

ACI 標準及報告

結構混凝土建築規範

(ACI 318-14 Traditional Chinese)

結構混凝土建築規範解說

(ACI 318R-14 Traditional Chinese)

ACI 318 委員會編訂

ACI 318-14



社團法人中國土木水利工程學會
CHINESE INSTITUTE OF CIVIL & HYDRAULIC ENGINEERING

Tci 社團法人台灣混凝土學會
Taiwan Concrete Institute

aci 美國混凝土學會台灣分會
American Concrete Institute Taiwan Chapter

用於試驗以計算 λ 的混凝土拌成物應能代表工程中使用之混凝土。

19.3 混凝土耐久性要求

R19.3 混凝土耐久性要求

混凝土耐久性為其抵抗液體侵入的能力所影響，耐久性主要受到混凝土 w/cm 與膠結材料組成影響。在已知 w/cm 下，使用飛灰、高爐水泥、矽灰，或此類材料之組合，通常可增強混凝土抵抗液體侵入的能力，進而改善混凝土耐久性。本規範強調藉由 w/cm 達成低滲透性以符合耐久性要求。ASTM C1202 可提供混凝土抵抗液體侵入能力之指標。

因為精確驗證混凝土 w/cm 值有困難，故 f'_c 之選定宜與耐久性要求的最大 w/cm 相配合。選定與耐久性要求所允許之最大 w/cm 相配合之 f'_c ，使得以用強度試驗結果來代替 w/cm ，以幫助確保現地混凝土未超過最大 w/cm 。

如表 19.3.2.1 附註所述，因為輕質粒料所吸收的拌合水，造成 w/cm 的計算不確定，故輕質混凝土並未指定 w/cm 最大限值。因此，使用最低 f'_c 的要求來確保高品質水泥漿。

表 19.3.1.1 訂定暴露環境分類，並依嚴重程度分暴露等級。19.3.2 提供混凝土於各暴露等級下的相關要求。

本規範不包括特別嚴重暴露環境的條款，例如酸或高溫。

19.3.1 暴露環境分類與分級

R19.3.1 暴露環境分類與分級

19.3.1.1 證照設計專業人員須依表 19.3.1.1 規定的各種暴露類別及構材的預期暴露程度設定暴露分級。

本規範訂定影響混凝土耐久性之四種暴露環境分類，以確保有足夠的耐久性：

暴露類別 F 適用暴露於潮濕與凍融循環環境，不論有無去冰化學藥劑的戶外混凝土。

暴露類別 S 適用於接觸含有害量之水溶性硫酸根離子之土壤或水的混凝土。

暴露類別 W 適用於接觸水但不暴露於凍融、氯鹽或硫酸鹽的混凝土。

暴露類別 C 適用於暴露條件需要額外防護，以抵抗鋼筋腐蝕的非預力與預力混凝土。

每個類別中的暴露嚴重程度，依等級以增加的數值代表暴露條件嚴重性的增加。如果暴露的影響可忽略（溫和的）或該構材不適用該暴露分類時，給予分級 0。

表 19.3.1.1 暴露環境類別與分級

類別	分級	條件	
凍融 (F)	F0	混凝土不會暴露於凍融循環	
	F1	混凝土暴露於受潮有限的凍融循環	
	F2	混凝土暴露於經常潮濕的凍融循環	
	F3	混凝土暴露於經常潮濕及使用去冰化學藥劑的凍融循環	
硫酸鹽 (S)		土壤中的水溶性硫酸鹽 (SO_4^{2-}), 質量% ^[1]	水中溶解之硫酸鹽 (SO_4^{2-}), ppm ^[2]
	S0	$\text{SO}_4^{2-} < 0.10$	$\text{SO}_4^{2-} < 150$
	S1	$0.10 \leq \text{SO}_4^{2-} < 0.20$	$150 \leq \text{SO}_4^{2-} < 1500$ 或海水
	S2	$0.20 \leq \text{SO}_4^{2-} \leq 2.00$	$1500 \leq \text{SO}_4^{2-} \leq 10,000$
	S3	$\text{SO}_4^{2-} > 2.00$	$\text{SO}_4^{2-} > 10,000$
與水接觸 (W)	W0	混凝土處於乾燥環境 混凝土與水接觸, 不要求低透水性	
	W1	混凝土與水接觸, 需要低透水性	
鋼筋的腐蝕防護 (C)	C0	混凝土處於乾燥環境或有防潮處理	
	C1	混凝土暴露於潮濕但無外來氯鹽的環境	
	C2	混凝土暴露於潮濕且有外來氯鹽的環境, 如去冰化學藥劑、鹽、鹽水、海水或其潑灑水	

^[1] 土壤中硫酸鹽的質量百分比應依 ASTM C1580 測定。

^[2] 水中溶解硫酸鹽的濃度 ppm 應依 ASTM D516 或 ASTM D4130 測定。

暴露類別 F 混凝土是否會受凍融循環損害, 視混凝土凍結時, 空隙內之水量而定 (Powers 1975)。此水量可用混凝土的飽和度來表示。若飽和度够高, 混凝土孔隙中的水量足以結凍膨脹, 產生內拉應力而造成混凝土開裂。不需要整個構材全部飽和才會受損, 例如, 版之頂層 3/8 in. 或牆之外層 1/4 in. 呈飽和狀態, 不論內部多乾燥, 此版頂或牆外層部分易受凍融所損。

對於任何需要抵抗凍融的構材部位而言, 其混凝土需有足夠的輸氣量與強度。藉由低 w/cm 獲得適當的強度, 也減少孔隙體積與增加抵抗水進入的能力。輸氣使混凝土較難達到飽和, 並允許水結凍時膨脹。

暴露分級隨著暴露於水的程度而改變, 因其影響暴露於凍融循環時混凝土任何部分飽和的可能性。增加飽和度潛勢的條件, 包括長期或經常接觸水且無排水或乾燥時機。構材中混凝土飽和的可能性與工程地點、結構中構材的位置與方位及氣候有關。既有結構中於概略相同位置的類似構材性能紀錄, 可提供暴露分級的指引。

暴露類別 F 次分為四種暴露分級:

- F0 級暴露為不暴露於反覆凍融循環之混凝土。
 - F1 級暴露為受反覆凍融且受潮有限之混凝土。受潮有限係指混凝土與水有某些接觸與吸水, 但不預期會吸收足夠的水而呈飽和狀態。證照設計專業人員宜謹慎檢視暴露條件以支持其決定, 即預期冰凍前混凝土無飽和之虞。即使在此分級的混凝土不預期飽和, 仍需要最低輸氣 3.5 至 6% 以降低萬一因部分混凝土構材飽和而受損的機會。
 - F2 級暴露為受反覆凍融且經常暴露於水之混凝土, 經常暴露於水意指部分混凝土會在結冰前吸收足夠水量而呈飽和狀態。若指定 F1 級與 F2 級有疑慮時, 得選用較保守的 F2 級。F1 級與 F2 級是不預期會暴露於去冰化學藥劑的環境。
 - F3 級暴露與 F2 級為受潮條件相同, 且暴露於凍融循環下的混凝土。此外, F3 級暴露的混凝土預期會暴露於去冰化學藥劑, 該藥劑會增加吸水和留存水分 (Spragg 等人 2011), 使混凝土較迅速飽和。
- 表 R19.3.1 提供各暴露分級的混凝土構材範例。

表 R.19.3.1 暴露類別 F 之結構構材範例

暴露分級	範例
F0	<ul style="list-style-type: none"> 處於不會遇到結冰溫度氣候條件下的構材 不會暴露於冰凍條件下的內部構材 不會暴露於冰凍條件下的基礎 埋在土壤冰凍線以下的構材
F1	<ul style="list-style-type: none"> 不會積雪和積冰的構材，如外牆、梁、大梁和不與土壤直接接觸的版 基礎牆可能屬於此分級，端視其飽和的可能性
F2	<ul style="list-style-type: none"> 會積雪和積冰的構材，如室外的墊高版(elevated slab)。 基礎或地下室外牆於地表上會積雪和積冰的延伸部位 與土壤接觸的水平和垂直構材
F3	<ul style="list-style-type: none"> 暴露於去冰化學藥劑的構材，如停車場結構的水平構材 基礎或地下室外牆於地表上會遭遇積雪、積冰和去冰化學藥劑的延伸部位

暴露類別 S 次分為 4 種分級：

- (a) S0 級暴露適用於接觸低濃度水溶性硫酸鹽，不需考慮硫酸鹽侵蝕之條件。
- (b) S1、S2 與 S3 級暴露適用於直接接觸到含水溶性硫酸鹽之土壤或水的結構混凝土構材。暴露的嚴重程度由 S1 級至 S3 級遞增，以土壤中所量測之水溶性硫酸鹽濃度或水中溶解硫酸鹽濃度之臨界值為依據。海水環境列為 S1 級暴露。

暴露類別 W 次分為兩種分級：

- (a) W0 級暴露適用於乾燥環境或與水接觸，但不需規定低透水性之構材。
- (b) W1 級暴露適用於需具低透水性的混凝土，水滲入混凝土可能降低構材的耐久性，例如地下水面以下的基礎牆。

暴露類別 C 次分為三種分級：

- (a) C0 級暴露適用於不需額外防護鋼筋腐蝕的條件。
- (b) C1 與 C2 級暴露適用於非預力和預力混凝土構材，依使用情況下所暴露於外界濕度與氯離子的程度而定。暴露於外來氯離子的例子，包括混凝土直接接觸去冰化學藥劑、鹽、鹽水、半鹹水、海水，或此等之潑濺水。

19.3.2 混凝土拌成物要求

19.3.2.1 混凝土拌成物應基於表 19.3.1.1 的各項暴露類別並符合表 19.3.2.1 中最嚴格的要求。

R19.3.2 混凝土拌成物要求

表 19.3.2.1 提供混凝土在各暴露分級的要求。當混凝土同時面對多種暴露條件時，取最嚴格的要求。例如，有一構材同時為 W1 級和 S2 級時，因為 S2 級的規定比 W1 級嚴格，故該構材的混凝土需符合 S2 級的規定，最大 w/cm 為 0.45 及最低 f'_c 為 4500 psi。

F1, F2 與 F3 級暴露：除遵照最高限 w/cm 與最低限 f'_c 外，暴露於凍融環境的混凝土構材亦要求依照 19.3.3.1 節規定輸氣。適用 F3 級環境的構材亦要求依照 26.4.2.2(b) 規定，限制膠結材料中之卜作嵐與高爐水泥的用量。

因為沒有鋼筋腐蝕的問題，故對 F3 級暴露的純混凝土構材要求比較寬鬆。證照設計專業人員宜考慮純混凝土構材中的最少配筋量，確認在個案中較寬鬆的要求是適當的。

S1, S2 與 S3 級暴露：表 19.3.2.1 列出暴露不同硫酸鹽侵蝕條件時，適當的水泥型式、 w/cm 最高限、及 f'_c 最低限。選用抗硫酸鹽侵蝕水泥，主要是考慮鋁酸三鈣 (C_3A) 的含量。

S1 級暴露：ASTM C150 第 II 型水泥之 C_3A 的最高含量限制為 8.0%，可適用於暴露 S1 級，亦可使用 ASTM C595 中有標記 MS 的混合水泥。自 2009 年起，ASTM C595 包括二元 (IP 和 IS) 及三元 (IT) 混合水泥的要求。ASTM C595 中，適合的二元與三元混合水泥為 IP (MS) 型、IS (MS) 型及 IT (MS) 型，其中 MS 附註代表水泥合於抗中度硫酸鹽侵蝕的要求。在 ASTM C1157 中，適合暴露中度硫酸鹽的類型為 MS。

S2 級暴露：ASTM C150 V 型水泥之 C_3A 的最高含量限制為 5.0%，可適用於 S2 級暴露。ASTM C595 中，適合的二元與三元混合水泥為 IP (HS) 型、IS (HS) 型及 IT (HS) 型，其中 HS 標記代表水泥合乎抗高度硫酸鹽侵蝕的要求。在 ASTM C1157 中，適合暴露中度硫酸鹽的類型為 HS。

S3 級暴露：本規範允許使用 ASTM C150 V 型水泥加卜作嵐材料，或已有成功使用紀錄的高爐水泥，以取代需符合 26.4.2.2(c) 節的試驗要求。此替代方案亦適用於 ASTM C595 中標記 HS 的二元及三元混合水泥、C1157 中之 HS 型水泥。

使用飛灰 (ASTM C618, F 級)，天然卜作嵐 (ASTM

C618, N 級), 矽灰 (ASTM C1240), 或高爐水泥 (ASTM C989) 亦可改善混凝土抵抗硫酸鹽侵蝕 (Li 及 Roy 1986; ACI 233R; ACI 234R)。表 19.3.2.1 的附註提供一個可依性能選擇適當之材料組合, 作為表列特定水泥的替選方案。依 26.4.2.2(c), 可用 ASTM C1012 來評估使用膠結材料組合的混凝土抗硫酸鹽侵蝕性能。

部分 ASTM C595 和 ASTM C1157 的混合水泥, 可在不添加卜作嵐材料或高爐水泥的情況下, 達到 19.3.4 的試驗要求。

從 2012 年開始, ASTM C595 要求 IL 型水泥含有 5~15% 石灰石, 及 IT 型水泥含有至少 15% 石灰石。現行的 ASTM C595 則不允許抵抗中度 (MS) 或高度 (HS) 硫酸鹽侵蝕的 IT 型水泥或 IL 型水泥含有超過 5% 的石灰石。

需注意抗硫酸鹽侵蝕水泥不會增加混凝土抵抗其它強烈化學侵蝕溶液的能力, 例如硫酸。施工圖說中宜載明此類情況。

即使海水通常含有超過 1500 ppm 的 SO_4^{2-} , 表 19.3.1.1 仍將海水列為 S1 級暴露 (中度暴露)。高 C_3A 含量的卜特蘭水泥可結合海水中的氯離子, 因此規範規定若最大 w/cm 為 0.40 時, 允許使用 C_3A 不超過 10% 的其他型式卜特蘭水泥 (見表 19.3.2.1 附註)。

除適當選用膠結材料外, 暴露於水溶性硫酸鹽下混凝土耐久性之其他要求是必要的, 如低 w/cm 、強度、適當搗實、均勻性、適當的鋼筋保護層、及充分的濕養護, 以發揮混凝土的潛在性質。

W1 級暴露: 適用於混凝土直接接觸水且要求具低透水性。而達到低透水性混凝土的主要方法為採用低 w/cm 。對已知 w/cm 而言, 混凝土拌成物中的膠結材料最佳化可降低透水性。

C2 級暴露: 適用於暴露 C2 級之非預力與預力混凝土, 其最高 w/cm 、最低規定抗壓強度、及最小保護層厚度均為考量的基本要求。應加以評估暴露於氯鹽下的結構物條件, 例如立體停車場, 可由車輛帶入氯鹽, 或靠近海邊的之結構物。採用塗布鋼筋、抗蝕鋼筋或保護層大於第 20.6 節的最小要求, 均可提供此條件下額外的防護。使用符合 ASTM C989 的高爐水泥、符合 ASTM C618 的飛灰, 及增加規定抗壓強度都可增加保護性。使用符合 ASTM C1240 之矽灰, 搭配符合 ASTM C494 中 F 型與 G 型或 ASTM C1017 之高性能減水劑亦可提

供額外的保護 (Ozyildirim 及 Halstead 1988)。利用 ASTM C1202 檢驗計畫使用之混凝土拌成物，可提供額外的混凝土性能資訊。

C 類暴露氯離子的限制：氯離子含量的限制適用於等級 C0、C1 及 C2 的暴露環境。對於非預力混凝土而言，於齡期 28 至 42 天間，依 ASTM C1218 所量測之混凝土內水溶性氯離子含量，與暴露於預期之外界濕度與氯離子的來源相關。對於預力混凝土而言，不論暴露環境，水溶性氯離子的限值為水泥重量的 0.06%。

ACI 提供氯離子對鋼筋腐蝕影響的附加資訊，ACI 201.2R 可做為混凝土耐久性指南。ACI 222R 提供混凝土內金屬腐蝕影響因子指南。藉由個別檢測混凝土組成材料的氯離子含量，可初步評估混凝土拌成物的總氯離子含量。假如以混凝土配比計算之總氯離子含量超出表 19.3.2.1 的限值，需要測試硬固混凝土樣品的水溶性氯離子含量。依 ASTM C1218 方法檢測水溶性氯離子含量時，有些存在於混凝土組成材料的氯離子，可能不溶於水或在水化過程中與水泥反應變成不溶於水的氯離子。

混凝土中水溶性氯離子含量的檢測，宜於齡期 28 至 42 天間進行。表 19.3.2.1 的限值適用於來自混凝土組成材料的氯離子，而非來自外在環境。對於乾燥環境下的非預力混凝土 (C0 級暴露) 而言，來自混凝土製作材料的水溶性氯離子限值為 1.00%。

規範

解說

表 19.3.2.1 不同暴露分級之混凝土要求

暴露分級	最大 w/cm ^[1]	最小 f'_c psi	附加要求			膠結材之限制
			含氣量			
F0	N/A	2500	N/A			N/A
F1	0.55	3500	表 19.3.3.1			N/A
F2	0.45	4500	表 19.3.3.1			N/A
F3	0.40 ^[2]	5000 ^[2]	表 19.3.3.1			26.4.2.2(b)
			膠結材料 ^[3] —種類			氯化鈣摻料
			ASTM C150	ASTM C595	ASTM C1157	
S0	N/A	2500	無限制	無限制	無限制	無限制
S1	0.50	4000	II ^[4,5]	含 (MS) 標記的 IP、IS 或 IT 分類	MS	無限制
S2	0.45	4500	V ^[5]	含 (HS) 標記的 IP、IS 或 IT 分類	HS	不允許
S3	0.45	4500	V 加上卜作嵐或高爐水泥 ^[6]	含 (HS) 標記的 IP、IS 或 IT 分類加上卜作嵐或高爐水泥 ^[6]	HS 加上卜作嵐或高爐水泥 ^[6]	不允許
W0	N/A	2500	無			
W1	0.50	4000	無			
			混凝土最大水溶性氯離子 (Cl ⁻) 含量, 水泥重量百分比 ^[7]			額外規定
			非預力混凝土	預力混凝土		
C0	N/A	2500	1.00	0.06		無
C1	N/A	2500	0.30	0.06		
C2	0.40	5000	0.15	0.06		混凝土保護層 ^[8]

[1] 表 19.3.2.1 中的 w/cm 最大限值不適用於輕質混凝土
 [2] 就無筋混凝土而言, w/cm 最大限值为 0.45, f'_c 最低限值为 4500 psi
 [3] 表 19.3.2.1 所列膠結材料之替代組合, 經抗硫酸鹽測試且能符合 26.4.2.2(c) 節中的準則者, 允許使用。
 [4] 暴露於海水環境下, 若 w/cm 不超過 0.40 時, 允許使用鋁酸三鈣 (C₃A) 為 10% 以下的其他類型卜特蘭水泥。
 [5] 允許於暴露分級 S1 或 S2 中使用其他種類的水泥如 I 型或 III 型, 若 C₃A 含量低於 8% 則用於 S1 暴露分級或含量低於 5% 則用於 S2 暴露分級。
 [6] 當使用於含 V 型水泥的混凝土時, 指定來源之卜作嵐或高爐水泥用量, 須至少為改善抗硫酸鹽能力使用記錄之用量。或者, 指定來源之卜作嵐或高爐水泥用量須至少為依照 ASTM C1012 試驗及合乎 26.4.2.2(c) 節中的準則所定之用量。
 [7] 源自於拌合水、粒料、膠結材、與摻料等組成材料之水溶性氯離子含量, 須依 ASTM C1218 在齡期 28 天至 42 天間檢驗。
 [8] 混凝土保護層須符合 20.6 規定。