

核四廠循環水出水隧道海中 到達井水中不分離混凝土介紹

The introduction of anti-washout concrete in the arrival shaft for the discharge tunnel of the 4th nuclear power plant

林治政 (Lin, C. C.) / 台灣電力公司龍門施工處課長 (Taiwan Power Company)

水中不分離性混凝土在日本擁有 30 年以上實績，被認為信賴度相當高之材料，普遍使用於海事工程中。然而國內工程並無前例可循，核四出水道海上工程因面向太平洋，正位於颱風及強浪衝擊處，結構強度要求極為重要，因此海上到達井內填充混凝土決定使用「水中不分離性混凝土」澆置，以確保工程品質，當時即參考日本經驗進行配比設計，並進行海中實際澆置試驗，確認均能達到品質要求（不分離性、流動性、強度等）。最後由拌合廠進行量產，在細密規劃下，順利完成澆置，並經由混凝土強度評估驗證，能獲得優良品質。藉由本工程水中不分離性混凝土的使用實績，希望在未來台灣的海洋、水下工程中也能廣泛地利用，以提升國內海上工程的技術水準。

Abstract

The anti-washout concrete has been used for more than 30 years in Japan, and it is considered as a very high reliable material that is commonly used in marine engineering. However,

there is no experience of the past on the use of anti-washout concrete in Taiwan. The discharge tunnel of the Fourth Nuclear Power Plant faces the Pacific Ocean, and is subjected to the impact of typhoons and strong waves. The requirements of structural strength are very important. So we decided to backfill with anti-washout concrete in the arrival shaft to ensure engineering quality. Using the experience of Japanese, we developed the concrete mixture design and performed a site test in the sea to evaluate the quality requirements (anti-washout, flowability, strength, etc.). Finally, under careful planning, the mass production of the anti-washout concrete was produced by the batching plant and the underwater placement was successfully completed. We got good quality concrete by verifying the concrete strength evaluation. With the experience of using anti-washout concrete, we hope it can be widely used to enhance the level of domestic marine and underwater engineering technology in the future in Taiwan.

概述

核四循環水出水道海上工程因面向太平洋，正位於颱風及強浪衝擊處，結構強度要求極為重要，因此海上到達井內填充混凝土須使用「水中不分離性混凝土」澆置，以確保工程品質，當時即參考日本經驗進行配比設計，並進行海中實際澆置試驗，確認均能達到品質要求（不分離性、流動性、強度等）。最後由拌合廠進行量產，在細密規劃下，順利完成澆置，並經由混凝土強度評估驗證，能獲得優良品質。

配比設計概要

- 目的：龍門（核四）計畫循環冷卻水出水道工程海上到達井預定採用水中不分離性混凝土回填，為決定其配比，故需進行配比設計。
- 試驗地點
信南建設（股）有限公司龍門預拌混凝土廠
- 拌合試驗時混凝土之配比條件
 - 設計基準強度（水中）
 $f'_c = 210 \text{ kgf/cm}^2$ （91 日強度）
 - 配比強度
 $f'_{cr} = 240 \text{ kgf/cm}^2$ （91 日強度）
 - 試體坍流度 $55 \pm 5 \text{ cm}$
 - 粗骨材之最大尺寸 25 mm 粒徑
 - 試體之空氣量 8.5% 以下
 - 溫度 32°C 以下（澆置作業時）
- 使用材料（請參閱表 1）

表 1 使用材料

材料	符號	摘要	備註
水泥	C	亞洲水泥 改良波特蘭水泥（耐礫性） 比重：3.22 比表面積：3,438cm ² /g	
飛灰	F	台中火力發電廠 比重：2.26	
細骨材	S	宜蘭宜來砂石場 河砂 + 碎砂 比重：2.64 F.M.：2.96	
粗骨材	G	宜蘭宜來砂石場 碎石 比重：2.65	
水中不分離劑	UWB	（三井化學資產株式會社）	
流動化劑	UWB-M	UC-150（台普化工股份有限公司）	

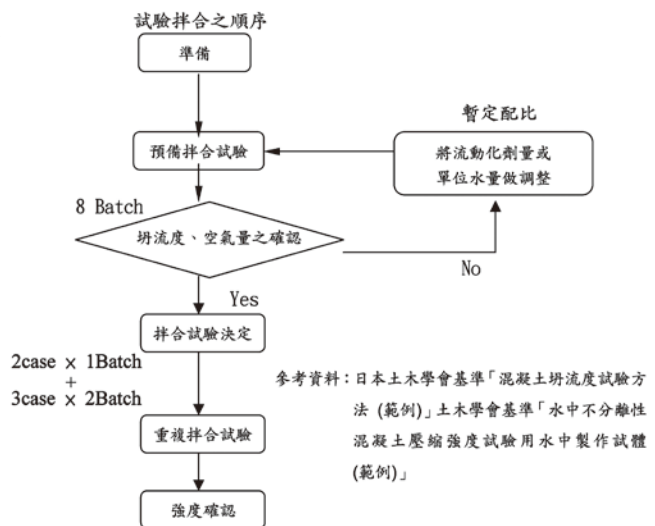
5. 試驗方法

- 攪拌機種類 強制二軸攪拌式
（光洋機械 KBHS60EG 型）
- 攪拌機容量 60L
- 拌合混和量 35L ~ 40L
- 材料投入順序
水泥 + 細骨材 + 粗骨材 + 水中不分離劑 → 乾拌 3 分鐘
→ 水 + 流動化劑 → 正式攪拌
3 分鐘以上

試驗項目

坍流度（SLUMP FLOW）試驗
空氣量試驗
混凝土溫度
水中製作試體的壓縮強度試驗

(5) 試驗拌合之順序



試拌（配比試驗）

首先使用台電水中混凝土配比 No. 62 試拌（配比試驗），看其性質是否符合規格。但是，依經驗判斷，配比 No. 62 的 45% 的水灰比並不能達到所需之坍流度，所以使用變更後的水灰比 50%、55% 作試驗。兩種試驗配比分別編為 No. 1 及 No. 2。其配比如表 2 所示。

表 2 台電水中混凝土 NO. 62 在用於水中不分離混凝土的配比計算表

類別	單位	水灰比 W/(C+F)	砂石比 S/(S+G)	水泥 C	飛灰 F	水 W	附加劑 WRR	砂 S	粗骨材 G	含氣量 A	不分離劑 UWB	流動化劑 UWB-M	單位重量 Y
		%	%	kg	kg	kg	kg	kg	kg	%	kg	L	kg/m ³
Base concrete 台電 NO. 62 (W25-18F15D)		45	45	389	69	204	2.29	744	914	(1.5)	0	0	2,322
	容積 (L/m ³)			122	30	204	2	282	345	15	0	0	計 1,000L

試驗配比 NO.1	容積 (L)	122	30	7.5+204	2	282	345	15	(2.56) ^{kg} 0	15	計 1,023L
	換算容積 (L/m ³)	119	29	7+200	2	276	337	15	0	15	計 1,000L
	50	45	381	66	7+200	2	729	893	(1.5)	2.56	15

試驗配比 NO.2	容積 (L)	122	30	30+204	2	282	345	15	(2.76) ^{kg} 0	15	計 1,045L
	換算容積 (L/m ³)	117	29	29+195	2	270	330	14	0	14	計 1,000L
	55	45	374	66	29+195	2	713	875	(1.5)	2.76	14

另外使用標準水中不分離性混凝土配比的試拌，確定好設定之黏稠度 (Consistency) 後，分別以水灰比 (w/c) 50%、45%、55% 作調整，再進行強度之確認。這三種水灰比的試驗配比分別稱為 No. 3、No. 4、No. 5，配比設計依據以下順序決定。

1. UWB 混合率

UWB 混合率請參閱表 3。

表 3 UWB 混合率之標準

施工條件	許可污染週遭水域之程度	
	a. 灌漿處附近水域的污染在某種程度是被許可時	b. 盡力避免污染之情形
a. 使用特密管及混凝土幫浦車，基本上為置入混凝土中的施工方法，但於位置更換時，前端軟管可能會掉入水中。不使用鋼筋的無筋混凝土。	1.0%	1.3%
b. 常會落入水中之情形 (30 ~ 50 cm 高程)。鋼筋混凝土。	1.15%	1.3%

即使將水中不分離性混凝土 (Hydrocrete) 落下於水中，卻鮮少有水泥流失或粒料分離發生，此為其特性。UWB 溶解後會變成黏稠狀，會促進水泥及骨材黏在一起，所以對流失的抵抗性是依 UWB

的混合率來調整。UWB 的混合率是隨拌合水量及流動化劑液體的合計量而變化。

$$\text{UWB 混合率 (\%)} = \frac{\text{單位 UWB 量 (kg/m}^3\text{)}}{\text{單位水量 (kg/m}^3\text{)} + \text{UWB-M 量 (L/m}^3\text{)}} \times 100$$

$$\text{單位 UWB 量} = (\text{拌合水} + \text{UWB-M}) \times 1.15\%$$

2. 黏稠度 (consistency)

如表 4，從施工條件到坍流度的範圍定為 55.0 ± 5 cm

表 4 黏稠度 (CONSISTENCY) 標準

施工條件	坍流度 (cm)	備註
急斜坡面石塊 (1:2 ~ 1:4/3) 的固結，薄的斜面結構體 (1:8 的坡度) 的施工等，Hydrocrete 的流動壓抑至極小以配合水泥幫浦車的灌漿極限	33 ~ 39	高黏稠性配比
一般的情形較不複雜的形狀及幫浦車之壓送距離為 50 m 以下	39 ~ 46	中黏稠性配比
充填空洞及幫浦車之壓送距離為 50 ~ 200 m 的情形	46 ~ 53	中黏稠性配比
狹窄的空洞充填及要求有良好的流動性情形	53 ~ 59	低黏稠性配比
又狹窄又深的空洞充填並要求有良好的流動性情形	59 以上	超低黏稠性配比

3. 拌合水量

使用流動化劑時，拌合水量與坍流度之關係，經實驗整理成表 5：

$$W' = W + M = 260 \text{ kg/m}^3$$

W：水量 (kg/m³)

M：UWB-M 量 (L/m³)

依據骨材條件，拌合水量之修正值依

據表 6：

$$w = 0 \text{ kg/m}^3$$

$$W = 248 - 0 = 248 \text{ kg/m}^3$$

表 5 拌合水量及 UWB-M 量的標準

碎石 25 mm 時 (W kg/m ³ + UWB-M L/m ³)			
UWB 混合率 坍流度 (cm)	1.0%	1.15%	1.3%
35	183 + 8	186 + 9	189 + 11
40	191 + 8	194 + 9	198 + 12
45	202 + 8	206 + 10	231 + 13
50	218 + 9	224 + 11	232 + 14
55	238 + 10	248 + 12	258 + 15
60	268 + 11	280 + 14	295 + 17

※ 若骨材條件不同時，以表 6 為標準修正單位水量

表 6 依據骨材條件之拌合水的修正值

粗骨材的種類	最大尺寸 (mm)	表 5 拌合水量的修正值 (kg/m ³)
碎石	25	不需修正
	40	12
河砂	25	- 10

4. 單位 UWB 量

UWB 量的計算是依據下式所計算出來的。

W：水量 (kg/m³)

M：UWB-M 量 (L/m³)

P：UWB 混合率，對 (水 + UWB-M) 的百分率 (%)

P_w：UWB 量 (kg/m³)

依據 $P_w = (W + M) \times P$

$$P_w = 260 \times \frac{1.15}{100} \doteq 2.99 \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

5. 單位 UWB-M 量

UWB-M 量的計算乃依據下式計算得來：

$$\begin{aligned} M &= 4 \times P_w \\ &= 4 \times 2.99 \doteq 12 \text{ (L/m}^3\text{)} \end{aligned}$$

6. 單位水量

依據 3 及 5

$$W = (W' - M) = 260 - 12 = 248 \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

7. 單位粗骨材量

粗骨材量是依據表 7 求得，但細骨材率 S/(S + G) 之值比 38% 為低，故依據以上之實例，細骨材率 S/(S + G) 設定為 38% 來求取粗骨材量。

表 7 粗骨材量的標準

粗骨材的種別	最大尺寸 (mm)	粗骨材量 (註)	
		體積 (L/m ³)	重量 (kg/m ³)
碎石	25	364	965
	40	410	1086
河砂	25	390	1033

(註) 實驗上所使用之粗骨材的實際容積率分別為 61、60、67%，比重皆為 2.65，細骨材粗粒率 2.89。

8. 單位細骨材量

粗骨材、水、水泥的各單位量決定後，最後修正為 1 m³ 的細骨材量便可求得。此時之空氣量依據至此的結果，可參考表 8 求得。

表 8 Hydecocrete 的空氣量

粗骨材最大尺寸 (mm)	空氣量 (%)
25	3.5 ± 1.0
40	3.0 ± 1.0

9. 試驗配比

試驗配比如表 9 所示。依據試驗結果，其拌合將會有所調整。

表 9 水中不分離性混凝土的試驗配比

項目	水灰比 W/(C + F)	細骨材率 S/(S + G)	水泥 C	飛灰 F	水 W ₀	減水劑 WRR	砂層 S	粗骨材 G	空氣量 A	不分離材 UWB	流動化劑 UWB-M
	%	%	kg	kg	kg	kg	kg	kg	%	kg	L
試驗配比 No. 3	50	38	442	78			533	875	3.5 (設定值)	2.99	12
試驗配比 No. 4	45		491	87	248	0	515	845			
試驗配比 No. 5	55		402	71			549	901			

配比試驗

1. 試驗項目

(1) 坍流度試驗

依據 JSCE-F 502-1990 (混凝土的坍流度試驗(範例)) 進行試驗。

(2) 空氣含量試驗

依 JIS A 1118 (依空氣含量試驗方法(容積法)) 進行試驗。

(3) 抗壓強度試驗

依 JSCE-F502-1990 (水中不分離性混凝土抗壓強度試驗用水中製作試體的製作方法(範例)) 來製作試體，並以 JIS A 1108 (混凝土的抗壓強度試驗方法) 進行試驗。

2. 試驗結果

(1) 新拌混凝土試驗結果

表 10 為新拌水中不分離性混凝土的性狀，依據試驗配比 No. 1、No. 2 的坍流度值，很清楚的知道以台電水中混凝土配比 No. 62 為基礎混凝土得不到所定的坍流度 55cm ± 5cm。加大水灰比後能夠增加流動性，但是水灰比超過 55% 的話，混凝土的耐久性會有問題。

另一方面，標準水中混凝土的試驗配比 No. 3、No. 4、No. 5 的坍流度皆符合要求。空氣含量方面，皆顯示 7 ~ 8% 的高含量。



澆置後之混凝土塊拉起



提出鑽心試體

表 10 水中不分離性混凝土 室內配合試驗 (40 L/Batch) 2001 年 8 月 3 日

試驗 配比	水灰比 W0/(C + F)	水 W ₀				粗骨材 G		細骨材 S	水泥 C	飛灰 F	減水劑 WRR	(添加劑)		結果			備註
		表面水率				G1	G2					不分離材 UWB	流動化劑 UWB-M	SF	AIR	Temp	
		W	WG1	WG2	WS												
No.	%	kg	%	%	% 絕乾 6.9 表乾 1.3	kg	kg	kg	kg	kg	g	g	Cc	cm × cm	%	C	
1	50	6.27	0.6	1.7	5.6	18	18.2	30.8	15.2	2.6	90	102	600	44 × 44	7.1	30	W = 17.60 kg (含容器)
2	55	7.04	0.6	1.7	5.6	17.6	17.8	30.1	15	2.6	88	110	560	46 × 49	8.4	30	W = 17.37 kg (含容器)
3	50	8.32	0.6	1.7	5.6	17.8	17.6	22.5	17.7	3.1	0	120	480	55 × 57	7.6	30	W = 17.02 kg (含容器)
4	45	8.37	0.6	1.7	5.6	17	17.2	21.8	19.6	3.5	0	120	480	54 × 56	7.6	30	W = 17.49 kg (含容器)
5	55	8.26	0.6	1.7	5.6	18.1	18.3	23.2	16.1	2.8	0	120	480	56 × 60	7.1	30	W = 17.47 kg (含容器)

(2) 壓縮強度試驗結果

表 11 為壓縮強度試驗結果，水灰比與壓縮強度的關係如圖 1 所示。

配比決定

依據水中製作試體的水灰比 (w/c) 及

表 11 壓縮強度試驗結果

No.	壓縮強度 (Kgf/cm ²)							
	1 週強度 (7 日)		2 週強度 (14 日)		4 週強度 (28 日)		13 週強度 (91 日)	
4 (W/C = 45%)	170.1	170	248.1	246	301.3	307.3	270.9	342
	165.1		236.2		194.4		351.1	
	175.6		253.9		313.2		334.8	
3 (W/C = 50%)	105.1	118	202.7	203	266.7	264.8	299.1	305
	118.4		203.1		263.8		301.6	
	130.4		203.3		263.9		314.5	
5 (W/C = 55%)	112.2	108	185.3	183	236.1	239.4	255.1	255
	101.9		185.1		234.9		265.8	
	110.7		188.1		247.2		245	

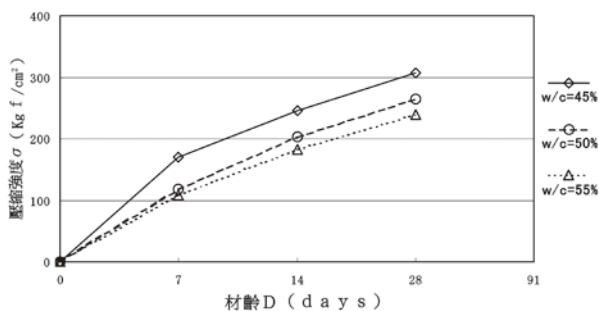


圖 1 材齡與強度

抗壓強度的關係，3 種配比其配比強度皆可達到標準。

配比強度 f'_{cr} 之設定：

$$f'_{cr} = \alpha \cdot f'_c$$

式中 f'_c ：設計基準強度 210 kgf/cm²

$$\alpha = 1 / \{1 - (1.64 \times V)\}$$

一管理狀態時變動係數設定為 $V =$

10%

$$\therefore f'_{cr} (\text{配比強度}) = 210 (\text{設計基準強度}) \times 1.20 (\text{比例增加係數}) = 240 (\text{kgf/cm}^2)$$

依據上述的拌合試驗結果及表 12 所示耐久性所決定的混凝土最大水灰比 (%)，決定水灰比 50% 的試驗配比 No. 3 為完成配比。

最終完成配比整理如表 13。

表 12 依耐久性決定的混凝土最大之水灰比 (%)

環境狀態	混凝土的種類	
	無鋼筋混凝土	鋼筋混凝土
淡水中	65	55
海水中	60	50

表 13 水中不分離混凝土的添加配比計算表

類別	單位	水灰比	砂石比	水泥	飛灰	水	附加劑	砂	粗骨材	含氣量	不分離劑	流動化劑	單位重量 γ
		W/(C+F) %	S/(S+G) %	C kg	F kg	W ₀ kg	WRR kg	S kg	G kg	A %	UWB kg	UWB-M L	
完成配比 (試驗配比 NO.3)		50	38	442	78	248	0	533	875	(3.7)	2.99	12	2,191
		42	38	442	78	248-30	0	533	875	(1.5)	0	0	計 938L 計 1,000L
	容積 (L)			138	35	248-30	0	202	330	15	0	0	
	換算容積 (L/m ³)			147	37	264-32	0	216	352	16	0	0	
(1) base concrete 添加藥劑前配比		42	38	470	84	264-32	0	570	933	16	0	0	2,289
	容積 (L/m ³)			0	0	30	0	0	0	0	(2.99) kg 0	12	計 42L
(2) 後添加物配比	換算容積 (L)			0	0	32	0	0	0	0	0	13	計 45L
完成配比 (1) + (2)		50	38	470	84	264	0	570	933	0	3.19	13	2,337
	換算容積 (L/m ³)			147	37	264	0	216	352	37	0	13	計 1,066L

水中不分離性混凝土製造

由龍門核四廠區混凝土拌合廠（信南建設）提供不分離性混凝土之製造、出料，在拌合廠添加由承商自備之不分離劑及流動化劑。

水中不分離性混凝土配比如下表所示：

水膠比	細骨材率 S/(S + G)	水泥 C	飛灰 F	水 W	減水劑 WRR	細骨材 S	粗骨材 G	不分離劑 UWB	流動化劑 UWB-M	空氣量
%	%	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	L	%
50	38	442	78	248	0	533	875	2.99	12	8.5 以下

註：水膠比 = (水 + 流動化劑) / (水泥 + 飛灰 + 不分離劑)



不分離劑 (UWB)

海上工程首次施用

1. 本次到達井回填混凝土採用「水中不分離性混凝土」，係一般混凝土中加入不分離劑與流動化劑，使其擁有自填充性 (self-compacting)、自流性 (self-leveling)、不泌水性 (no-bleeding)、高黏性等特性，澆置

混凝土時輸送管口勿須插入澆置面，提高施工性與品質可靠度，為國內首次使用於海上之施工，並順利完成。

2. 藉由本工程水中不分離性混凝土的使用實績，希望在未來台灣的海洋、水下工程中也能廣泛地利用，以提升國內海上工程的技術水準。

(本文圖表版權，為台電公司所有)



流動化劑

參考資料：

龍門（核四）計畫循環冷卻水出水道工程水中不分離性混凝土結果及定案稿 — 榮民公司編定。Ti