

深開挖工程對鄰近隧道之影響
INFLUENCE OF
DEEP EXCAVATION TO NEARBY TUNNELS

陳鴻濤，彭嚴儒
H. T. Chen and Y. R. Peng

原著載於營建知訊第 178 期
1997 年 11 月，第 16~23 頁

*Reprinted from Construction News Record
Taipei, Taiwan
November, 1997, No. 178, pp.16~23*

深開挖工程對鄰近隧道之影響

彭嚴儒

陳鴻濤

亞新工程顧問公司

台北市政府捷運工程局

摘要

本文資料為亞新工程顧問公司擔任捷運局大地專業顧問期間所整理而得，且為台北捷運系統施工一系列有關大地工程文章之一部份。近來由於地下工程大規模興建，使得彼此間的影響程度日益嚴重，尤其是後施工者對既有構造物之影響不得不加以重視。本文主要探討深開挖工程對鄰近隧道之影響。開挖對隧道襯砌之影響自然與連續壁之最大位移及兩者之距離關係密切，此點勿庸置疑。此外，分析結果顯示，當開挖區相當接近隧道時，以最大位移正常化後之隧道襯砌應變與應力隨連續壁變形之曲率增加而增加，但當開挖區距離隧道有相當距離時則反是。

一、前言

台北都會區因衛生下水道及捷運工程大量興建地下隧道，使得地下隧道密佈，為避免爾後的開挖作業，影響隧道結構安全，必須就開挖作業對既有隧道結構

之影響加以探討，如圖 1 所示。本文利用 FLAC 程式 (Fast Lagrangian Analysis of Continua)，以強制壁體變形方式，來模擬因深開挖對現有隧道所產生之影響。

二、數值分析

FLAC 是一個以有限差分法分析土壤結構互制問題的電腦程式。如同所有的數值分析程式一般，FLAC 亦有其先天性的限制。一般而言，數值分析對加壓狀況，如填土以及基礎承載等問題較能掌握，對解壓狀況，如開挖甚至地上擋土壁之側向位移等問題，較難得到滿意的結果。從另一角度來看，深開挖時之連續壁變形已有相當多的實測資料，可以以經驗公式粗略估計。如以強制變位的方式，探討深開挖對隧道之影響，則可以避過數值分析對解壓狀況無能為力的困窘。當然，這必須有一個前題，就是假設隧道之存在並不影響連續壁之行爲。與眾多影響連續壁行爲的因素中，相對而言，隧道之影響可說是微不足道。因此相信這個假設並不影響本研究之價值。

2.1 互制模式

本文為簡化分析，假設土壤材料之組合模式為線彈性行爲，並視潛盾隧道與深開挖部份為 2-D 平面應變狀態；網格之切割如圖 2 所示，左邊界取距隧道中心 50 公尺處，視該處已無水平變位，以 Roller 限制之，垂直向則不受限制，右邊界則依不同的相鄰距離而變，以強制變位模擬壁體水平位移，垂直向則不受限制；底部邊界則取至地表下 50 公尺處，視該深度為不動層，以 Hinge 限制結點位移。此外關於強制壁體變位及隧道結構體之基本假設如下：

1. 最大開挖深度 $D=15$ 公尺。
2. 假設隧道之存在不影響深開挖時之土體變形，土體變形可由經驗公式得到，並且強制加於連續壁上。
3. 假設隧道直徑為 6 公尺，環片厚度 0.25 公尺。
4. 以樑元素 (beam element) 模擬環片結構，並假設混凝土的容許抗壓強度 $f_c' = 420 \text{ kg/cm}^2$ ，包森比 (Poisson's ratio) $\nu = 0.17$ ，楊氏係數 $E = 15100 \sqrt{f_c'} \text{ (kg/cm}^2\text{)}$ 。

本項分析中所使用之土壤參數如下：

1. 楊氏係數, E_s (三組): 10MPa、20MPa 及 40MPa
2. 連續壁與隧道相鄰距離, B (四組): 5公尺、15公尺、25公尺及 40公尺
3. 包森比, $\nu = 0.45$

2.2 連續壁變形曲線

根據壁中傾度管量測結果，如圖 3 所示，吳沛軫等 (1997) 建議將常態分佈曲線，即式(1)，經座標轉換以模擬連續壁之壁體變形，如式(2)所示：

$$\delta = \delta_{\max} \cdot \exp\left(-\frac{z^2}{2t^2}\right) \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$\delta = \delta_{\max} \cdot \exp\left\{-m \cdot \frac{\left[\left(\frac{z}{Z_a}\right)^k - 1\right]^2}{\left[\left(\frac{Z_c}{Z_a}\right)^k - 1\right]}\right\} \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$1 - \left(\frac{Z_b}{Z_a}\right)^k = \left(\frac{Z_c}{Z_a}\right)^k - 1 \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$m = -\ln\left(\frac{\delta_i}{\delta_{\max}}\right) \quad \dots\dots\dots(4)$$

式中 δ_{\max} = 連續壁之最大位移

δ_i = 參考側位移

i = 寬度參數

k = 偏態修正係數。

m = 形狀修正係數。

z = 深度。

Z_a 為最大側位移所在深度，而 Z_b ， Z_c 為變形曲線某一特定側位移量 δ_i 所對應的上、下兩深度。由於不是每一支傾度管的變形曲線都與理論曲線吻合，可用試誤法，以不同之「參考側位移量」， δ_i ，選定最適合之線型，迴歸出最為接近量測值

之變形曲線方程式。

在台北都會區大眾捷運系統施工期間量測所得結果顯示，連續壁之最大位移在 $0.8D$ 至 $1.2D$ 之間，因此在本研究中，選定 $Z_a = D = 15m$ 。由於組合模式採線彈性，因此在其餘條件相同時，不同的 δ_{max} 值，襯砌應力與 δ_{max} 成正比，在分析中採固定值 $\delta_{max} = 20mm$ 。「參考側位移量」， δ_i ，之選擇對結果之影響不大，在本研究中也採固定值， $\delta_i = 10mm$ 。另外，由 3 組 Z_b 值及 3 組 Z_c 值組成 Aa、Ab、Ac、Ba、Bb、Bc、Ca、Cb、Cc 等九組變形曲線，如圖 4 所示。其餘兩參數 k 及 m 為因變數，可由式 3 及式 4 計算而得。

三、分析結果

由 FLAC 計算所得位移向量如圖 5 所示。深開挖對鄰近隧道襯砌結構之影響可就以下幾項進行探討：

1. 襯砌最大彎矩變化。
2. 襯砌最大剪力變化。
3. 襯砌最大軸力變化。

除連續壁之最大位移及連續壁與隧道間之距離外，顯而易見的是，連續壁變形對隧道的影響與其曲率相關。如何選擇能量化變形曲線曲率的指數是一大困擾。在本研究中，是單以變形曲線所覆蓋之面積作為指數。變形曲線所覆蓋之面積與分析隧道上方沉陷所用之「土壤漏失量」， V (Peck, 1969) 相類似，為方便起見，在此採用這一名詞。土壤漏失量愈大，表示連續壁外之土體之體積變化 (volumetric strain) 愈大。但是在本研究中，因為最

大位移 $\delta_{max} = 20mm$ 為固定值，這面積愈大，表示變形曲線愈為平緩。在九組變形曲線中，以 Cc 之土壤漏失量為最小 (0.32 立方公尺/公尺)，Aa 之土壤漏失量為最大 (0.5 立方公尺/公尺)。

3.1 襯砌彎矩變化

圖 6 為在土壤楊氏係數 $E_s = 20MPa$ 時，在不同情形下計算所得之襯砌最大彎矩變化。當連續壁與隧道十分接近時 (圖中 $B = 5$ 公尺之狀況)，彎矩之變化量有隨土壤漏失量之增加 (即連續壁變形曲線趨平緩) 而下降之勢，以 Cc 一例之變化為最大，Aa 一例之變化為最小。當連續壁與隧道相距甚遠時 (圖中 $B = 40$ 公尺之狀況)，彎矩變化量反而隨土壤漏失量之增加有略增之勢，Cc 一例之彎矩變化為最小，Aa 一例之彎矩為最大。

今將其中 Cc 一例之結果單獨繪製於圖 7。由該圖可以看出彎矩變化量隨連續壁與隧道間之距離增加而遞減，這點自不待言。此外，土壤勁度由 $10MPa$ 增加至 $40MPa$ 時，彎矩變化量約增加 80%。這趨勢十分合理，土體中之應力 (σ) 與土壤之楊氏係數 (E_s) 成正比 ($\sigma = E_s \epsilon$)，在強制變位之狀況下，作用在隧道襯砌之應力自應隨土壤之勁度增加而增加。必須在此說明的是，在本研究中，土壤勁度對連續壁位移之影響並未考慮在內。土壤勁度增加時，連續壁之位移應會減少。根據經驗，土壤勁度由 $10MPa$ 增加至 $40MPa$ 時，可以預期連續壁之位移也會減半。兩種效應相互抵消，彎矩之變化量可能不受土壤勁度之影響也說不定。

根據各種不同組合之分析結果顯

示，最大彎矩發生位置均位於隧道側壁約三點鐘方向，亦即圖 8 中結點 7 之處，該處由於距變形曲線最大曲率處較近，因此產生之彎矩值亦愈大。

3.2 襯砌剪力變化

圖 9 為在土壤楊氏係數 $E_s=20\text{MPa}$ 時，在不同情形下計算所得之襯砌最大剪力變化。資料顯示，最大剪力變化趨勢與最大彎矩變化趨勢頗為一致，而且由各種不同組合之分析結果來看，襯砌最大剪力發生位置均位於樑元素(4,5)及(9,10)等處，其對應之最大剪力發生位置與理論結果相符，均位於彎矩正負號轉變處。

3.3 襯砌軸力變化

圖 10 為在土壤楊氏係數 $E_s=20\text{MPa}$ 時，在不同情形下計算所得之襯砌最大軸力變化。當連續壁與隧道十分接近時（圖中 $B=5$ 公尺之狀況），軸力之變化量有隨土壤漏失量之增加而下降之勢，以 Cc 一例之變化為最大，Aa 一例之變化為最小。此種現象在連續壁與隧道相距甚遠時（圖中 $B=40$ 公尺之狀況），上述結果恰好相反，即 Cc 一例之軸力變化為最小，Aa 一例之軸力變化為最大。

同樣亦以 Cc 一例之結果單獨繪製於圖 11。由該圖可以看出軸力變化量隨連續壁與隧道間之距離增加而遞減，此點與彎矩變化之趨勢相似。此外，土壤勁度由 10MPa 增加至 40MPa 時，軸力變化量約增加 2.5 倍，這趨勢亦十分合理。

根據分析結果顯示，最大軸力變化量發生位置均集中在樑元素(12,13)、(1,2)、(1,24) 等處，如圖 12 所示。最大軸力變化

大多集中於頂拱中央或仰拱中央處，顯示該處軸力減低現象，主要受開挖水平解壓所致。

四、結論與建議

綜整各種分析結果可規納以下幾點結論與建議。

1. 根據九組不同壁體變形曲線分析發現，在近距離開挖時，以曲率較大之變形曲線對襯砌最大彎矩、剪力及軸力之影響最大；在遠距離開挖時，則以曲率較小（即土壤漏失量較大）之變形曲線影響較明顯。
2. 受鄰近開挖作業影響，襯砌最大軸力變化量發生在頂拱中央處或仰拱下緣。
3. 在相同的壁體變形曲線時，隧道襯砌應力所受之影響程度與土壤的楊氏係數(E_s)有關， E_s 值愈大的土壤，結構體所受的影響愈大。

本項數值分析並未就土壤的實際行為做深入探討，故分析結果僅能做定性之描述，無法對既有隧道產生之影響做定量分析。此外，一般採數值分析進行土壤深開挖時，所產生誤差頗大，故在本文中採用強制變位法以消除數值分析在模擬土壤解壓所產生的誤差。但若無法事先預測壁體變形曲線，則所做的分析也僅能做到趨勢預測而已，因此如何根據既有的監測數據，回饋、統計，以做到預測壁體變形曲線，則須進一步研究。

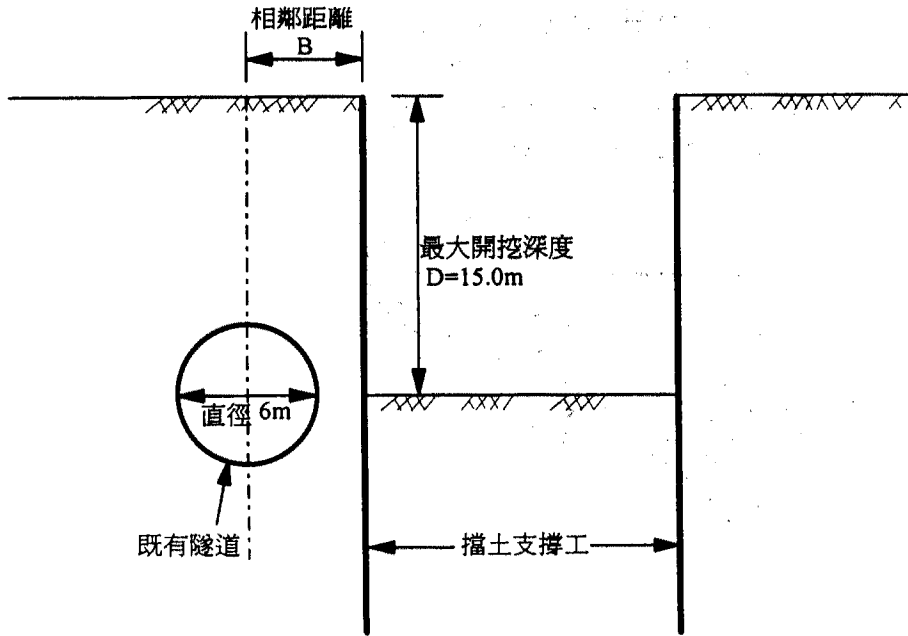


圖1 深開挖與既有隧道間相互位置示意圖

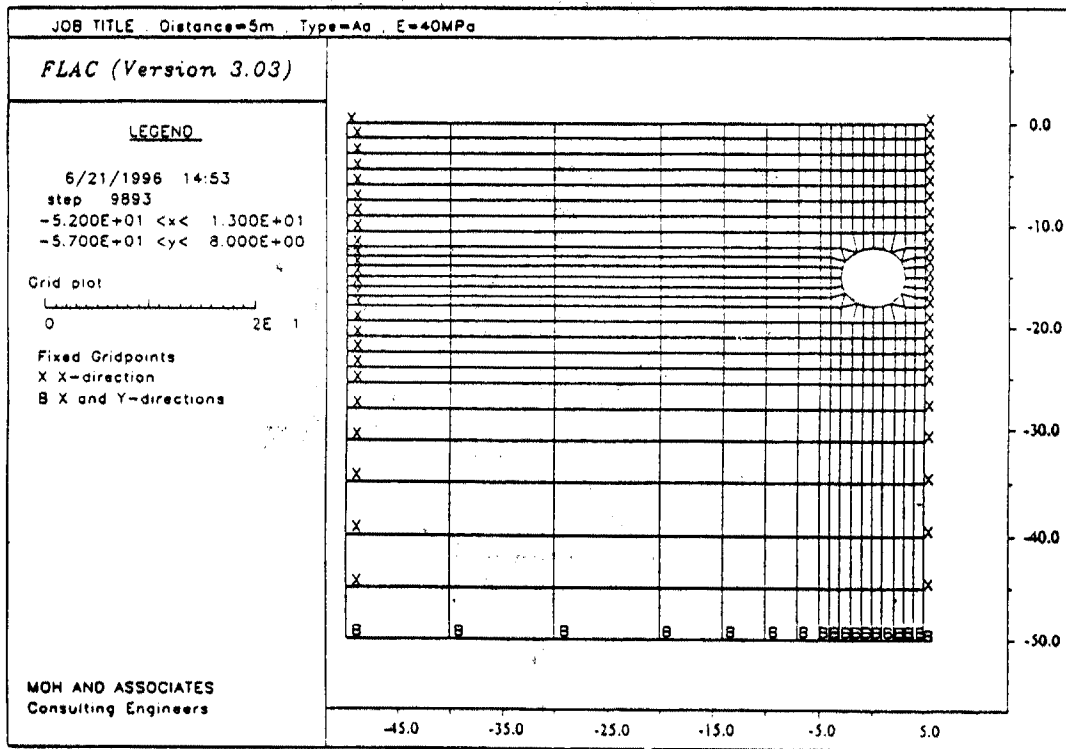


圖2 數值分析切割之網格(相鄰距離B=5公尺)

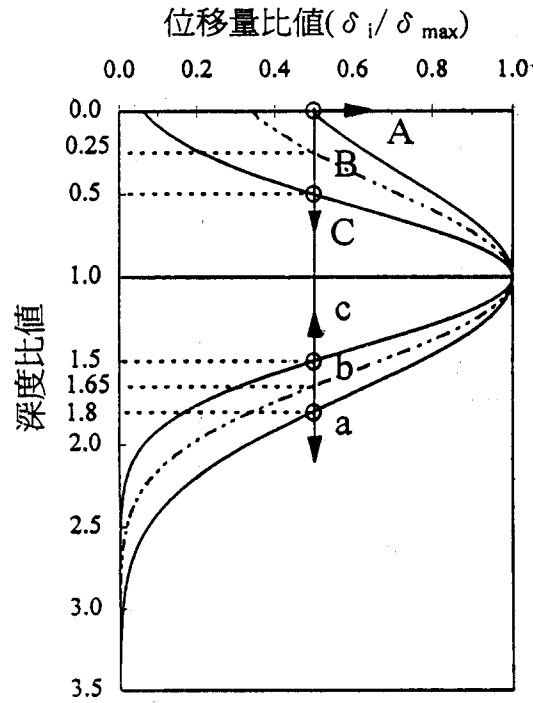


圖3 定義壁體變形曲線型式示意圖

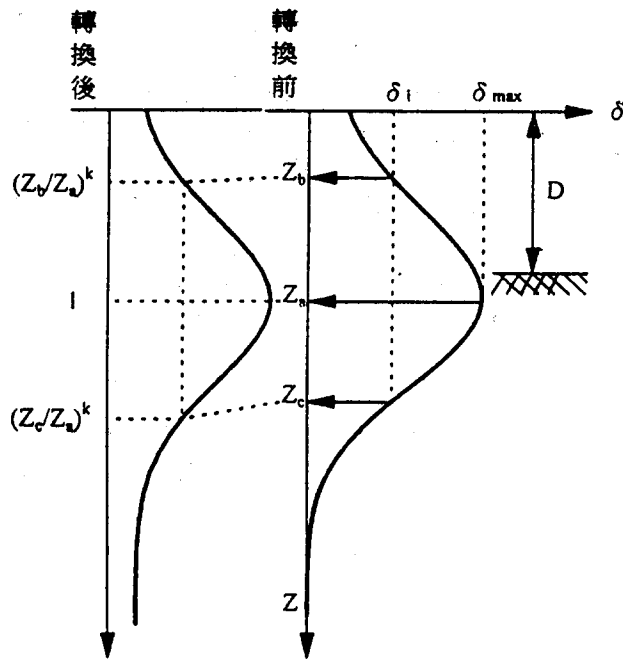


圖4 壁體變形曲線 Z_a 、 Z_b 、 Z_c 三係數之關係

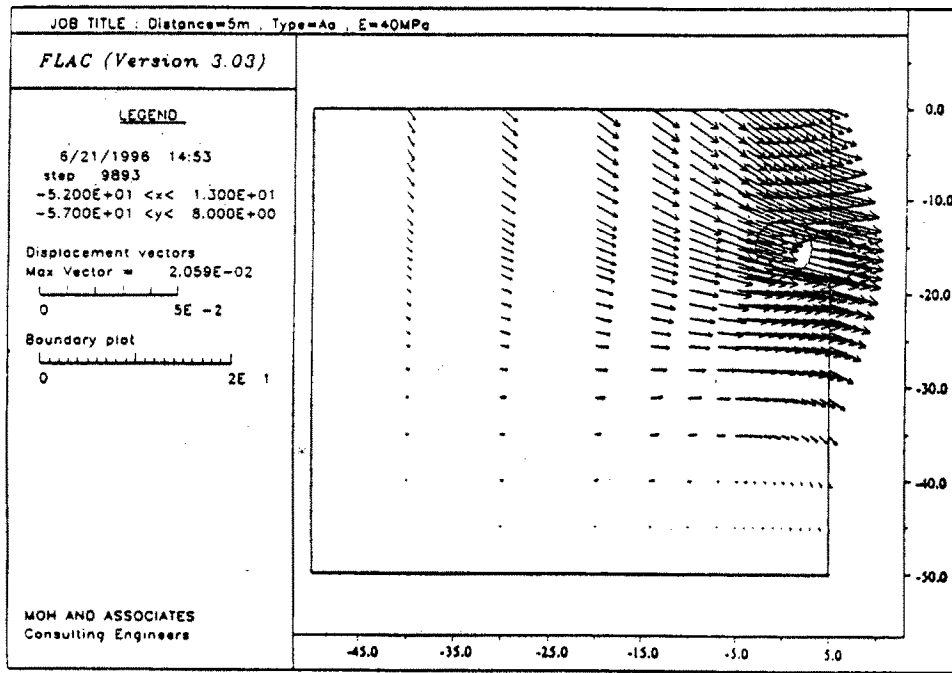


圖5 壁體強制變形平衡後之位移向量

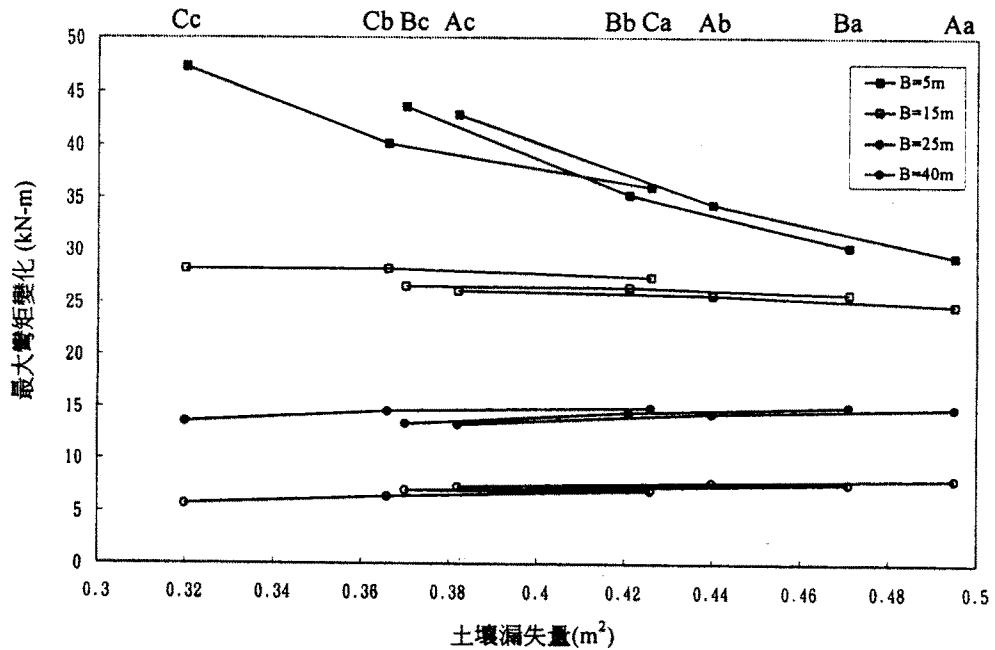


圖6 各變形曲線土壤漏失量與襯砌最大彎矩變化量之關係

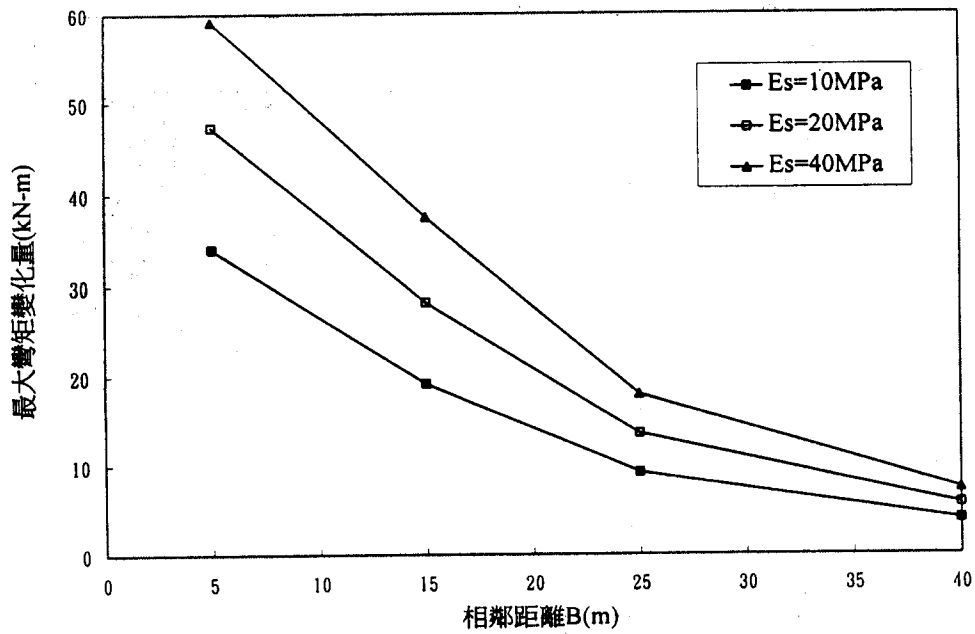


圖7 相鄰距離B與襯砌最大彎矩變化量關係

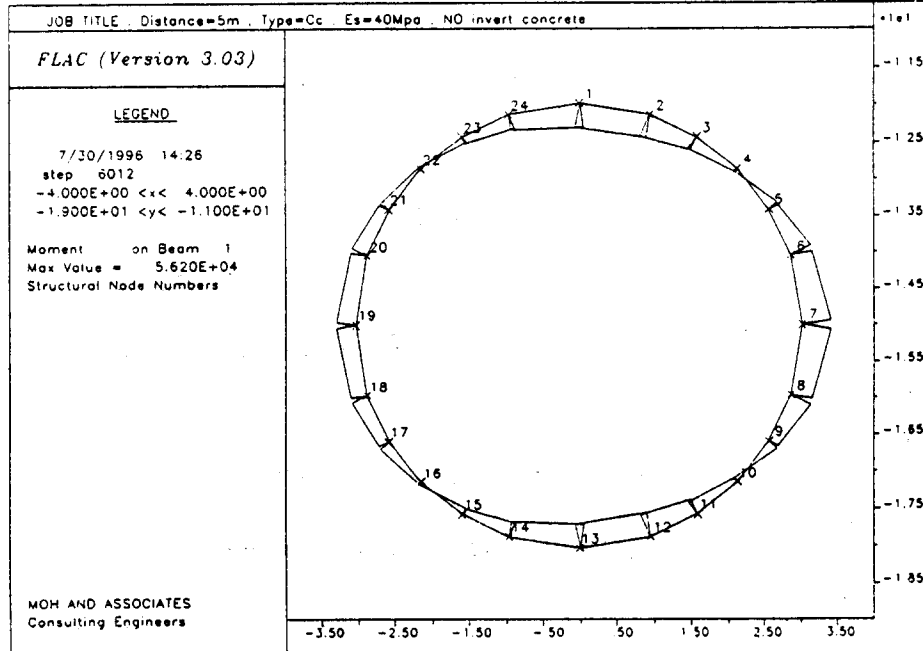


圖8 隧道襯砌各節點之彎矩圖(Cc類型)

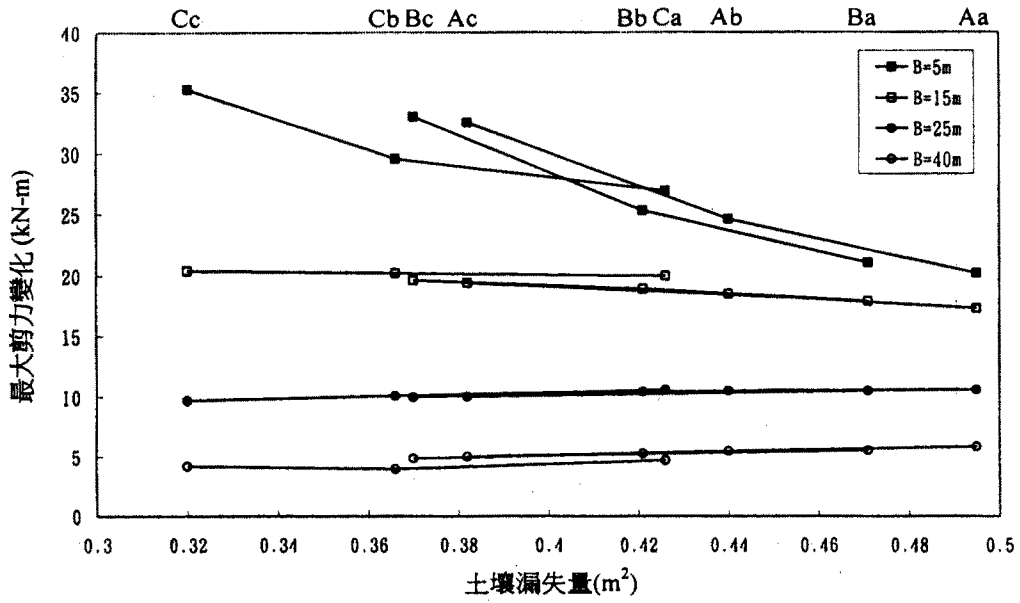


圖9 各變形曲線土壤漏失量與襯砌最大剪力變化量之關係

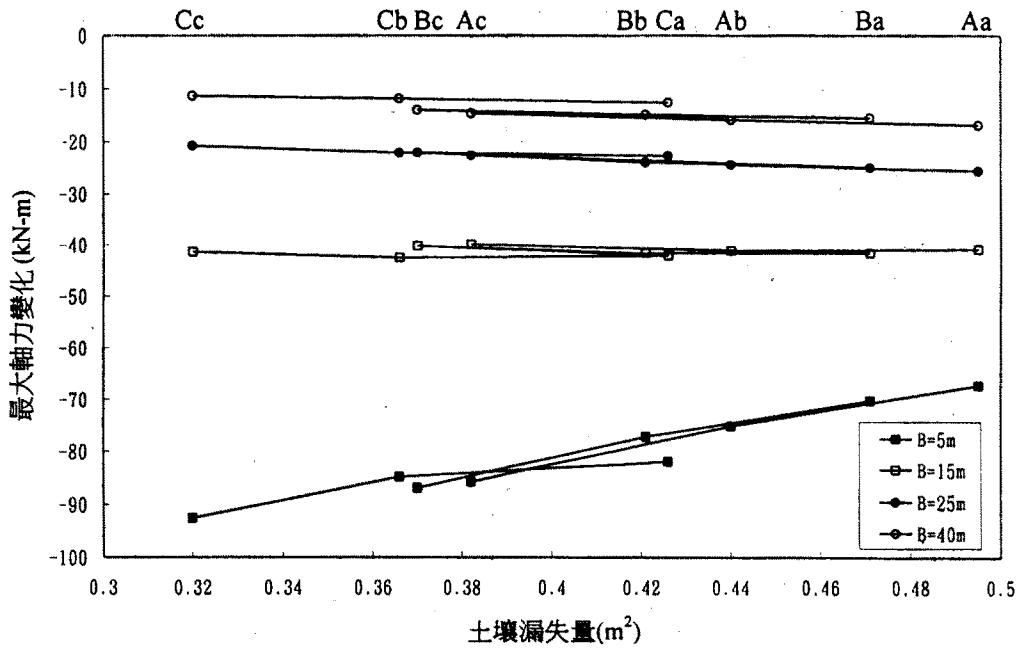


圖10 各變形曲線土壤漏失量與襯砌最大軸力變化量之關係

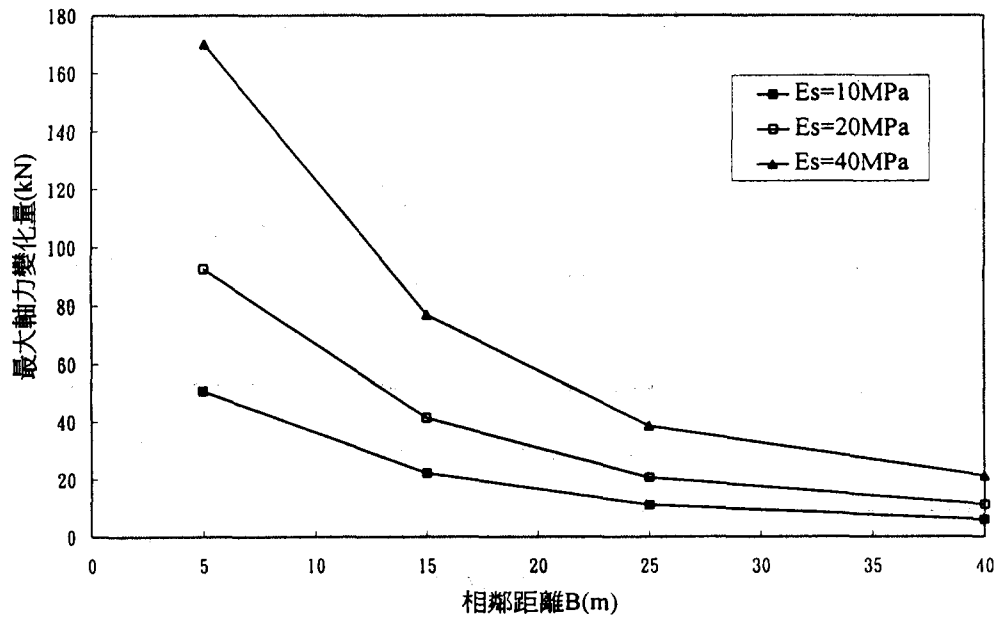


圖11 相鄰距離B與襯砌最大軸力變化量關係

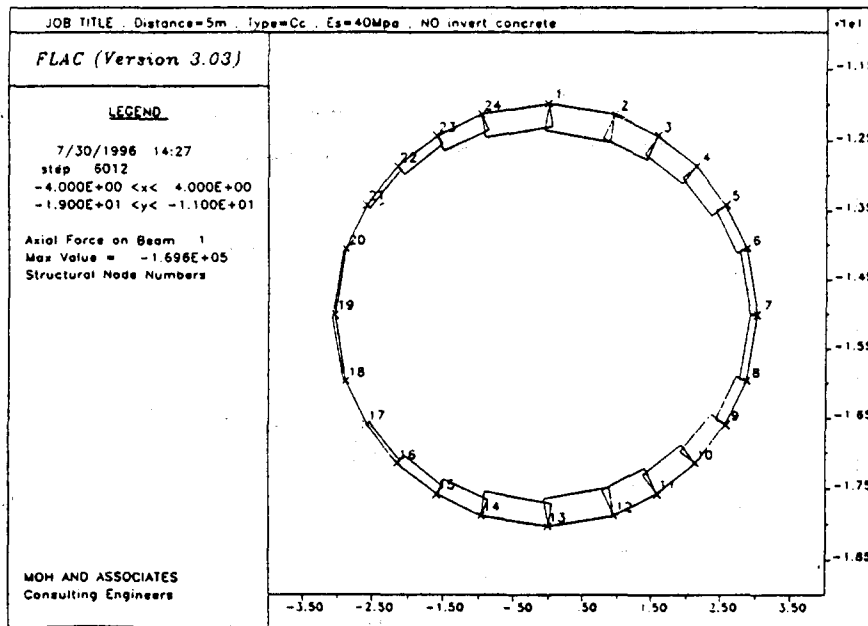


圖12 隧道襯砌各節點之軸力圖(Cc類型)