

高樓結構系統傳力路徑細部檢核探討

陳正平 土木、結構技師

【摘要】

高樓結構設計除須決定結構系統、地震力、結構分析、及構件設計等工作外，尚有許多傳力路徑所經過之力量集中處、分析模式與實際結構施作不同而產生之差異、不同結構材料間力量轉換，以及分析模式簡化而致部份構件沒有輸出數據可供設計等情況，而必須作進一步檢核、修正、還原等工作。雖然檢核結果會增加些微材料用量，但其對結構系統的安全影響確是關鍵性的，如果豎向構材之穩定性未能確保，而發生傳力路徑中斷，或產生弱點，則大樓結構之主要構材設計得再保守也是沒有用的，甚至此些傳力路徑之重點位置尚須依“建築物耐震設計規範及解說”第六章(結構系統設計詳細要求)之規定放大地震力設計之。因此結構設計時必須事前對傳力路徑所經過之重點位置，其連續性及穩定性等問題作周詳的審視規劃，並預留所需構材尺寸空間，確實作好檢核工作才能確保整體結構安全性。

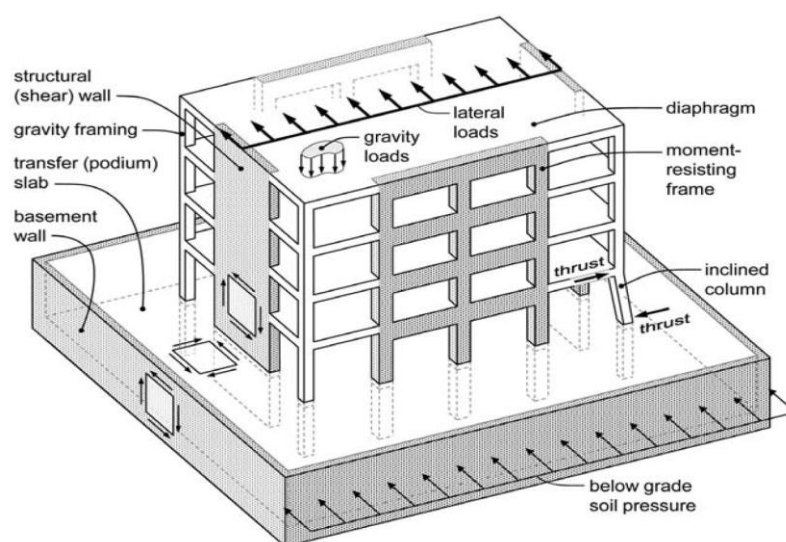
一、前言

高樓結構設計之重點除了選用適用之結構系統、考量合理之地震力、建立結構分析模式、及構件設計等工作外，尚有許多須要進一步檢核的地方。例如：傳力路徑所經過之力量集中處、分析模式與實際結構施作方式不同而產生之差異，不同結構材料間力量轉換，以及因為結構分析模式作了某種程度的簡化模擬而致部份構件沒有輸出數據可供設計等情況，必須依賴結構設計者藉其專業素養與經驗來作局部檢核與修正還原的工作。這些工作看似簡單，沒有什麼高深的計算，但這些細微的工作如果忽略或因力學觀念不確實，則可能造成整體結構系統機能效果不彰，嚴重時甚至導致結構物無法抵抗地震力而倒塌。高樓結構系統在地下

一層由上部鋼結構轉換成下部鋼筋混凝土構造地下室，便是一個須作進一步檢核之重要的位置。甚至此些傳力路徑之重點位置尚須依“建築物耐震設計規範及解說”第六章(結構系統設計詳細要求)之規定，針對傳力路徑臨界斷面作放大地震力設計之，以確保上部結構可進入塑性變形達到消能的目的。一樓橫隔版須進行檢核之主要項目有剪力牆或斜撐構架之周邊剪力檢核，及一樓橫隔版之彎矩及剪力傳遞檢核(含樓版開孔補強)等二主要項目。

二、豎向構材轉換層之力學模式

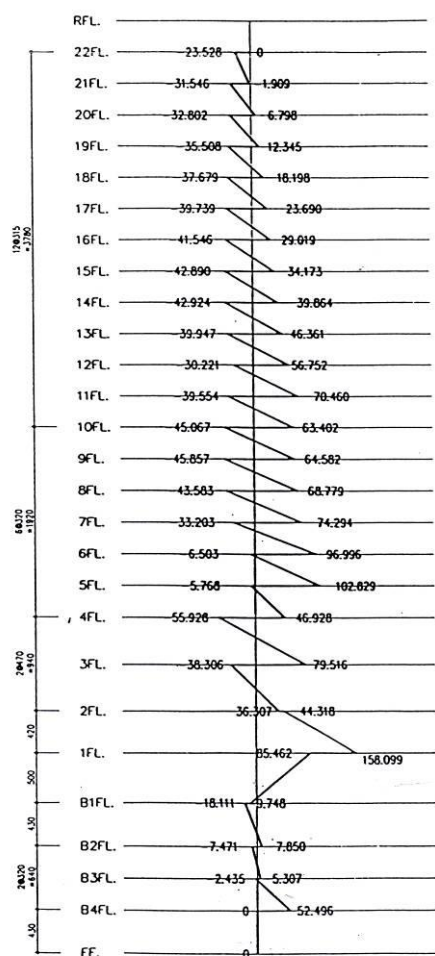
高樓結構系統之分析模式一般為減少輸入及輸出之工作量，分析程式均作了某種程度的簡化，其中尤以橫隔版假設為剛性之簡化動作對結構分析模式之輸入及輸出工作量大幅減少。也因為橫隔樓版本身的剛性很大(樓版開孔太多及長條形橫隔版除外)，若一樓橫隔樓版再與鋼筋混凝土構造地下室及外牆結合，就形成幾乎沒有側向位移的箱形結構體。此箱形結構體也是轉接及固定全部豎向構材之有效模式，但設計此轉接層之工作須配合其結構行為的特性，才能充分掌控結構體之整體安全性。由圖一之結構系統配置示意圖可看出「結構系統」本身即是「傳力路徑圖」，由圖中之力量走向即可了解傳力路徑走向。



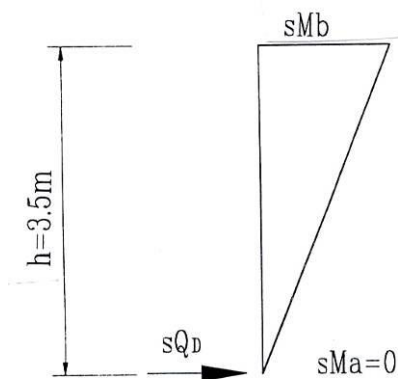
圖一：結構系統配置圖(亦即傳力路徑圖)^[1]

2.1 柱構材在轉接層之力學模式

高樓結構系統之柱構材由電腦結構分析所得之輸出力量，可描繪出如圖二所示之柱構材豎向彎矩圖。圖中顯示：在頂層之柱頂，梁柱接頭因為沒有上柱，因此該接頭由左右二根梁束制一根下柱；而柱底由二根梁束制二根(上及下)柱，致柱頂之束制度比柱底高，故柱頂之柱彎矩較柱底彎矩為大，其反曲點則偏向柱底。而中間一般層之柱頂及柱底之束制條件較平均故彎矩反曲點大部份在接近柱中間高度的位置；在底層則因地下室箱形結構的高束制現象，致一樓柱之彎矩反曲點很高，甚至已進入二樓之中間高度，故柱底之彎矩特別大，且一樓柱底之梁柱接頭其塑鉸不會產生在一樓梁，而是產生在一樓柱底。此即為轉接層之力學固定模式使然，要設計地下一層之轉接細部，就必須了解此種結構系統之特性。



圖二：柱構材彎矩分佈圖



圖三：轉接層自由體力學平衡模式

若取圖二中，地下一層部份之彎矩圖並將已接近下端之反曲點簡化為在柱底處，則其自由體力學平衡模式如圖三所示。設計此轉接層其力學平衡模式必須符合圖三之自由體平衡模式，才能符合整體結構系統之力學行為。要符合圖三之平衡模式可依以下之模擬來設計：

- (1) 假設地下一層柱底反曲點處必須提供一水平剪力，以便乘上反曲點至柱頂結點間之距離而得到柱頂平衡彎矩，轉接層柱頂彎矩完全由鋼骨柱承受(此轉接行為不得以鋼筋鋼骨混凝土合成柱設計)。
- (2) 假設柱底剪力可由柱底板之錨栓，鋼柱柱底之剪力樺或反曲點附近之剪力釘，及柱底正壓力產生之剪力摩擦力來提供。惟採用柱底正壓力產生之剪力摩擦力之方式來提供柱底剪力時，必須先確定所採用之正壓力為該組合載重反復作用下之最小正壓力，且須保守乘以 0.75~0.85 之折減係數，以避免載重高估。
- (3) 鋼柱之軸力可經由地下一層有包覆混凝土柱全段上之剪力接合物及柱底板直接承壓之有效面積合併轉接(見圖六)，但至轉接完成之柱底須以純鋼筋混凝土柱設計。

對彎矩部分之轉接舉簡單 ASD 計算例說明如下：

地下一層轉接層柱之彎矩圖如圖三所示

柱斷面：BH 850 x 250 x 12 x 19

材 質：SM 50 ($f_y = 3.3 \text{ t/cm}^2$)

塑性斷面模式： $Z = 4958 \text{ cm}^3$

$$s M_b = 4958 \times 3.3 \times 0.66 = 108 \text{ t-m}$$

$$s Q_D = \frac{s M_a + s M_B}{h} = \frac{0.0 + 108}{3.5} = 30.9 \text{ t}$$

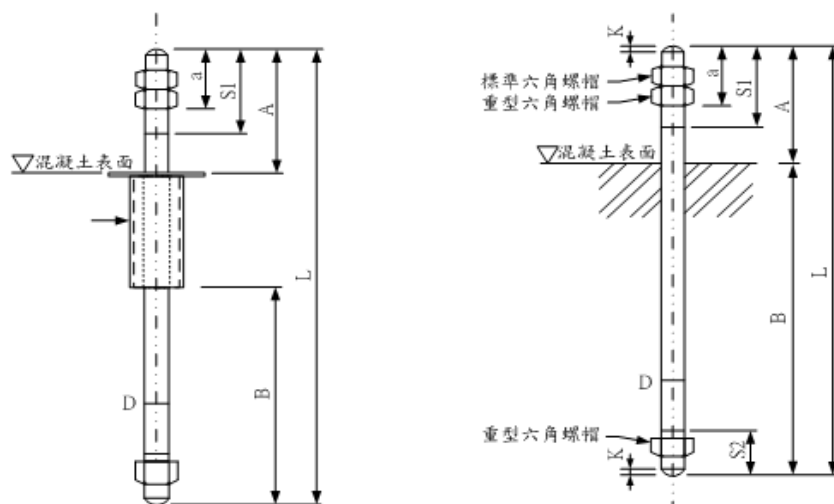
D42 錨栓容許剪力(參考尺寸見表一)

$$0.17 F_u \cdot A_b = 0.17 \times 4.2 \times 13.85 = 9.9 \text{ t} \quad (\text{控制})$$

$$0.33 F_u \cdot A_b \cdot \mu = 0.33 \times 4.2 \times 13.85 \times 0.55 = 10.6 \text{ t}$$

$$h = \frac{30.9}{9.9} = 3.1$$

USE 4 - D42 A307 錨栓



圖四：錨栓尺寸示意圖

表一：錨栓容許張力參考表錨栓尺寸示意圖見圖四)

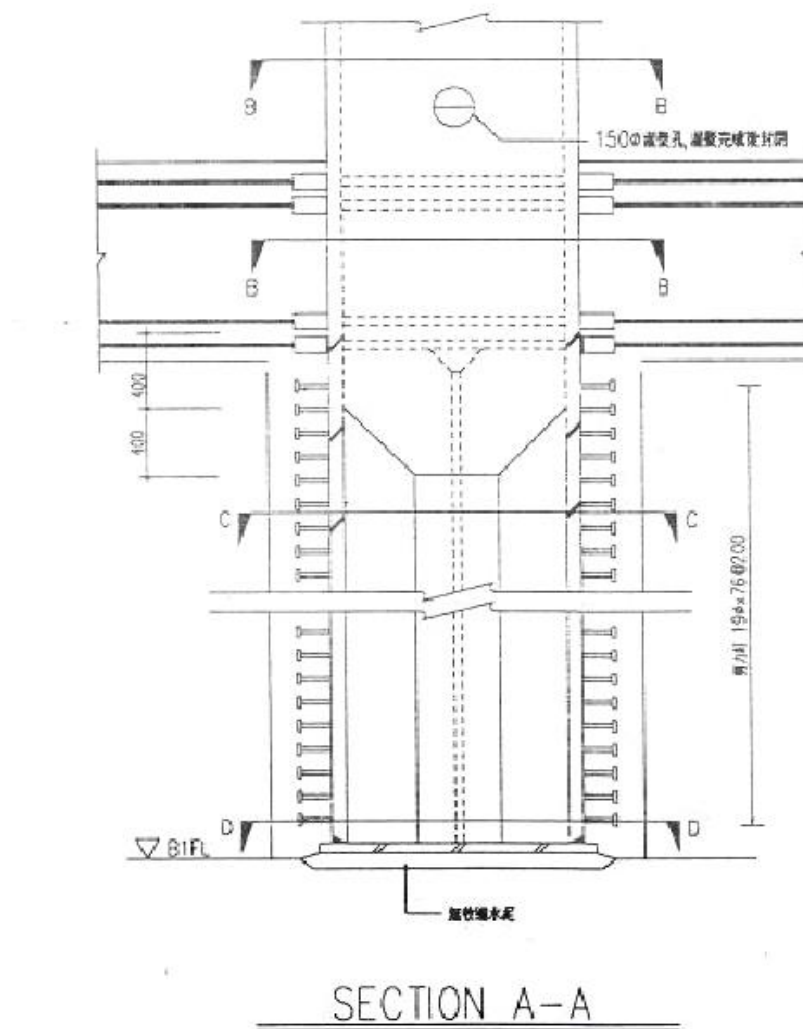
D	容許張力(ton)		A MAX.	B MIN.	S1	S2	K	F MIN.	G MIN.
	未留 腐蝕餘裕	容許周圍 1.5mm腐蝕							
M12	1.59	0.9	100	220	40	15	2	36	80
M16	2.83	1.87	120	320	50	19	2	48	100
M20	4.43	3.2	160	460	60	22	2.5	60	100
M24	6.38	4.88	280	600	70	27	3	72	150
M30	9.97	8.07	300	750	85	35	3.5	90	150
M36	14.35	12.06	390	890	100	41	4	108	150
M42	19.53	16.84	420	1030	115	47	4.5	126	150
M48	25.51	22.43	500	1180	130	53	5	144	200
M56	34.73	31.11	540	1380	150	61	5.5	168	200
M64	45.36	41.21	560	1580	170	72	6	192	200
M72	57.41	52.72	590	1770	190	80	6.5	216	250
M80	70.87	65.66	620	1970	210	88	7	240	250

(單位:mm)

(附註：轉接層柱頂之彎矩之抵抗模式不能以該彎矩除以該鋼柱沿彎矩方向之柱

深來計算剪力釘數量(見圖五)。因為此種平衡模式須待全數剪力釘均受載

才能完成將彎矩轉換至鋼筋混凝土柱，此時柱底轉接完成處之彎矩值仍為最大。此種平衡模式非如整體分析，將構材假設為一稜柱桿件分析所得在柱底反曲點處彎矩值為零之平衡模式。二者明顯不一致，前者將會導致局部提前破壞現象。)



圖五：不當之轉接模式(彎矩除以鋼深計算剪力釘數量)

在無地下室外牆或轉接層不在地下室之情況，則上例由分析所得之柱彎矩反曲點便不會在柱下端，反曲點之位置會往上升，通常會位於上下二樓版之間。反曲點處之剪力轉接方式可藉由柱上之剪力釘及小部份之鋼柱側面有效直接承壓面積轉給鋼筋混凝土柱。

在轉接層以上之鋼柱若為箱形斷面，則為了使箱形鋼柱在轉接層有較好的混凝土填充效果及握裹效果，實務上一般都會將箱形鋼柱轉變為“十”字形斷面（轉接層相關構件示意圖見圖六）。此種不同柱斷面之轉換會衍生下列問題：

(1)彎矩檢核

在轉接層之鋼柱必須承受如圖二所示之倒三角形彎矩及軸力，由於箱形鋼柱轉變為“十”字形斷面會減少承重斷面積及抵抗彎矩之斷面模數，因此箱形鋼柱斷面四個角落之裁切起始(頂)點及終(底)點必須檢核裁切剩餘斷面是否足夠承受該處剩餘之彎矩及軸力，故裁切起始位置不能太高。“十”字形斷面與箱形斷面相連接處，在二種斷面的過渡段中，“十”字形柱的腹板應伸入箱形柱內，其伸入長度應以不小於鋼柱較寬尺度之百分之八十七為宜，若施工確有困難則不得小於百分之五十，否則箱形柱之軸力轉入“十”字形柱的腹板內會有困難。參考資料建議“十”字形柱的腹板應伸入箱形柱內之長度不小於柱斷面深度加200mm，筆者認為此深度對二種斷面間之軸力轉換會更順暢，但對施工銲接工作會造成困擾。

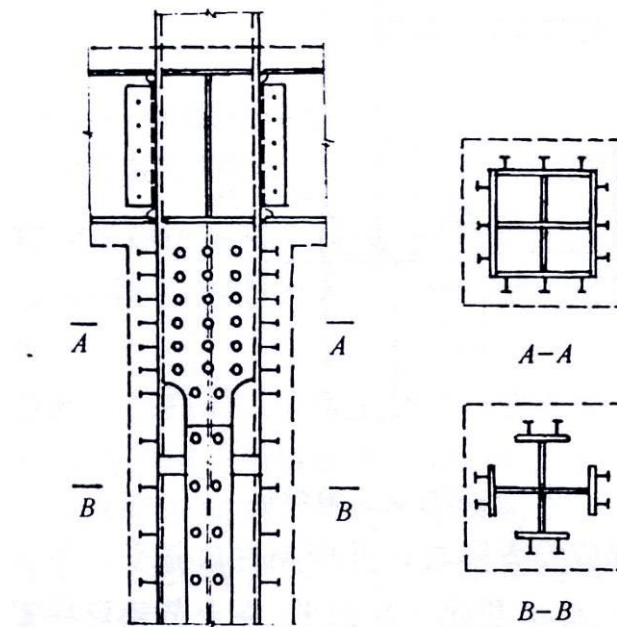
(2)剪力檢核

由於箱形柱之剪力傳遞係在二側柱板，而“十”字形柱之剪力傳遞係在中間腹板(見圖五之斷面 A 及斷面 B)，故“十”字形斷面之腹板頂端必須有一箱形柱之柱內橫隔板作為二種不同斷面間之剪力轉換，但若此橫隔板離箱形柱轉成“十”字形柱之裁切位置以上太遠，會導致“十”字形柱之腹板頂端與橫隔板間，以及

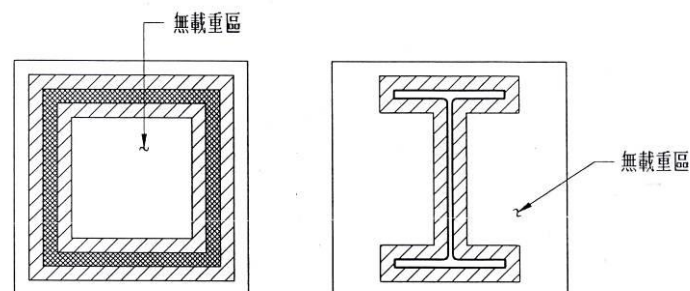
橫隔板與柱板間之銲接將會沒有足夠的空間可供進行手銲工作。因此剪力轉換之橫隔板便無法利用一樓梁柱接頭之下翼板橫隔板，而必須另行於“十”字形柱之腹板頂端或“十”字形柱之起始處增設一橫隔板。

(3)軸力檢核

鋼柱之軸力轉接方式可假設為全部軸力由分散於轉接層柱段全高之剪力接合物及柱底板直接承壓之有效面積合併轉接，此種假設是基於鋼柱在轉接層柱段及柱底板有效直接承壓面積(見圖七)之壓縮變形量二者均不大，其勁度相當。



圖六：轉接層細部構件示意圖



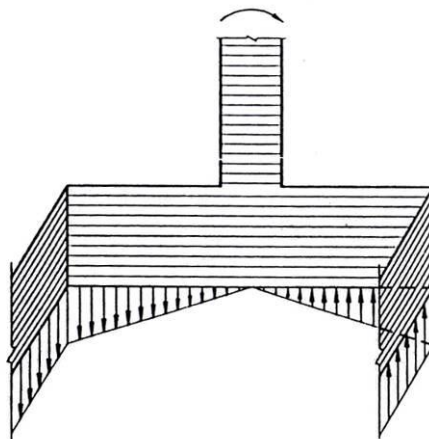
圖七：柱底板有效直接承壓面積示意圖

2.2 斜撐構架在轉接層之力學模式

斜撐構架在地下室有牆之情況，其穩定方式與斜撐構架在地下室之位置有關，大致可分為下列二種情況：

2.2.1.斜撐構架座落於地下室外牆上

斜撐構架座落於地下室外牆之上時，地下室外牆與斜撐構架成為一體，地下室外牆亦為斜撐構架之支承，其穩定方式係藉由斜撐構架之邊柱藉植上剪力釘錨定入地下室牆體內，再由地下室牆體將傾倒力矩及剪力向外擴展傳遞至整個地下室箱體，最後由土壤之承載力及摩擦力來承受(見圖八)。此時剪力牆之邊構材主筋須埋入足夠的深度，以便與地下室外牆之垂直筋錯位搭接。



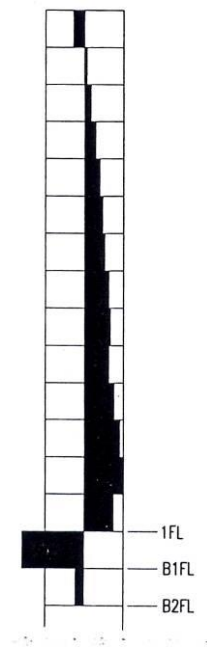
圖八：地下室牆體傾倒力矩擴展傳遞示意圖

2.2.2 斜撐構架座落於地下室外牆以內

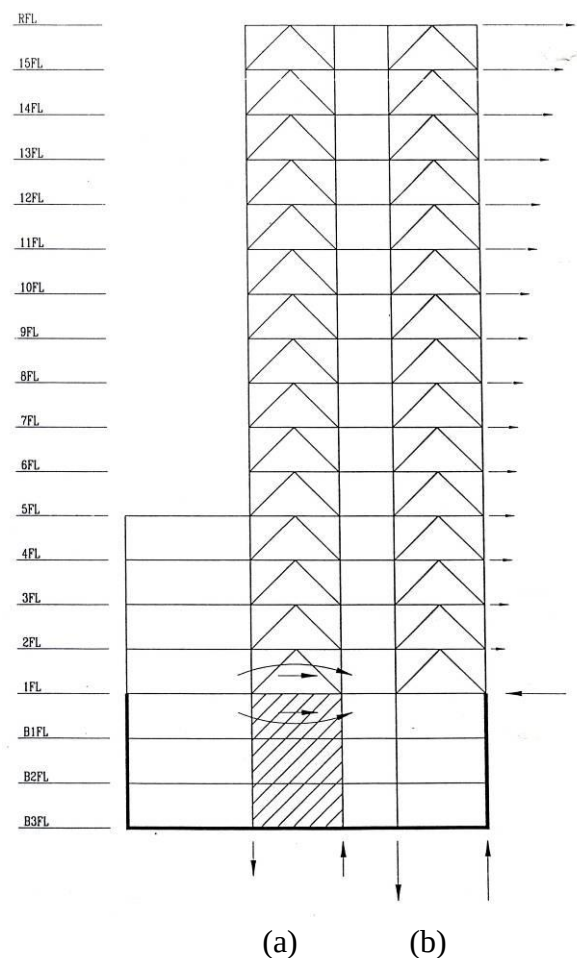
2.2.2.1 斜撐構架下方有斜撐或剪力牆向下延伸一層樓高以上之情況

高樓結構斜撐構架或剪力牆由電腦分析所得，在轉接層之輸出剪力圖可描繪出如圖九所示。圖中顯示在地下一樓轉接層之剪力甚大，甚至大過最小設計總橫力，且地下一樓轉接層之剪力與一樓之最小設計總橫力為同方向。此種現象是因為地面以上之剪力牆在沿牆面方向之勁度較其他柱構材之勁度高出很多，因此剪

力牆會承受大部份之建築物水平力，進而在二樓樓版面產生極大之傾倒力矩及剪力。剪力牆承受此傾倒力矩及剪力便須有良好的穩定措施才能發揮剪力牆之功能。如果剪力牆有繼續向二樓版面以下延伸一層樓高以上時，此時地面以下部份之牆其主要力學行為已不是以剪力牆為主之功能，而是兼做為上部斜撐或剪力牆構架之傾倒力矩及水平力之平衡穩定功能。斜撐構架結構系統其錨定或穩定之力學平衡模式圖見圖十所示。



圖九：斜撐構架或剪力牆層剪力分佈示意圖



圖十： 斜撐構架穩定系統力學平衡模式示意圖

圖十 (a)中剪力牆之穩定方式主要為由一樓樓版(橫隔版)與地下一層樓版利用槓桿原理所提供之水平力力偶來平衡及抵抗傾倒力矩及剪力，其簡化之力學模式如圖十一所示。並藉由橫隔版之傳遞(見圖十二)，將此水平力傳遞至地下室箱室結構之外牆上。其中：

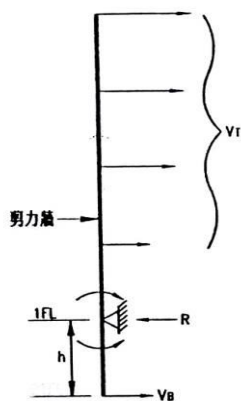
$$M_{(1F)T} \doteq M_{(1F)B}$$

$$V_B = \frac{M_{(1F)B}}{h}$$

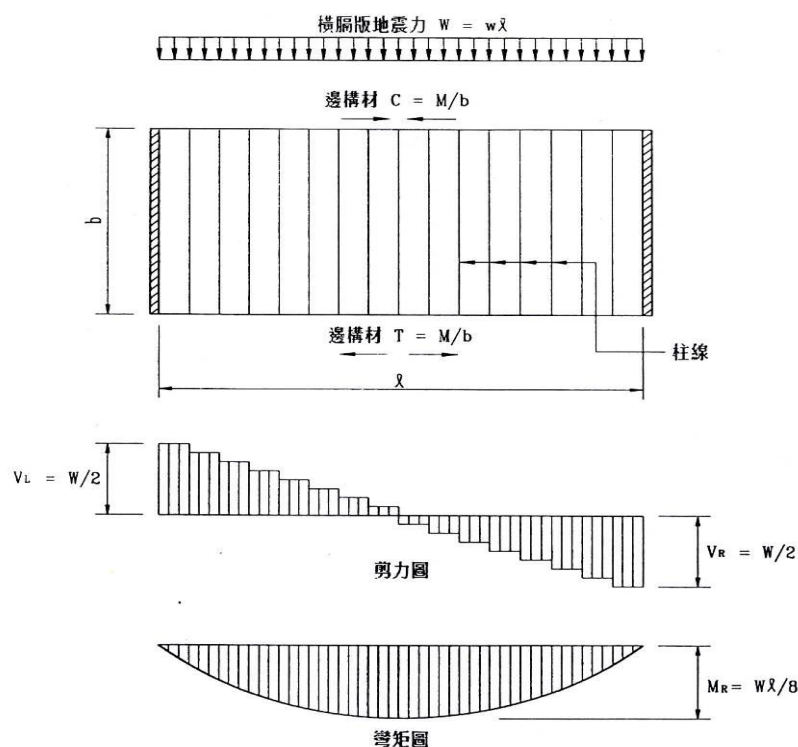
$h=1FL$ 梁中心至反曲點間之高度

因 $M_{(1F)B}$ 很大，而 h 很小，故所產生之剪力便很大。當然在剪力牆二端之邊構材之基底部亦會受土壤反力及地梁或基樁之束制而產生另一組垂直力力偶來

分擔傾倒力矩，但因地梁或基樁之勁度與水平橫隔版及地下室箱體之高勁度相比仍明顯較小，因此這組垂直力力偶對抵抗剪力牆之傾倒力矩之貢獻度較不顯著。因此圖十(a)之情況，上部剪力牆之傾倒力矩及剪力之穩定系統係以地下室剪力牆段之水平力力偶系統為主。當然邊構材由垂直力及傾倒力矩所產生之軸力仍須比照鋼柱之軸力轉接模式，經由地下一層有包覆混凝土柱之全段轉接模式轉給鋼筋混凝土柱，但至轉接完成之柱底須以純鋼筋混凝土柱設計。



圖十一：水平力力偶抵抗傾倒力矩之簡化力學模式



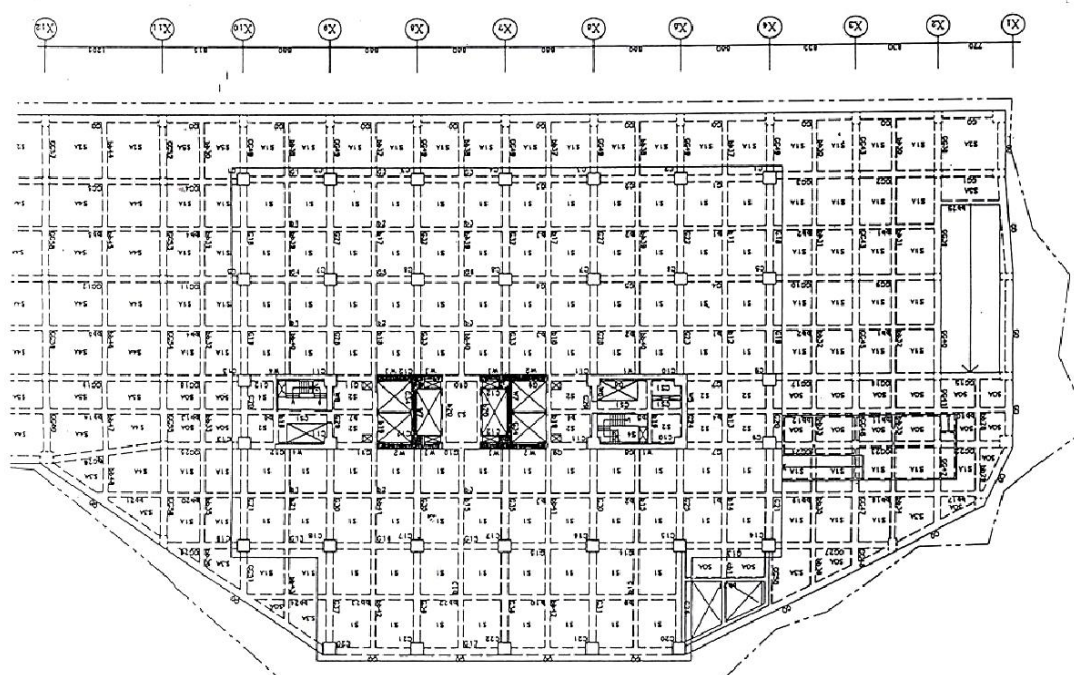
圖十二：橫隔版水平力傳遞至地下室外牆力學模式示意圖

2.2.2.2 斜撐構架下方無斜撐或剪力牆向下延伸之情況

斜撐構架下方亦常有因通道經過或另有其他用途等因素，致斜撐或剪力牆未能往下延伸至地下一層以下(見圖九 (b))，而必須中止於地面層之情況。此時斜撐構架之穩定系統便無法由一組水平力力偶系統來抵抗傾倒力矩及剪力，而必須全部由垂直力力偶來抵抗傾倒力矩。此時斜撐構架邊構材(鋼柱)之軸力須經由轉接層轉給地下室鋼筋混凝土柱，因傾倒力矩必須全部由垂直力力偶來承受，因此邊構材之軸力很大，有時甚至須將邊構材延伸至地下室基礎才足以傳遞全部邊構材之軸力。地下室之鋼筋混凝土轉接柱之設計除須按「混凝土結構設計規範」第 15.5.4.1 至 15.5.4.5 節之規定於柱之全長配置橫向圍束箍筋外，亦須有足夠強度的地梁或樁基供其錨定。

三、橫隔版在轉接層之力學模式

豎向構材在地面層梁之上緣及下緣之剪力，絕大部份為正、負號為相反，但剪力作用方向為同向，因此地面層樓版須承受豎向構材於該層上緣及下緣剪力相加之總剪力，故豎向構材在地面層之剪力集中處須檢核該豎向構材四周之局部抗剪能力是否足夠。同時亦須檢核地面層橫隔樓版之面內剪力(剪力僅可由版承受，不可由垂下樓版下方之梁斷面承受)及彎矩強度是否足夠將橫隔樓版面內之總水平力傳遞至地下室周邊之外牆上(見圖十二)。但主要抵抗地震力之豎向構材常會位於電梯間、樓梯間、採光天井或管道間周圍，此時豎向構材在地面層之剪力集中處常因這些樓版開孔之存在致豎向構材四周之局部抗剪強度不足之現象(見圖十三所示：剪力牆二側樓版均有電梯間或管道間之開孔，必須由穿過剪力牆前後端之集力梁向外側傳遞散開)，若設計時沒有作局部之加強則豎向構材之穩定性也會因此而受到影響。

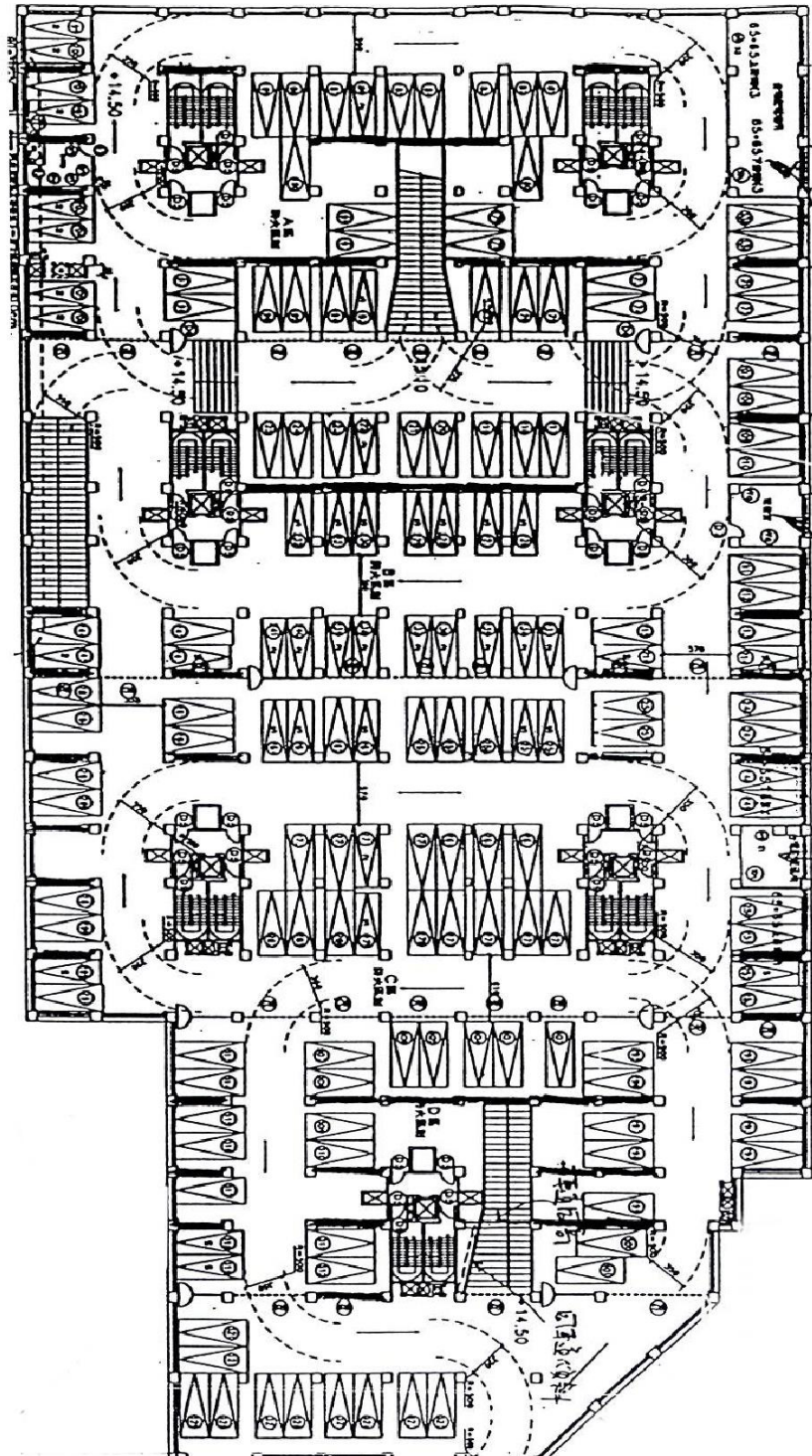


圖十三：斜撐構架或剪力牆局部抗剪能力檢核模式

四、地面層橫隔版為長條狀之處理方式

地面層為長條狀或長條不規則形狀時，在檢核總水平力在橫隔版面內傳遞時將面臨產生之面內彎矩太大而致橫隔樓版之邊構材斷面不足以容納撓曲鋼筋的情況。因此規劃結構斷面時須先於地下室範圍內平均配置垂直於長向之地下室剪力牆(見圖十四)，以便幫助承受總水平力。且此地下牆於結構分析前即須建立於分析模式中，並須檢核地下室基礎的承載能力。若地下牆無法在地下室中上、下連續配置，則設計時尚須檢核傳力路徑力量集中的問題。

若地面層橫隔版開孔太多，例如：電梯間、管道間、排煙道、汽車匝道、樓梯及電扶梯等致使地面層無法發揮橫隔版功能時，則必須考慮增加地下牆或放棄該層橫隔版功能。若開孔量不多可採補強方式補救時，則須檢核二次彎矩所增加之局部邊構材鋼筋量及其錨定設計問題。

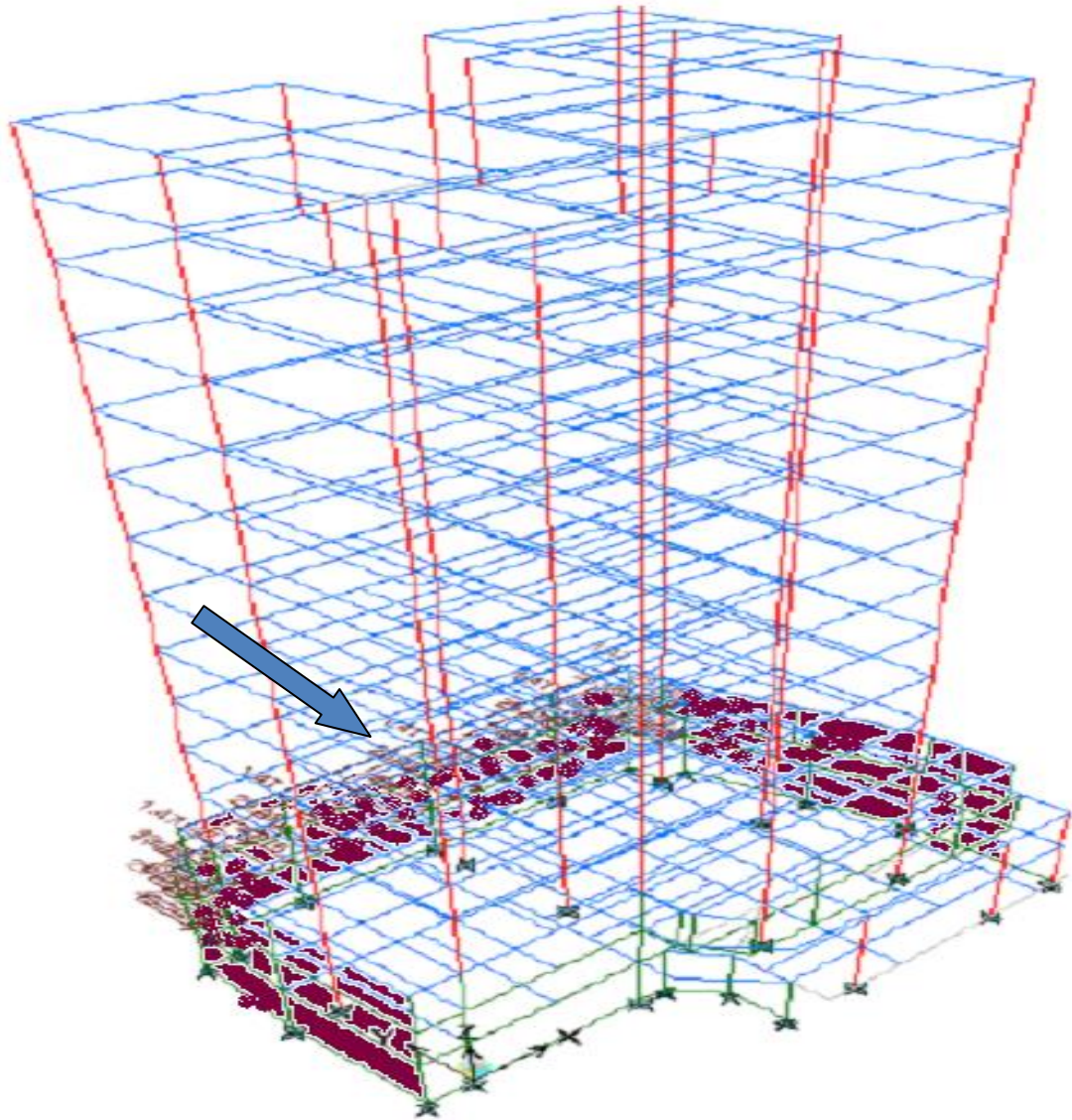


圖十四：地下室配置垂直於長向之剪力牆示意圖

五、地下室外牆不完整時之處理方式

當地下室外牆只有三面之坡地建築物，其一樓橫隔版在無外牆那一面上方之

邊梁必須成直線貫通，否則一樓橫隔版之邊構材會呈不連續狀，亦即有如沒有橫隔版邊構材，橫隔版將無法發揮功能(見圖十五)。



圖十五： 地下室外牆只有三面之情況

六、結語

總上探討，高樓結構設計並非以電腦自動化分析及設計就可完成。其豎向構材之穩定性檢核以及傳力路徑連續性檢核是高樓結構設計必要之動作，雖然其工作量及材料用量佔整體結構體之比例並不高，但其對結構系統的安全影響確是關

鍵性的，如果豎向構材之穩定性未能確保，則大樓結構之主要構材設計得再保守也是沒有用的。目前從高樓結構外審中可發現絕大多數之高樓結構均未檢核前述要項或檢核工作不完全，因此建議作結構設計時必須事前規畫傳力路徑所經過之重點位置之連續性及穩定性問題，除必須預留所需構材尺寸外，必須確實作好檢核工作才能確保結構安全性。

【參考文獻】

- [1] Moehle, Jack P., Hooper, John D., Kelly, Dominic J., and Meyer, Thomas R. (2010). “Seismic design of cast-in-place concrete diaphragms, chords, and collectors: a guide for practicing engineers,” NEHRP Seismic Design Technical Brief No. 3, produced by the NEHRP Consultants Joint Venture, a partnership of the Applied Technology Council and the Consortium of Universities for Research in Earthquake Engineering, for the National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, NIST GCR 10-917-4.