

鋼筋混凝土結構繫鈑柱 與 梁抗震補強工法之設計與施工

林 瑞 棋 著

現代營建雜誌社 編印

國家圖書館出版品預行編目資料

鋼筋混凝土結構繫鈑柱與梁抗震補強工法之設計與施工/ 林瑞棋著.--初版.-- 臺北市：現代營建雜誌社,2004[民 93]

面： 公分

ISBN 957-9418-26-8 (平裝)

1. 鋼筋混凝土 2. 建築物—防震

441.557

93007532

鋼筋混凝土結構繫鈑柱與梁抗震補強工法之設計與施工

作 者：林瑞棋

出 版 者：現代營建雜誌社

發 行 者：蘇文宗

登 記 證：局版台誌字第2228號

地 址：台北市長安東路一段46號5樓

電 話：(02)25518906(代表號)

傳 真：(02)25719333

郵政劃撥：01510899

戶 名：現代營建雜誌社

總 經 銷：現代營建雜誌社

地 址：台北市長安東路一段46號5樓

電 話：(02)25518906

傳 真：(02)25719333

出 版：2004年 5 月初版

定 價：新台幣250元

I S B N：957-9418-26-8 (平裝)

《版權所有・翻印必究》

495

7437502

20121

自序

1999年9月21日凌晨一點四十七分，在台灣中部地區發生規模7.3級強烈地震，造成南投、台中、苗栗、彰化、雲林等縣市民眾重大傷亡，建築物損壞倒塌，道路寸斷、橋樑潰陷等嚴重財產損失；創鉅痛深，而震驚世界。歐美先進國家及日本基於人道主義，先後派遣專業救援隊抵台，積極投入進行掩埋在瓦礫中之災民；俄羅斯之救援隊為爭取救援時間，而向中國政府商請借道領空航線直飛台灣參與災民救援行動，竟然遭到中國政府拒絕，中國政府此一毫無人性之作為，令世人印象惡劣深刻。

在台灣國內民眾、人民團體與宗教界等，亦自動自發捐獻物資、建造臨時房屋、認養倒塌國中、小學重建，充分表現台灣人同心協力關懷愛護台灣這塊國土與災民之高操情懷，值得台灣人自己慰藉。

根據台灣官方調查統計震災資料：死亡人數為1,712人、受傷人數為4,005人，失蹤人數為219人；建築物全倒數為51,969戶，半倒者為35,735戶；又據內政部營建署與公共工程委員會動員專業技師公會辦理有報酬建築物危險分級評估工作共60,511棟，。

「鋼筋混凝土建築物震害評估與修復補強設計(專利第164024號)」，係根據鋼筋混凝土結構設計理論與規範針對受震害結構之版、梁與柱等之個別構材損壞程度，經現場勘查鑑測，取樣試驗等所獲得之混凝土與鋼筋之實際強度，據為分析計算未遭受損壞前之抵禦外力強度，受損後殘存抵禦外力強度，求取構材損壞損失抵禦外力強度做為震害評估與修復補強設計數據，其在分析計算過程中，可以明確獲得混凝土或壓力鋼筋之增加壓應力，與拉力鋼筋之增加拉應力之數值，在容許應力範圍內，或在容許應力與降伏應力之間，或在降伏應力與最大拉力之間，而評估判定建築物構材毀損程度分類級別。

對於補強設計，即應根據上列分析計算所得混凝土與壓力鋼筋二者損失之壓應力分析計算所得壓力之和，或拉力鋼筋損失之拉力計算需要補強鋼材斷面積，以選擇材質適宜之角鋼與鋼板條做為補強肢材；因混凝土遭受破壞後並不能以混凝土補強，而必需使用鋼材補強，為維持原有補強構材之斷面尺寸與構架梁與柱之剛性連接點各構材勁度不致發生過度變化，而影響梁與柱承受力之重分配變動，是本補強設計採用角鋼與鋼板條為補強材料之主要考慮。

1999年9月21日發生大地震以來，已將屆滿五年，當震災後建築物之修復補強係由建材商主導；建築師與專業技師公會亦動員會員以目視自由心證判斷建築物之毀損程度張貼「紅、黃、青」等三種紙張了事；如今建築主管官署卻仍停留在「震災後危險建築物緊急鑑定評估」，有報酬委任建築師與專業技師等以構材損壞總數百分比填表評估，令人憂心。921震害之建築物不知何年何月始能修復補強結束。

筆者抱著沉重的心情完成拙作，唯一心願為希望有助於災民早日完成受震害建築物經修復補強後得到生命財產安全保障，而重獲安居樂業正常生活。

林 瑞 棋 謹序
公元 2004 年 4 月

目 錄

自 序

一、前言..... 1

二、鋼筋混凝土構造物震害鑑定標準悖逆設計理論與規範..... 1

三、鋼筋混凝土構造物之破裂損傷應依設計理論與規範規定鑑定..... 4

四、鋼筋混凝土建築物梁與柱構材在外力作用下所受之應力..... 6

五、遵循鋼筋混凝土容許應力設計理論與規範之修復補強方法..... 8

六、矩形斷面簡支梁之補強設計..... 10

七、矩形斷面有壓力鋼筋梁之補強設計..... 23

八、柱構材斷面破裂補強設計..... 36

九、單向偏心力柱斷面破裂補強設計..... 40

十、雙向偏心載重柱斷面破裂補強設計..... 52

十一、軸心載重柱斷面破壞修復補強設計..... 64

十二、繫鈑柱之補強設計..... 67

十三、外伸懸臂梁構材斷面破裂補強設計..... 79

十四、鋼筋混凝土結構繫鈑柱與梁抗震補強工法施工..... 85

十五、鋼筋混凝土結構繫鈑柱與梁抗震補強工法之施工典型圖..... 88

十六、結語..... 90

十七、附錄..... 92

一、前言

鋼筋混凝土構造物係以鋼筋與混凝土二種物理性質迥異之個別材料結合而成，以此二種材料結合為土木、建築等工程構造物之構材，主要在擷取鋼筋抗拉力與混凝土抗壓力之優點，以構成構造物抵禦垂直靜載重、活載重與地震力、衝擊力、風壓力及風吸力等之外力作用；為達成鋼筋混凝土構造物足以抵禦外力作用，在結構設計分析時，必須依據「鋼筋混凝土設計理論」與「鋼筋混凝土設計標準規範」之限制，凡未遵循設計理論與標準規範，或疏忽所造成構造物之破壞或倒塌，其責任應歸屬設計人；在施工階段，施工者倘不遵循設計圖說規定「材料標準規範」與「施工標準規範」施工，並接受監造人之糾正改善者，所造成構造物之破壞或倒塌，其責任應歸屬施工者；若施工者均能依設計圖說在監造人督導指揮下施工，所造成構造物之破壞或倒塌，其責任應歸屬監造人；監造人除監督指導施工外，並應於施工前發現設計圖說錯誤，告知設計人更正或變更設計，其所造成施工或成本與工期之增減，設計人應予起造人及承造人共同協商解決。

在建築物破壞或倒塌時，應徹底釐清起造人、設計人、承造人與監造人間之權利義務與責任界限，方能在發生災害後，研判責任歸屬與損害賠償問題；歷來，在台灣發生地震、風颱、土砂流時，將造成災害一味歸於人力不可抗拒之「天災」，而放縱真正造成災害關係人之「人禍」，其對消費者而言，是一絕對不公平的。

對於毀損壞之建築物，經詳細鑑定分析設計，確認可以修復補強者，應准予修復補強使用，以減輕受害人之經濟負擔，是拙文唯一標的。

二、鋼筋混凝土構造物震害鑑定標準悖逆設計理論與規範

鋼筋混凝土結構設計分析方法之基本理論分為：

1. 彈性理論設計：即容許應力或工作應力設計。
2. 非彈性理論設計；即極限強度設計或強度設計；

非彈性理論又分為「塑性鉸理論」與「屈服線理論」二支流。

彈性理論與非彈性理論二種設計方法，均被應用於鋼筋混凝土構造物之設計；

容許應力彈性理論設計應用於土木、建築工程，迄今約為70年，極限強度非彈性理論設計約為30年，然而，鋼構造(SS)或型鋼鋼筋混凝土構造(SRC)或鋼筋混凝土構造(RC)，在較保守之美國鐵路工程協會(AREA)等，則仍沿用容許應力彈性理論設計；另一種設計方法為變形界限之臨界載重設計，但較少被採用。

鋼筋混凝土設計理論，因基於分析計算需要，或以假定，或以實驗數據而獲得，以致理論與實際尚存在若干差異，而可能導致在設計分析計算上造成安全上之缺陷或瑕疵，為彌補該等差異或缺陷，乃以往昔累積經驗去蕪存菁列為設計分析必須遵循之「設計規範」，供為設計分析時之制約，以避免結構設計完全依理論分析計算時，造成構造物在建造完成使用後，在外力作用下構成變形、破壞、甚至倒塌，而影響安全保障，故結構設計者除應熟諳設計理論外，更應嚴格遵循設計規範之拘束，方能促成結構設計趨向盡善盡美境界。

鋼筋混凝土構造物之嚴重變形，崩潰或倒塌，是一無法修復補強的不幸事實；構造物構成之梁、柱、版等構材個別破裂損傷之修復補強，亦是一非常無奈的事後補救措施，其修復補強方法、現場勘查鑑定、設計分析等技術之困難度應超過一般新建構造物之設計分析計算。

對於構造物造成個別構材破裂損傷者，應依循「設計規範」規定逐項加以檢查勘測，如版、梁構材之最小厚度或深度、最大撓度、最少鋼筋量與破裂深度等做為初步研判依據，倘檢查勘測結果發現未符合設計規範規定，則可瞭解造成破裂損傷之原因為「設計錯誤」；若檢查勘測結果符合設計規範規定時，則須進一步就破裂損傷部位附近敲除水泥砂漿粉飾厚度，先以混凝土抗壓強度彈性錘測試混凝土抗壓強度參考數據，做為混凝土鑽心取樣試驗抗壓強度數值；同時選擇構材受力最少部位之鋼筋取樣做鋼筋拉力強度試驗，以研判使用鋼筋材料是否符合「材料標準規範或設計規範」；依據前述混凝土與鋼筋試驗強度，除可做為修復補強設計分析計算數據外，亦可研判造成構材破裂損傷係出於監造人未嚴格執行督導施工或覆核設計圖說之錯誤，或放任承造人偷工減料所造成。

依據前述檢查勘測混凝土與鋼筋試驗實際強度、鋼筋數量及構材破裂損傷深度

等，均符合材料、設計、施工標準規範允許內之構材破裂損傷，應為值得修復、修復補強；對於因政府改變建築執行命令提高抗震強度前，完全未遭受破壞之構造物，僅為配合建築執行命令，使構造物之抗震強度符合新政令者，則須做補強措施，或以現成構造物檢查勘測事實，核算其抗震強度是否符合新政令之抗震強度，經核算後，如有不符合新政令時，始須補強。

1999年9月21日發生集集大地震後，內政部於同年12月29日修正「建築技術規則建築構造篇耐震設計規範與解說」，提高台灣各地地震分區抗震分區抗震區別，如震害最嚴重之南投縣自中度地震地區改列強烈地震地區，但在集集大地震災區內，未受到震害之毫無破裂損傷的建築物是否應加補強，則深具爭議性存在；此一情形，在日本亦有類似爭議，該爭議應出於建築執行命令未界限重建或新建建築物，或包含未受到震害建築物？

對於檢查勘測結果，如樓版雙向版之厚度小於90mm或延版四周總長度之1/180時，所造成之破裂損傷；樓房傾斜後之重心與形心構成本力偶大於樓房傾倒力矩時，所造成之傾斜；連續梁之深度小於1/26跨度，且在無活載重下，其撓度超過1/360跨度時，所造成之破裂損傷是否值得修復補強；地下室建造在軟弱土層之連續壁厚度小於0.07開挖深度或建造在一般堅實土層少於0.05開挖深度時，所造成之破壞是否值得修復補強等，均有疑問？若以樓房傾斜度為例：依美國ACI 347規定：現場澆鑄混凝土建築物，垂直定位為(a)全高小於或等於30m之線條、面、及稜線不得大於26mm，(b)全高大於30m之線條、面、及稜線不得大於全高之1/1000，並不得大於152mm，(c)自基礎側面及頂面相對於圖說指定平面之斜度，每3m不大於26mm。若據台灣建築物之鑑定標準規定：建築物之傾斜度小於或等於1/200全高為不嚴重，小於1/200或等於1/150全高為使用不方便，小於1/150或等於1/100為危險但可扶正；依此一規定，如建築物全高為50m時，其水平偏移25cm為不嚴重，水平偏移達34cm始為使用不方便，水平偏移達50cm始為危險，但可扶正；再假設樓層寬度為20m時，則樓版兩端之高低差已達10cm為不嚴重，高低差已達14cm始為使用不方便，高低差已達20cm始為危險；但就相對基礎而言、沉陷或懸浮10cm為不嚴重；沉陷或懸浮14cm始為使用不方

便，達21cm始為危險；但對建築物偏移重心後，可能造成之傾倒力矩逐漸增加，將導致土壤承载力之增加，是否將構成安全上之威脅？按該鑑定標準，因建築主管機關迄未建立建築物竣工圖必須詳列傾斜度管制，故該鑑定標準應無法反應造成構造物之真實傾斜度；其他如版、梁、柱等構材之破裂損傷，係以破裂縫之寬度為鑑定安全標準，而忽視破裂縫深度，該鑑定標準顯然已悖逆設計理論與規範制約。

三、鋼筋混凝土構造物之破裂損傷應依設計理論與規範規定鑑定

鋼筋混凝土構造物主要使用材料為鋼筋與混凝土，其個別材料材質、性能、強度等要求應符合其個別「材料標準規範」，並應詳細標註於設計圖上，俾可供為施工時遵循採購，抽樣試驗、方足於事前預防採購材料造成未符合設計要求問題，並避免造成構造物在建築完成後成為有缺陷之潛在危險建築物。

鋼筋混凝土建築物之結構設計，其設計樓層數至少應依表一所列混凝土設計強度 f_c' 與鋼筋種類、降伏點 f_y 、抗拉強度 f_{pu} ，較為符合設計與經濟原則，如設計圖說標註混凝土設計強度 f_c' 及鋼筋種類與表一不同時，仍應採用設計圖說標註標準；表一中所定混凝土設計強度 f_c' 係以15cm ϕ ×30cm 試體之28天齡抗壓強度為準。

表一 鋼筋及混凝土強度

結構物	混凝土設計強度 kgf / cm ² f_c'	鋼筋種類 (C.N.S)	降伏點 kgf / mm ²	抗拉強度 kgf / mm ²
無筋混凝土	140(2,000 psi)			
二層樓以下建築	175(2,500 psi)	SD24	24以上	39以上
三層樓至五層樓建築	210(3,000 psi)	SD28	28以上	49以上
六層樓以上建築	280(4,000 psi)	SD42	42以上	63以上

鋼筋混凝土建築物之施工應依ACI 347標準之垂直載重、混凝土側壓力規定設計模型(Form work)，模型完成混凝土澆鑄後、其修飾與修補外露面之容許誤差如表二：

表二 混凝土外露修飾與修補之容許誤差

最大容許誤差
單位：inch(mm)

1.現場澆置混凝土建築物

(1)垂直定位(Vertical alignment)

(a)全高小於(含)30M

線條、面、及稜線.....1(26)

外露腳柱之外角及露見之混凝土控制縫凹槽(grooves).....1/2(13)

(b)全高大於30M

線條、面、及稜線.....全高之1/1000但不大於6(152)

外露腳柱之外角及露見之混凝土控制縫凹槽.....全高之1/2000但不大於3(76)

(2)側向定位(Lateral alignment)

(a)構件(members).....1(26)

(b)位於樓版，小於(含)30cm開口之中心線位置及較大開孔之邊緣位置.....1/2(13)

(c)截角(sawcut)、接縫及嵌入版中之薄弱面.....3/4(19)

(3)水準定位(Level alignment)

(a)版頂面

斜坡版面(slabs-on-grade)之高程.....3/4(19)

模板支撐未拆除前，版頂面之高程.....3/4(19)

(b)模板支撐未拆除前，有模板版面(formed surface)之高程.....3/4(19)

(c)門楣、門檻、女兒牆、水平槽及其它露見線條.....1/2(13)

(4)斷面尺寸(Cross-sectional dimensions)

柱、梁、柱墩、牆(僅厚度)及版(僅厚度)及其它構件

斷面尺寸小於(含)30cm.....+3/8(+10)

.....-1/4(-7)

斷面尺寸大於30cm但小於90cm.....+1/2(+13)

.....-3/8(-10)

斷面尺寸大於90cm.....+1(+26)

.....-3/4(-19)

(5)相對定位(Relative alignment)

(a)階梯

相鄰蹴高之差.....1/8(4)

相鄰踏深之差.....1/4(7)

(b)凹槽(grooves)

指定寬度小於(含)5cm.....1/8(4)

指定寬度大於5cm，但不大於30cm.....1/4(7)

(c)拆模後之成面相對於圖說指定平面之斜度，每3M不大於下列各值	
外露腳註之外角及露見之混凝土控制縫凹槽.....	1/4(7)
其它條件.....	3/8(10)
(6)構件開口(Openings through members)	
(a)開口模斷面尺寸.....	1/4(7)
.....	+1(+26)
(b)開口中心線位置.....	1/2(13)
2.基礎	
(1)側向定位	
與指定重心之偏差在錯誤方向，基礎寬度之2%內但不大於.....	2(51)
基礎面砌有圬工.....	1/2(13)
(2)水準定位	
基礎面砌有圬工.....	1/2(13)
其它基礎面.....	+1/2(+13)
.....	-2(-51)
(3)斷面尺寸	
(a)平面尺寸(有模板)(formed members).....	+2(+51)
.....	-1/2(-13)
(b)平面尺寸(無模板)(unformed members)	
小於(含)60cm.....	+3(+76)
.....	-1/2(-13)
大於60cm小於180cm.....	+6(+152)
.....	-1/2(-13)
大於180cm.....	+12(+305)
.....	-1/2(-13)
(c)厚度減少.....	-5%
(4)相對定位	
基礎側面及頂面相對於圖說指定平面之協度，每3M不大於.....	1(26)

四、鋼筋混凝土建築物梁與柱構材在外力作用下所受之應力

建築物結構體中之主要構材為基礎、柱、梁、樓版、剪力牆；樓梯、承重牆或隔間牆為次要構材；主要構材一旦受到破壞，但未傾斜、變形崩潰或倒塌時，應可以鋼筋混凝土設計理論，依個別構材破裂損傷程度，如梁、柱等破裂深度，或爆裂殘存有效斷面，與實際使用鋼筋斷面積等為數據，以分析計算受害構材在破壞前鋼筋與混凝土個別實際抵禦外力強度；再依據勘查，鑑定構材遭受破壞裂縫深度或爆

裂或破碎等情況，分析計算出遭受破壞後鋼筋與混凝土個別殘存實際抵禦外力強度；然後以遭受破壞前實際抵禦外力強度減去遭受破壞後殘存實際抵禦外力強度，計算遭受破壞之減損強度，做為分析計算鋼筋增加之拉應力或增加壓應力，與混凝土增加之壓應力，以決定修復或修復補強鋼材需要斷面積，選擇抗彎曲拉力、抗彎曲壓力、抗扭曲力或抗剪力等個別主要肢材元件與次要肢材元件，做為修復補強梁、或柱、或版之材料，使該個別構材恢復至破壞前之抵禦外力強度。

另一種鋼筋混凝土構造物在遭受強烈地震後，並未受到任何破壞，但因政府新頒佈建築法令提高抗震強度，而必須補強以符合新建築法令者；其分析計算方法則須依據構造物之現狀，如梁之跨距，斷面尺寸、與柱之高度，斷面尺寸等之平面與立面佈置，以新頒佈建築法令提高抗震強度前與後，個別設計分析構造物之梁、柱、版等之抗彎曲力矩、抗剪力、抗扭力等，然後以建築法令提高後之梁、柱、版等抵禦外力強度減去建築法令頒佈前之梁、柱、版等抵禦外力強度，做為分析計算需要增加補強梁、柱、版等鋼材之主要肢材與次要肢材個別補強需要斷面積，以選擇抗彎曲拉力、抗彎曲壓力、抗扭力或抗剪力等個別主要肢材元件與次要肢材元件，以決定構造物補強材料加以補強；因此種鋼筋混凝土構造物之梁、柱、版等之斷面尺寸均已固定，但因新舊澆鑄混凝土無法凝結成為一體，致補強時僅能以鋼材為補強材料。

前述修復與修復補強、或補強方法等，以使用鋼板與角鋼等做為修復補強或補強材料，且應以焊接為宜，故選用鋼材時，應選用CNS S(XX)CI(W)或ASTM A36、A242、A441、A572、A570等鋼材；以此一方法修復、修復補強、或補強，其分析計算雖然十分繁雜，但可達到真正有效修復補強，或補強效果外，並不致改變梁與柱連接點勁度分配，而保持原設計結構系統作用力之傳遞為其優點(智慧財產局發明專利16402號)之一，簡稱「SRCS工法」。

此一工法對於三、四層之地下室或停車場遭受地震力破壞結構體時，亦可經詳細檢查鑑定分析設計，採用繫板梁與柱包裹已受破壞RC梁與柱做為水平支撐及中間，然後，依計畫順序補強或敲除已破壞RC梁、柱與樓版之混凝土，再組立模板於

繫鈑梁與柱外，並澆鑄新混凝土，使繫鈑梁與柱與混凝土結合成一繫鈑構架混凝土結構；對連續壁因厚度不足而破裂者，可先加止漏後，以繫鈑斜支撐或支柱補強後，組立模板，並澆鑄混凝土加以補強，而克服地下室遭受震害之重建或改建難題。

五、遵循鋼筋混凝土容許應力設計理論與規範之修復補強方法

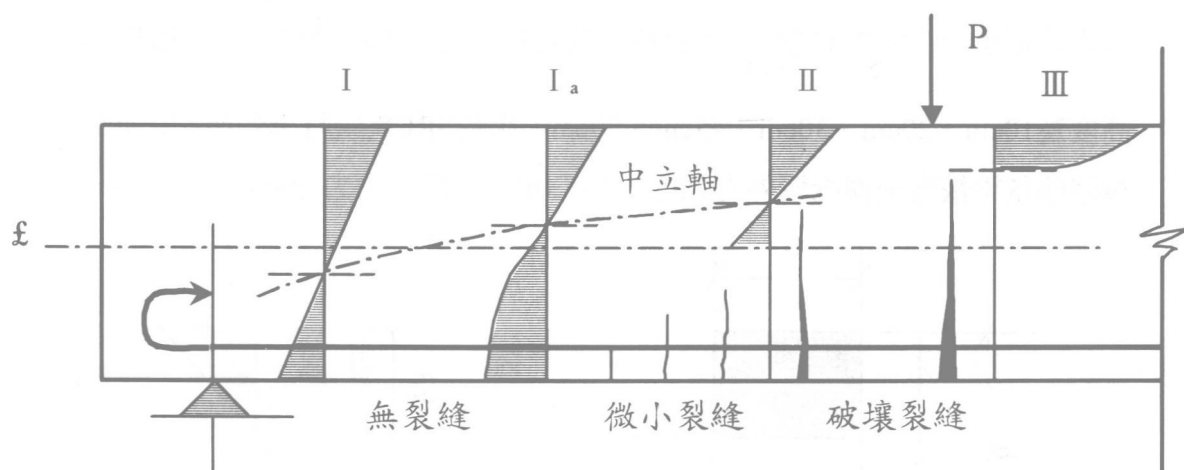
鋼筋混凝土構造物係以非均質材料構成，依設計假定，當鋼筋混凝土構材斷面未破裂前，假設混凝土完全不承受拉應力，但事實上，混凝土亦能承受少量拉應力，其容許拉應力約為 $0.424\sqrt{f'_c} \text{ kg/cm}^2$ (ACI318-63)，極限拉應力一般採用 $0.5\sqrt{f'_c}$ 至 $0.7\sqrt{f'_c}$ ；依俄國規範規定，預拌混凝土之極限拉應力依混凝土設計強度 $f'_c \text{ kg/cm}^2$ ，分別明列，如 $f'_c = 200 \text{ kg/cm}^2$ 極限拉應力 $f_c = 7.2 \text{ kg/cm}^2$ ； $f'_c = 300 \text{ kg/cm}^2$ ， $f_c = 10.5 \text{ kg/cm}^2$ ， $f'_c = 400 \text{ kg/cm}^2$ ， $f_c = 12.5 \text{ kg/cm}^2$ 等。

對於破裂構材斷面，其已破裂混凝土面積之拉應力則視為無效，故斷面常數之計算僅能以受壓力部分之面積計算，此種破裂斷面的柱構材或梁構材之作用相同。

鋼筋混凝土梁斷面在未破裂前視同為一均質構材，而在彈性限度內將鋼筋所承受拉應力變換為混凝土之 n 倍，即 $n = \frac{2,039,000}{w^{1.5} 4,270 \sqrt{f'_c}}$ ，式中 $w = 2.323 \text{ t/m}^3$ ， f'_c = 混凝土設計極限強度 kg/cm^2 ；與混凝土彈性模數比 $\frac{E_s}{E_c}$ 計算，在斷面中立軸上部份皆承受壓應力，此一壓應力均由混凝土負擔，倘有壓力鋼筋時，則由混凝土與壓力鋼筋兩者共同負擔，其合壓力以 C 表示；在壓力鋼筋處依直線理論，該壓力鋼筋之壓應力為 $\frac{f'_s}{n}$ ，但因混凝土潛變之影響，規範皆規定為 $\frac{f'_s}{2n}$ ，此即所謂半彈性理論。在中立軸下部份，此時混凝土視為已破裂，而不能負擔任何拉應力，故皆由拉力鋼筋負擔，其合拉力以 T 表示，在此處的拉應力，仍為由直線理論所得之 $\frac{f'_s}{n}$ 。

據前述規定，在鋼筋混凝土梁斷面開始破裂起鋼筋則同時增加負擔因混凝土破裂後減少之拉力外，梁斷面有效面積亦減少為未破裂斷面面積，致其斷面常數同時發生變化而減少，中立軸面開始向原以視同均質構材之中立軸面上部份混凝土受壓力區移動，其應力及中立軸之變化過程與斷面破裂縫高度之關係如圖一簡支梁所示。

由圖中I至I_a為無破裂縫，I_a至II為微小破裂縫，II至III為破壞裂縫；在無破裂縫階段，中立軸面下部份混凝土仍具有拉應力，但將自容許拉應力遞減至零而出現微小破裂縫；當微小破裂縫越過拉力鋼筋斷面，則未破裂混凝土斷面變成一均質混凝土斷面，其中立軸面即與均質混凝土斷面中心線一致，在此中立軸面向壓力區移動後，拉力區混凝土雖具有拉應力，但將迅速破裂至中立軸面，促使壓力區抗壓力C，與拉力區鋼筋抗拉力T平衡，以構成偶力來抵禦彎曲力矩；若有偶力不足以抵禦彎曲力矩，破裂縫將繼續侵入混凝土原壓力區內，使壓力區斷面積繼續減少，中立軸面向上繼續移動，而使原設計混凝土壓力區內在新中立軸面下部份混凝土承受拉應力，如圖一II所示；若破裂繼續延伸，終將使混凝土壓力區斷面最外纖維之壓應力達到混凝土極限強度而破碎，如圖一III所示。



圖一 梁應力與中立軸變化過程

依前述簡支梁之破壞情形有二種：一種為鋼筋先達到降服強度 f_y ，並大量伸長，致梁產生相當大之撓度，造成混凝土拉力區破裂縫向上延伸，侵入混凝土壓力區內

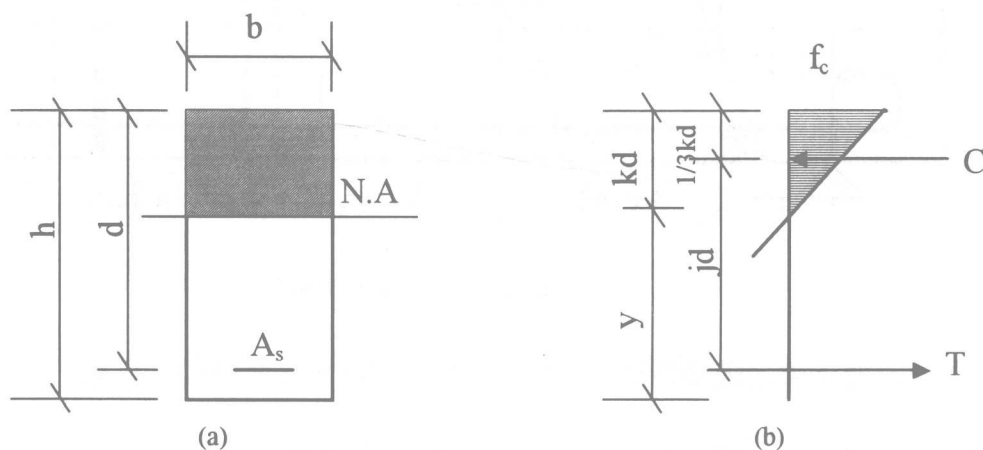
之應變迅速增加，而至混凝土被壓碎；此種破壞主要原因出在設計時，所使用之拉力鋼筋量不足；或鋼筋材質未達設計強度規定；實際外力作用載重超過設計載重。

另一種之破壞情形為設計時，梁之斷面不足，使用超量拉力鋼筋，或鋼筋材質超級使用，或混凝土強度不足等，以致造成鋼筋未達降服強度前，混凝土已發生破碎。鋼筋混凝土構造物破裂損傷以繫鈑梁與柱修復補強(SRCS)工法，係依據前述設計理論，在構造物之破裂損傷未超過構造物其個別構材尚在設計與施工允許誤差規範內，以抗拉力、抗壓力、抗剪力鋼材補強，以促使因破裂損傷後失去抵禦外力構材恢復至原設計抵禦外力強度之一種有效方法。

六、矩形斷面簡支梁之補強設計

例一：

簡支梁經勘查鑑定為一無壓力鋼筋之矩形梁，如圖二(a)所示，梁寬 $b=25\text{cm}$ ，梁高 $h=65\text{cm}$ ，有效梁高 $d=60\text{cm}$ ，主鋼筋為3支 $\phi 25$ ($A_s = 15.21\text{cm}^2$)，混凝土鑽心取樣之抗壓應力 $f_c' = 211\text{ kg/cm}^2$ ，鋼筋降伏拉應力 $f_y = 4.200\text{ kg/cm}^2$ ，梁斷面破裂縫高度為10cm、20cm、30cm、45cm、50cm，應用SRCS工法(專利發明164024號)修復補強該梁恢復至原抵禦外力強度；圖二(b)為梁斷面應力分佈圖。



圖二

1. 勘查鑑定梁斷面未破裂之抵禦外力強度評估

查詢該建築物為1965年建造，故應依ACI 318-63鋼筋混凝土設計規範評估。據ACI 318-63規定：

$$\text{鋼筋與混凝土之彈性模數比 } n = \frac{E_s}{E_c} = 10$$

$$\text{混凝土彎曲容許壓應力 } f_c = 0.45f'_c = 94.5 \text{ kg/cm}^2$$

$$\text{鋼筋彎曲容許拉應力 } f_s = 0.402f_y = 1.690 \text{ kg/cm}^2$$

$$p = \frac{A_s}{bd} = \frac{15.21}{25 \times 60} = 0.0102$$

$$k = \sqrt{2(0.0102) \times (10) + [(0.0102)(10)^2]^2} - (0.0102)(10) = 0.361$$

$$j = 1 - \frac{0.361}{3} = 0.880$$

$$y = 65 - (0.361)(60) = 43.34 \text{ cm}$$

$$M_c = \frac{1}{2}(94.5)(0.880)(0.361)(25)(60)^2 = 1,350,934 \text{ kg.cm}$$

$$C = \frac{1}{2}(94.5)(25)(0.361)(60) = 25,586 \text{ kg}$$

$$T = C = 25,586 \text{ kg}$$

$$f_s = \frac{25,586}{15.21} = 1,682 \text{ kg/cm}^2 < 1,690 \text{ kg/cm}^2$$

據此，瞭解此一簡支梁原設計抵禦外力強度與混凝土及鋼筋所承受之壓應力 f_c 與拉應力 f_s ；即

$$\text{彎曲力矩 } M_c = 1,350,934 \text{ kg.cm}$$

$$\text{混凝土之水平壓應力之和 } C = 25,586 \text{ kg}$$

$$\text{鋼筋之水平拉應力之和 } T = 25,586 \text{ kg}$$

$$\text{混凝土最外纖維最大壓應力 } f_c = 94.5 \text{ kg/cm}^2$$

$$\text{鋼筋承受拉應力 } f_s = 1,682 \text{ kg/cm}^2$$

2. 梁斷面破裂後殘存抵禦外力強度評估

梁斷面發生破裂時，應如圖二(a)將鋼筋斷面積 A_s 變換為均質混凝土斷面積 nA_s ，以梁斷面有效高度 d 計算混凝土受壓面積對新中立軸面之面積矩等於 n 倍鋼筋面積對新中立軸面之面積矩，求解自新中立軸面至混凝土最外纖維受壓應力之距離 kd 值，然後求解混凝土最大抗壓應力 f_{c1} 與鋼筋最大抗拉應力 f_{s1} ，俾可評估梁斷面破裂後之抵禦外力殘存強度。

梁斷面破裂後計算 kd 值之方程式如下：

$$b \frac{(kd)^2}{2} = nA_s (d - kd)$$

$$b(kd)^2 + 2nA_s (kd) - 2nA_s d = 0$$

據勘查鑑定梁斷面自梁底起已破裂10cm高度時，梁斷面有效高度 $d=65-10=55\text{cm}$ ，則

$$(25)(55)^2 k + 2(10)(15.21)k - 2(10)(15.21)(55) = 0$$

$$k=0.373, \quad kd=(0.373)(55)=20.5\text{cm}$$

$$y=65-20.5=44.5\text{cm}$$

$$jd = 60 - \frac{1}{3}(20.5) = 53.2\text{cm}$$

為恢復至原設計強度修復補強，即混凝土之水平壓應力之和 $C=25.586\text{kg}$ ，故混凝土最外纖維之壓應力 f_{c1} 為

$$f_{c1} = \frac{2 \times 25,586}{25 \times 20.5} = 99.85 \text{ kg/cm}^2$$

$$\text{混凝土增加之壓應力 } f_{c2} = 99.85 - 94.5 = 5.35 \text{ kg/cm}^2$$

混凝土增加水平壓力之和 $C_1 = \frac{1}{2}(5.35)(25)(20.5) = 1,371\text{kg}$ ，則混凝土殘存

水平壓力之和 C_2 為：

$$C_2 = 25,586 - 1,371 = 24,215\text{kg}$$

$$\text{構材斷面殘存彎曲力矩 } M_{c1} = 24,215 \times 53.2 = 1,288,238\text{kg.cm}$$

$$\text{以平衡設計計算鋼筋增加拉應力 } f_{s1} = \frac{1,371}{15.21} = 90.14 \text{ kg/cm}^2, \text{ 鋼筋增加水平}$$

拉力之和 $T_1 = 90.14 \times 15.21 = 1,371\text{kg}$ ，其數值與混凝土增加水平壓力之和，二者應相等；鋼筋殘存水平拉力之和 T_2 為

$$T_2 = 25,586 - 1,371 = 24,215\text{kg} \quad (\text{可})$$

$$\text{鋼筋殘存彎曲力矩 } M_{s1} = 24,215 \times 53.2 = 1,288,238\text{kg.cm}$$

梁破裂高度10cm後，鋼筋承受拉應力

$$f_s = 1,682 + 90.14 = 1,772 \text{ kg/cm}^2 > 1,682 \text{ kg/cm}^2$$

3. 梁斷面破裂後恢復至原斷面抵禦外力強度之修復補強

因簡支梁斷面已破裂10cm，致混凝土抗壓力側與鋼筋拉力側均發生變化，而增加混凝土抗壓應力與鋼筋抗拉應力，其增加抗壓力與抗拉力，即為梁原斷面因破裂後減少抵禦外力強度；為恢復梁斷面至原斷面抵禦外力強度、而必須就梁斷面減少抵禦外力強度部份加以補強，但因混凝土材料之特性新舊混凝土無法凝結成一體，故該抗壓部份必須使用具有抗壓鋼材補強修復。

據鋼筋混凝土構造設計中立軸面上部份皆受壓應力，比等壓力均由混凝土負擔，若有壓力鋼筋，即由混凝土與鋼筋兩者共同負擔，其水平壓力之和 C ，在壓力鋼筋處，依彈性理論，其壓應力為 f_s' / n ，但因混凝土潛變之影響，依設計規範皆規定為 $f_s' / 2n$ ，是謂半彈性理論；中立軸面下部皆受拉應力，此一假設已將中立軸面下部混凝土視同破裂，而不負擔任何拉應力，而皆由拉力鋼筋負擔水平拉力之和 T ，在此處的應力，仍為彈性(直線)理論所得的 f_s / n ；依彈性理論複核鋼筋壓應力 f_s' 為