

預力混凝土結構之設計

林同棧 原著
王樅 譯述

工程叢書

中國工程師學會出版

工
程
叢
書

預力混凝土結構之設計

林同棧 原著
王從譯述

中國工程師學會出版

譯 者 序

預力混凝土，爲一種問世僅約卅年之新興建築材料。在此短短之三十幾年中，因其所具之優點，故進展甚速，現已與鋼材及鋼筋混凝土，同爲現代之主要建材。在若干類型之工程中，且特別適用，因而取代鋼材與鋼筋混凝土在預力混凝土未被利用前所適用範圍內之地位。以本省爲例，多孔簡支鋼筋混凝土公路橋，其最大之經濟跨長爲二十公尺，勉強可以修建至跨徑二十五公尺者，以應流水之需要；但以靜重過大，已頗不經濟。若改用多孔之預力混凝土簡支樑橋，則跨徑可以大至三十五公尺至四十公尺，橋孔加大，便利流水，於是在颱風時期自然可以減少橋墩被沖失之機會。如此之例，俯拾即是，故預力混凝土之特色，已爲工程界所周知之事實。

至於有關預力混凝土工程設計之書籍，英美出版者頗多，其中對於理論闡釋明晰且顧及實用方面之諸多細節者，實以國人林同棧氏之“Design of Prestressed Concrete Structures”一書，最爲美國及國內各大專所樂予採用。蓋林君在加州大學講授此科有年，且於教學之餘，經營工程公司，以其專長擔任此一方面之顧問工作，故此書能理論與實際並重。茲特譯出，以供國內各校之採用。原書於每章之後附有詳細之參考文獻目錄，書末並附有關於預力混凝土之規範書二種及設計有關之資料。以各種文獻在臺甚難覓讀，而規範則已陳舊，另有新修正者通行。至於資料則似於教學時應另採用公制者，故皆刪去未予附入，以節篇幅。

本書之付印，多承裘燮鈞、趙國華、王璟各位先生之協助，始獲實現，謹在此表示感謝之忱。如讀者發現有錯誤之處並請不吝賜教指正。

王 稹謹序

預力混凝土結構之設計

目 次

譯 序	
第一章 引 言	1
第二章 材 料	26
第三章 施加預力之方法；端錨	46
第四章 預力之損耗；磨擦力	71
第五章 對於撓曲之斷面分析	100
第六章 對於撓曲之斷面設計	138
第七章 剪力；粘結；支承	185
第八章 拱勢；撓度；鋼纜設計	226
第九章 部份預力及不施預力之鋼筋	253
第十章 連續樑	271
第十一章 載重平衡方法	305
第十二章 預力混凝土版	330
第十三章 拉力構材；環形施加預力	351
第十四章 壓力構材；預力混凝土樁	372
第十五章 經濟；結構形式	398
第十六章 設計例題	422

第十七章	設計準則；法規及規範	464
第十八章	特殊問題	474
附 錄	定義；符號；縮寫	494

預力混凝土結構之設計

第一章 引言

1.1 預力混凝土之發展

預力意指故意在結構或其集合中，創造永久應力，其目的係在各種使用狀況之下，改善其功效及強度。

預力之基本原理，應用於建造，可能係在幾世紀之前，當時係將繩索或金屬扁條，繞於木桶板外，以作成木桶（如附圖 1.1），當金屬扁條被收緊之後，扁條係受拉預力，而拉預力又依次在木桶板之間，創造壓預力，並如此以使木桶板抵抗由在內之液體壓力所產生之箍拉力。用另一句話說，金屬扁條及木桶板，在承受任何使用載重之前，均已施加預力。

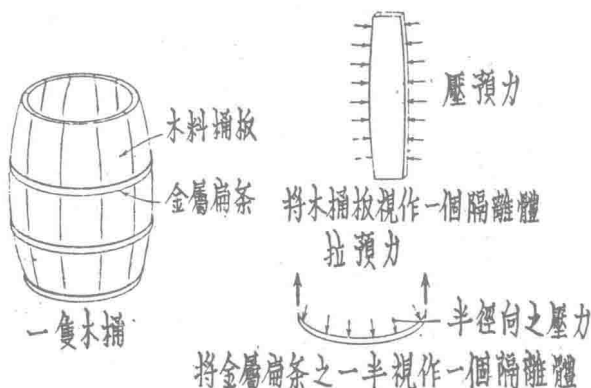


圖 1.1 應用於木桶構造上之施加預力原理

但同樣之原理，直至 1886 年美國加州舊金山之工程師 P. H. Jackson 君，於取得在人造石塊及混凝土拱內，拉緊鋼拉桿以用為樓板之專利權以前，並未應用於混凝土上。約在 1888 年德國之 C. E. W. Doehring 君，另外於未受他人影響之情況下，獲得一種於混凝土版未承受載重之前，先用已受有拉力之金屬，將混凝土加強之專利權。凡此應用，係基於一種構想，即混凝土雖然在壓力

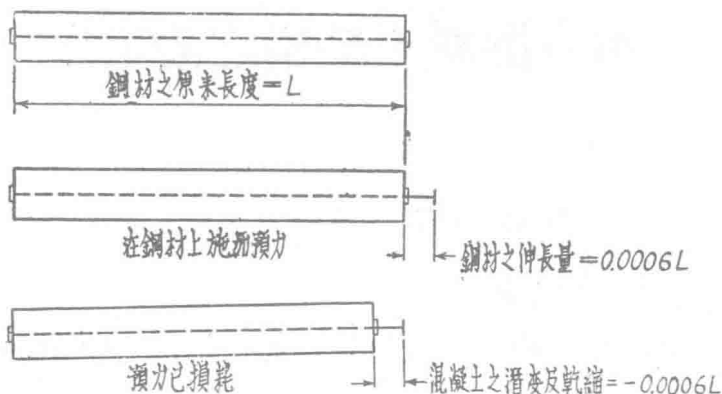


圖 1.2 普通結構鋼材在混凝土上施加預力

方面很强，但在拉力方面則很弱。若頂着混凝土施加預力於鋼材，則將置混凝土於壓力之下，即可以用此項壓力，以平衡由靜重或活重所產生之任何拉應力。

最初取得專利權之方法，並未成功。由於當時在鋼材內所產生之低微預力，不久即消失；係由於混凝土之乾縮及潛變之結果。設想一根普通之結構鋼棒，受預力至工作應力為每平方吋 18,000 磅，(附圖 1.2)。如鋼材之彈性模數為每平方吋 30,000,000 磅，則鋼棒之單位拉長，可由下列公式算出：

$$\begin{aligned}\delta &= \frac{f}{E} \\ &= \frac{18,000}{30,000,000} \\ &= 0.0006\end{aligned}$$

因最後之乾縮及潛變，常誘發可以與此數值相當之混凝土收縮量，此項鋼料之最初的單位拉長，於時間進展中，可能完全消失。在最好之情形下，僅有預力之一小部分，可以保留。而此種方法並不能與習用之混凝土用鋼筋者在經濟方面競爭。

在 1908 年，美國之 C. R. Steiner 君建議於混凝土已有些乾縮及潛變發生之後，重行再拉緊鋼筋以便恢復若干預力損耗之可能性。在 1925 年美國尼布拉斯加州之 R. E. Dill 君，曾試行將高强度鋼棒，加塗塗料，以阻止混凝土與鋼棒粘結。在混凝土硬結之後，在鋼棒上施加拉力，並用螺絲帽將鋼棒錨固於混凝土上。但此類方法其應用並未推廣，主要的係由於經濟上之原因。

預力混凝土之近代進展，應歸功於法國之 E. Freyssinet 君；氏於 1928 年，開始用高强度鋼線施加預力。此類高拉力鋼線具有每平方吋高達 250,000 磅之極限強度，及超過每平方吋 180,000 磅之屈伏點強度，加預力至約每平方吋為 150,000 磅/吋²，即造成如下之單位應變（附圖 1.3）：

$$\begin{aligned}\delta &= \frac{f}{E} \\ &= \frac{150,000}{30,000,000} \\ &= 0.0050\end{aligned}$$

假設由於混凝土之乾縮及潛變，以及其他種種原因，其損耗之總額為 0.0008，淨應變為 $0.0050 - 0.0008 = 0.0042$ ，仍將留存於鋼線中，等於用下式計算之應力：

$$\begin{aligned}f &= E \delta \\ &= 30,000,000 \times 0.0042 \\ &= 126,000 \text{ 磅/吋}^2\end{aligned}$$

雖然 Freyssinet 氏並曾經試驗先拉法，在此法中，鋼線不用端錨而係與混凝土粘結者。但此種先拉法之實際應用，則最初係由德國之 E. Hoyer 君完成。Hoyer 氏方法，係在距離有幾百英尺之兩座撐牆之間，拉直若干根鋼線；在各構材單位之間，放置隔板，澆置混凝土；並於混凝土硬結之後，截斷鋼線。此種方法，可以使幾個構材單位，在兩道撐牆之間澆鑄。

直至可以信賴且具有經濟價值之施加拉力方法及端錨，業經發明之後；預力

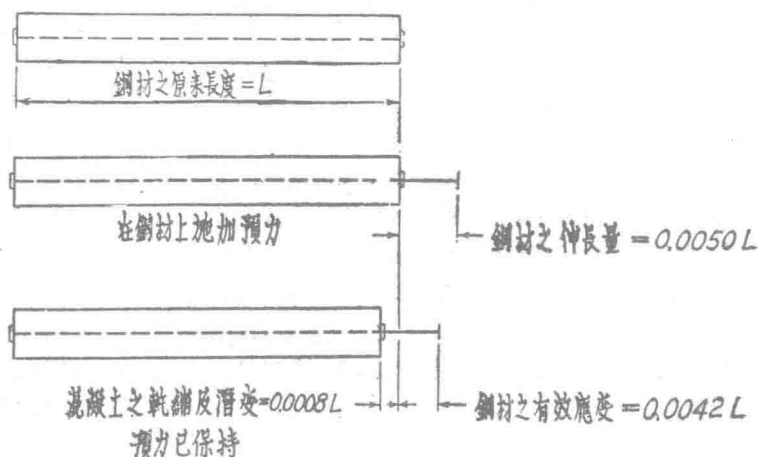


圖 1.3 以高拉力鋼材在混凝土上施加預力

混凝土之廣被採用，實為不可能者。於 1939 年 Freyssinet 氏發展成功用為端錨之圓錐形楔；並設計成功用以拉線施加預力之雙動千斤頂。於拉線後，將公錐塞入母錐，以將兩個圓錐體安裝牢固。在 1940 年比利時之 G. Magnel 教授發展成功 Magnel 氏法。在該一預力施工法中，兩根鋼線同時被拉緊，並在每一端用一個簡單之金屬楔，安裝牢固。在當時，預力混凝土開始取得其重要性，雖然直到 1945 年預力混凝土並未居於顯著之地位。可能因戰時在歐洲缺少鋼料，給予若干刺激，蓋由於在預力混凝土中所需之鋼料，遠比在其他常用之營建工程中為少。但亦有必需了解清楚者，即在當日尚需要證明並改進預力混凝土合用之可能性，並經濟及安全；且需使工程師們及建築業者，以熟悉一種新的設計及施工方法。

雖然法比兩國領導預力混凝土之進步，英、德、瑞士、荷蘭、蘇俄及意大利，亦迅速跟進。現在在德國大約佔混凝土橋之百分之八十，為預力混凝土橋。在 1960 年一年之內，蘇俄生產 3,000,000 立方公尺預力混凝土，以用於房屋建築。

在美國預力混凝土則遵循另外一個途徑以進展。代替長向施預力法，此為一種賦予預力混凝土樑及版之名詞，圓向施預力法特別應用於儲存池者，處於領先地位。此為幾乎完全由 Preload 公司所實施。該公司發展成功一種特殊之鋼線捲線機，並自 1935 至 1936 年，在美國及世界其他各地區，建造約一千座預力混凝土之儲存池。

長向施預力法直至 1949 年在美國並未開始採用。當年 Philadelphia 著名之 Walnut Lane 橋開始施工。美國公路總局 (The Bureau of Public Roads) 之調查表示：在 1957 年至 1960 年內，共有預力混凝土橋 2,052 座，經標準施工；總長約為 68 哩，累積之建造費用為美金兩億九千萬元，在長度及費用兩方面，均佔全部新公路橋之 12 %。

在美國預力混凝土之成長，直至 1963 年 6 月，均沿預鑄先拉製成品這一條路線發展，主要的為橋樑與房屋建築。當 1950 年僅有此類工廠一座，至 1954 年則已有 34 座，由預力混凝土學會 (Prestressed Concrete Institute) 所作之一項調查指出，至少有此類工廠 229 座在 1961 年開工生產。在 1962 年內之預鑄預力混凝土製成品之總體積，經估計超過 2,000,000 立方碼。其中可以粗略估計，約有百分之五十用於橋樑方面，其餘則屬於房屋建築及其他營建計劃。在美國用後拉法就地施工之預力混凝土，其體積無法估計得確實可靠，但已知其僅佔預鑄體積之一極小部分。

當此尚不可能決定在美國境內，有多少座房屋建築將預力混凝土構材包含在

內，合成爲一體時，但若是斷定每年建造幾千座，似頗確實可靠。但若與房屋建築之總體積作一比較，則此數只代表一極小部分，可能尚不到其結構費用之1%。此一百分比如與丹麥作一比較，似偏低。例如在該國於1961年內，約有44%之房屋建築均多少包含某種型式之預力混凝土構材在內，以構成一體。

當橋樑容易由美國之聯邦政府及州政府所屬各機構予以標準化，因此幫助推動預力混凝土結構之進展時；使各自自行開業之建築師及工程師，充分發展建築材料製成品及設計，則頗爲需要時間。均一致相信，由於已將預力混凝土加入於建築法規之內，及對於預力混凝土設計及施工之一般的認識；可望自現在起，預力混凝土將在房屋建築方面有較爲迅速之成長率。

在美國境內預力混凝土可能即將發生之進展，將大概爲後拉法之應用於房屋建築及橋樑，包括合併使用先拉法，後拉法，及習用之鋼筋混凝土於結構及結構上之部分構材。當工程師及建築師認識清楚預力混凝土之潛力，及其可能完成之一切工作，並精通其原理及其設計以及細部設計之一切辦法，上述情形便將到來。

在儲存池橋樑及房屋建築以外，預力混凝土亦偶爾應用於築壩。將已施預力之鋼棒，安裝牢固於壩之基礎上，或頂着壩基用千斤頂將壩頂住。樁、桿及管子均曾經用過預力混凝土製造。有某些結構，可以不採用預力鋼筋而加預力於混凝土。例如在 Freyssinet 氏拱之補強法內，用一系列之液壓千斤頂嵌進於拱內，引入補強應力於拱肋，此類應力係企圖用以消除在拱內之乾縮影響，拱肋縮短，及溫度下降者。在 Brest 市附近之 Plougastel 橋，爲三孔每孔跨徑 612 呎之拱橋，即爲此種方法應用之一例。

預力之基本原理，並不限用於混凝土結構，且曾同樣應用於鋼構造物。當兩塊鋼板利用趁高熱打入之鉚釘或高拉力螺栓，連接於一起時，連接用配件，將被高度施加拉力，而鋼板承受壓力；如此可以使鋼板負荷拉力載重於兩塊板之間。Scioto ville 橋爲幾孔跨徑 720 呎之橋，其構材在架設時預先施加彎曲力，以便消除由活重及靜重所致之次應力。用高拉力鋼線加預力於一架連續桁構者，爲曾修建於比國布魯舍爾之飛機庫。並有相同之兩架桁構，受試驗於比國 Ghent 大學。

不論預力係施加於鋼結構或混凝土之上，其終極之目的，均爲雙重的：第一爲誘發想要之應變與應力於該結構之內；第二爲平衡不想要之應變與應力。在預力混凝土中，鋼線預先被拉長，以避免在使用載重之下，過度被拉長；同時混凝土已先加壓力，以便防止在拉應力下，發生裂縫，如此便可以獲得兩種材料之理想的配合。關於預力混凝土最基本的希求，無需多說，便可自明。但其普遍應用

，最後全有賴於設計及施工兩方面新方法之進展。此項進展將提高其與習用之各種結構類型，互相比較後之經濟價值。

預力混凝土之進步，在研究及發展兩方面，可能由其有關之技術性社團，及彼等之刊物之成長，作最好之暗示。在美國，預力混凝土學會成立於 1954 年，現已有會員九百餘人，並刊行 *PCI Items* 及 *PCI* 雜誌。1957 年在舊金山舉行之預力混凝土世界會議 (World Conference on P.C.) 及 1960 年在加里弗尼亞舉行之預力混凝土建築物西方會議 (Western Conference on Prestressed Concrete Buildings)，刊印之會議記錄，均包括此一科目各方面具有價值之論文。國際預力混凝土聯盟 (The International Federation for Prestressing 簡稱 FIP)，其總部設於倫敦，有三十二國為其會員，曾刊印該聯盟於 1953 年在倫敦，於 1955 年在阿姆斯特丹，於 1958 年在柏林，於 1962 年在羅馬舉行會議之論文幾百篇。

1.2 預力混凝土之一般原則

預力混凝土之最佳定義，係由美國鋼筋混凝土學會，預力混凝土委員會 (the ACI Committee on Prestressed Concrete) 所提供。

預力混凝土：混凝土在其中會引入內應力，其數量及分佈，使因受外在載重而引起之應力，得以平衡，至所想要之程度。在鋼筋混凝土構材內，預力通常由加拉力於鋼筋以引入之。

可能有應附加說明者，即預力混凝土若從該一名詞之廣義而言，可能尚包括若干情況，在其中由內在應變所致之應力，將被平衡至某種程度；例如拱之補強即是。但本書將大部分僅討論及於由 ACI 預力混凝土委員會下定義所規定之預力混凝土結構。並將限制本書之內容於施加拉力於鋼線所引入之預力。此為直至最近期內，預力混凝土最為常見之型式。

有三種不同之概念，可應用以說明並分析此一型式預力混凝土之基本的行態。設計者應充分了解清楚所有此三種概念，以便彼能設計並調配預力混凝土結構之尺寸，使其具有機智及效率，實屬重要。此三種概念將分別說明於下：

第一種概念——加預力以改變混凝土使成為具有彈性之材料。此一概念，將混凝土視作一種具有彈性之材料，加以處理，可能尚為工程師們共同之觀點。此一概念應歸功於 E. Freyssinet 氏；氏將預力混凝土，主要的想像為一種混凝土，因已給予預壓力之故，已由易碎之材料，改變成為一種具有彈性之材料。混凝土原來為弱於拉力強於壓力者，經壓縮後（通常用高拉力下之鋼線）以至於本來易碎之混凝土，將可能經得起拉應力。從此項概念，沒有拉應力發生這一準

則，於焉產生。一般的均相信，若在混凝土中沒有拉應力，則不會有裂縫，於是混凝土不再是一種容易碎之材料，並且成爲一種具有彈性之材料。

從此種見地，混凝土係被想像爲承受兩種力系者：內在之應力及外在之載重。其由外在載重所引起之拉應力，被由預力所致之壓應力平衡。與此種情況相似，由於載重而起之裂開，將由在鋼腱內所產生之預壓力，加以防止或延遲至以後再發生。一直到沒有裂縫時爲止，混凝土中之應力，應變及撓度，由於此兩種力系所引起者，可以分別加以考慮，並於必要時可以疊加於一起。

於其最簡單之形式中，我等將先考慮一根斷面爲矩形之簡支樑，由通過重心軸線之鋼腱施加預力，並負荷外在載重。由於預力 F ，有如下之均佈應力：

$$f = \frac{F}{A}$$

將產生並均佈於該斷面上，該斷面之面積爲 A 。若 M 爲在該斷面上，由於在樑上之載重，及樑本身之重量所引起之外在彎矩；於是橫越該斷面，在任何一點上，由於該力矩 M 所引起之應力爲：

$$f = \frac{My}{I}$$

其中 y 爲距離重心軸之距離， I 爲該斷面之慣性力矩。於是應力分佈之最後結果，可以由下式得到：

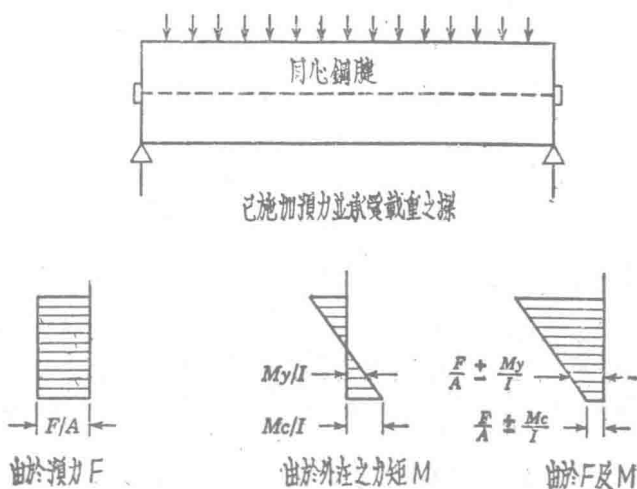


圖 1.4 越過一個同心施加預力之混凝土截面之應力分佈

$$f = \frac{F}{A} \pm \frac{My}{I}$$

示如附圖 1-4。

如鋼腱之安置，對於混凝土斷面之重心有偏倚時，例如附圖 1-5，其解法將略微更為複雜。由於偏心之預力，將承受一項彎矩，正如其承受直接載重。由預力產生之彎矩為 Fe ，而由於此一彎矩所致之應力為：

$$f = \frac{Fey}{I}$$

於是其結果所得之應力分佈，可以由下式得到：

$$f = \frac{F}{A} \pm \frac{Fey}{I} \pm \frac{My}{I}$$

示如附圖。

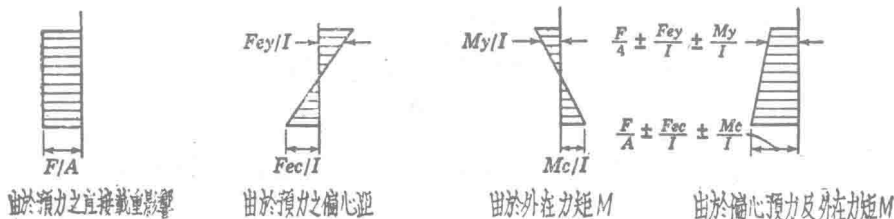
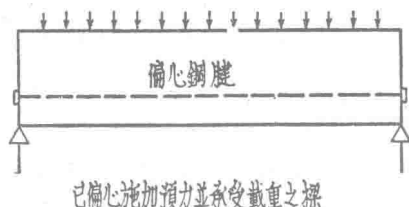


圖 1-5 越過一個偏心施加預力混凝土截面之應力分佈

例題 1-1

一根預力混凝土矩形樑，斷面為 20 吋×30 吋。其簡支之跨徑為 24 呎，包括其本身之重量在內，負荷之均佈載重為 34 磅/呎，如附圖 1-6。預力鋼腱位置如附圖所示，並產生有效預力 360 千磅。試計算在跨徑中央之混凝土纖維應力。

解：應用公式 1-5，已有預力 $F=360$ k，樑之斷面 $A=20 \times 30=600$ 吋²（將任何由於安裝鋼腱之孔洞均略去不計），偏心距 $e=6$ 吋，慣性力矩 $I=$

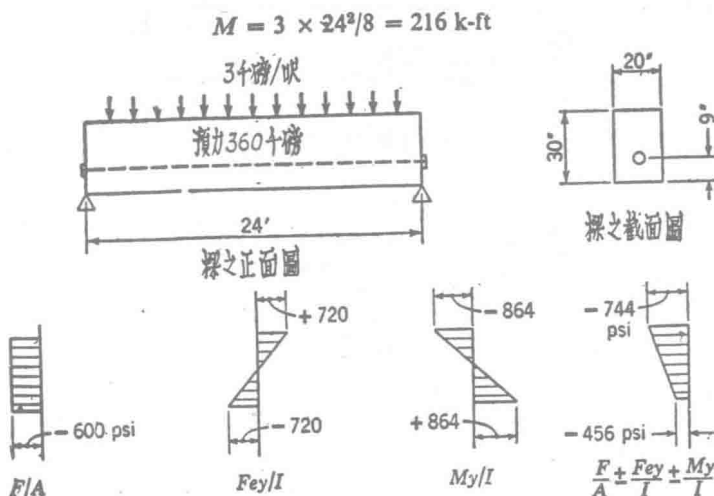


圖 1.6 例題 1-1

$\frac{bd^3}{12} = \frac{20 \times 30^3}{12} = 20 \times 30^3 / 12 = 45,000 \text{ 吋}^4$ ；最外纖維距重心軸之距離 $y = 15$ 吋。

$$\text{彎矩 } M = \frac{3 \times 24^2}{8} = 216 \text{ 千磅-呎}$$

於是

$$\begin{aligned} f &= \frac{F}{A} \pm \frac{Fey}{I} \pm \frac{My}{I} \\ &= \frac{-360,000}{600} \pm \frac{360,000 \times 6 \times 15}{45,000} \pm \frac{216 \times 12,000 \times 15}{45,000} \\ &= -600 \pm 720 \pm 864 \\ &= -600 + 720 - 864 = -744 \text{ 磅/吋}^2, \text{ 頂部最外纖維} \\ &= -600 - 720 + 864 = -456 \text{ 磅/吋}^2, \text{ 底部最外纖維。} \end{aligned}$$

其最後之應力分佈示如附圖 1.6。

在鋼腱為曲線形或彎折，如附圖 1.7(a) 時，常為方便起見，將該構材之左側部分，或右側部分，視為隔離體，以便估計該預力 F 之影響。於是，在附圖 1.7(b) 內，由於水平諸力之平衡，指出在混凝土內之壓力等於在鋼腱內之預力 F ，由於偏心力 F 所引起在混凝土內之應力，可以由下式求得：

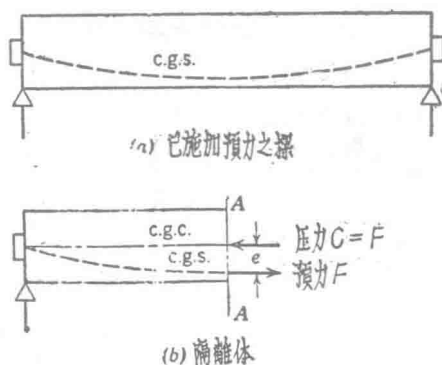


圖 1.7 預力之影響

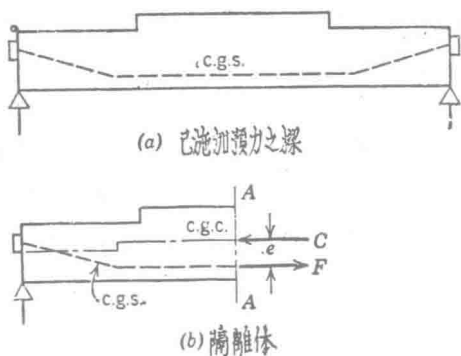


圖 1.8 樑之形狀在原截面以外有變化時之影響

$$f = \frac{F}{A} \pm \frac{Fec}{I}$$

因此在某一個斷面上之混凝土應力 f ，僅賴在該斷面上預力 F 之量及所處之部位而定，完全與順沿該樑，在其他各處鋼筋之縱斷面變化無關。例如，若在附圖 1.8 內，樑之斷面 A-A 完全與在附圖 1.7 內之斷面 A-A 相同，則由於偏心距為 e 之預力 F 所引起之混凝土應力，在兩個斷面上者，將完全相同，而與樑在形狀方面之變化，或與在該斷面以外之鋼筋縱斷面完全無關。（此項事實僅對於靜定結構在其中外之反力不受內在預力之影響者為確實可靠。請參閱第 10 及第 11 兩章，關於靜不定結構系統之討論。）

例題 1-2

一根混凝土樑，具有與例題 1-1 相同之跨徑，載重，斷面及預力。其拋物線形之彎曲鋼筋，示如附圖 1.9。試計算在其跨徑中央之最外纖維應力。

解：在跨徑中央之樑斷面，示如附圖，並與附圖 1.6 例題 1-1 之斷面完全相同。因此完全與例題 1-1 之計算相同者，可以應用於本題，故其最外纖維應力亦完全相同。

頂纖維 -744 磅/吋² (壓力)

底纖維 -456 磅/吋² (壓力)

第二種概念——為高强度鋼與混凝土之合併體而施加預力。此種概念係將預力混凝土視為係鋼材與混凝土之合併作用體與鋼筋混凝土相似，由鋼承受拉力並由混凝土承受壓力，以便此兩種材料，形成一對抵抗偶力，以對抗外在之彎矩，如附圖 1.10。此一概念，對於工程師們之熟悉鋼筋混凝土者，即在其中由鋼筋供應拉力，由混凝土供應壓力，而此兩個力系即形成一個偶力；介於其間者，為槓桿臂，常為一易於接受之概念。但很少有工程師能認識清楚有與此相似之行態存在於預力混凝土中。

在預力混凝土中，將採用高拉力鋼。此項高拉力鋼，在其強度被充分利用之

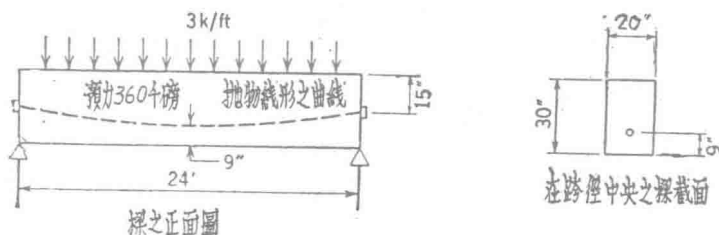


圖 1.9 例題 1-2

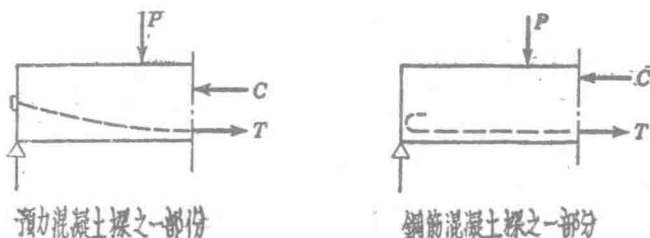


圖 1.10 在預力-及鋼筋混凝土樑內之內在抵抗力矩

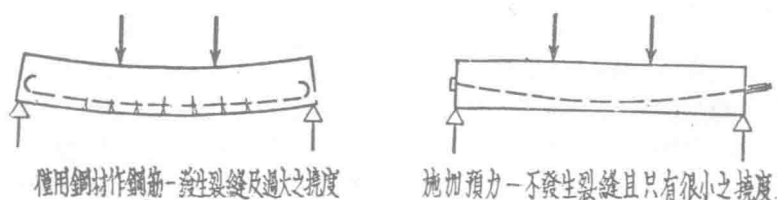


圖 1.11 採用高拉力鋼材之混凝土樑

前，必將被拉長至很長一段。若高拉力鋼筋僅被埋入於混凝土中，一如在普通鋼筋混凝土內之鋼筋，在鋼筋周圍之混凝土，於鋼之全部強度充分發揮之前，必將嚴重裂開，如附圖 1.11。因此必須以混凝土為依據將鋼筋預先拉長。由於將鋼筋拉長，並將其錨固於混凝土上，將在兩種材料內，產生所想要之應力及應變。即在混凝土內發生壓應力及應變，在鋼筋內發生拉應力及應變。如此合併起作用，以容許此兩種材料之安全及經濟利用。此種利用方法為僅將鋼材埋入於混凝土中，如在普通之鋼筋混凝土內所作者，絕對不能達到者。另有若干獨特之例，在其中使用中等強度之鋼材，作為簡單之鋼筋，而不施加預力。同時鋼材為粘結而特別加壓綫紋，以便分散裂縫。此種程序可以避免預先拉長及錨固之費用，但不能用於高拉力鋼。且並未具有想要獲得預施壓力於混凝土及減少撓度之效果。

從此一觀點言之，預力混凝土不再是一種新奇形狀之設計。勿謂認為其係鋼筋混凝土，在應用上之擴大及修正，俾將高強度之鋼材包括在內。從此一觀點，預力混凝土不能於其材料強度之能量以外，表演出奇蹟。雖然可以運用許多機智於適當且經濟之預力混凝土結構設計上，但絕對無有神奇之方法可以避免用內在之偶力，以負荷外在之彎矩，這一最後之需要。且此內在之抵抗偶力，必需由受拉力之鋼材及受壓力之混凝土供應，無論其為預力混凝土或鋼筋混凝土，此一概念曾被恰當的應用，以決定預力混凝土樑之極限強度，並可以應用於其彈性形態，主要的係由本書之原著者所發表，（參閱第六章之參考資料第一種）。

只要工程師能見到此一觀點，彼即充分了解介於預力混凝土與鋼筋混凝土間之相似點。於是許多屬於預力混凝土之複雜性，均將消失，而能夠聰明的將預力混凝土設計予以完成。而非在一堆複雜混亂之公式內，表演暗中摸索。

下述之例題，說明簡單應用以上之原則，於分析預力混凝土樑。範圍較大之處理，將在第六章內提供。