夠之解析度，Kokusho (1980) 所敘述之非接觸式趨近儀可以量測 0.1μ 以下之位移。載重元也必須安置於三軸室內，其載重範圍不可過大以保持必須之解析度。與監測儀器配合之訊號處理系統也必須有高度之穩定性。

試驗裝置必須能夠穩定的對試體施加往復的載重，傳統能夠滿足此一要求之方法包括氣壓（pneumatic）與閉路伺服控制（close loop servo controlled）油壓（例如 MTS）系統。由於其高壓縮性，氣壓加載系統比較適合做應力控制之試驗。伺服控制油壓系統雖然可以做應力或應變控制之試驗，但是當位移量低於 0.1mm 時一般之伺服控制油壓系統無法達到穩定之控制。因為這些原因，若使用氣壓或油壓加載系統在小應變情況下進行動態試驗通常只限於應力控

制試驗。此方法之主要缺點是必須在事先估計土壤之勁度來決定動態應力之範圍，若估算錯誤則會造成應變之過大或過小。因此應變控制之動態試驗是比較理想之方法。傳統單向受載 (monotonic loading) 試驗多用電動馬達與減速齒輪配合對試體以應變控制之方法加載。但是這種系統無法從事穩定的動態加載，因為在馬達反向時減速齒輪間之空隙會產生背隙 (back lash) 會暫時失控。

應變控制之動態三軸試驗

本三軸實驗裝置之主要功能是進行應變控制之動態三軸試驗，以決定試體極端變形量範圍在 $10^{-4}\%$ 至 1% 間，往復受載情況下之彈性模數與阻尼係數。依據 Toki et al. (1995) 之建議，使用同一試體來決定所需應變範圍內之彈性模數與阻尼係數。本試驗採用交通大學大地工程試驗室自行研發之應變控制動態三軸試驗裝置 (Huang et al., 1994)。三軸試驗裝置之加載系統是由一高解析度，高扭力之直接驅動步進馬達所組成。馬達之最大扭力為 220 N-m，每旋轉一圓周細分為 614,400 步，可由步進的數目、旋轉的方向與速度來控制馬達乃至於試體受力之方向與變形速率。由於此步進馬達扭力夠大而無須變速齒輪，馬達可直接透過高精密度之滾珠螺桿 (ball screw) 將旋轉動能轉換成線性動能 (馬達每旋轉 5 圈，滾珠螺桿移動 25.4mm)，而提供動態三軸試驗所需之動力。此一設計之重點在於施力方向反轉時不會產生背隙，而每 1mm 之移動，使用本加載系統可分成約 120,925 ($614400 \times 5 / 25.4$) 步來控制，因此有足夠之解析度在所需之應變範圍內進行試驗。

三軸試體直徑 70 mm 高度 160 mm，使用夾具分別將兩組非接觸式趨近儀 (non-contact proximitor) 固定於三軸試體上，做局部應變量測，如圖 1 所示。所使用之非接觸式趨近儀量測範圍 2 mm，解析度在 $0.1 \mu\text{m}$ (10^{-6}mm) 以下。軸向受力採用安裝於三軸室內，最大量測範圍 1000 kg 之載重元來量測，軸向變形同時也使用安置於三軸室外，最大量測範圍 50 mm，解析度 0.05 mm 之位移轉換器 (LVDT)。圖 2 顯示此三軸室之照片。

在進行應變量低於 $10^{-10}\%$ 動態三軸試驗時，組非接觸式趨近儀、載重元與孔隙水壓計之類比訊號分別與四具解析度為 22 bit 之 HP 數位電表做類比/數位轉換與資料擷取，所擷取之資料透過

GPIB 介面傳輸至電腦。因為一具數位電表只負責一個監測儀器之資料擷取，所以這四個數據是同步圖取而無時間差的。這些數位電表有極高之訊號穩定度但是其類比/數位轉換速率每秒只有三次，因此動態試驗之頻率最高只能設在 0.2 Hz。

試驗程序與結果

本報告以一系列夯實砂土動態試驗之結果來展示此試驗裝置之功能。砂土的來源是新竹縣寶山第二號水庫蓄水區內地表取得風化之粉土砂岩經碾碎後而成。本砂土之比重為 2.67，含有約 10% 之非塑性細料，其統一土壤分類為 SP-SM。以 Standard Proctor 方法做夯實試驗所得之最佳含水量為 13.8%，最大乾密度 ($\gamma_{d\max}$) 為 1.76 g/cm^3 。試體之相對夯實度 98%，以三個試體分別在有效圍壓 $\sigma'_c = 1、3、5 \text{ kg/cm}^2$ ($\sigma'_c = 100、200、300 \text{ kPa}$) 下進行應變控制之動態三軸試驗。試體準備方式採用搗實法 (使用一根直徑 20mm 之不鏽鋼棒作為夯錘)，將具有最佳含水量之砂土分三層夯入鋼模，使試體之乾密度達 $\gamma_{d\max}$ 之 98%。試體之飽和程度以 Skempton 之 B 值進行檢驗，本系列試驗中之 B 值都在 0.92 以上。試體在飽和壓密完成之後將連接試體之排水閥關閉 (不排水試驗)，於設定之應變範圍內以 0.2 Hz 之速率往復受載 20 來回。在往復試驗完成之後將排水閥打開，讓超額孔隙水壓回復平衡，然後進行下一應變範圍之試驗。每一試體使用 3 至 4 種應變範圍做動態三軸試驗。圖 3 顯示 $\sigma'_c = 100 \text{ kPa}$ ，最大軸向應變介於 $3 \times 10^{-4}\%$ 至 $7 \times 10^{-10}\%$ 間所量得之應力應變曲線環 (stress-strain loop)。

試體之彈性模數與阻尼係數是根據往復受載達到穩定情況下 (20 來回受載後期) 所得之應力應變曲線環 (stress-strain loop) 來計算。因為三軸試驗是採用軸向之往復受載，所求得之彈性模數稱之為對應楊式模數 (equivalent Young's modulus, E_{eq})，如圖 4 所示。

$$E_{eq} = \frac{(\sigma'_a - \sigma'_c)}{(\varepsilon_a)_{SA}} \quad (1)$$

其中：

σ'_a = 三軸試體所受之軸向有效應力

SA 指的是單向波幅 (single amplitude)，也

就是往復應變最大應變幅度（從極限壓力到極限張力）之一半。阻尼係數（damping ratio, h ）之計算為

$$h = \frac{1}{2\pi} \frac{\Delta W}{W_1 + W_2} \quad (2)$$

其中 ΔW 、 W_1 、與 W_2 之定義如圖4所示。在報導彈性模數與應變關係時大多數文獻都以剪力模數與剪應變來展示。為便於數據之分析以及與其他文獻中所報導之數據相比較，在本系列試驗中所量得之 E_{eq} 與軸向應變 (ϵ_a) 將以下列方式分別轉換成對應剪力模數 (equivalent shear modulus, G_{eq}) 與剪應變 (γ)。

$$G_{eq} = \frac{E_{eq}}{2(1+\nu)} \quad (3)$$

$$\gamma = 1.5\epsilon_a \quad (4)$$

其中：

ν = 土壤試體柏松比，在飽和情況下假設為0.5

圖5展示殼層材料正規化剪力模數 (G_{eq}/G_{max}) 隨剪應變 (γ) 遞減之關係。圖6顯示殼層材料阻尼係數, h 與 γ 之關係。

為了準備進行應力控制三軸試驗以決定砂土抗液化強度，主持人也同時將上述之三軸試驗制動系統加以改良。原步進馬達可以轉換成為伺服馬達，其輸出之扭力與控制電壓成正比。此伺服馬達制動系統與壓力元以及馬達控制器、資料擷取系統之結合，形成一閉路伺服控制系統。此系統之最大優點是動態應力之穩定性不會隨砂土接近液化時而逐漸失控，這是傳統氣壓開放迴路式動態三軸試驗系統之重大缺失。圖7展示使用伺服控制三軸系統，對試體 ($D_r = 70\%$ Ottawa sand) 施加規則正弦波，所做試驗之應力應變與時間之關係。圖8為同樣試體施加 random loading 所得之應力應變與時間之關係。

四、參考文獻

Burland, J.B., 1989, "Small is Beautiful-the Stiffness of Soil at Small Strain," Canadian Geotechnical Journal, Vol.26, No.4, pp.499-516.

Kokusho, T., 1980, "Cyclic Triaxial Test of

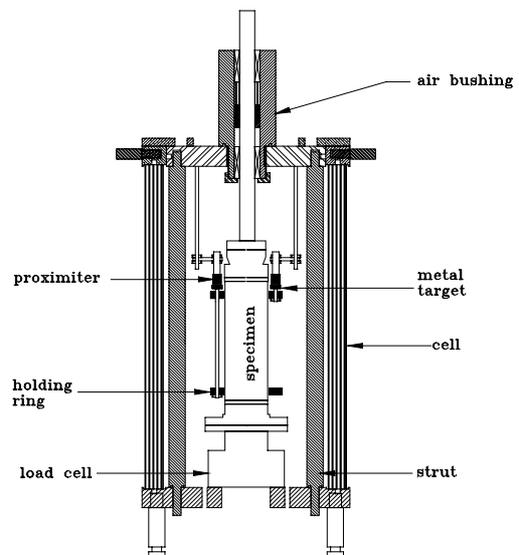
Dynamic Soil Properties for Wide Strain Range," Soils and Foundations, Vol.20, No.2, pp.45-60.

Huang, A.B., Hsu, S.P., and Kuhn, H.R., (1994) "A Multiple Purpose Soil Testing Apparatus," ASTM Geotechnical Testing Journal, Vol.17, No.2, pp.227-232.

Ishihara, K., 1993, "Liquefaction and Flow Failure during Earthquakes," Geotechnique, Vol.43, No.3, pp.351-415.

Toki, S., Shybuya, S., and Yamashita, S., 1995, "Standardization of Laboratory Test Methods to Determine the Cyclic Deformation Properties of Geomaterials in Japan," Proceedings, the 1st Pre-Failure Deformation of Geomaterials, Sapporo, Japan, Vol.2, pp.741-784.

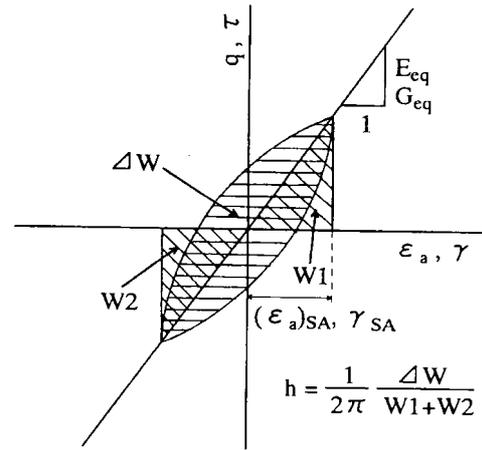
五、圖表



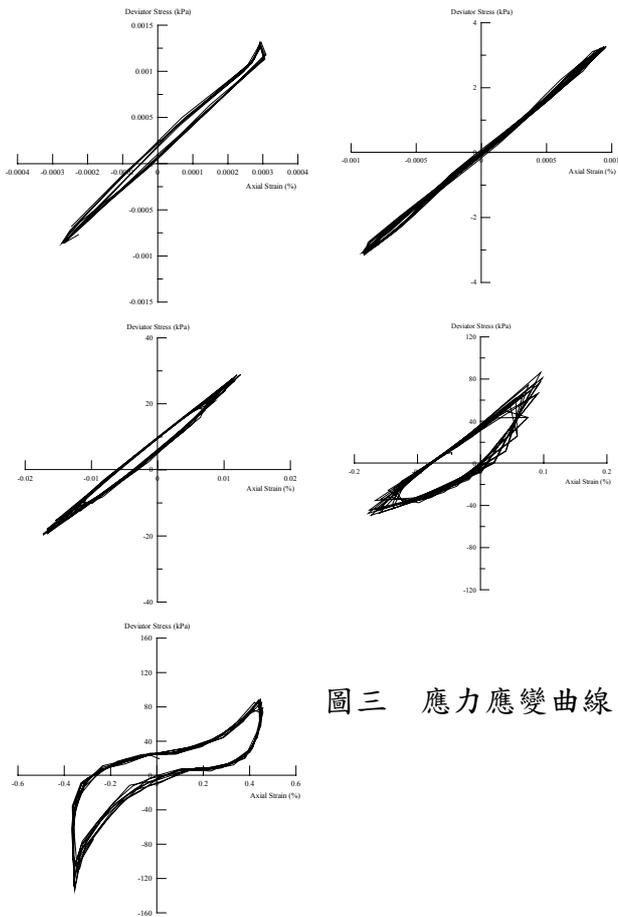
圖一 三軸室內局部應變量測之示意圖



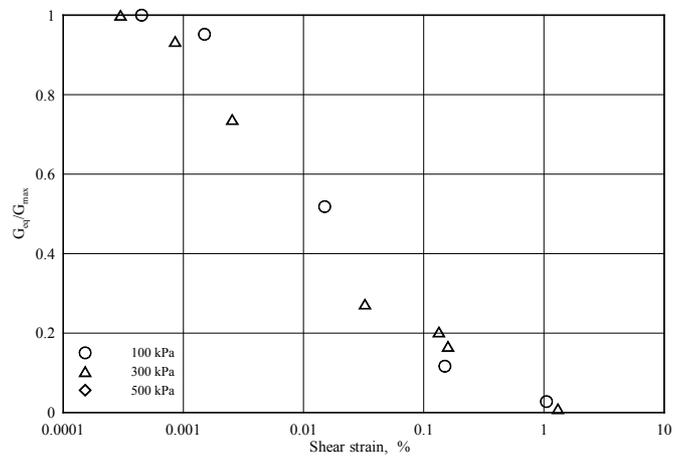
圖二 應變控制往復式三軸試驗裝置



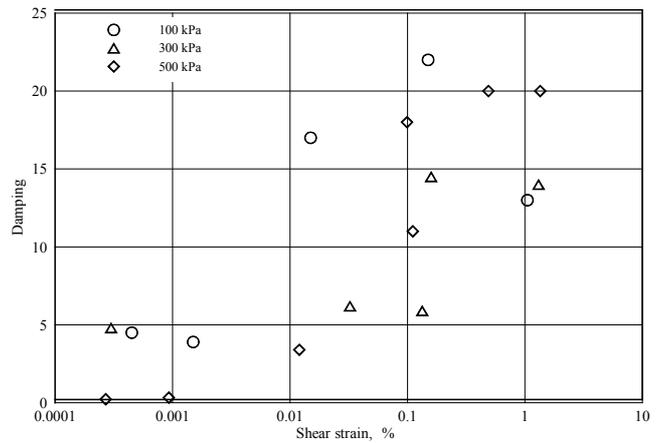
圖四 對應楊氏模數與阻尼係數之計算



圖三 應力應變曲線



圖五 正規化剪力模數隨剪應變遞減之關係



圖六 阻尼係數與剪應變之關係。

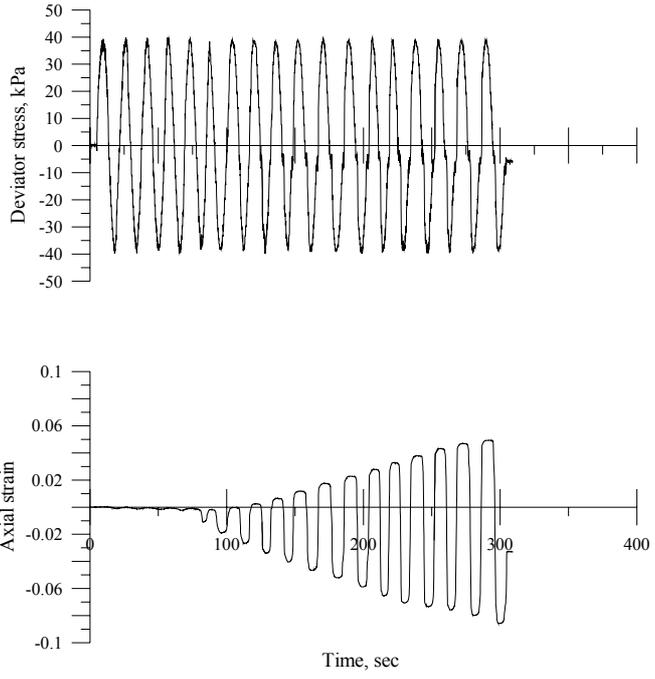


圖 7 正弦波試驗之應力應變與時間關係

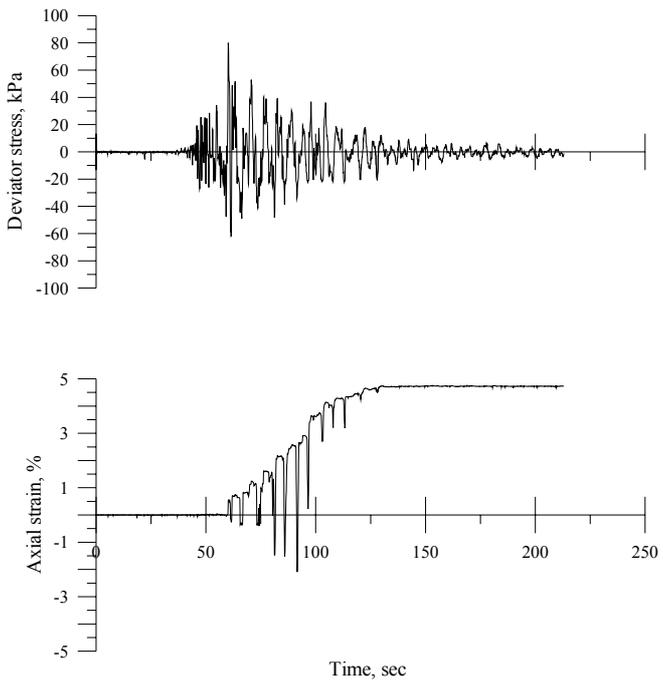


圖 8 Random loading 試驗應力應變與時間關係

