

北宜高速公路坪林隧道導坑工程

四稜砂岩破碎帶地盤處理模式

國道新建工程局第三區工程處

榮民工程股份有限公司

中興工程顧問股份有限公司

一、 概述

坪林隧道東口段位於歐亞大陸板塊與菲律賓海板塊摺皺衝斷構造區，地質複雜多變，3 公里內即確知有 5 條主斷層通過，另每隔約 30~50 公尺即有一條剪裂帶，且全程節理發達，地下水豐沛。致造成導坑 TBM 之 10 次受困及鑽炸段 13 次之大小坍塌。由此可見在此褶皺複雜多變之惡劣地層，在施工中實有再建立一套較為詳實的現場地質探查之必要。

另由三次水平長鑽孔所獲得之地質資料，再配合開挖面短階之探查後，陸續施作了七次的地質灌漿處理及多次的排水孔鑽設，成功地阻絕水脈、固結岩盤及舒解水壓，並順利地通過上述之地質弱帶，惟鑽灌作業耗時較長。為縮減鑽灌時間，有效提升工進，以前述經驗為基礎方式重新檢討鑽灌之必要性及鑽灌佈置，建立鑽灌模式，以為後續施工之準則。

二、 四稜砂岩地質概論

(一) 地質構造模式

四稜砂岩地層主由淺灰色至灰白色中至粗粒(局部呈礫狀)石英砂岩夾粉砂岩薄層及紋層，灰至灰黑色細粒砂岩夾硬頁岩薄至紋層，層狀砂岩與硬頁岩，以及碳質頁岩薄層所組成。地層中偶見基性或中性火成岩小脈貫入，其規模小且不具規律性分佈。除硬頁岩外，岩層層面構造顯著，位態較均整，大抵以低角度傾斜與隧道呈斜交分佈。

由於受到大區域地質構造力作用而發生褶皺與斷層構造，即地盤受大地壓應力發生上升變形，而後伴隨之斷裂破碎型態，初始造成異性岩層界面間平行位

移，沿層間滑動，致岩層撓曲形成剪裂泥縫，富集區則呈泥層狀規模。繼之因作用力持續增強，岩層斷裂錯移，終造成規模大小，頻率疏密不一之剪裂破碎帶。此類剪裂構造在隧道開挖面尺度規模上觀察時是呈現正斷層性較逆斷層佔頗高比例。(這種現象的解釋，可以引用台灣地體構造之板塊構造學說的研究中較具多數認同的意見，即在板塊衝撞沿著台灣島向西北進行之同時，菲律賓海板塊向北隱沒到琉球島弧之下，台灣北部隱沒方向改變，壓應力減弱，而近期內沖繩海槽之擴張，致生正斷層群聚台灣北部之結果。)除卻非應力作用之不連續構造，本區岩層節理基本上屬系統性，主要共計三組，皆為高傾角構造面，其位態予簡化為 J1：南北向(包括北北東至北北西)，J2：東北東至北東，及 J3：西北西至東西。由於此三組主要節理均有相等之剪裂構造相應，且節理面經常夾有剪裂砂粒薄膜，偶亦伴隨剪裂泥縫，因此節理多屬剪裂性構造。各組節理間距大致在 5~10 公分間，部份出現間距更窄至 3~5 公分。因此整體而言，四稜砂岩體節理發達，剪裂帶出現頻仍，若盤品質為差。

(二) 水文地質模式探討

就以往多次遭遇之岩層湧水現象所發生之機制與地質條件關聯性方面詳予分析，尋求可能最大機率模式。迄今為止，依據現況得知有關四稜砂岩地盤湧水現象之水文地質模式，基本上仍屬於封閉型之裂隙含水層，惟可概括為二類型。一為層間含水層，另一為剪裂構造前緣(上游區)破裂帶含水層。再就地質條件之觀點而論，四稜砂岩之堅脆地盤內，岩層除石英砂岩外，尚有硬頁岩與碳質頁岩夾層分佈。由於本區處於複雜與活躍之地質活動帶，地層深受褶皺與斷層作用影響，堅硬弱質岩層間發生層間剪裂弱帶構造，因硬頁岩層具低滲透性，其形成之層間泥層具良好之阻水性。若其上層為石英砂岩，且因具有三組優勢節理分佈，多少形成良好滲透通道，而為層間含水層，其水量端視含水層之封閉幅員與厚度大小，以及距離補給高區遠近而定。一般來說層間剪裂造成岩層破碎範圍有限，其含水量規模小且持續短暫。反觀非屬層間之剪裂帶含水層，因受大地應力強烈擠壓與伸張，岩層極端壓碎呈粉碎與剪磨泥狀(Cataclastic Rock Powder & Clay Gouge)，斷裂錯移規模程度不均等，其前緣破碎帶之含水層規模亦隨之變化，惟若比較層間含水層，前者釋水程度可觀且持續性長。

上述二類型之裂隙含水層以剪裂構造前緣破碎帶含水層出現機率優於層間含水層，因此地盤處理上雖原則上應涵蓋所有破碎含水層，但仍針對高機率者為處理對象。

三、 隧道前方地質調查

基於坪林隧道導坑四稜砂岩段富含高壓地下水，且斷層密布、剪裂頻繁，TBM開挖困難，目前雖已改採鑽炸法施工，但部份區段仍需先行施作地盤處理以避免開挖面之抽坍。為確實瞭解現場開挖面前方之地質狀況，施工中之地質探查仍屬必要，以期建立後續地盤處理之判斷依據。

(一) 調查方法

1. 隧道內震波探測(Tunnel Seismic Prediction, TSP)

主要係依據反射波的原理，配合隧道狀況所設計開發出來的一種調查方法。當震波在隧道內傳遞時，若遇上構造或岩性上的不連續面時，會產生反射波，再由預先設置的接收器接收，配合電子計算機的資料分析、處理，即可得到岩體強度的變化與分布，再配合現場地質資料即可得到主要地質構造的剖面。TSP 在實際操作上有其優點：如施測時間短，配合 TSP 施作時，開挖面只需停工 1~2 小時，不會影響隧道正常工進。此外，TSP 後續資料處理時間較快，約一天即可得到初步成果。若與傳統震測法或 HSP 比較，其資料解析度較高(約 1~2 公尺)，而一次施作可得到隧道前方 80~100 公尺的地質資料。但 TSP 也有其缺點與限制：如對水較不敏感，無法測定地下水層位置，且只可反應岩體平均強度變化，無法預測正確的地質狀況。此外若施測區域岩盤較差，則得到的訊號品質即較差。

2. 不取心探查

主要係利用衝擊式鑽機施作。由鑽機的衝擊壓力及扭力值的變化、鑽進時間，配合迴水及岩屑的觀察，以推估前方地質狀況。不取心探查的優點是施作時間較短、費用較低(與取心探查比較)，但過去在導坑 TBM 施作不取心探查時，所花費的時間卻遠超過預估所需時間。另外，若隧道前方隱藏有地下水層，由不取心探查可得到此一訊息。但不取心探查在施作期間開挖面通常需配合停工，且由於不取心探查無法得到完整岩心，在地質解釋方面，常存在有不確定因素。在地下水方面，有時不取心探查孔常會因坍孔而無法量得正確的水壓及水量。

3. 取心探查

主要係利用鑽機取出完整岩心供地質研判，可再區分為水平長距離鑽孔及短階鑽孔(30m 內)。取心探查可得到直接的地質資料，以提供較正確的地質研判，一般多同時施作三孔，以期得到地質構造在三度空間的關係。同時取心探查在施作期間開挖面亦通常需配合停工，且其施作所需時間比起不取心

探查要長得多，費用亦較高。水平長距離鑽探以反循環方式施作容易產生的缺點是取出的岩心多受到擾動，岩心多呈破碎狀，且岩塊在沖出的時間上有遲滯現象，坍孔料亦隨之沖出，易使弱帶的位置產生誤差及誤判。但對於穿越富含高壓地下水層的岩層而言，正可利用此地下水將岩心沖出，且鑽探完成後鑽孔亦能當成排水孔。

(二) 調查作業

鑑於四稜砂岩破碎高壓水帶長距離鑽探不易，在鑽炸法施工區段將以短階(30~50公尺)之取心鑽探與 TSP 相輔作調查，其施作程序如圖一；TSP 視需要時施作，每一階段作 80~100 公尺預判前方地質構造。在施工過程，TSP 地質判讀仍有疑義或可能存在破碎帶之區段，再以短階之取心探查驗證；另在開挖時每作約四輪進即施作 9m 之前進探查兩孔(分別位於 10 點至 2 點位置間，仰角約 15 度)，以較明確掌握前方之地質狀況。

四、 以往鑽灌作業檢討及後續鑽灌模式

坪林隧道導坑工程，TBM 施工經過第十次受困後，經改採鑽炸工法施工迄今，為加強岩體自立時間，以錐體方式在隧道周圍佈設灌漿孔，共完成七次灌漿作業，並已成功地通過三次高壓水層($6\text{kg}/\text{cm}^2 \sim 12\text{kg}/\text{cm}^2$ 不等)，其灌漿作業原則如後：

1. 鑽孔大致成圓錐體，分別有單圈、雙圈及三圈之佈設。
2. 佈孔沿隧道周遭佈設，孔底距隧道邊緣約等於隧道直徑，錐體長度為 20~30 公尺間。
3. 灌漿壓力最大為 $50\text{kg}/\text{cm}^2$ ，約為水壓之三倍。
4. 灌漿採分階灌漿(Stage Grouting)長度 10 至 15 公尺，但在鑽孔時若出水量超過一定程度(單孔 $2\ell/\text{sec}$)及有相當壓力時($3\text{kg}/\text{cm}^2$ 以上)即停止鑽進，開始灌漿。

根據過去七次鑽灌作業情形，彙總統計工作數量及工期如表一。從表一的統計可見，在一般情形下，不論孔數的變化，每單位長度錐體吃漿量約在 10.6 至 $14.2\text{ m}^3/\text{m}$ 之間，平均約為 $12.5\text{ m}^3/\text{m}$ ；而每單位孔長吃漿量則變化較大，在 0.42 至 $1.05\text{ m}^3/\text{m}$ 之間，由此可見減少孔數，但增加每一孔的吃漿量，亦可維持相仿的地盤改良的效果。

為提高工作效率並能達到適當之灌漿效果，縮短鑽灌時間，以爭工進，前述之鑽灌作業原則經檢討修正為“減少鑽孔，提高灌漿壓力”。經地質探查發現高

壓地下水或剪磨泥層，得視地下水壓及地質構造將後續處理模式分為四類(詳圖一)，其類別及處理方式分述如下：

1. 水壓 $P \leq 3\text{kg/cm}^2$ ：

視實際出水點及水量鑽設排水孔後，輔以支撐鋼管向前開挖。

2. $3\text{kg/cm}^2 < \text{水壓 } P$ ；非擠壓性岩盤(TYPE I)：

- (1) 灌漿孔佈設如圖二，原則上在開挖面之起拱線以下 30° 往上平均佈設六孔(A1~A6)及灌漿檢查孔(C1)一孔。
- (2) 施灌方法則先鑽設 A1~A6 及 C1 孔埋設 3 公尺長孔口套管後，即進行第一組序(1st Sequence A1、A3、A4、A6 孔)第一階段(1st Stage，原則上長度定為 12 公尺)之鑽孔，並量測單孔水壓和水量及記錄第一組序第一階段孔之總水量後進行第一階段灌漿。
- (3) 完成第一組序(1st Sequence)第一階段(1st Stage；至 12 公尺)灌漿後，隨即進行第一組序(1st Sequence)第二階段(2nd Stage；至 22 公尺)之灌漿作業，完成後隨即進入第一組序(1st Sequence)第三階段(3rd Stage；至 30 公尺)之灌漿作業，其程序均與第一組序第一階段相同。
- (4) 依前述之順序進行第二組序(2nd Sequence，A2、A5 孔)之鑽灌作業。
- (5) 灌漿作業方式則位於低高程者先灌(即先灌低處孔後逐次往高處孔灌)。
- (6) 完成所有組序之灌漿後，即進行灌漿檢查孔之鑽孔，孔深與灌孔最長者同深，並量測水壓及水量，若水量小於 0.4 l/min/m 或水壓 $\leq 3\text{kg/cm}^2$ 則將灌漿檢查孔予以灌漿後即可進行開挖。否則再視現場情況增補鑽灌後再開挖。

3. $3\text{kg/cm}^2 < \text{水壓 } P$ ；擠壓性岩盤(TYPE II)：

- (1) 灌漿孔佈設方式如圖二，原則上在開挖面之起拱線以上平均佈設 6 孔 A1~A6，起拱線以下佈孔 A7、A8 及灌漿檢查孔(C1)一孔。
- (2) 此模式之鑽灌組序為：(1) A1、A3、A4、A6。(2) A2、A5。(3) A7、A8。(4) C1 依序辦理。
- (3) 後續之埋管、灌漿及灌漿檢查孔之作業方式同 2。

4. 主(大)斷層且水壓 $P > 12\text{kg/cm}^2$ (TYPE III)：

- (1) 灌漿佈孔將採全圓方式佈設，外圓 8 孔(A1~A8)、內圓 6 孔(B1~B6)及灌漿檢查孔(C1)一孔。其施作組序為：(1) A1、A3、A5、A7。(2) A2、A4、A6、A8。(3) B1、B3、B4、B6。(4) B2、B5。(5) C1。
- (2) 灌漿管之埋設、施灌方法及灌漿檢查孔之鑽設亦採如同上述 2.之方式施

工。

5. 若地質構造出露不均勻，或施工人員認為必要時得參酌圖二、圖三調整佈孔(可增減)。

6. 排水孔之鑽設：

為降低開挖面前方或上方之高壓水層對隧道開挖造成之抽坍風險，在灌漿完成後方側壁適當位置，朝開挖面前方或上方施鑽排水孔，第一階段採灌漿處理，其數量將視實際出水情形決定。

7. 在鑽灌地質處理前，得先施作擋牆，以維開挖面之穩定。

8. 灌漿壓力：

- | | |
|---------------|-----------------------|
| (1) 第一組序，第一階段 | 30 kg/cm ² |
| 第二、三階段 | 50 kg/cm ² |
| (2) 其他組序，第一階段 | 35 kg/cm ² |
| 第二、三階段 | 60 kg/cm ² |
| (3) 灌漿檢查孔 | 60 kg/cm ² |
| (4) 排水孔，第一階段 | 35 kg/cm ² |

灌漿壓力原則上依上列壓力執行，必要時視實際情形調整。

9. 灌漿材料：

灌漿料之使用，將以 B/C 漿液(水泥加皂土)、LW 漿液或純水泥漿為主，化學灌漿則視水量大小或開挖面水泥漿、B/C 漿液無法止水時使用。各式灌漿材料之配比如表二、表三。

10. 施工機具：

- (1) ATLAS COP1238 及 KH-120 或高性能鑽機各乙部。
- (2) YAMATO THP-60W 雙液型灌漿機。
- (3) KG-150 單液型灌漿機。
- (4) SHF-240-200-1200 雙液型自動流量。

五、 結語

由過去七次之灌漿作業所得經驗，由於高強度之四稜砂岩磨耗力強，不管排水孔或灌漿孔之鑽設，施作過程中發生一些共通之困難如鑽頭磨損、鑽桿斷落孔內、卡桿、坍孔等，是造成鑽灌作業費時之主因，為能有效克服上述問題，將評估並改進更新機具鑽串，以期能縮短處理時程，加速工進。

表一 導坑及繞行隧道灌漿數量及工期統計

單程位置	(D.T.)					(P.T.)	
	3K+110	39K+095	39K+074	39K+019	39K+005	38K+998	38K+980
鑽孔總數	9	10	27	26	24	22	10
鑽孔總長度 (m)	234	310	1,026	460	472	442	170
錐體處理長度 (m)	26	31	24/30	15/20	15/23	15/23	15/20
L.W.體積 (m ³)	42.6	309.1	317.9	231.0	322.6 * ²	279.2	99.3
水泥/BC 漿體積 (m ³)	9.9	18.1	109.2	16.1	81.2 * ²	14.8	3.7
漿體總體積 (m ³)	52.5	327.2	427.1	247.1	230.8 * ² (283)	294.0	103.0
單位孔長吃漿量 (m ³ /m)	0.22	1.05	0.42	0.54	0.60	0.67	0.61
單位長度錐體吃漿量 (m ³ /m)	2.0 * ¹	10.6	14.2	12.4	12.3	12.8	5.2 * ³
工期 (天)	12	20	69	15	21	22	6
鑽孔型號	KH120	KH120	KH120	A.Copco 1238	A.Copco 1238	A.Copco 1238	A.Copco 1238
最大灌漿壓力 (kg/cm ²)	40	40	50	50	50	50	50
與前次錐重長度 (m)	0	10	10	0	6	0	5

附註：

1. 本次灌漿係為補充灌漿，故吃漿量明顯較低。
2. 灌漿時導坑航道湧水大減，估計約有 120m³ 漿體流入抽坍所形成的空洞。
3. 受損頁岩層阻隔，推估灌漿改良區域僅及正常錐之 30% 至 50%。

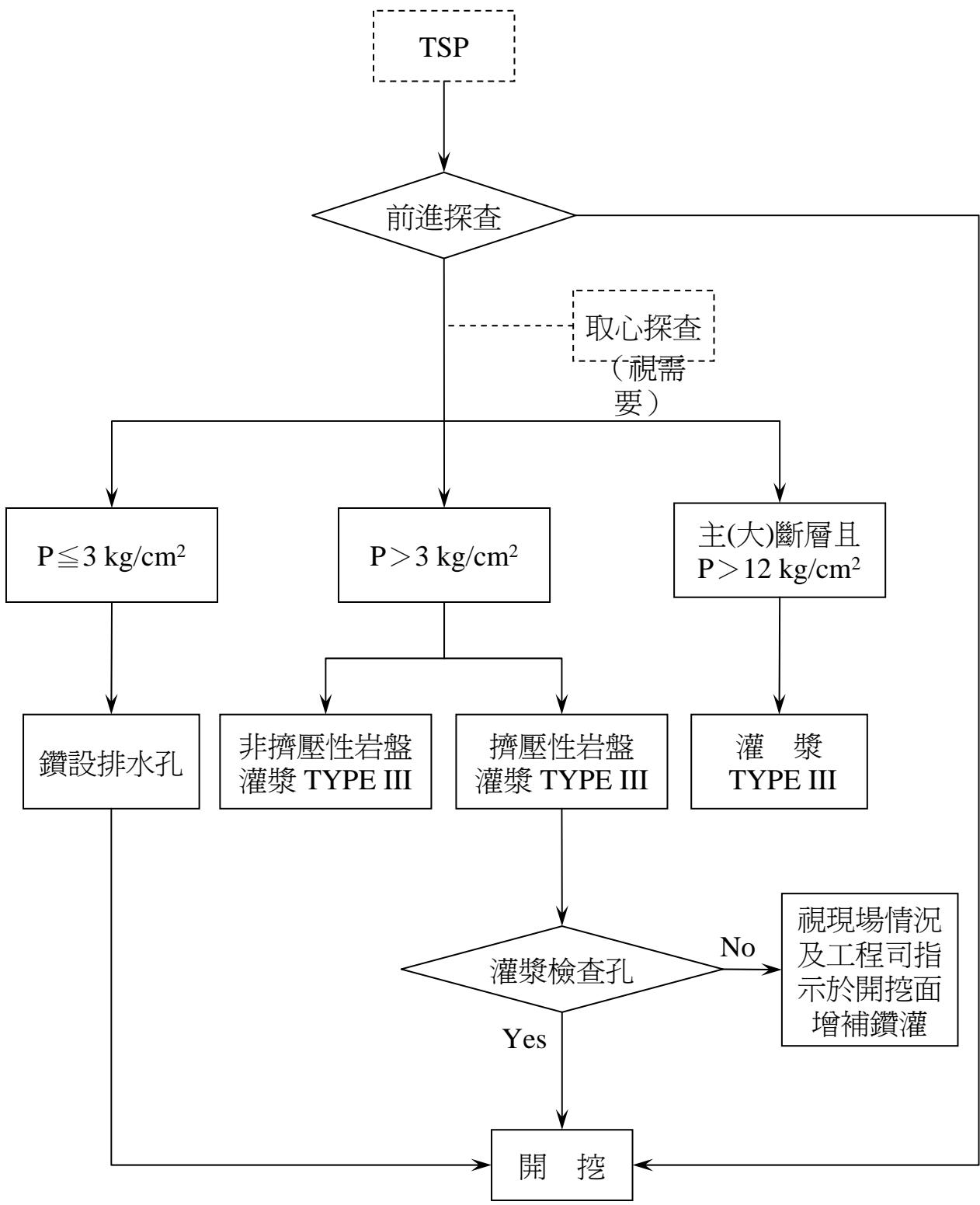
表二 LW 漿液配比表

配比 編號	水灰比 (W/C)	A 液		B 液		合 計 (公升)	膠凝時間 (sec)
		水泥(kg)	水(ℓ)	水玻璃(ℓ)	水(ℓ)		
1	3.52	50	176	96	96	384	113
2	3.02	50	151	84	83	334	91
3	2.18	50	109	63	62	250	64
4	1.68	100	168	100	100	400	51
5	1.35	100	135	83	83	333	45
6	0.93	100	93	63	62	250	31
7	0.68	200	136	100	100	400	25

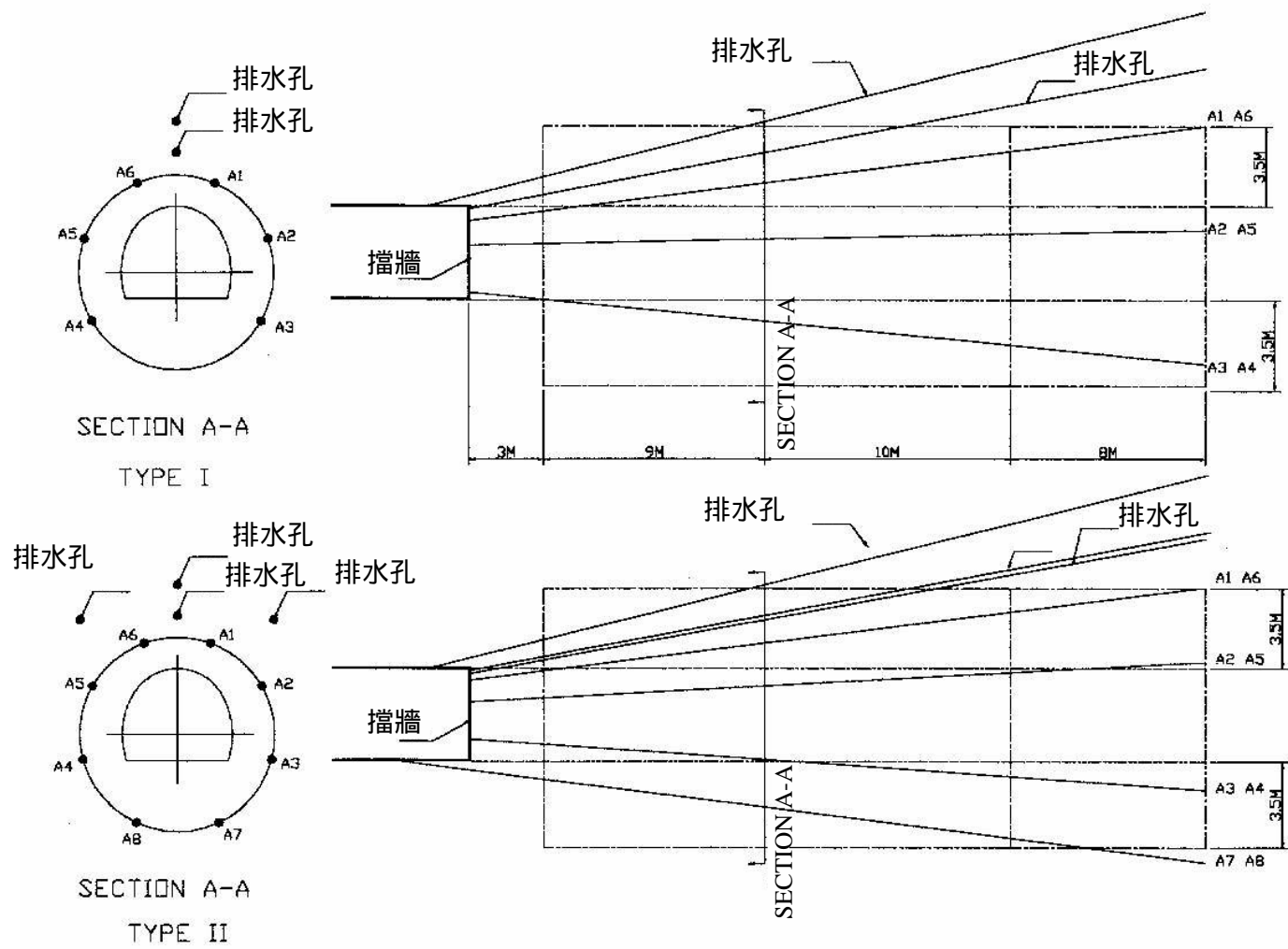
表三 皂土漿液及水泥漿配合比表

配比 編號	水灰比 (W/C)	水泥 (kg)	皂土 (kg)	水 (ℓ)	合 計 (公升)
1	2.13	100	15	213	250
2	1.33	150	8	200	250
3	1.33	150	6	200	250

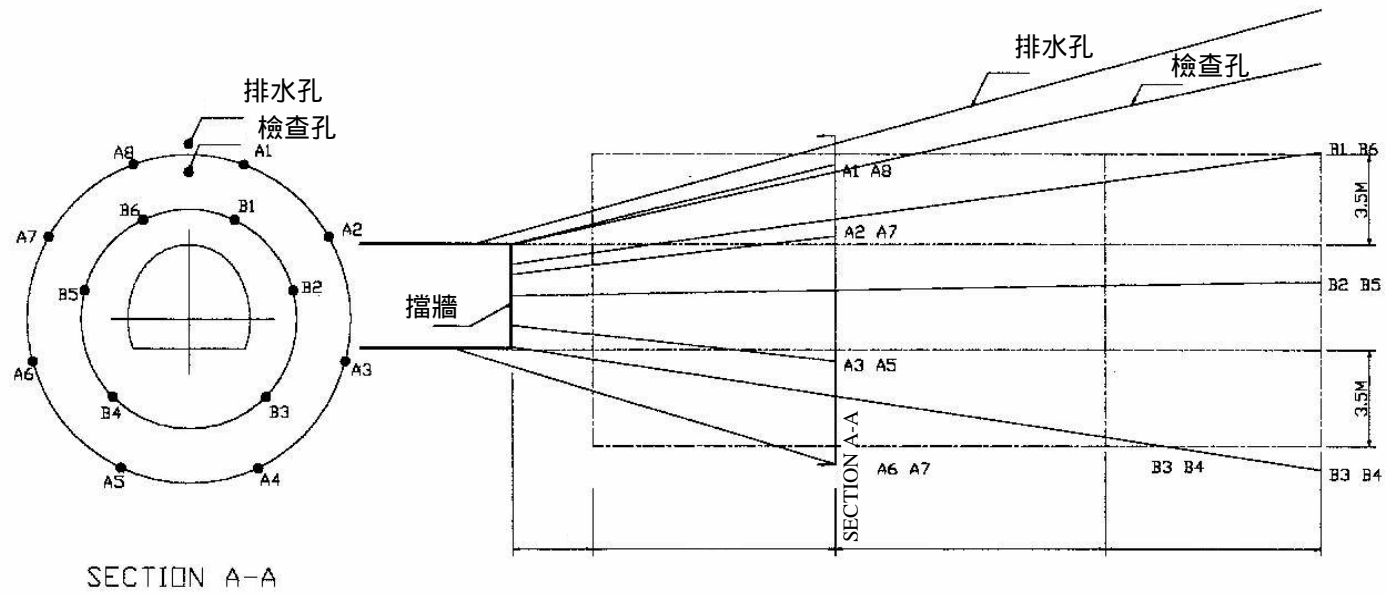
配比 編號	水灰比 (W/C)	水泥 (kg)	砂 (kg)	水 (ℓ)	合 計 (公升)
1:2	2	50	0	100	116
1:1	1	50	0	50	66
1:0.8	0.8	50	0	40	56
1:0.6	0.6	50	0	30	46
1:1:1	1	50	50	50	84
1:1:0.8	0.8	50	50	40	75



圖一 地質探查及鑽灌處理流程



圖二 TYPE I 及 TYPE II 鑽灌佈孔及排水孔示意圖



圖三 TYPE 鑽灌佈孔及排水孔示意圖