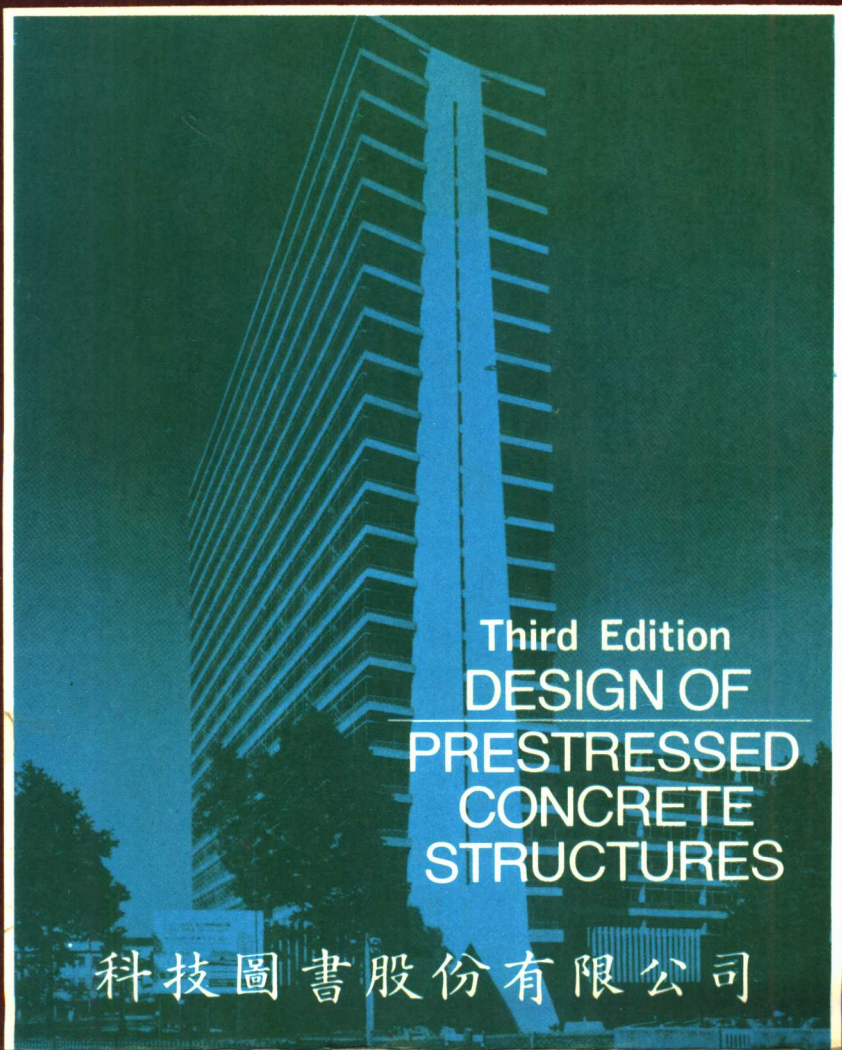


預力混凝土設計

(SI版)

原著者：林同琰／Burns

譯述者：鍾功偉



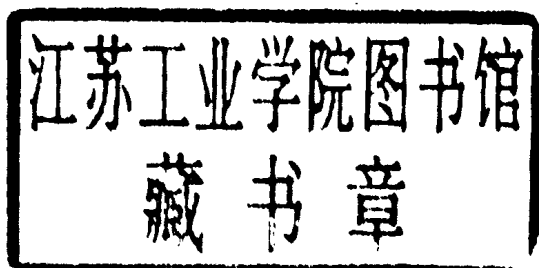
Third Edition
DESIGN OF
PRESTRESSED
CONCRETE
STRUCTURES

科技圖書股份有限公司

預力混凝土設計 (SI版)

原著者：林同琰／Burns

譯述者：鍾功偉



科技圖書股份有限公司

本公司經新聞局核准登記
登記證局版台業字第1123號

書名：預力混凝土設計 (SI版)

原著者：林同棧/Burns

譯述者：鍾功偉

發行人：趙國華

發行者：科技圖書股份有限公司

台北市重慶南路一段49號四樓之一

電話：3118308・3118794

郵政劃撥帳號 0015697-3

七十五年九月初版

七十六年十月二版

特價新台幣 240 元

序

預力混凝土的發展，引用筆者在 1957 年在舊金山召開的預力混凝土國際會議時所提出一首詩篇來說明是最恰當不過了。（原詩抄錄如下）：

All the world's a stage,
And all engineering techniques merely players:
They have their exits and their entrances.
Prestressed concrete, like others, plays a part,
Its acts being seven ages. At first the infant,
Stressing and compressing in the inventor's arms.
Then the curious schoolboy, fondly created
By imaginative engineers for wealthy customers;
Successfully built but costs a lot of dough. Then the lover,
Whose course never runs smooth, embraced by some,
Shunned by others, especially building officials. Now the soldier,
Produced en masse the world over, quick to fight
Against any material, not only in strength, but in economy as well.
Soon the justice—codes and specifications set up to abide,
Formulas and tables to help you decide. No more fun to the pioneers,
But so prestressed concrete plays its part. The sixth age
Shifts to refined research and yet bolder designs,
Undreamed of by predecessors and men in ivory towers.
Last scene of all, in common use and hence in oblivion,
Ends this eventful history of prestressed concrete
As one of engineering methods and materials
Like timber, like steel, like reinforced concrete,
Like everything else.

當林寫成本書的第一版序時，美國預力混凝土的發展才進入第四階段，即大量生產開始。現已進入第六階段而步向最後階段。由於如此突飛猛進的壓力下促使本書需作第二次徹底修正。

第三次的修正，仍提示預力混凝土中的基本理論，仍與第二版同。關於載重平衡法，則與工作載重法與極限載重法作並行研討，以構成預力混凝土設計的一個三腳支架。

11/16/84/04

2 預力混凝土設計

材料預力系統與預力損失各章均經修改成最新應用的資料。彎矩-曲度關係的重要各節，亦分別增列以加強撓曲分析之用。剪力與黏結各問題，亦予編入，並依各種試驗成果，兼作理論的解析。拱勢與撓度，對混凝土的依時而變性質更作詳加研討。連續樑用的彎折後拉預力鋼腱分析法，經修正後將更臻完整。載重平衡用理想鋼腱，包括在分析中，並用實際的鋼腱佈置在各例中分別考慮。

因預力混凝土的建築法規及橋樑規範種類繁多，經標準化，並用最新ACI規範作設計例。橋樑設計者，固應依據AASHTO橋樑設計規範，關於許可應力與載重因數兩項，亦作若干必要調整。

若干經過選擇的習題，原係筆者在任教大學與研究所的課堂作業使用，分別轉載在附錄E。這些習題答案，凡是參與教務的人們可來信索取。

相信此次修正內容，大都是最近資料，可繼續提供從事預力混凝土工程人們參考與教學之用。

在付印本版時，多承Martha Burns與Stephanie Burns兩位擔任原稿打字，Jorge Bastos，Hosang Engineer，I-Kuang Fang，Frank Lam，Ruben E. Lores與Pankaj Trivedi等各位幫助SI單位的換算工作，在此謹表謝忱。

T. Y. Lin 林同棧

Ned H. Burns 波恩斯

預力混凝土設計

目 錄

序

第一章 導 論

1.1 預力混凝土的發展	1
1.2 預力混凝土一般原則	12
1.3 預力分類與型式	25
1.4 加載階段	27
1.5 預力混凝土與鋼筋混凝土的比較	33
1.6 部分預力	37
1.7 預力混凝土的設計規範	38
參考資料	40

第二章 材 料

2.1 混凝土強度的必要條件	41
2.2 混凝土的應變特性	43
2.3 混凝土的特殊製造技術	49
2.4 輕質骨材混凝土	50
2.5 自增應力水泥	52
2.6 施預力用鋼材	54
2.7 鋼 線	55
2.8 鋼 索	57
2.9 鋼 條	58
2.10 纖維玻璃鋼腱	59
2.11 輔助材料灌漿	61

2 預力混凝土設計

2.12 疲勞強度	63
-----------------	----

參考資料	66
------------	----

第三章 預力系統；端錨

3.1 緒 論	68
---------------	----

3.2 先拉預力系統與端錨	69
---------------------	----

3.3 後拉預力系統，預拉方法	74
-----------------------	----

3.4 利用楔作用的後拉預力端錨	80
------------------------	----

3.5 後拉預力法直接支承式鋼線的端錨	81
---------------------------	----

3.6 用後拉預力法鋼條的端錨	83
-----------------------	----

3.7 各種預力系統的比較	85
---------------------	----

參考資料	87
------------	----

第四章 預力損失；摩擦力

4.1 預力損失的意義	88
-------------------	----

4.2 預力損失的總和估計	91
---------------------	----

4.3 混凝土的彈性縮短	92
--------------------	----

4.4 依時變化的預力損失	98
---------------------	----

4.5 由混凝土潛變（CR）所起的損失	101
---------------------------	-----

4.6 由混凝土乾縮所起的損失	102
-----------------------	-----

4.7 由鋼材鬆弛所起的損失	103
----------------------	-----

4.8 由端錨所吸收的損失	106
---------------------	-----

4.9 由構材彎曲所起的損失或獲得	107
-------------------------	-----

4.10 摩擦損失，在實際上的考慮	110
-------------------------	-----

4.11 摩擦損失理論上的考慮	113
-----------------------	-----

4.12 預力損失的總量	118
--------------------	-----

4.13 鋼腱的伸長量	125
-------------------	-----

參考資料	128
------------	-----

第五章 撓曲斷面分析

5.1 緒 論	130
5.2 由預力引起在混凝土中的應力	130
5.3 由載重所起混凝土中的應力	139
5.4 由載重引起的鋼材應力	143
5.5 開裂彎矩	149
5.6 極限彎矩——黏結鋼腱	152
5.7 彎矩-曲度分析——黏結樑	162
5.8 極限彎矩-非黏結樑	181
5.9 合成斷面	186
5.10 預力轉移後的撓曲行為與極限強度	192
參考資料	196

第六章 撓曲斷面設計

6.1 撓曲斷面初步設計	197
6.2 彈性設計，一般觀念	201
6.3 彈性設計，不容拉力在混凝土中	204
6.4 彈性設計，容許拉力存在應注意事項	212
6.5 彈性設計，容許並考慮拉力的存在	214
6.6 彈性設計，合成斷面	219
6.7 極限設計	226
6.8 混凝土斷面形狀	232
6.9 標準預鑄斷面設計	239
6.10 鋼材佈置—分段預力	245
參考資料	255

第七章 剪力、黏結、支承

7.1 剪力，一般考慮	256
7.2 剪力，主拉應力	261
7.3 剪力，樑的極限強度	267
7.4 剪力，腹鋼筋	279

4 預力混凝土設計

7.5 在中間各點的撓曲黏結	283
7.6 在先拉預力混凝土中預力轉移時的黏結	285
7.7 在端錨處的支承力	292
7.8 端塊上之橫向拉力	296
7.9 抗扭強度	302
參考資料	306

第八章 拱勢、撓度與鋼索佈置

8.1 拱勢與撓度	309
8.2 簡支樑的佈置	325
8.3 鋼索的縱斷面圖	328
8.4 懸臂樑的佈置	335
8.5 跨度 - 樑高比值的限制條件	342
參考資料	344

第九章 部份預力與不施預力的鋼筋

9.1 部分預力與樑的行爲	345
9.2 非預力鋼筋的使用	349
9.3 非預力鋼筋 - 彈性應力	352
9.4 非預力鋼筋的極限強度	355
9.5 非預力鋼筋的轉移強度	361
9.6 鋼腱在低級位施加的應力	363
9.7 預力混凝土與鋼筋混凝土的聯合應用	365
參考資料	366

第十章 連續樑

10.1 連續性	367
10.2 連續樑的位置	371
10.3 結構分析、彈性理論	377
10.4 直線型移位與鋼纜的同心	392

10.5 鋼纜位置	401
10.6 連續結構開裂與極限強度	405
參考資料	414

第十一章 載重平衡法

11.1 應力觀念、強度觀念與平衡載重觀念	415
11.2 簡支樑與懸臂樑的載重平衡	418
11.3 連續樑的載重平衡	423
11.4 剛構架的載重平衡	430
11.5 設計的實際鋼腱佈置	432
11.6 兩維度載重平衡	438
11.7 三維度載重平衡	445
11.8 載重平衡準則，此法的準確度	451
參考資料	452

第十二章 版

12.1 引言；單向預力版	454
12.2 雙向預力與簡支預力平版	461
12.3 連續預力平版、設計步驟與試驗結果	466
12.4 平版設計應注意事項	481
12.5 平版、剪力強度	483
參考資料	486

第十三章 拉力構材、圓型預力

13.1 拉力構材、彈性設計	488
13.2 拉力構材、開裂與極限強度	493
13.3 圓型預力	495
13.4 圓周預力	497
13.5 儲蓄池（槽、櫃）中的垂直預力	504
13.6 圓頂環預力	508

6 預力混凝土設計

13.7 核電廠圍阻容器	512
參考資料	516

第十四章 壓力構材、樁

14.1 由預力所引起的柱作用	517
14.2 壓力構材	520
14.3 在偏心載重作用下的柱	526
14.4 預力混凝土樁	534
參考資料	547

第十五章 經濟、結構型式與佈置

15.1 經濟	548
15.2 建築型式與佈置	550
15.3 房屋建築的連接	556
15.4 屋頂構造用之薄殼	557
15.5 橋樑型式與佈置	564
15.6 鐵路軌枕與路面	570
參考資料	573

第十六章 設計實例

16.1 設計實例、後拉預力法、多跨度連續橋樑	576
16.2 設計實例、先拉預力屋頂樑	587
16.3 設計實例、後拉預力橋大樑	594
16.4 設計實例、平版式公寓建築	606
參考資料	625

附錄A 定義、符號、縮寫

A.1 定義	626
A.2 符號	627
A.3 換算因數：由美國慣用單位換算 SI 單位	631

附錄B 有關若干預力系統資料

B.1	公司地址.....	633
B.2	預力鋼材的性質.....	635
B.3	鋼筋性質（非應力）.....	636
B.4	DYWIDAG 後拉預力系統.....	637
B.5	BBRV 鋼鍵與端錨.....	639
B.6	FREYSSINET K 級組	641
B.7	複鋼纜組	643

附錄C 樑斷面常數

附錄D 預力混凝土的預力損失計算

D.1	PCI 預力損失、一般算法（節錄）.....	650
D.2	計算預力損失的簡化法.....	656
D.3	PCI 法用符號	659
D.4	例題 4.5 的計算.....	661

附錄E 習題說明

E.1	撓曲分析—任務載重.....	665
E.2	預力的損失.....	668
E.3	彎矩—曲率關係與強度.....	669
E.4	剪力強度.....	671
E.5	組合樑.....	672
E.6	連續樑.....	674
E.7	版.....	676

第一章 導 論

1.1 預力混凝土的發展

結構材料的發展，可依圖 1-1 中三個不同項目來描述。在圖中的第一列表示抗壓材料，以石料、磚料開始，依次發展為混凝土，最近則已進展到高強度混凝土。第二列的抗拉材料；最早使用竹與繩索，依次為鐵條與鋼材，現已發展到高強度鋼材。第三列的材料為抗壓與抗拉材料，木料使用最早，繼用鋼與鋼筋混凝土兩種，但迄今日預力混凝土被發展成功，並已廣泛應用。

鋼筋混凝土與預力混凝土主要區別，依事實上所指出，鋼筋混凝土係由混凝土與鋼筋組合而成，但只使其組合隨其所欲作用在一起。反之，預力混凝土是聯合高強度混凝土與高強度鋼材在一具活性的（active）或以有效方式得最適情況。此由拉伸鋼材，並對混凝土錨着

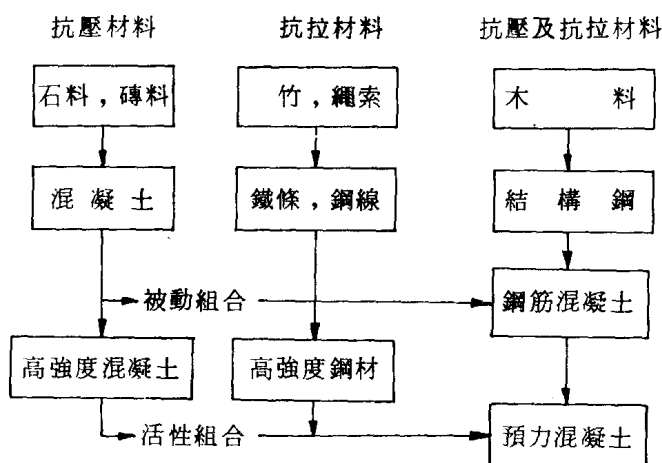


圖 1-1 營造材料的發展

2 預力混凝土設計

所致，如此，混凝土更能承受相當高的壓應力。因此，該活性的聯合導致兩材料獲得更佳行為。鋼，原為延性材料，但由於施加預力，使其能在高拉力下抵抗。混凝土為脆性材料，只具有限抗拉能力，現由於壓力改善，對抗壓能力亦不致損害。故預力混凝土成為現代兩項高強度材料的理想結合物。

預力混凝土的發展過程，在不同創始方式中成長。初期使用預力，原期在混凝土中產生永久壓應力，以增進其抗拉強度。隨後用的鋼材預力，亦有賴於高拉力鋼材的有效利用。因此，預力的導入，故意在結構中建立一種永久應力，其目的在求各種任務狀況下，改善其行為與強度。

在本章中，附有預力混凝土大型結構物照片。要注意，此項基本觀念與高強度材料，現已成為現代結構物的重要部分。

預力的基本原理，應用於營造方面，可能在數世紀前即有此類企圖。當時用繩索或金屬扁條，繞在木桶板外，造成木桶（見圖 1-2）。當扁條被拉緊，扁條受拉預力，此拉預力又在桶板間產生壓預力，如此使桶板能具抵抗桶內液壓力所產生的環拉力（hoop tension）。

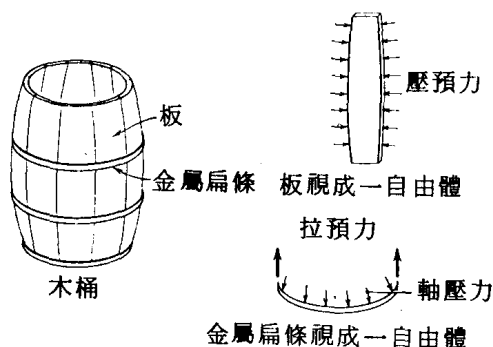


圖 1-2 用在木桶構造的預力原理

同一原理，直到 1886 年美國舊金山工程師 P. H. Jackson 首先將人造石與混凝土拱內，用鋼拉桿拉緊作為樓版，並取得專利權。約在 1888 年德國 C. E. W. Doehring 將混凝土版在未受載重前，先用受拉力的金屬加強，亦獲得專利權。此等應用均依一種構想，即混凝土的

壓力特強，但拉力較弱，若對混凝土加一預力在鋼材內，即可將混凝土置在壓應力下，並用來平衡由靜重或活載重所產生的任何拉應力。

此類最初取得專利權的方法均未成功，因產生在鋼材中的拉預力過低，由於乾縮與潛變兩項預力損失而抵銷。例如一根普通結構鋼條受預力達 124 MPa（見圖 1-3）。若鋼的彈性模數為 200×10^3 MPa，則鋼條的單位拉伸長度，由下式算得：

$$\begin{aligned}\delta &= \frac{f}{E} \\ &= \frac{124}{200,000} \\ &= 0.00062\end{aligned}$$

但因最後乾縮（shrinkage）與潛變（creep）常誘致混凝土內相當的收縮量，在進行中鋼材的初始單位伸長度可能消失殆盡。在最佳情況下，只有一小部分的預力，可能保留。因此，此法未能與習用的在混凝土中內的鋼筋競爭。

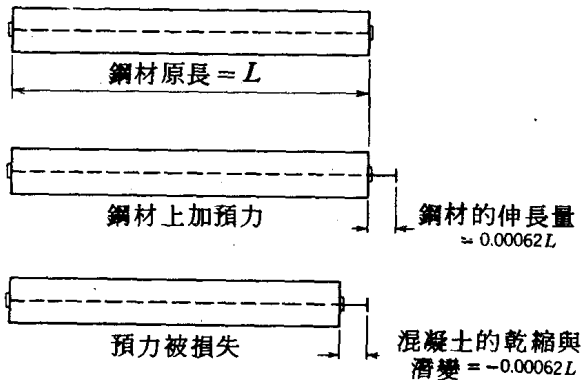


圖 1-3 用普通結構鋼，在混凝土上施預力

在 1908 年，美國 C. R. Steiner 曾建議俟混凝土發生局部乾縮與潛變後，重行拉緊，以恢復若干預力損失。另在 1925 年，美國 R. E. Dill 復將高強度鋼條塗上塗料，以阻止混凝土與鋼條黏結，並俟混凝土硬化後，將鋼條預拉，並用螺帽將鋼條錨碇在混凝土上。但因經濟

4 預力混凝土設計

上的不理想，此法未能推廣應用。

預力混凝土能有今日的發展，應歸功於法國 E. Freyssinet。因彼在 1928 年已開始使用高強度鋼線並施預力，終告成功。鋼線的極限強度，高達 1725 MPa 且屈服點強度亦超過 1,240 MPa，施預力達 1000 MPa 時，所產生的單位應變為（見圖 1-4）：

$$\begin{aligned}\delta &= \frac{f}{E} \\ &= \frac{1,000}{200,000} \\ &= 0.0050\end{aligned}$$

假設乾縮與其潛變總損失為 0.0008，其淨應變為 $0.0050 - 0.0008 = 0.0042$ 仍保留在鋼線內，其相當的應力為：

$$\begin{aligned}f &= E\delta \\ &= 200,000 \times 0.0042 \\ &= 840 \text{ MPa}\end{aligned}$$

Freyssinet 雖曾試用先拉預力法，鋼材不用端錨，但與混凝土黏結，但此法的實際應用，首由德國 E. Hoyer 完成。該 Hoyer 法用相距幾百 m 的兩座支牆，並能拉伸多根鋼線，同時可使幾個構材單位，在此支

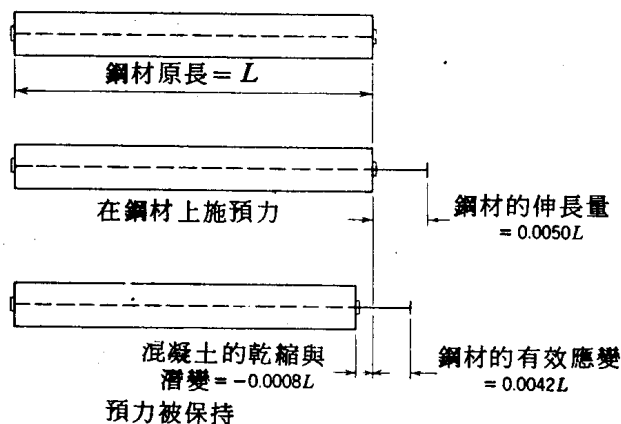


圖 1-4 高拉力鋼在混凝土上施預力

牆間逐段澆置混凝土，俟混凝土硬化後再剪斷鋼線。

當時，預力混凝土尚不能廣泛應用，直到可靠而經濟的拉力法與端錨工作發明後，在 1939 年 Freyssinet 始發展完成端錨用圓錐楔，並設計雙動千斤頂，在拉線時，將公錐塞入母錐，使圓錐體得以錨碇。在 1940 年，比利時 G. Magnel 教授另發展 Magnel 法，由兩根鋼線同同時被拉緊，並在每端用簡單的金屬楔錨碇。當時預力混凝土已開始獲得應用的重要性能，直到 1945 年始行問世。歐洲在戰時因鋼材缺乏，對預力混凝土提早應用受到相當刺激，因預力混凝土所需的鋼材遠比一般混凝土為少。但當時尚需時日，等待預力混凝土的服務性、經濟與安全等均已確實改善；且更需使工程師們及營建業者熟悉，並掌握此一設計與營造的新方法。

法、比兩國雖曾領導預力混凝土的開發，英、德、瑞士、荷蘭、蘇俄與意大利亦迅速跟進。自 1965 年後，德國新建的混凝土橋，大

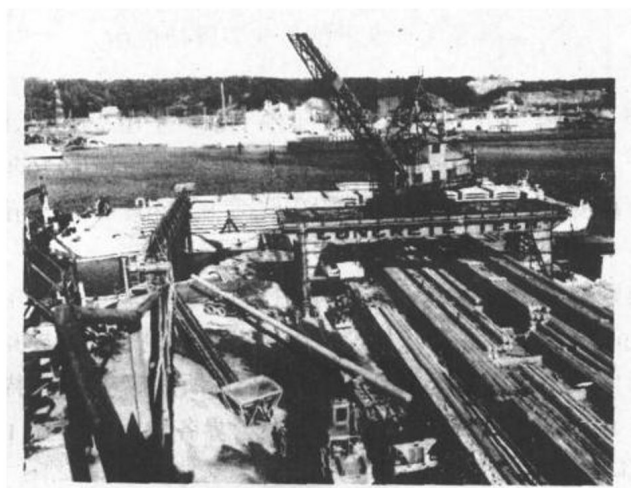


圖 1-5 現代預力廠所產品質優良的預力混凝土。圖示頗長的八角形樁共長 11100m，連同 440 個橋面分段 (panel)，由華盛頓州 Tacoma 混凝土技術合作工廠運往 Adak (阿拉斯加)，用來建造海軍供應碼頭