

第6章 管材節能減碳分析

6.1 混凝土配比節能減碳之分析

內政部建築研究所為使民眾瞭解綠建築涵義，並鼓勵相關人員與廠商投入興建綠建築；同時，為了判斷建築物是否符合環保永續之綠建築概念，以及配合政府政策推廣，提出綠建築九大指標。水泥強度效益（Cement Strength Efficiency, CSE）是指每一立方公尺的混凝土中，每公斤水泥所能發揮出來的抗壓強度，由於此項目可間接判斷綠建築九大指標中「二氧化碳減量」成效，故亦可作為一項綠建築「綠指標」。以齡期 28 天為例，本計畫設計混凝土配方之水泥強度效益（齡期 28 天）相較於傳統混凝土之水泥強度效益預估高出 3 倍。換言之，相同強度設計下，混凝土生產所排放之 CO₂ 僅為傳統混凝土約 1/3 左右，符合綠建築指標。

經濟性是不管業主或施工者都渴望追求的目標，也是工程成功的指標之一。對業主而言，以最低的價格買到最佳的品質是必要的；而對施工者而言，係以最低的施工單價，追求獲得最高之利潤。為了提昇每立方公尺混凝土經濟性，最常見的方法有二：（一）增加粒料含量與緻密性，如此可降低每立方公尺混凝土之水泥漿量，由於粒料之單價低且穩定性較水泥為高，故不但降低工程成本，亦可提昇混凝土耐久性。（二）減少水泥量，最常見之方式即是使用卜作嵐材料，由於飛灰、爐石粉屬工業廢棄物再利用之產品，目前市價每公斤僅約 0.8 元及 1.7 元，為水泥價格 3.4 元/公斤之 24% 及 50%，因此若以此取代部分水泥量或填塞砂間隙而降低水泥用量，當然可節省混凝土的製造成本，進而提高獲利的空間，故目前普遍被預拌混凝土廠商所採用。然而，若一味的只顧縮減水泥用量，則將會危急結構體的安全性，不可不慎。

本計畫混凝土配比設計利用上述概念，採用低水量、低水泥量之策略。限定低用水量（160 kg/m³），則在水膠比不變下，不僅可降低水泥用量，且每立方公尺混凝土之粒料用量將間接提高。另外，本計畫以卜作嵐材料取代部分水泥量，其設計強度 350 kgf/cm² 之每立方公尺混凝土依材料費用估計可減少 473 元，材料成本費用約節省 18.4%。

西元 2000 年後，國際環境保護組織透過京都協定及蒙特婁公約限制各國 CO₂ 排放量，以減少大氣溫度上昇，而避免發生全球性的災害。由於混凝土中水泥的生產是必須將石灰與粘土混合料，經過高溫窯燒至 1,500°C 左右後形成熟料，再經冷卻研磨製成，因此估計每生產一公噸水泥過程將排放 0.85 公噸的 CO₂，若以台灣 2005 年水泥總消耗量 1500 萬公噸估算，相當於 1275 萬公噸的 CO₂ 釋放在大氣中，水泥為能量耗用高的材料，如何減少水泥的使用，在環境保護上頗具意義。要降低水泥排放 CO₂ 之直接方法即以卜作嵐材料（如

飛灰、爐石粉、矽灰等) 取代部分水泥量，適度的使用卜作嵐材料，不但具備減廢，同時亦有減輕空氣汙染之效益，一立方混凝土中設計強度 350kgf/cm² 之卜作嵐材料各使用 230 kg (其中爐石粉與飛灰各佔 50%)；除此之外，卜作嵐材料能與水泥水化產生之氫氧化鈣 (CH) 產生卜作嵐反應，增加混凝土之緻密性，使混凝土結構不容易發生病變及劣化現象，進而延長構造物的「生命週期」。

表 6.1-1 為國內工程實績之二氧化碳排放量效益比較表。表中顯示，南港車站地下化工程之 SCC 案混凝土配比設計強度為 350 kgf/cm²，其卜作嵐材料取代水泥各佔 50% 及 48.9%，因此所使用之混凝土可稱之為「綠色混凝土」。卜作嵐材料取代水泥量愈多，則間接減少 CO₂ 排放量亦愈多，該案與國內其他應用實績 (如：高雄東帝士 85 大樓、屏東海洋生物博物館、台北 101 大樓及南投國宅污水處理廠) 相比，CO₂ 減量達 0.17~0.19 tons/m³，高於其他應用實績 0.10~0.14 tons/m³ 甚多。故在未來混凝土管材應用改良型配比若能通過強度及耐久性之檢測，可作為公共工程「綠建築」之典範，且適當的應用卜作嵐材料對環境生態的保護具有相當高之效益。

表 6.1-1 國內工程二氧化碳排放量之效益比較表

工程名稱	W/C	W/B	卜作嵐取代率(%)	水泥用量(kg/m ³)	卜作嵐材料用量(kg/m ³)	CO ₂ 減量(ton/m ³)	總 CO ₂ 減量(ton) [總混凝土量]	CO ₂ 減量相當樹木量(棵)
南港車站地下化工程之 SCC	0.83	0.41	50.0	200	200	0.1700	6,304 [37,080 m ³]	170,378 [37,080 m ³]
	0.72	0.37	48.8	230	220	0.1870	3,653 [19,536 m ³]	98,730 [19,536 m ³]
	0.72	0.37	48.8	230	220	0.1870	44,162 [236,158 m ³]	1,193,568 [236,158 m ³]
	0.72	0.37	48.8	230	220	0.1870	2,350 [12,566 m ³]	63,514 [12,566 m ³]
高雄 85 層大樓之 HPC	0.45	0.34	24.6	355	116	0.0986	1,035 [10,500 m ³]	27,973 [10,500 m ³]
海洋生物博物館之 HPC	0.53	0.34	28.9	290	118	0.1003	8,485 [84,600 m ³]	229,324 [84,600 m ³]
台北 101 大樓之 HPC	0.42	0.28	29.1	380	172	0.1326	27,846 [210,000 m ³]	752,595 [210,000 m ³]
南投國宅污水處理廠之 HPC	0.76	0.40	44.3	206	164	0.1394	154 [1,106 m ³]	4,162 [1,106 m ³]
Type I 改良(台科大)	0.69	0.36	50	230	230	0.1955	61,405 [314,092 m ³] ^{註2}	1659598 [314,092 m ³]

註：1 棵直徑 50 公分、高 15 公尺的柳安樹，1 年約可吸收二氧化碳約 37 公斤。[資料取自台灣大學森林學系王松永教授-木質材料對二氧化碳固存的環境效應。

2. 以未完成之管線粗估混凝土體積量。

6.2 管材厚度及人孔(含另件)節能減碳之效應

混凝土管材使用於下水道工程為大宗材料，在使用上除了安全的考量外，在施工過程應能考量施工時產生結構上變異造成混凝土管體之破裂，本計畫以有限元素法分析其結構應力，係利用提高混凝土強度來提昇其施工之安全性，

並應考量在耐久性之環境抵抗力，就針對混凝土管材及人孔等相關設施，除了兼顧安全性及耐久性符合規範之要求，減少混凝土厚度可達到節能減碳的目的，並可增加業者之經濟及減少資源之浪費。

本計畫以 SAP2000 初步分析混凝土管材人孔設施，可減少 1~3cm 及 6cm(人孔厚度)的程度，目前雖未將結構分析以試驗加以驗證，就混凝土管材及人孔設施單元，分析其體積減少量可達 7-27%及 25%如表 5.2-1 所示，若經試驗驗證其安全性能及耐久性能均可符合要求，將使節能減碳之效益達 0.183~0.233 及 0.215 (人孔) CO₂ 減量 (tons/m³)如表 6.2-1，此部份係根據混凝土配比之分析所得之資料，需再經試驗驗證。

表 6.2-1 混凝土管材厚度減少效益分析

種類	尺寸(cm)			減少體積 (m ³)/m	厚度減少效益(%)			CO ₂ 減量※ (ton/m ³)	
	長度	內徑	外徑		1(cm)	2(cm)	3(cm)		
管 材	φ400	100	40	52	0.024	9.33	18.48	27.45	0.233
	φ500	100	50	65	0.030	7.48	14.84	22.09	0.188
	φ600	100	60	75	0.035	7.36	14.62	21.78	0.185
	φ700	100	70	85	0.039	7.27	14.45	21.55	0.183
人孔直管	30	120	150	0.191	25.32			0.215	

※管材之 CO₂ 減量以厚度減少 3 cm

已提送 CNS 國家標準申請之新訂「污水下水道用硬質聚氯乙烯塑膠製匯流井」及「污水下水道用硬質聚氯乙烯塑膠製直管式連接井」標準內容，其厚度計算及制定標準依據如 5.2.1 及 5.2.2 節所述，在強度符合需求及規定條件下，厚度相較於現行管厚較薄，亦達節能減碳之目的。

國內現行尚無人孔標準規範，目前人孔型式、配筋及尺寸隨業主、設計單位以及製造廠商而異，造成過度設計資源浪費，本計畫已提送 CNS 國家標準申請之新訂「下水道用鋼筋混凝土預鑄人孔」標準內容，在強度符合需求及規定條件下，制定最薄人孔厚度為 11 cm，各尺寸人孔組件厚度與現行人孔組件厚度比較如表 6.2-2，新訂定人孔標準各組件厚度皆薄於現行人孔組件厚度，因此人孔製造使用之水泥量可減少，達節能減碳效益，此部分僅就目前標準制定之厚度減小，若經應力分析，可進一步探討人孔組件厚度是否仍有減薄空間。

表 6.2-2 人孔厚度比較表

人孔規格	新訂組件厚度 (cm)	現行組件厚度 (cm)
P90	11	15~20
P120	12.5	15~25
P150	15	18~20
P180	17.5	22
P200	21	25
P220	21.5	—

2. 妥善的材料選用

從土石方、選料、材料運輸或營建廢棄物為資源的角度來看，若能在工址現地減量，並在工區內妥善處理、再利用，不但能減少運輸所消耗的能源，減少二氧化碳排放，對環境保育與公共安全亦以正面助益。從公部門監督之下的推動策略可包括：

- (1). 加強查核土方計畫：鼓勵設計單位優先採用「土方平衡」之設計。
- (2). 鼓勵推動剩餘土石方多元再利用：結合中央、地方政府及業界力量，制定區域性可行之方案。
- (3). 選用適當的施工材料：配合材料科學的發展與工程的特質可以選用適當的施工材料。常見的施工材料如：自填充式混凝土、高效能鋼筋、控制性低強度回填材料、再生混凝土與再生粒料等。

3. 優良的營建效率

在施工階段，施工作法的改善或使用設備效能的提升，對於節能減碳皆有很高的助益，施工作法的改善可包含新施工法的研發與營建自動化。

4. 精準的進度控制

公共工程（道路、管線的帶狀施工）形成交通問題，表面上是時間與安全的問題，但回算到油耗與車輛的損耗，亦是排碳與節能的總量元兇之一，因此施工期間的進度掌控應依照先期規劃的網圖施工，必要時可修正進度與工程項目，可避免不必要的排碳與耗能。

5. 務實的品質管理

施工品質良好的工程，能大幅減少維護管理所需投入之資源，延長設施壽命，減少不必要浪費，公共工程委員會長年推動「公共工程施工品質管理作業要點」，使中央及地方政府均能落實三級品管，並加強施工查核，透過公部門之查核，促使施工單位提升工程品質。

第一級品管的施工單位需達成契約所規定之工程品質目標，如特性、規格、成本、有效性、壽命週期等。第二級品管為主辦機關與監造單位進行品質確認，確保工程的施工結果能符合設計及規範。監造單位依據三級品質管理的權責進行材料的檢驗、施工的查驗與文件的外稽等三項重點管理措施。

6. 完整的施工記錄

施工單位在三級品管中被賦予實質記載施工歷程的任務，從放樣測量、材料進場、材料試驗、分段施工、合格試驗、完工位置標示（竣工圖）都有既定的規格與表單，可提供類似工程設計施作的參考或提供同一地點工程的選線與場址規劃參考，並且提供延壽計畫的考量。

施工階段節能減碳材料有

1. 自填充混凝土（SCC）

使用 45% 的水淬高爐石粉及飛灰取代水泥用量，大幅達到節能減碳的目的。

2. 高效能鋼筋材料

臺北市體育館（田徑場）2009 聽障奧運主場館於柱箍筋、樑箍筋及鈹金採用 SD50 盤圓筋及點焊鋼絲網，柱樑構件主筋採用 SD490 竹節

鋼筋取代一般 SD280 鋼筋，減少鋼材用量 30%~40%，取代一般 SD420 鋼筋，減少鋼材用量 10%~15%。

3. 控制性低強度回填材料 (CLSM)

為一種具可自行充填，用以替代傳統級配材料之新型回填用材料。

4. 再生混凝土與再生粒料

利用水庫淤泥及污水處理廠污泥，製成輕質骨材及營建廢棄物製成再生粒料，製作成混凝土除可消耗廢棄物轉化為資源，增加工程之節能減碳之效益。

5. 垃圾焚化底渣

應用於道路基底層之級配料與控制性低強度回填料。

6. 再生瀝青混凝土

為落實公共工程生命週期管理概念，在設計階段就應兼顧維護需求，並且研擬延壽執行方案，於污水下水道工程，延壽概念與本案 3.7 節長壽命管材相呼應，採用長壽命管材提升生活及公共工程品質，於經濟面、社會面及環境面皆有助益，最後達到公共資源永續利用之願景。

6.4 薄管與厚管段差處理

薄管與厚管段差處理議題與撓性管較為相關，目前用戶接管管材多採用塑膠製品，管材產品品質主要依據之國家標準包括：

- (1).PVC:採符合 CNS 1298 聚氯乙烯塑膠硬質管 B 級品以上厚度(200 m/m 管厚 10.5 m/m)。
- (2).ABS:採符合 CNS 13474 化學工業及一般用 ABS 塑膠管及接頭配件 6.3 kg 級品以上厚度 (200 m/m 管厚 8.1 m/m)。
- (3).HDPE:採符合 CNS 2458 化學工業及一般用高密度聚乙烯塑膠管表 6 之規定厚度 (200 m/m 管厚 8.0 m/m)。

本會新訂 PVC 接頭配件標準係參考日本 JIS 標準制定，但連接井底座用 1,000 kPa 算出最小管厚為 8.8mm，小於 PVC 200 m/m 管厚 10.5 m/m，惟壁厚變薄在符合強度條件下更可達到節能減碳之效，且底座本體內側均具有符合水理特性之水流導槽構造使污水容易流動，並已要求底座銜接匯流管及用戶接管之接頭型式可採用承口或插口，底座與匯流管或用戶接管銜接後，其各水平接頭內部接合處底部應平順、無落差，若底座插口接頭與匯流管或用戶接管厚度不同時，須加裝轉接頭使該接頭內部接合處底部平順、無落差，匯流管承口長度須配合底座插口長度一致，以避免現場施工出現連接管承口加內環或底座插口裁短等狀況。

6.5 埋管成本加總分析 (以 PRCP 與 RCP 為例)

將各類剛性管之 100 年施工造價之管材及重置費用分析如表 6.5-1，施工造價費以每次 25000 元/m 計算，管材價格來源為坊間廠商，具 50 年耐用年限之長壽命管材為抗菌混凝土管(全管)、抗菌混凝土管(30mm 內襯)、聚酯樹脂混凝土管，長壽命管材之單價較高，現行之內襯 PVC-304 或二型水泥鋼筋混

凝土管單價較低，但管材耐用年限僅有長壽命管材之一半，考量重置費用後，抗菌混凝土管(全管)、抗菌混凝土管(30mm 內襯)、聚酯樹脂混凝土管這三種長壽命管材具有最低之年單價，全鋁質鋼筋混凝土管年單價亦偏低，故以工程成本角度考量，應採用長壽命管材，符合經濟效益及環保概念。

表 6.5-1 剛性管材 100 年工程成本分析表

§ 500mm, 1m 長	平均單價 (元)	使用年限 (年)	100 年施工造價	年單價 (元)
抗菌混凝土管(全管)	5330	50	$(5330+25000) \times 2 = 60,600$	606
抗菌混凝土管(30mm 內襯)	4310	50	$(4310+25000) \times 2 = 58,620$	586
聚酯樹脂混凝土管	7500	50	$(7500+25000) \times 2 = 65,000$	650
內襯 PVC-304	4300	25	$(4300+25000) \times 4 = 117,200$	1172
全鋁質-304	4700	30	$(4700+25000) \times 3.33 = 98,901$	989
二型-304	3375	25	$(3375+25000) \times 4 = 113,500$	1135

6.6 節能減碳分析結論

下水道工程全生命週期應考量節能減碳，建立節能減碳評估與決策體系，有效利用資源，發展以性能為導向之公共工程，鼓勵創新科技，推動公共設施延壽計畫，提高效能與壽命等方向發展。本案針對混凝土管材材料改良，引入新配比技術可增加減碳效益及管材應力分析以減少管壁厚度增加減碳效益，大量採用農工業之副產品資源化再生利用，並政府及民間機構辦理配合教育訓練以改進施工之準確性，推動品質管理制度之建立以減少不必要之浪費；使在材料設計、施工技術及施工管理各方面能落實節能減碳推展。以下就混凝土管材節能減碳分析具體實施方向說明如下：

1. 管材材料改良：研發是營建產業實現工業化與節能減碳必經的路徑，唯有技術革新與研發才能讓產業與工業化順利銜接，並進一步發展更為省料、減碳、耐久的工程技術，研究中針對混凝土材質引入新配比技術採用 I 型水泥並使用大量工業廢棄物飛灰爐石粉等，除工業廢棄物資源化外，亦可減少採用水泥用量，增加減碳效益 CO₂ 減量達 0.17 ~ 0.19 tons/m³ 外，亦可增加管材之壽命，延長工程使用壽命及資源之充分應用。
2. 管材應力分析以減少管壁厚度：應用電腦程式分析顯示目前採用之管材厚度及人孔配筋、壁厚有必要配合混凝土配比技術以減少其厚度，不僅可減少材料之浪費，亦可增加工作之便利性並在節能減碳上增加效益達 0.183~0.233 及 0.215 (人孔) CO₂ 減量 (tons/m³)。
3. 大量採用農工業之副產品資源化再生利用：混凝土材料常存在之耐久性問題，導致應用上出現使用壽命縮短，造成工程成本之增加，間接影響節能減碳之效益，所以在目前混凝土技術日益精進同時，應用卜作嵐材料及工業副產品(廢棄物)，成為改良混凝土品質又可兼顧增加其耐久性的新趨勢。所以混凝土管材採用針對管材工程所處之環境設計不同性質之混凝土需求以符合環境保護及物盡其用之原則。
4. 政府及民間機構辦理配合教育訓練：為提升規劃設計從業人員之品質

管理職能，推動品質管理制度之建立，以改進施工之準確性，減少不必要之浪費，研擬相關規劃設計品質管理訓練課程等機制，協調各部會及民間機構共同推動相關教育訓練事宜，並建置與推動規劃設計品質管理評鑑制度，使工程順利推展減少不必要之浪費提升節能減碳之效益。預定將於明年推動技術轉移研討會，以推動抗菌混凝土管材及 I 型水泥改良配比混凝土管材應用，輔導廠商接受新配比技術及品質觀念技術。