

應 用 研 究

鋼柱橫隔板開孔型式 對 柱內混凝土充填及軸力 行為影響之研究

尹衍樑／潤泰集團總裁

甘錫滢／永峻工程顧問股份有限公司總工程師

王瑞禎／潤弘精密協理

鄭瑞濱／潤泰水泥 副總經理

姚村淮／永峻工程顧問股份有限公司協理

本文從實務角度探討現行 CFT 柱內隔板之開孔型式及柱內灌漿材料的合理性，研究標的為臺北南山廣場新建工程之高 272 公尺之塔樓巨柱，共進行三階段實尺寸柱內灌漿試驗及 1/4 短柱縮尺試驗，試驗結果顯示柱內橫隔板採均佈小孔設計，有助於灌漿過程中板下氣泡之排放，相較於現行中央大孔做法，氣泡量可從 10% 附近降至 2% 以下，此外均佈小孔的直徑宜大於 8 cm，總開孔率最小應等於中央大孔之設計。另由軸壓試驗結果顯示，以萬分之四膨脹率之 SCC 填充鋼柱，隔板採大孔或均佈小孔，對軸壓行為的影響不顯著，柱軸壓強度皆可滿足設計要求。

CFT 柱橫隔板發展現況

鋼骨填充混凝土柱（CFT）是常見的高樓建築型式之一，以指標建築台北 101 為例，其主樓結構柱便是由鋼 BOX 柱內填充高強度 SCC 而成，鋼柱內部藉由壓力灌漿填充 SCC 讓鋼骨與混凝土形成複合結構共同承擔設計載重，而目前正在興建中的臺北南山廣場新建工程，其塔樓結構柱也是以 CFT 柱的型式設計。

常見的 CFT 柱混凝土填充方式有二：一是以特密管由上插入鋼柱內貫穿至柱底，將混凝土注入後，配合混凝土填充高度慢慢將特密管邊灌邊抽，直到柱灌漿完成；另一個方式則是在柱底側邊開灌漿口，將漿料由柱底部以壓力灌漿的方式，往上推擠至所需高度。上述第一種方式常見於地下層逆打鋼柱之柱內灌漿，通常整隻

逆打鋼柱採一次灌置，不做分段；第二種方式普遍應用在地上層的鋼柱灌漿，通常柱內灌漿是在鋼結構完成，樓板逐層往上施作的過程中進行，需分段實施，為避免灌漿口過多影響結構性能，一般取十幾公尺為一段，灌漿時機需視施工載重、鋼柱承載力及灌漿分段而定。

鋼柱在柱梁交會處需設置橫隔板，透過橫隔板可讓鋼梁翼板的力量在柱梁交會區順利傳遞，而不會對柱鋼板造成不當的損壞，但對柱內灌漿而言，橫隔板是一種阻礙，因此需在橫隔板上留置適當孔洞，以利混凝土漿料順利通過，填滿鋼柱。圖 1 為目前鋼柱內橫隔板常見的開孔方式，以中央設置一個大孔為主，為灌漿管或混凝土漿料主要的通行路徑，另在四個角落各設置一個 1/4 圓的開孔，讓灌漿過程中隔板下方堵塞的空氣可以從角落排出，以減少隔板下之混凝土孔隙率。然根據實際灌漿測試資料顯示，在大型鋼柱中採圖 1 的開孔型式，隔板下方之氣泡量佔柱斷面比率可達 10%，較工程上習慣使用的 5% 氣泡率上限值高出一倍，顯示圖 1 的開孔方式並無法很有效地將板下累積的灌漿氣泡排出。

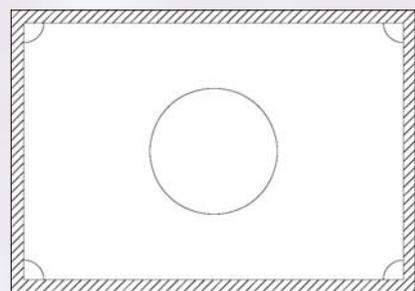


圖 1 現行鋼柱橫隔板常見的開孔方式

臺北南山廣場新建工程為目前台北指標性建案之一，其巨型 CFT 鋼柱斷面邊長可達 2 公尺以上，有鑑於鋼柱結構性能對建築機能與安全的重要性，因此本文以此指標性個案為研究標的，探討 CFT 鋼柱內之灌漿材料及隔板開孔型式對施工及柱性能的影響，以做為同業工程應用參考。

CFT 柱內灌漿新材料

自充填混凝土 SCC (self-compacting concrete) 由於具有良好的流動性與充填性，因此常被用於 CFT 柱之柱內灌漿材料，本研究標的採強度 12,000 psi 與 10,000 psi 之高強度 SCC 作為其柱內灌漿料，其配比在滿足強度要求下，需具有流動性佳且微膨脹效果。

通常混凝土材料在硬固後體積會有收縮的現象，而 SCC 相較於一般混凝土其體積收縮現象又更為顯著，為避免 SCC 在柱內灌漿後，鋼板與混凝土間或 SCC 分段澆置介面因體積收縮而產生間隙，因此在配方上特別要求 SCC 需具有萬分之四之微膨脹效果，這是一般 CFT 柱柱內灌漿所忽略的部分。

表 1 為本文所測試的六種 SCC 配比之基本性能表，強度有 12,000 psi 及 10,000 psi 兩種，粗骨材粒徑選擇 10 mm、8 mm 及 6 mm 三種，其中 10 mm 為常見的 3 分石，材料膨脹率設定為萬分之四，V_{time} 選擇較短的設計標準 10 ± 3 sec，以期漿料具有較好的流動性，同樣坍流度設定在較大的 70 ± 5cm，表中列出設計值與實測值，顯示針對灌漿材料所設定的標準可經由配方調配達成。

表 1 柱內填充之 SCC 基本性能表

配 比	粗 骨 材	強度 (psi)		膨脹率 (萬分之)		V _{time} (sec)		坍流度 (cm)	
		設計	實際 (28天)	設計	實際 (28天)	設計	實際	設計	實際
1	10mm	12000	14571	4	4.5	10±3	10.5	70±5	69×69
2	8mm	12000	13843	4	4.1	10±3	11.4	70±5	78×79
3	6mm	12000	12658	4	4.4	10±3	11.8	70±5	83×82
4	10mm	10000	11366	4	5.6	10±3	10.5	70±5	68×69
5	8mm	10000	10966	4	4.7	10±3	10.4	70±5	70×71
6	6mm	10000	9986	4	5.1	10±3	11.5	70±5	78×79

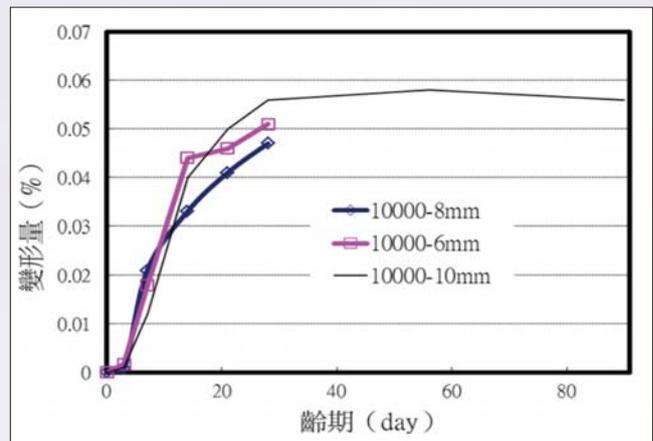
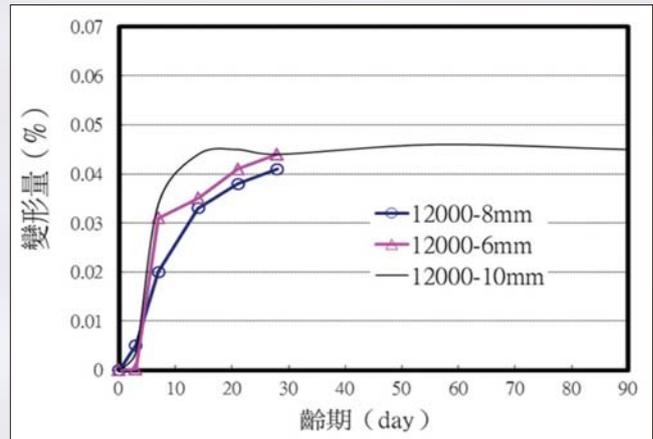


圖 2 微膨脹 SCC 之膨脹率量測結果

新型 CFT 柱橫隔板開孔 實尺寸鋼柱灌漿試驗

本研究依研究標的之巨柱斷面共規劃三階段柱內灌漿試驗，選用之鋼柱斷面為 2000 mm × 1400 mm，試體斷面依實尺寸設計，三階段柱內灌漿試驗之柱高度分別為 1 公尺、2 公尺及 4 公尺，以下分別說明之：

第一階段試驗

圖 3 為第一次灌漿試驗之架構，SCC 採表 1 之第 1 組配比，試體高度取 1 公尺，灌漿口中心線設置於距底部 15 cm 高程處，上方放置透明壓克力板，板上留設 6 種不同的開孔方式，壓克力板以 14 隻螺栓與鋼模固定，中間放置防漏膠墊，藉由螺栓迫緊防止 SCC 漿液由介面間隙滲漏。灌漿以常見的 φ 12.5 cm 管進行，灌漿速度控制在柱內 SCC 上升速度小於 50 cm/min，第一次試驗共進行 6 次灌漿，每次需統計壓克力板下之氣泡率、將灌漿料清除乾淨、更換隔板開孔型式後再進行下一次灌漿。

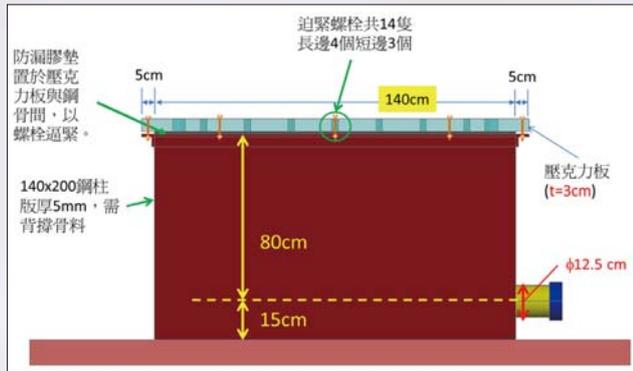


圖3 第一次灌漿試驗架構

圖4為測試的6種隔板開孔設計，分成中央大洞加均佈小孔與均佈小孔兩種，試驗共準備兩片透明壓克力板，第一片留設1個直徑60cm大洞，及54個直徑3.75cm之均佈小孔，共進行3次測試，第1次測試小孔全開，第2次測試將其中24個小孔塞住，第3次則將所有小洞塞住；第二片留設67個直徑3.75cm之均佈小孔，第1次測試孔洞全開，第2次開放39個，第3次僅開放19個。

圖5為隔板採中央大孔設計之灌漿測試照片，試驗結果顯示當SCC漿料由下往上通過橫隔板時，漿料會往阻力最小的路徑流動，因而集中由中央大洞通過隔板，雖然隔板上仍設置許多小孔，但小孔阻力大，多數漿料不會選擇由小孔通過，因此大孔以外的區域漿液流動幾近停滯，造成卡在隔板下方的空氣無法藉

由漿液流動排出，此為這種型式隔板下方氣泡率偏高的原因，表2為隔板下方氣泡量統計結果，此類型隔板下方之氣泡率平均為柱斷面之9%，以只開大孔的氣泡率最高，達13.85%。

圖6為隔板採均佈小孔之灌漿測試照片，灌漿結果顯示SCC漿液可以較均勻的由斷面均佈的小孔通過隔板，這有助於板下氣泡的排出，表2的結果顯示採此類隔板之板下氣泡率約為1~2%左右，平均1.5%。不過測試6的過程中，壓克力板因壓力過大而出現破裂的現象，此乃因僅開放19個 $\phi 3.75$ cm的小孔，隔板開孔率為1%，漿液壓力過大所致，因此在設計上隔板開孔率也不宜過小。此外在均佈小孔的設計下，3.75cm孔徑會阻礙粗骨材通過，造成通過隔板之粗骨材約較隔板下減少44%；若採中央大孔的設計則隔板上下粗骨材比例相近，顯示隔板孔洞直徑也不宜過小。

第二階段試驗

本研究根據第一階段試驗結果，修正試體以進行第二階段灌漿試驗，圖7為第二階段灌漿試驗的試體圖，內容說明如下：

1. 隔板開孔改為圖7的型式，共40個直徑85mm孔洞，保留四角落的1/4圓孔洞，開孔比率放大為7.88%。

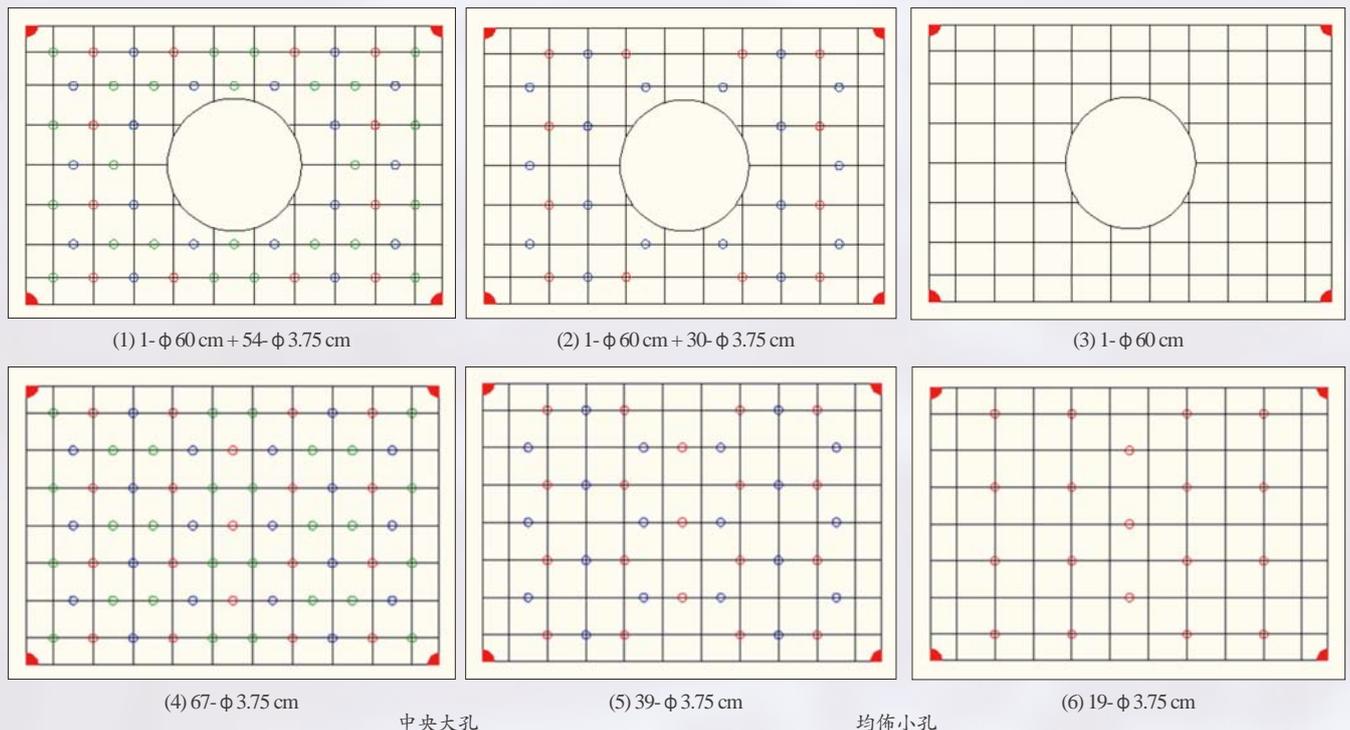


圖4 第一次試驗所用之六種隔板開孔



圖 5 隔板採中央大孔設計之灌漿測試照片

表 2 第一次灌漿試驗之氣泡量統計結果

測試	1	2	3	4	5	6
隔板開孔	1- ϕ 60cm 54- ϕ 3.75cm	1- ϕ 60cm 30- ϕ 3.75cm	1- ϕ 60cm	67- ϕ 3.75cm	39- ϕ 3.75cm	19- ϕ 3.75cm
隔板開孔率	12.5%	11.6%	10.4%	2.9%	1.8%	1.0%
板下氣泡 總面積量 cm^2	2236	1408	3877	526	216	547
氣孔率 (%)	7.99%	5.03%	13.85%	1.88%	0.77%	1.95%
平均氣孔率		9.0%				1.5%

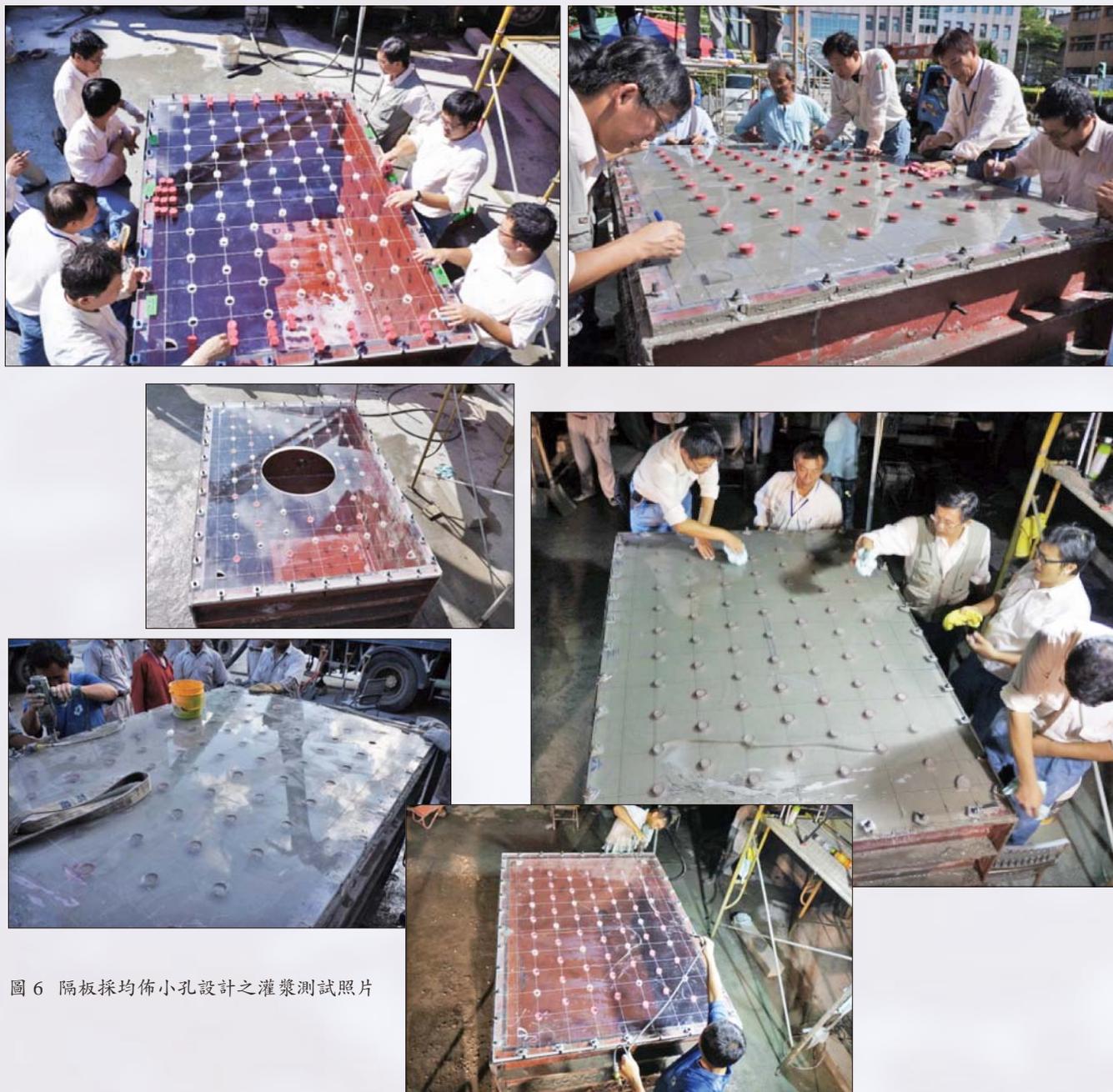


圖 6 隔板採均佈小孔設計之灌漿測試照片

為避免孔洞影響隔板應力傳遞，在四邊 30 cm 範圍內不開孔，但在下方設置導氣斜板（1/5 斜度）。

試體分兩層，下層高 1 公尺，上層高 2 公尺，兩層中間及上方設置透明壓克力隔板。

進行兩次灌漿，第一次僅有下部 1 公尺模具，灌漿完成並記錄後，把試體清洗乾淨，並組裝上下兩部分模具，以進行 3 公尺高、兩片隔板之灌漿測試，灌漿材料沿用配比 1 之設計。

第二階段灌漿試驗照片如圖 8 所示，其中第 1 次灌漿隔板下方之氣泡率 1.09%，第 2 次灌漿隔板下方之氣泡率 0.8%，粗骨材通過性而言，通過上層隔板之

粗骨材比例約減少 8%。試驗結果顯示採 85 mm 開孔（開孔率 7.88%），並在隔板下方設置斜度 1/5 之導氣斜板，板下氣泡堵塞率可降至 1% 左右，骨材通過性也可大幅改善。

第三階段試驗

圖 9 為第三階段灌漿之試體架構圖，此階段灌漿隔板沿用第二階段的開孔方式，但將隔板孔洞由 8.5 cm 調整為 9.5 cm，使開孔率與中央一 60 cm 直徑大孔者相同，並取消四周導氣斜板，試體總高度為 4 公尺，柱內設置間距 500 mm 之隔板八層，除最頂層為透明壓力

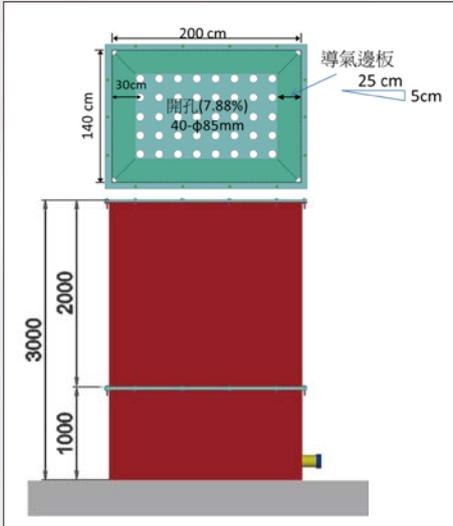


圖 7 第二階段灌漿試驗之試體架構



(a) 灌漿模具照片



(b) 第 1 次灌漿照片(下層隔板)



(c) 第 2 次灌漿(上層隔板)

圖 8 第二階段灌漿試驗照片

力板外，其餘為鋼板，灌漿口設置在底部，此外在柱面由下而上設置 8 個壓力計，每層一個，壓力計採薄膜與柱內連通，壓力表在外以方便記錄壓力值。

此階段模具由鋼模廠以真實鋼柱之製造方式施作，包含開孔、組裝、焊接等，以藉此瞭解鋼柱的製造性，柱鋼板及橫隔板厚皆為 25 mm，依合格的程序焊接組裝而成，柱內並依實際設計設置剪力釘，圖 10 為試體在鋼模廠製造的情形。

圖 11 為第三階段灌漿試驗之照片，此階段之 SCC 採表 1 之配比 5 進行，漿料由下往上壓力泵送，通過隔板至柱頂面溢出，過程中在底部及 4~5 層隔板中間進行兩次取料，以進行粒料分析。

此次灌漿由壓力計觀察柱內壓力隨高度約成二次方遞減，柱底之壓力最大達 4.2 kgf/cm²，為 4m 高 SCC 淨壓力之 4.4 倍，顯示隔板對灌漿有明顯阻力，且在灌漿中止、取料、重新灌漿的過程中，壓力會有

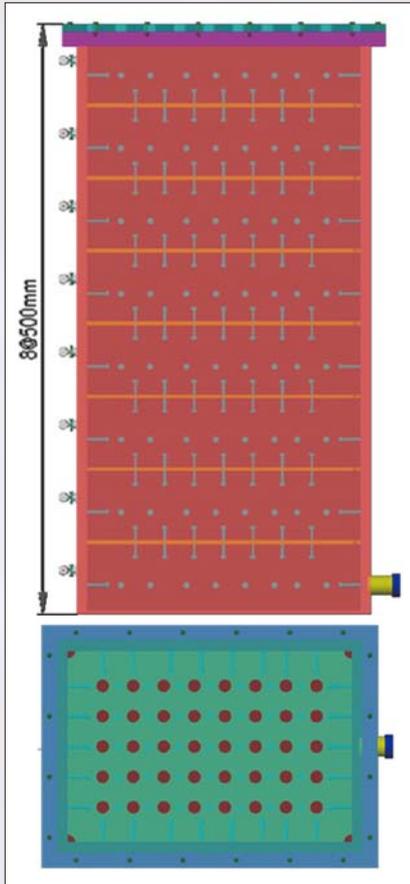


圖 9 第三階段灌漿之試體架構圖



圖 10 第三階段灌漿模具之製造



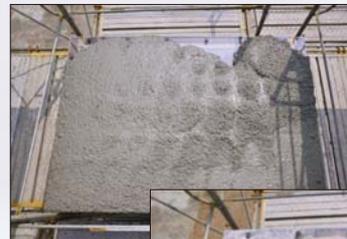
(a) 模具



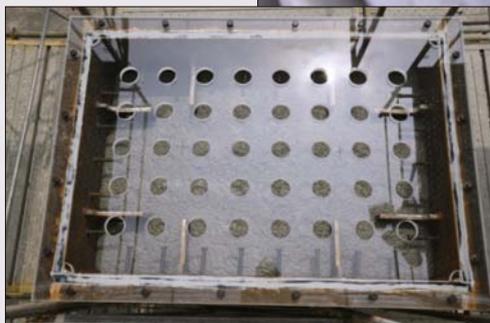
(b) 柱頂壓克力板



(c) 壓力計



(e) SCC 漿料通過柱頂壓克力板



(d) SCC 漿料由下往上充填



(f) 灌漿後之氣孔分布

圖 11 第三階段灌漿試驗之照片

明顯上升的現象，因此實務上要盡量避免灌漿缺料、中止的狀況發生。就隔板下氣泡率而言，取消導氣斜板會讓氣泡量增加為 2.57%，且集中在四週。就 SCC 粗骨材分佈，由柱頂面、柱中段、及柱底取料分析結果顯示，粗骨材在柱下、中、上之變化率為 100%、93.6%、92%，差異不大。

新型 CFT 柱橫隔板開孔 短柱縮尺軸壓試驗

試體說明

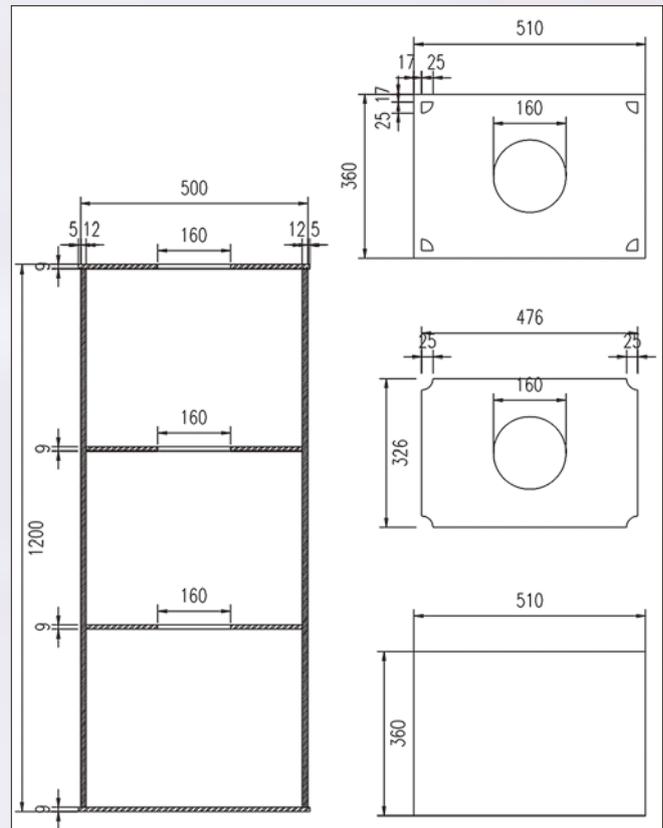
由灌漿試驗結果顯示，隔板開孔型式對板下氣泡率、粗骨材通過性、及柱內壓力有顯著的影響，試驗結果顯示開孔越大粗骨材越容易通過，開孔數多而均勻則版下之氣泡量越少。對粗骨材通過性而言，以常見的三分石粗骨材，隔板開孔直徑宜在該 8 cm 以上；就板下氣泡率而言，採中央一大孔板下氣泡率約 10%，採均佈孔則板下氣泡率可降至 2% 左右。

為進一步了解上述差異對柱承載力的影響，本研究規劃 5 個短柱試體，進行軸向單向加載試驗，試體尺寸依研究標的之結構主要巨柱（2000 mm x 1400 mm）進行 1/4 縮尺，共測試三種型式隔板、兩種 SCC 強度，表 3 為試體規劃表，其中試體 1 之隔板採目前通用的做法，鋼柱統一採 JIS G3101 SS400 規格之熱軋鋼材製作，試體之 SCC 採表 1 之配比 2 與配比 5。

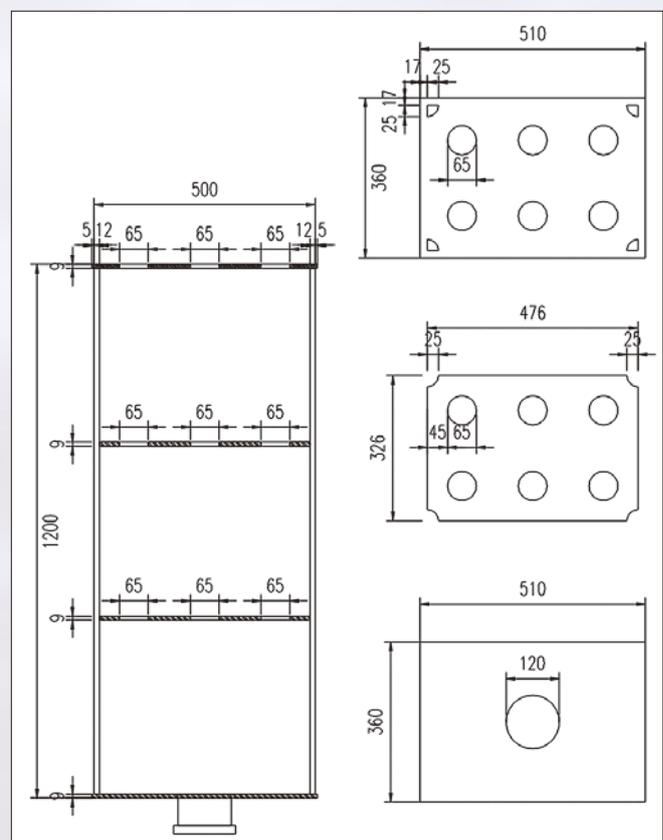
圖 12 為三種型式隔板之試體設計圖，斷面尺寸為 500 mm x 350 mm，試體高度取 1200 mm，試體 1 之底部橫隔板無開孔，其他三片隔板採 1-Φ160 mm 開孔，並在四角落各有一 1/4 圓之開孔（半徑 25 mm）。另外在試體 2 至試體 5 之底部隔板留設直徑 120 mm 之灌漿孔，其他隔板則依開孔型式留設孔洞。

表 3 軸壓試驗試體設計表

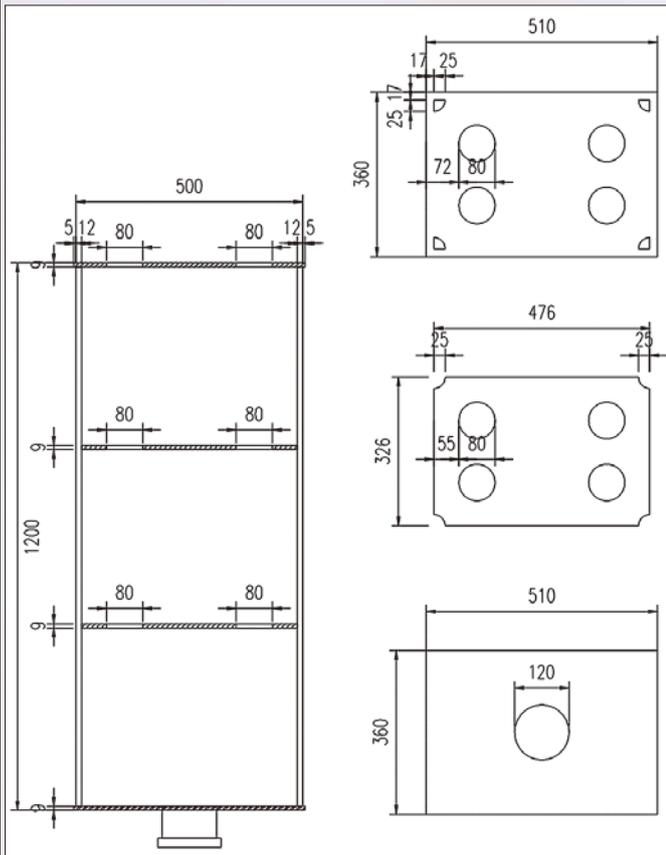
設計參數	間隔板孔洞 (mm)			混凝土強度 (psi)	
	1-Φ160	6-Φ65	4-Φ80	12000	10000
試體編號	1	2	3	4	5
1	O			O	
2		O		O	
3		O			O
4			O	O	
5			O		O



(a) 1-φ160 隔板試體圖



(b) 6-φ65 隔板試體圖



(c) 4-φ80 隔板試體圖

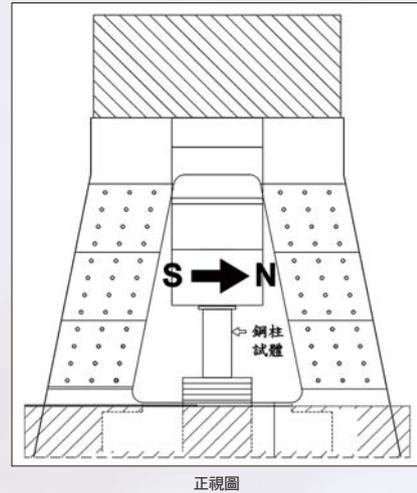
圖 12 軸壓試體設計圖

試驗配置及試驗方法

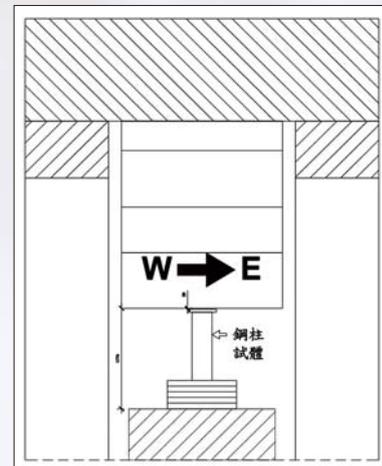
本試驗為非線性構件試驗，採用國家地震工程研究中心之多軸向試驗系統 (MATS)。如圖 13 所示之試驗配置中，對受測之鋼管混凝土柱試體以固定加載速率 (0.067 mm/sec) 施加單向漸增之軸向變位，直至試體產生明顯破壞為止。圖 14 為試體之量測儀器配置圖，本試驗之量測資料除了 MATS 試驗機台本身之軸向變位及軸向力外，於試體短向 (南北兩側) 中段 1/2 柱高處裝設外部位移計 (LVDT) 以量測較為確的軸向變位 (排除柱上下界面不平整因素)，進行可推求柱體之軸向應變；此外，在試體的四個面中點處，亦黏貼橫向之應變計，以觀察混凝土受鋼管圍束之受力情況。

試驗結果討論

圖 15 為三組 12,000 psi 試體的加載曲線，三組試體在強度達最高點後，都出現強度快速衰減的現象，而隨著強度下滑、變形增加，柱鋼板也出現明顯的外



正視圖



側視圖

圖 13 試驗配置圖

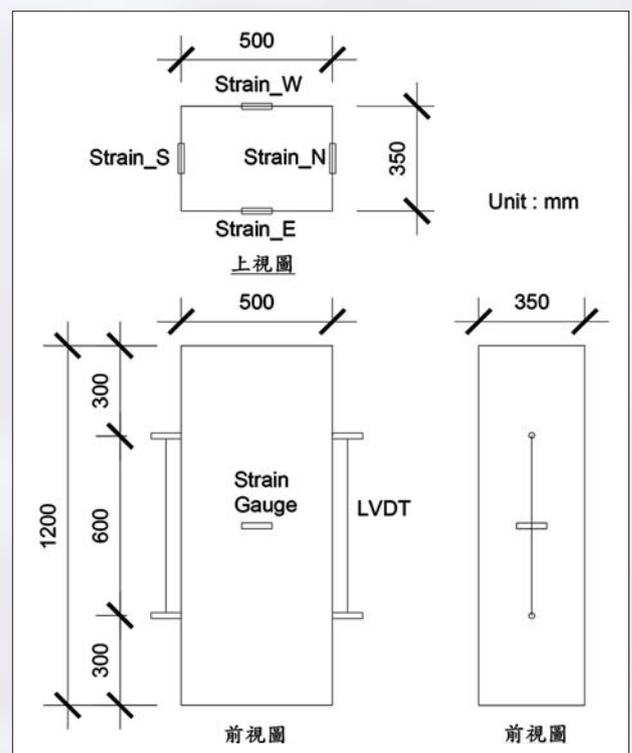


圖 14 量測儀器配置圖

拱情形，外拱部位多數出現在柱中段兩隔板間。此外三組試體雖然隔板不同，但反應曲線相近，試體極限強度皆約 18,000 kN，極限強度對應的位移在 12~13 mm 附近，顯示隔板對柱軸向承載行為的影響不大。

圖 16 為兩組 10,000 psi 試體的加載曲線，者兩組試體同樣在極限強度後出現強度快速衰減的現象，試體最後也呈現明顯鋼板外拱的現象，外拱部位同樣多數位於兩隔板間。在這兩組試體中，採 6 個 ϕ 65 開孔隔板的試體強度略低於採 4 個 ϕ 80 開孔的試體，試體極限強度約 15,000 kN，兩個試體對應於極限強度的變形量相當接近，約在 11 mm 左右。

圖 17 為製作完成的試體照片，圖 18 與圖 19 為試體最終破壞照片，由照片可明顯看出柱鋼板明顯外拱，焊道撕裂的現象。

表 4 為試驗結果統計表，試體標稱軸壓強度的計算乃依據內政部 100 年 7 月修訂之「鋼骨鋼筋混凝土構造設計規範與解說」條文計算，依「強度疊加法」，

分別計算鋼管及混凝土的標稱軸壓強度，其中鋼管混凝土柱的，K 值採 0.65，L 取試體總高 120 cm，而混凝土強度則不計意外偏心， Φ_e 取 1.0。

由表中數據顯示，五組試體的試驗強度 P_{test} 皆大於設計標稱強度 P_n ，兩者之比值介於 1.06~1.19 之間，且以採四個 80 mm 開孔隔板之試體強度最高，採 6 個 65 mm 開孔隔板之試體強度最低，其中 12,000 psi 試體之最大強度差異 3%，10,000 psi 試體之最大強度差異為 6%，強度差異在材料變異範圍內，顯示隔板開孔型式雖然會影響粗骨材通過性及隔板下方氣孔率，但對柱軸壓行為卻無顯著的影響。

表 4 試驗結果比較表

試體	標稱受壓強度 P_n (KN)			試驗強度 P_{test} (KN)	P_{test}/P_n	$\Delta_{-P_{max}}$ (mm)	$\Delta_{-0.8P_{max}}$ (mm)
	P_{ns} (鋼管)	P_{nrc} (SCC)	合計				
12000psi_1- ϕ 160	4850	10858	15708	18340	1.17	12.51	14.48
12000psi_4- ϕ 80	4850	10858	15708	18647	1.19	12.85	13.98
12000psi_6- ϕ 65	4850	10858	15708	18255	1.16	12.49	13.18
10000psi_4- ϕ 80	4850	9048	13899	15587	1.12	11.19	12.39
10000psi_6- ϕ 65	4850	9048	13899	14698	1.06	10.90	12.90

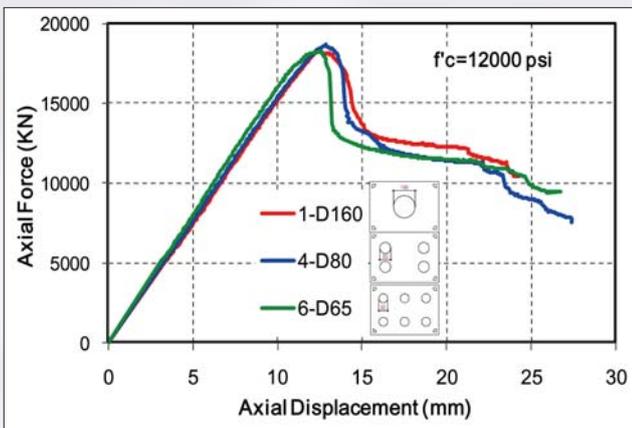


圖 15 試體之軸力與位移關係圖 ($f'_c = 12000$ psi)

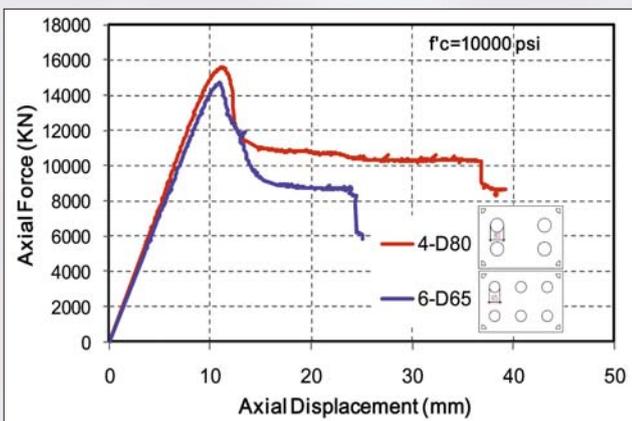


圖 16 試體之軸力與位移關係圖 ($f'_c = 10000$ psi)



圖 17 軸壓試體照片

材料、設計、施工通盤檢驗・成效顯著

本研究從實務面切入，以臺北南山廣場新建工程之塔樓 CFT 柱為研究標的，經一系列灌漿及軸壓試

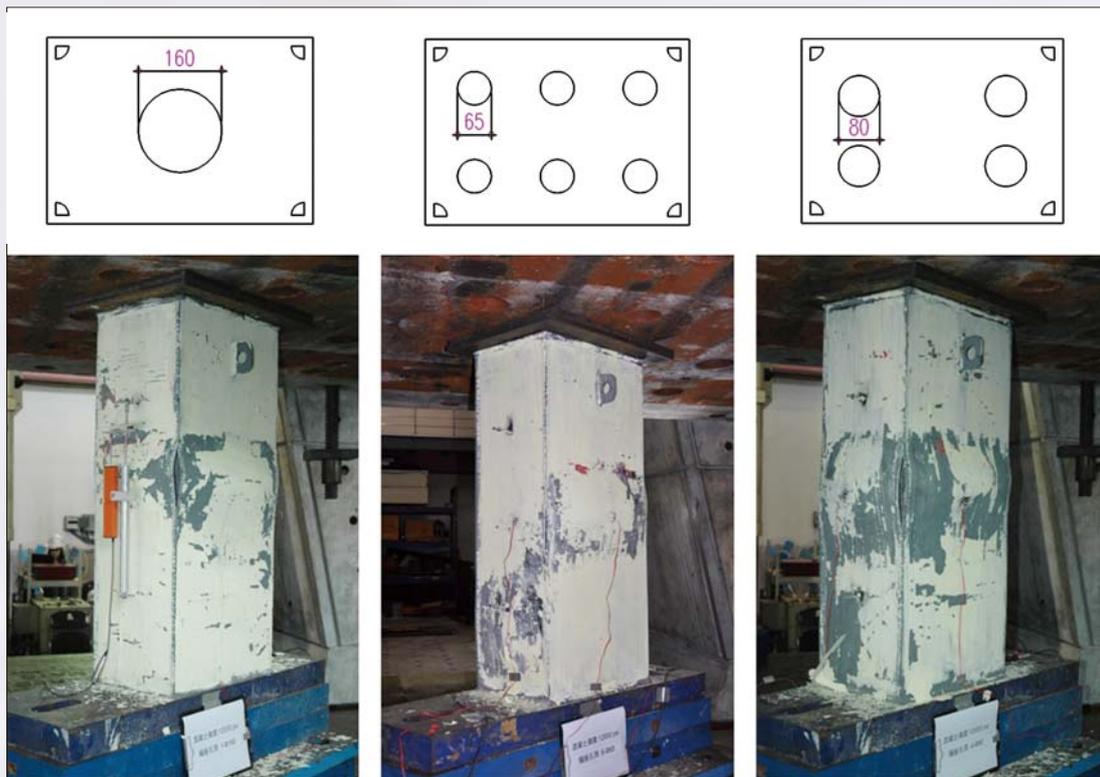


圖 18 試體破壞照片 (12,000 psi)

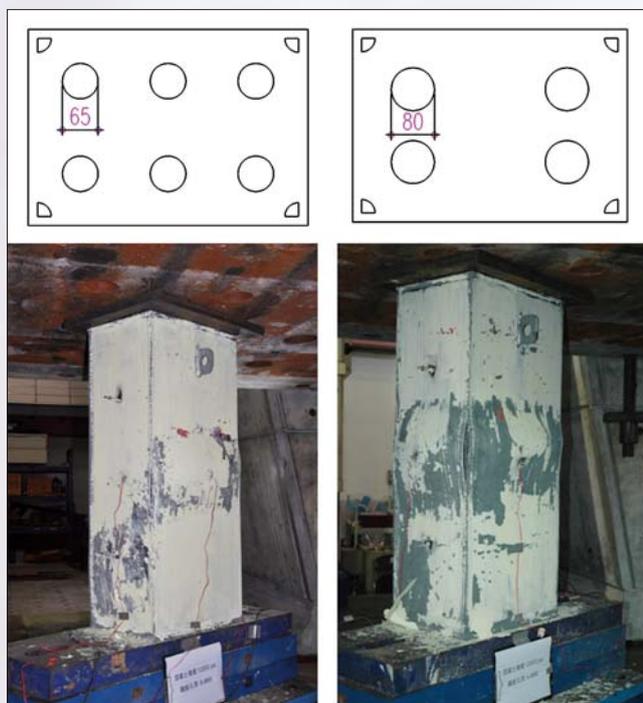


圖 19 試體破壞照片 (10,000 psi)

驗，探討業界習慣的 CFT 柱內隔板開孔及填充材料之合理性，以下為本研究之結論：

1. 一般混凝土材料體積在硬固後會有收縮現象，為避免此一反應導致 CFT 柱鋼板與混凝土介面或混

土二次澆置面產生間隙，本研究首先針對柱內灌漿材料的體積收縮現象進行改善，透過配比改善，使柱內灌漿用之 SCC 在硬固後具有萬分之四的微膨脹反應，研究成功針對 12,000 psi 與 10,000 psi 兩種強度，及 10 mm、8 mm、及 6 mm 等三種粗骨材粒徑，獲得相對應的配比，可滿足施工需求。

2. 由三階段柱內灌漿試驗結果顯示，採傳統中央一大孔的橫隔板，不利於灌漿過程中板下氣泡的排出，隔板下方氣泡量可達 10% 以上。隔板採均佈小孔可有效減少隔板下方的氣孔率至 2% 以下。
3. 就隔板開孔直徑而言，針對常用的三分石粗骨材 (10 mm)，研究顯示隔板開孔直徑在 8 cm 以上即不會粗骨材通率造成顯著影響。
4. 就隔板開孔率而言，隔板採均佈小孔之開孔率不宜過小，開孔率最少需等於中央一大孔之設計，試驗顯示以開孔率 12% 之隔板八層，其底部灌漿壓力可達漿料淨壓力 4.4 倍，且中途斷料、重新灌注會造成壓力驟升，施工時應避免。
5. 軸壓試驗結果顯示，鋼柱內以萬分之四微膨脹 SCC 填充，隔板採中央一大孔或均佈小孔，軸壓強度都可滿足設計要求，且軸壓行為差異不大，強度差異最大約 6%，在材料變異範圍內。