

混凝土結構設計

(上冊)

Design of Concrete
Structures
9th Edition

原著者：George Winter
Arthur H. Nilson

譯述者：王堯雄、趙國強

複校者：趙國華

科技圖書股份有限公司

混凝土結構設計

(上冊)

Design of Concrete
Structures
9th Edition

原著者：George Winter
Arthur H. Nilson

譯述者：王堯雄、趙國強

複校者：趙國強

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：混凝土結構設計（上册）

原著者：Winter and Nilson

譯述者：王堯雄、趙國強

發行人：趙國華

發行者：科技圖書股份有限公司

台北市復興南路一段360號7樓之三

電話：7056781・7073230

郵政劃撥帳號 15697

六十九年七月初版

七十三年一月五版

特價新台幣100元

原 序

本版仍保留以前作者的兩個方向：徹底了解基本材料的行態，以及鋼筋及預力混凝土結構體的基本力學，同時也列出適合潮流的設計實務與步驟，以提供並協助專業性的運用。

我們充分了解，只有着手專業技巧與規範化設計步驟的訓練外，無法達成成功的專業運用。這些技巧與步驟，經常在改變，為求趕上這些快速的發展，工程師必須徹底了解混凝土與鋼，作為構造材料時的基本行態，以及鋼筋混凝土構件及結構體的彈性與非彈性行態。從另一方面來看，結構工程師的最終目標是求安全、經濟而有效地設計出結構體。因此，用這些基本的了解，作為紮實的基礎。在引用時，對熟悉最新的設計步驟與技巧是很重要的。本版與以前各版一樣，要求同時達成這兩個目標。

第八版的一般排列方式大部份仍予保留，但仍有相當的變更，分述如下：

第二章對鋼筋混凝土的力學與行態，那些與設計步驟的細節更直接有關的部份，已移到適當的設計章節中去。例如，第四章、梁；第五章、版；第六章、壓力構件。這樣既能加強第二章中說明基本鋼筋混凝土力學及行態的目標，又可在以後的設計章節中建立最佳的連續性。

我們增列了簡要而獨立的第三章，結構安全。現代的或然率法，在安全與信賴度方面的重要性，已在所有的結構工程領域中逐漸增加。ACI 1963 版曾首先提出，目前稱為“荷重與抗力因數設計”(load and resistance factor design)，已快要擴展到其他領域去。由於這種遞增的重要性，似乎有必要設置濃縮而獨立的一章加以說明。本章與 ACI 規範中有關安全規定的完全而有系統的說明，完全一致。

另一方面，前面一版中有關拱與薄殼屋頂章節已作重大刪改，而將有關薄殼的資料併入第九章的建築物中。這是因為專業化的電算機程式已使前版的拱分析與對應的表格以及冗長而繁複的說明變得落伍。有關薄殼的基本資料則保留原狀未予增加篇幅。要注意，接觸這門領域的人們，是可以且不可避免地要閱讀有關薄殼分析及設計的專門書籍的。

第六章有關壓力構件，亦已大部份重寫，並作相當程度的擴大篇幅，將以前有關材料的一部份，包括在第二章中。現在該章有關柱設計的說明更能連貫而更易了解。將基本的與更實用的觀點結合在一起。根據應變兼容性 (strain compatibility) 的數字計算更予強調，為數更多的範例亦予更新，並作徹底的說明。

除以上的重大更改外，簇新而趕上時代的資料也分列在本書的所有章節中。大多數這類的更改與增添，是由於 1977 的 ACI 鋼筋混凝土建築規範所引發的。本書所有的設計步驟、範例、以及習題等，均分別修正以適應此新版的規範。各章最後的參考書目，亦已更新，大多數都予擴大。全書的習題數量也增加了。

為反映美國境內公制化的過渡狀態，全書有一大部份用括弧換算成 SI 單位，尤其是基本的數據。此外還附有附錄 B。不僅列出美國的常用單位的 SI 當量值，同時還有許多公式及等式的當量式。其中很多因尺寸上的非均質性 (nonhomogeneity) 公式，很難或冗長而不便換算者，亦已分別列出。

其他尚未提及的重大改變與增添部分分列如下：剪力與扭力設計，在全書中均用力的形式，而不用老式的應力形式來表現，以符合新規範規定。在第一章中，雙軸及三軸應力下的混凝土行態資料，已予更改而趕上潮流。有關鋼筋疲勞的新資料亦已列入。第二章有關混凝土應力塊參數的資料，已經仔細推算出來，反映出較高強度材料的應用與其限制，並已更清晰地說明剪力破壞的機構。第四章加一段新節目以說明深梁，並包括一個設計範例。第五章加上一新節目，用係數法說明雙向邊支承版的簡化設計，又列出平版及板中柱子的力矩傳遞，以及平版、板與雙向版的撓度計算。全新的鋼板、補強版的資料亦

已包括進去，以反映出這種樓板系統的廣泛應用。第九章列有剪力牆的全新材料以及地震設計的特別規定，包括梁及柱的特別補強細節，與對超載的反映延性的接頭設計。第十一章有預力損失的擴大處理，以及先拉與後拉梁中錨定帶的全新資料。第十二章已按照最新的設計實務趕上潮流，尤其是營造細節方面。1977版的AASHTO 規範的條文亦已列入。

這些資料再加上許多設計工具、表格與圖表的附錄 B，使本書繼續成為實際工程師有價值的桌上參考書。

教師在使用本書時，很為重要的一點是，本書是設計成可適應於多種課程組織的，如果時間有限而只能介紹一下鋼筋混凝土，則第一至第三章加上第四章及第六章的一部份，即可達成此項目標。如果每週有 3 或 4 小時的混凝土課，則第一至第六章及第七章的一部份，將能提供完整的資料。不論是那一種課程安排，其時間都不可能容許列入第九及第十章有關建築物與預鑄結構的部份。但我們建議，第九章的一部份以及簡要的第十章的全部，都可指定為必要或推薦性的讀物。這樣可使學生對結構體實際上如何組合在一起，有更多敘述性的某些設計方面的資料。能補助其他數章中更具分析性的主題。同時依作者的經驗，這種補助性的獨立讀物，更能加強學生的機動性。最後，有兩學期的課程，或一學期大學部與一學期研究所的課程，本書全部可為專業設計的實務，打下堅實的基礎。

George Winter

喬治·溫特

Arthur H. Nilson

阿賽 H. 納爾遜

混凝土結構設計

目 錄

原 序

第一章 混凝土與鋼筋

1.1	概說：混凝土、鋼筋混凝土、預力混凝土	1
1.2	水 泥	5
1.3	骨 材	7
1.4	混凝土成份比與拌合	8
1.5	輸送、灌注、壓實與養護	12
1.6	試驗、品質控制與檢驗	13
1.7	混凝土受壓時的強度與變形	15
1.8	抗拉強度	21
1.9	聯合應力下混凝土強度	22
1.10	體積變化：收縮、溫度	25
1.11	輕混凝土	28
1.12	鋼 筋	29

第二章 鋼筋混凝土的力學性與行態

2.1	基本概念	38
2.2	軸 壓 力	40
2.3	軸 拉 力	47
2.4	彎 曲	49
2.5	剪力與斜拉力	68
2.6	裹握力與錨定	84

2.7	壓力加上彎矩	92
2.8	預力混凝土	97

第三章 結構的安全

3.1	安全與適用性	107
3.2	荷 重	108
3.3	強 度	110
3.4	結構安全度	110
3.5	設計基準	111
3.6	簡 史	113
3.7	ACI 規範的安全規定	114

第四章 梁

4.1	簡 介	119
4.2	撓曲設計	120
4.3	剪力與斜拉力的設計	142
4.4	裹握、錨定與發展長度	156
4.5	鋼筋的選擇與其間距	160
4.6	鋼筋切斷與彎起點	163
4.7	完整設計例題	169
4.8	撓曲構件內鋼筋的續接	174
4.9	裂縫的控制	176
4.10	工作荷重下的撓度	179
4.11	扭矩、扭矩與剪力作用	191
4.12	深 梁	209
4.13	工作荷重設計	221

第五章 版

5.1	版的類型	229
	單 向 版	231

5.2	撓曲分析	231
5.3	溫度與收縮用鋼筋	234
5.4	單向版設計	235
雙向版		240
5.5	雙向版的行態	241
5.6	用係數法分析	244
5.7	雙向邊緣支承版	251
雙向柱支承版		256
5.8	行態	257
5.9	撓曲分析	260
5.10	撓曲鋼筋	270
5.11	剪力設計	272
5.12	版中開孔	281
5.13	柱的力矩傳遞	282
5.14	深度限制	285
5.15	有梁由柱支承的雙向版	286
5.16	撓度的計算	295
地面版		304
5.17	簡介	304
5.18	受集中荷重分析法	305
5.19	分佈在部分面積上的荷重	310
5.20	連續鋼筋混凝土鋪面	311
版分析用的屈服線理論		313
5.21	簡介	313
5.22	屈服線位置	315
5.23	平衡分析法	318
5.24	虛功分析法	320
5.25	角隅叉裂	325
5.26	屈服線理論的限制	326
鋼承板 - 補強組合版		327

5.27	簡 介	327
5.28	剪力裹握強度	329
5.29	撓曲強度	334
5.30	組合版的 ϕ 值	335
5.31	撓度收縮鋼筋 - 連續性	336

第一章 混凝土與鋼筋

1.1 概說：混凝土、鋼筋混凝土、預力混凝土

混凝土 (concrete) 是一種似石的材料，由水泥、砂、礫石或其他骨材與水按一定比例拌合，灌入定形模型內硬化，而成所需結構物的形狀與大小。此一材料的統體積由細粗骨材所成。水泥及水經化學作用後，將骨材結合成固體。加入的水量比化學作用所需者略多，以求提高可工度 (workability)，使其易於灌鑄並在結硬途中將鋼筋完全包住。若將混凝土的結合物的成份作適當的調整，可得到各種強度。使用特種水泥 [例如早強水泥 (high-early-strength cement)]，特種骨材 [例如輕質骨材或重骨材 (light-weight or heavy-weight aggregates)] 以及特殊養護方法 (例如蒸汽養護)，可造成許多不同性質的混凝土。

混凝土的性質與拌合料的比例、拌合程度以及從灌鑄開始到完全硬化過程中的濕度、溫度均有密切的關係。這些控制過程，稱為養護 (curing)。為提高混凝土的品質，需要高度的控制技術與督導，包括成分的重量比例、拌合和灌鑄，一直到養護完成。

自從古埃及開始，千百年來人們就用混凝土作為營造材料。由此

2 混凝土結構設計

發展迄今已成為全世界所通用。其主要的優點是具可塑性 (plastic)，可依模板製成的形狀，鑄成任何實用的形狀。它具高度的耐火與抗風化性，亦為其主要優點。混凝土的主要成分，除水泥外，均可廉價獲得或距現場近處取用。其抗壓強度與天然石材一樣高，故能擔任結構中的主要抗壓構件，如拱與柱。但與天然石材一樣是脆性，抗拉強度要比抗壓強度低得很多。以致不能經濟的成為抗拉構件的營造材料；例如完全受拉力的繫桿 (tied rod)，或受部分拉力的梁與其他抗彎構件等。

為求補救這項缺點，在十九世紀末葉，就有人利用高拉力強度鋼筋置在受抗拉強度限制的混凝土中，以加強混凝土的抗拉強度。所用的鋼筋為圓斷面鋼條，表面軋成凹凸不平以增強與混凝土間的裹握力。在未灌鑄前，這些鋼筋就先安置在模板內的適當位置。在混凝土硬化之後，就結合成為構件的完整部分。這種結合而成的材料，稱為鋼筋混凝土 (reinforced concrete)。鋼筋混凝土兼具鋼與混凝土兩種材料的優點；成本低廉，防火與抗風化力強，抗壓强度高，混凝土的可型性 (formability) 大，鋼的延性與韌性 (ductility and toughness) 也很高。由於鋼筋混凝土具有上述許多優點，故其用途特別廣泛，舉凡房屋、橋梁、壩工、水塔、水櫃以及各種結構，均可用鋼筋混凝土建造。

近年來，由於技術進步，已能廉價生產比普通鋼筋屈服强度高達四倍以上的鋼筋；同樣能製出比普通混凝土的抗壓强度高出二至三倍的混凝土。惟此種組合材料的強度，受到限制，超過此一限制，構件的優點即不再有效。為求確保安全起見，將該構件的強度限與組成材料的強度成正比。但因高應力所產生的應變大，故高強度的鋼筋在荷重下，會產生較大變形，因而使所成的構件產生較大的撓度。當鋼筋的應變增大，其周圍的混凝土，因抗拉力不足而發生裂縫。這種裂縫雖微不可見，卻會使鋼筋表面逐漸暴露，易受潮濕或化學作用而起腐蝕。為防止這種現象發生，鋼筋的屈服強度須限制於 80 ksi (552 MPa) 以下，約為普通鋼筋強度 40 ~ 60 ksi (276 ~ 414 MPa) 的兩倍。

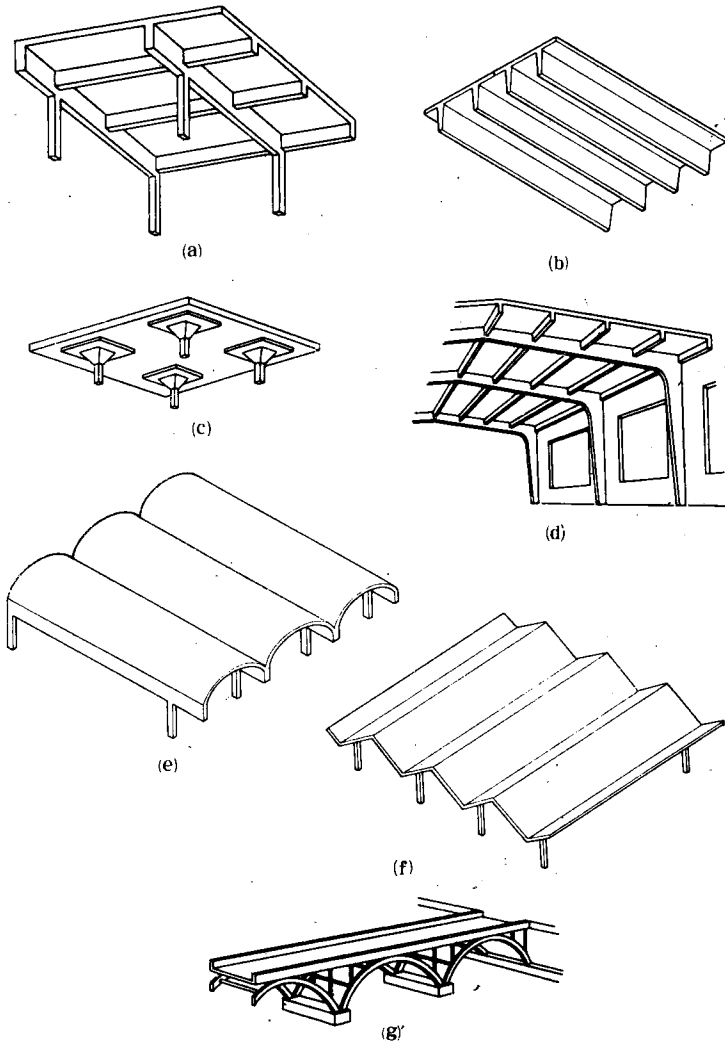


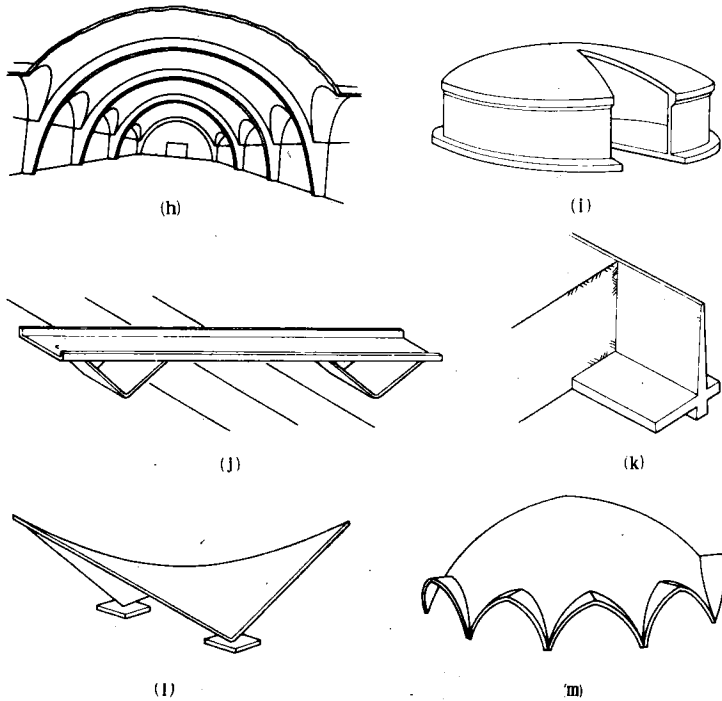
圖 1.1 鋼筋混凝土造的主要結構形式(a)梁與大梁版；(b)肋版；(c)無梁版；(d)剛架結構；(e)圓筒式薄殼屋面；(f)摺板屋面；(g)多拱橋

有一種特殊方法，可將高強度鋼筋與混凝土合併使用。此種構造

4 混凝土結構設計

稱為預力混凝土 (prestressed concrete) 。所用的鋼筋大部份為鋼線 (wire) 或鋼索 (strand) ，有時亦用鋼條 (bar) ；在高拉力下埋在混凝土內，與周圍經硬化後的混凝土壓力成平衡。由於混凝土受預壓力 (precompression) 的作用，只有在超載時，於受拉力面才會產生裂縫，故在工作荷重下，不會起裂縫。因此，高強度材料才可有效地應用。預力混凝土特別適用於大量的預鑄構件的製造。在一般情況下一樣可用。預力混凝土的進展，使兩種材料的合用效果更為擴大。

圖 1.1 所示為若干主要鋼筋混凝土結構型式 (principal struc -



(h)薄殼屋面；(i)水箱；(j)剛架橋樑；(k)撐樑式擋土牆；(l)雙曲線橢圓薄殼；(m)點支式穹窿頂

tural form): 其設計方法將在以後論述。圖中(a) 爲一多層結構中的版 (slab)、梁 (beam) 與大梁樓板 (girder floor); 圖(b)的肋條樓板 (ribbed floor), 可節省混凝土, 其標準金屬的模板, 拆後仍可再用; (c)爲平版樓板 (flat-slab floor), 其特點爲不用梁與大梁支承。常用於荷重大的建築物, 如倉庫; (d)爲剛架結構 (rigid frame structure), 用於跨徑大的建築物, 如大禮堂、體育館, 或工廠等; (e)及(f)爲圓筒薄殼屋面 (cylindrical shell roof) 及摺板屋面 (folded-plate roof) 與(h)、(l) 及(m) 的薄殼屋面相似, 這是近來才發展出來的薄殼, 其相對比較蛋殼爲薄; (g)及(j)爲橋梁的兩種構造形式。前者爲大跨徑多拱橋 (multiarch bridge), 後者爲剛架結構公路橋。(i)爲水櫃與水庫, 係由圓筒與球形薄殼所組成; 前者常用預力混凝土造成; (k)爲撐垛式擋土牆 (counterfort retaining wall), 爲鋼筋混凝土應用於基礎工程的代表。

圖 1.1 並不包括所有混凝土構造物的形式, 僅爲幾種比較合於混凝土性質的結構而已。由此可見, 混凝土作爲各種構造物的適用性。包括一維構件 (如梁、大梁、柱等), 兩維構件 (如版、拱、剛架結構等) 或三維結構 (如薄殼), 以及許多附屬結構部分。從這些結構可以看出, 混凝土的適應性 (adaptability), 使我們可造成許多種結構形式, 既經濟而又美觀。

1.2 水 泥

水泥爲一種膠結材料, 其膠着性與黏附性, 能將骨材結合成一具有相當強度與耐久性的固體。具有這種特性的材料, 除水泥外, 尚有用在公路修築方面的石灰 (lime)、瀝青 (asphalt) 以及煤焦油 (tar) 等。用於構造混凝土的水泥, 以水硬性水泥 (hydraulic cements) 爲最多。水泥凝結與硬化的化學作用 (水化作用) 過程, 需有足夠水份。各種水硬性水泥, 以 1824 年在英國獲得專利的波德蘭水泥最爲普遍。

波德蘭水泥爲一種粉末狀灰色材料, 其主要成分爲鈣及鋁的矽酸

6 混凝土結構設計

鹽。其原料為石灰石 CaO ，與粘土或頁岩（供給 SiO_2 及 Al_2O_3 ）。將這些原料磨碎，混合之後，送入窯中燒成硬塊，再經冷卻磨成粉末，而成水泥。製成的水泥用散裝或裝袋運出，每袋重 94 lb（台灣用 50 kg）。用波德蘭水泥造成的混凝土，通常在兩星期後才有足夠的強度以承載重量。經 28 天後，方能達到設計強度。此後，所增的強度較緩。有時為求趕工，可改用早強水泥（high-early-strength cement），其價格雖較普通波德蘭水泥為貴，但可在 1 至 3 天內達到相當於波德蘭水泥 28 天的強度。早強水泥的基本成分與波德蘭水泥相同，不過在煅燒前後的混和與研磨，較為均勻與精細。

當水泥與水拌合成漿，此後就開始硬化，逐漸變成硬塊。這種過程稱為凝結與硬化（setting and hardening）。當其具有相當強度而能承受相當壓力時，該水泥即謂已經凝結。此後經長時間的硬化，其強度亦逐漸增加。水泥漿內的水分，將水泥顆粒表面的物質溶解成膠體（gel），此種膠體的體積漸增則硬度漸大。約在水份加入後 2 到 4 小時內，其硬化速度最快。在持續硬化過程中，水化作用繼續深入水泥顆粒中，但其速度愈來愈慢。一般混凝土的水化作用可能並不完全。硬化的水泥漿，其體積變化的主要原因，係受膠體結構的關係。水份的變化，會引起混凝土的體積變化。如混凝土乾燥時的收縮（shrinkage）。

為使已知量的水泥能充分水化，H. Rusch 認為，所需水量約為水泥重量的 25%。因此若以重量計，最少的水灰比（water-cement ratio）為 0.35 到 0.40。這相當於每包水泥的用水量為 4 到 4.5 加侖。此一水量乃為水灰比的習慣表示法。為使混凝土具有適當的工作度（workability），實際用的水灰比要比此一最小值為大。假如用水量超過 25%，水化過程會使混凝土漿產生孔隙。這些孔隙會削弱混凝土的強度，其減少量與孔隙容積所占總容積量成反比。因為只有固體才能承受應力，孔隙不能承受應力。這就是混凝土強度與水灰比成反比的原因。

在凝結與硬化過程中，所放出大量的熱，稱為水化熱（heat of hydration）。在鉅大的混凝土體中（例如壩體），因水化熱發散很

慢，故溫度升高，體積隨之膨脹。當溫度降低時，因混凝土已經凝結，故由體積收縮會造成破裂。爲了防止這種原因所引起的破裂與強度的削弱，必需使用特殊方法予以控制。

1.3 骨 材

普通房屋結構用的混凝土，骨材約佔硬化體積的70%到75%，其餘則爲水泥、水份（即水泥水化時未含的水份）及氣孔。其中水及氣孔對混凝土的強度並無貢獻。骨材愈結實則混凝土的強度愈大，對風化的抵抗力也愈強，亦且愈經濟。因此，骨材的顆粒級配，對混凝土的固結非常重要。骨材的選擇：強度要高，耐久性要大，抗腐蝕力要強，且不含雜質。若骨材中含有壤土（loam），沉泥、以及有機物等雜質，將會減低骨材與水泥漿間的膠結力。骨材與水泥間，不應有不良的化學作用產生。

天然骨材，一般可分爲細骨材（fine aggregate）與粗骨材（coarse aggregate）。細骨材或砂需能通過四號篩，亦即每in有四篩孔。比這個大的骨材稱爲粗骨材或礫石（gravel）。有時爲應級配需要，可將砂用篩分法分成兩三組，也將粗骨材分成若干組，然後按級配表（grading charts），照比例混合，以得到結實的骨材級配。鋼筋混凝土所用的粗骨材的最大粒徑，是據模板寬窄與鋼筋的間隔而定。骨材粒徑必須小於最狹模板間距或版厚的五分之一或三分之一，也不能大於鋼筋間的最小間距的 $\frac{2}{3}$ （柱用）至 $\frac{3}{4}$ （其它構材用）。在ACI 621 號報告中，有關骨材性質對混凝土性質的影響，其級配方法、骨材選用準則以及操作方法，都有專門性的介紹（參考書1.1）*。

所謂石質混凝土（stone concrete），即以天然石料作爲骨材的混凝土，其單位重量約在140 pcf 到152 pcf 之間，一般可假設爲145 pcf（ 2320 kg/m^3 ）有時爲應特別需要使用輕質混凝土（light-weight concrete）以減輕重量，其使用亦日漸普遍。

* 參考書列在本章末。