



淡海輕軌大地工程經驗分享

新北市政府捷運工程局局長 / 李政安

新北市政府捷運工程局科長 / 鄭紹祥

新北大眾捷運股份有限公司資深經理 / 楊鵬飛

關鍵字：淡海輕軌、藍海線、綠山線、新北捷運

摘要

淡海輕軌第一期路網於109年底完工通車，本路線由紅樹林站經淡金路連接淡海新市鎮，採平面及高架型式佈設，雖避免都會區捷運系統深開挖工程之困難與風險，但臺北盆地周邊地形變化大、地質變異性高的特性，使得基礎工程仍面對相當挑戰。本工程採統包方式施工，統包工程因設計、施工併行的特性，可在維持原功能需求條件下，彈性檢討不同設計方式，採取最有利的工程方案，本工程累積之輕軌運輸系統工程規劃、設計、監造、施工之技術與經驗，可作為國內其他都會區推動輕軌運輸系統參考。

一、前言

大臺北都會區捷運「三環六線」路網是由文湖線、環狀線（以上為第一環）、新莊線、萬大-中和-樹林線（以上為第二環）、板南線、三鶯線、機場線（以上為第三環）等三環以及淡海輕軌、安坑輕軌、五股泰山輕

軌、八里輕軌、深坑輕軌、汐止民生線等六線之捷運路線所構成，完整路網詳圖1。

「三環六線」完成後形成新北市境內主要捷運路網，總共206站，長度235 km，使原本以臺北車站為中心的捷運路網，擴大涵蓋到新北市中心及桃園地區，串連北北桃生活



圖 1 新北市捷運建設願景圖



圈，以「三環六線」作為大眾運輸骨幹，達成大臺北一小時交通生活圈的目標。

(一) 淡海輕軌運輸系統

淡海輕軌運輸系統為六線之一，可服務淡水地區及淡海新市鎮，將捷運核心路網往外圍地區延伸，透過路線轉乘機能擴大整體路網面。淡海輕軌包含綠山線與藍海線兩部份，路線全長約13.99 km，共設置20座車站，1座機廠，路線及車站位置如圖2；其中綠山線已於107年12月24日通車，藍海線第1期將於109年底通車，第2期目前進行設計中。

綠山線始於臺北捷運淡水信義線紅樹林站北側，以高架型式跨越中正東路（台2乙線）接淡金路（台2線）沿中央分隔島往北，至金龍橋南側由淡金路中央轉至道路西側，沿金龍橋西側平行前進跨越谷地後，再轉回淡金路續北行至濱海路左轉往西，並於跨越中山北路後由高架轉為平面型式，至沙崙路

轉往北至新市六路路口，共設置7座高架車站及4座平面車站；藍海線以平面型式自中山路（台2乙線）與中正路（淡水老街）交會處之捷運淡水站起，其後上下行軌分別沿中山路與淡水河岸採單軌布設，至文化路與中山路交會後併為雙軌，並沿台2乙線往西至沙崙海水浴場淡海路右轉，跨公司田溪後再右轉沿濱海路至沙崙路口後，往北與綠山線銜接，共設置9座平面車站；機廠配置包括駐車區、維修區、行政辦公區、及其他相關設施，面積約為5.0公頃。

整體路網分為兩期推動，第1期路網興建綠山線與藍海線濱海沙崙（G06）站至淡水漁人碼頭（B06）站路段（約9.55 km，共7座平面車站及7座高架車站）；第2期路網興建藍海線由淡水漁人碼頭（B06）站至捷運淡水站前之B01站路段（約4.44 km，6座平面車站）。

(二) 沿線地質特性

淡水區位於新北市西北端、淡水河出海口北岸、大屯山群西側。境內除淡水河口狹小平原外，其餘地區為屬大屯山範圍，地形發育主要受火山熔岩噴發所控制。

依據經濟部中央地質調查所區域地質圖林口圖幅（詳圖3），淡海輕軌沿線行經區域包括全新世沖積層或更新世凝灰角礫岩。沖積層為砂、黏土及礫石所組成，凝灰角礫岩則為火山碎屑之堆積，由略帶稜角、大小不一之安山岩碎塊，以及顆粒較細之凝灰岩、泥砂等夾雜混合構成，一般膠結良好，主要分布於火山邊緣，或覆蓋於火山岩流上部或夾於其中。由於噴發前地形各異，噴發量亦



圖 2 淡海輕軌整體路線圖

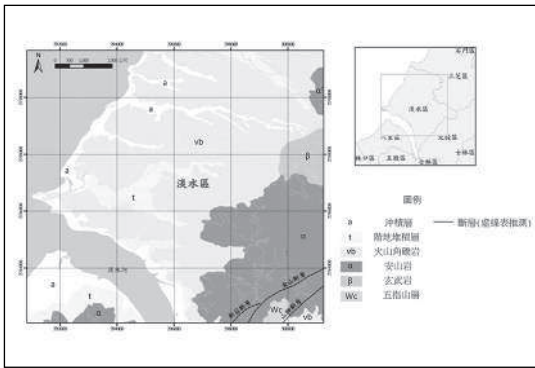


圖 3 區域地質圖

隨處不同，故凝灰角礫岩之厚度各地不一，可以從數公尺至300 m以上。

計畫路線之地形以東南側為最高，向海岸線漸次降低，主要為向海緩緩傾降的火山周緣斜坡地形，綠山線行經淡金路（台2線）路段屬大屯火山群西麓邊緣地帶，地表高程介於EL.8~70 m之間，藍海線則沿淡水河北側佈設，地表高程介於EL.5~22 m之間。

依據補充地質調查鑽探資料，火山碎屑階層上方覆蓋深度約5~8 m黃棕色、具堅實稠度之粉土質黏土，常含岩塊，SPT-N值約8~25，地下水位約在地表下3 m。

(三) 統包工程優勢

淡海輕軌第1期路網採統包工程方式，除了設計、施工併行作業可縮短工期的優點外，現場施工人員遭遇之工程議題，可即時回饋設計人員，採取因地制宜之設計方案與施工規劃，可發揮統包廠商之專門施工技術進而加快工程進度、發揮最大工程效益。茲將本工程在設計與施工總體整合方面之作為

說明如后。

二、高架橋基礎工程案例介紹

(一) 基礎設計原則

高架段路線佈設於中正東路、淡金路及濱海路；依輕軌系統列車軸重需求，以及地盤承載層深度較深（至少在6 m以下）之條件，高架橋之基礎型式採深基礎方能滿足設計需求；再者，考量淡金路為連繫三芝、石門之主要交通幹線，平、假日交通流量大，遇有特殊節慶常發生交通壅塞，故採施工風險性低、工期較短的全套管基樁工法，並避免對道路路面污染、降低對交通之衝擊。

淡金路沿線既有特殊地下管線如Ø1000自來水管、台電161 kV高壓電纜等重大管線，本案以BIM（Building Information Modeling）輔助設計如圖4所示，高架橋基礎以避開既有管線為設計原則，但仍有部分與之衝突，在不影響工期的考量下，分別採管線遷移或調整基礎設計等方式克服，並積極研擬代辦、吊掛保護等方式與管線單位溝通協調，以減少對工程進度之影響。

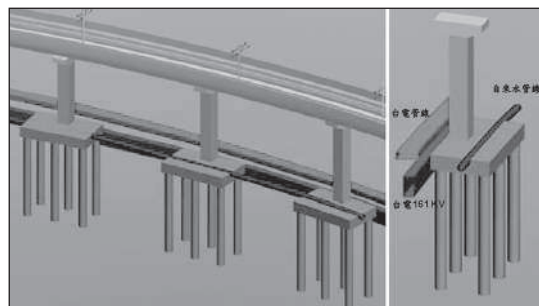


圖 4 特殊地下管線與高架橋基礎 BIM 模型圖



圖 5 台電 161 kV 高壓電纜吊掛示意圖

以淡金路於坪頂路段下方配置之既有台電 161 kV 高壓電纜為例，受限於 161 kV 高壓電纜線無法臨時遷移、永久遷移遷移期程過長，在基樁位置無法調整的狀況下，改採井式基礎設計並配合 161 kV 高壓電纜吊掛保護，現場施工如圖 5 所示。

另部分無法與既有公路橋梁共構、跨越谷地之路線（全套管樁施工機具設置困難）之橋墩基礎，亦採井式基礎如下節所述。

（二）金龍橋西側井式基礎案例

1. 基礎型式與設計

金龍橋跨越水源街與忠愛街間谷地，為淡金路沿線重要橋梁。金龍橋長約 200 m、寬約 24 m，最大跨徑約 90 m，設置有 4 座橋墩。

民國 80 年代完工之金龍橋，並無考量與淡海輕軌共用橋墩基礎所需之額外載重；再者，考量於金龍橋既有結構補強之施工困難度，以及施工期間對淡金路之交通衝擊，高架段路線改由金龍橋西側穿越。新設橋墩與金龍橋既有橋墩採平行、併列方式配置（如



圖 6 金龍橋西側高架路線示意圖

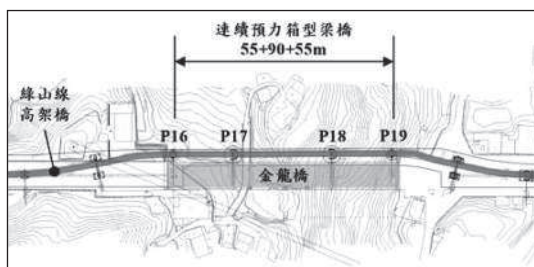


圖 7 金龍橋西側高架橋墩結構配置圖

圖 6)，以降低當地景觀衝擊。

金龍橋西側高架橋上部結構設計採場鑄預力鋼筋混凝土箱型梁，以懸臂工法施作。下部結構配置 P16 至 P19 等 4 座橋墩（如圖 7），P17 與 P18 橋墩間跨徑達 90 m，橋墩結構設計採雙壁式柱結構，最大柱高約 35 m，基礎則採井式基礎結構，基礎外徑 9 m、深度 25 m。

依據地質調查結果，地表下約 14 m 以上為自立性好之粉土質黏土、砂土層，以下則為砂岩層，地下水位約在地表下 3 m。井式



表 1 金龍橋側高架橋簡化土層

層次	地層種類	說明
1	粉土質黏土層	主要為粉土質黏土夾細砂，分布地表下約 6 m，T-N 值約為 8，屬中等堅硬黏土
2	砂土夾礫石層	主要分布於地表下約 6~14 m，厚度大約 8 m，PT-N 值大於 50，屬緊密砂土
3	砂岩層	主要分布於地表下約 14 m，厚度大約 25 m（孔最大深度），SPT-N 值大於 100。

基礎採分階段開挖，每階開挖深度約 2.0 m，開挖後於井壁鋪設鋼絲網及噴凝土以保護井壁，簡化地層如表 1 所示。

2. 特殊施工狀況

105年6月中旬P17橋墩井式基礎於開挖至地表下 22 m 時，井體北側開挖面發生地下水夾帶土砂湧入之狀況，地下水入滲量約 100l/min，統包廠商緊急回填土方穩定開挖面。初步研判是局部砂岩層高透水性造成地下水滲入。經檢討於井體北側滲水處以樁徑 1m 灌漿改良樁進行長 22.5 m、寬 8 m 之地盤改良，開挖面以上部分採低壓水泥灌漿 LW 填充地層孔隙、開挖面以下部分則採高壓噴射灌漿 JSP 補強地層強度與止水。

後續開挖過程開挖面及開挖至預定開挖深度仍持續有大量地下水湧入，配合開挖區內抽水作業仍無法順利施作底層鋼筋。考量金龍橋西側高架段為本工程要徑工項，工進落後將延誤完工通車時程，故除增加開挖區

外降水作業控制開挖面湧水並嘗試以進行基礎結構施工外，另同步檢討若必須以混凝土封底穩定開挖面，採提升井體周邊地層強度方式增加井體單位面積承载力。再以厚度 2m 之水中混凝土封堵開挖面後，配合開挖區外持續降水作業進行基礎結構施工，以及時完成 P17 橋墩井式基礎工程。

3. 地盤補強改善

為擬定 P17 橋墩井式基礎周邊地層之地盤改良作業，補充地質調查工作包括地質鑽探取得原狀土樣進行岩層單軸抗壓試驗，以及地電阻影像探測。岩層的單軸抗壓試驗，深度位於地下 13.15 m 至 13.78 m，qu 值介於 3.11~8.01 kgf/cm² 間。深度位於地下 20.0 m 至 20.46 m，qu 值介於 0.2~0.63 kgf/cm²；依綜合以上資料，地質為泥岩，岩質極弱，並且土層中有許多孔洞，地層極為疏鬆（如表 2）。

經檢討後採雙環塞地質改良工程，

表 2 地改前岩石力學試驗總表

孔號 (No.)	深度 (M)	含水量 Wi (%)	乾密度 γd (kN/m ³)	破壞應變量 Ef (%)	單軸抗壓強度 Uc (kgf/cm ²)	岩心描述
ABH-90	20.00~20.17	28.34	1.59	5.53	0.63	棕黃色泥岩
ABH-90	20.17~20.32	27.10	1.57	2.57	0.16	棕黃色泥岩
ABH-90	20.32~20.46	28.74	1.56	1.46	0.20	棕黃色泥岩
ABH-91	13.15~13.33	24.24	1.50	1.33	3.12	棕黃色砂質泥岩
ABH-91	13.49~13.61	21.02	1.75	2.63	8.01	棕黃色砂質泥岩
ABH-91	13.61~13.78	15.89	1.87	1.90	3.11	棕黃色砂質泥岩



圖 8 地盤改良雙環塞灌漿施工

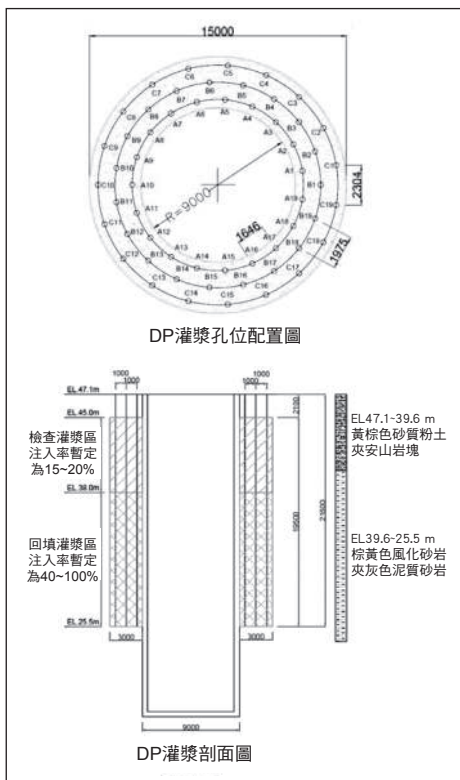


圖 9 井體周邊灌漿

於工作井周圍進行二重管雙環塞止水灌漿 (Double Packer) (如圖8)，於井體周邊地表下5至25.5 m間，形成厚度2 m、深度20.5 m的連續改良體，改良樁樁徑1 m，採交錯配置計三排共57支 (如圖9)。

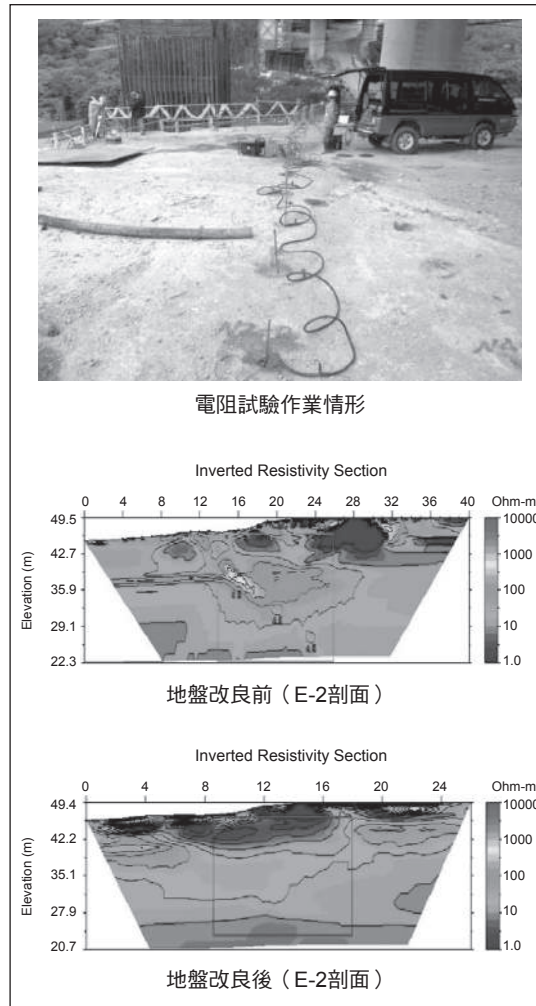


圖 10 地盤改良前、後地電阻影像剖面圖

由探測得知地盤改良前、後E-2測線地電阻係數剖面圖如圖10所示。比較改良前後之地電阻係數剖面圖得知，改良前於測樁16 m高程36 m附近、測樁20 m高程32 m附近，及測樁24 m高程27 m附近之疏鬆或有孔隙地層，由於疏鬆土壤地電阻值 (R) 較大，於圖上顯示為綠色、黃色區塊，另色塊顏色不連續代表其質地分佈不均勻；地盤改良後疏鬆地層被水泥取代且地電阻較小，圖上顯示

表 3 地改後改良範圍內改良體強度試驗總表

孔號 (No.)	深度 (M)	含水量 Wi (%)	乾密度 γ_d (kN/m ³)	破壞應變量 Ef (%)	單軸抗壓強度 U_c (kgf/cm ²)	岩心描述
ABH-92	2.30~2.60	70.30	14.51	1.18	39.58	灰白色水泥
ABH-92	2.60~3.75	62.90	13.56	1.53	24.34	灰白色水泥
ABH-92	4.40~4.65	67.10	13.87	0.72	38.93	灰白色水泥
ABH-92	6.00~6.15	57.50	13.92	0.93	31.27	灰白色水泥
ABH-92	8.25~8.5	71.00	13.76	1.08	30.93	灰白色水泥
ABH-92	9.10~9.30	74.4	13.89	0.81	27.98	灰白色水泥
ABH-92	10.35~10.60	62.80	14.57	1.03	45.75	灰白色水泥
ABH-92	13.55~13.75	57.20	13.64	0.76	29.04	灰白色水泥
ABH-92	14.55~14.75	55.70	13.86	0.94	24.24	灰白色水泥
ABH-92	15.60~15.85	71.80	14.12	1.03	28.93	灰白色水泥
ABH-92	17.60~17.80	72.40	13.83	0.69	34.84	灰白色水泥
ABH-92	19.35~19.55	79.80	14.03	1.27	30.37	灰白色水泥
ABH-92	20.15~20.40	67.10	14.24	0.97	31.77	灰白色水泥
ABH-93	2.65~2.85	64.50	14.17	0.93	30.94	灰白色水泥
ABH-93	3.15~3.40	68.60	13.69	1.30	33.02	灰白色水泥
ABH-93	3.75~4.00	70.20	13.94	1.24	24.50	灰白色水泥
ABH-93	5.45~5.60	73.90	14.11	1.79	27.09	灰白色水泥
ABH-93	6.00~6.25	75.50	14.17	1.24	23.96	灰白色水泥
ABH-93	8.00~8.30	72.50	13.85	0.95	29.61	灰白色水泥
ABH-93	10.30~10.55	65.50	14.20	0.93	44.94	灰白色水泥
ABH-93	12.05~12.25	68.00	13.79	0.93	34.77	灰白色水泥
ABH-93	14.60~14.80	71.60	14.05	1.01	32.21	灰白色水泥
ABH-93	16.45~16.70	61.10	14.51	1.32	37.78	灰白色水泥
ABH-93	17.40~17.65	72.50	13.51	0.67	39.05	灰白色水泥
ABH-93	18.80~19.00	68.70	13.97	1.25	38.71	灰白色水泥
ABH-93	21.40~21.65	68.20	13.66	0.89	35.89	灰白色水泥

為藍色、藍綠色區塊，色塊面積大且連續顯示地盤改良後已為均勻之水泥改良體，顯示改良效果良好，且地盤的單軸抗壓強度也顯著提昇，從0.2~8.01 kgf/cm²，提昇至24~38 kgf/cm²間，達到整體地盤固結的效果（如圖11、表3）。

三、平面段軌道路基設計

（一）平面段軌道設計原則

平面型式之輕軌系統多沿既有道路佈



圖 11 地盤改良後順利施工之 p17 墩柱

設，以目前國內採用的隔離路權型式，在橫交路口處需與一般車輛共用路口，必須採用



對既有道路使用影響最小之嵌埋式軌道。不同於傳統道碴式軌道可藉由整碴方式調整鋼軌面高程，嵌埋式軌道直接固定於鋼筋混凝土軌道版，需藉由剛性軌道版克服地層不均勻分布之自然特性。

軌道版下方基層之彈性模數為軌道版設計之重要基本參數，以能確保列車荷重能透過軌道版均勻分配至基層，保持鋼軌的相對變位與相對變位角在容許範圍內，增進列車行駛之平順，不致於因為軌道版之相對變位與相對變位角過大，影響列車或軌道之正常功能，而必須進行大量維修工作進而影響正常之營運。

(二) 平面段軌道路基

1. 地質特性

綠山線於淡海新市鎮範圍採平面型式佈設，配置於濱海路及沙崙路之中央分隔島。設計單位彙整綠山線平面段沿線地質資料，於地表下3.5 m左右（以上）深度為黏土層夾安山岩塊之火山堆積層，且該黏土層屬「過壓密」黏土層，依SPT-N值評估屬堅實程度，其承载力良好；另由現地鑽探資料（圖12），平面段沿線之地層變異性低，簡化地層說明如表4所示，平均參數如表5。

2. 設計考量

平面段軌道採嵌埋式軌道設計，主要構件包括槽型鋼軌（54R2）、彈性包覆材（CDM）、軌道版及基層，嵌埋式軌道橫斷面配置如圖13所示。

依據軌道工程設計規範，統包廠商需依據車輛系統及其軌道變位限制等設計條件與

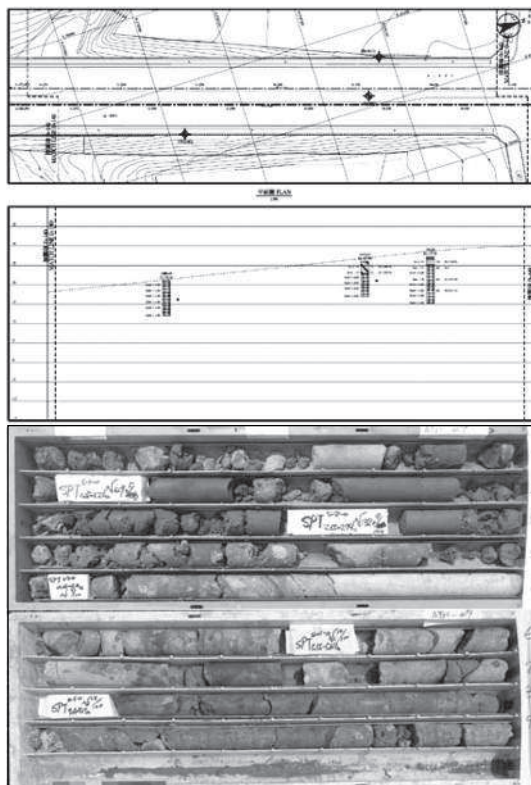


圖 12 G06 至 G07 站間鑽孔剖面圖及鑽孔岩心

表 4 綠山線平面段簡化地層

層次	地層種類	說明
1	回填層	主要為岩塊、鋼筋混凝土及礫石等組成，本層分布於地表下約 1.6 m
2	粉土質黏土層	分布地表下約 1.6~4.4 m，平均厚度約 3 m，SPT-N 值 5~10，屬中等堅硬黏土
3	安山岩塊層	主要分布於地表下約 4.4~12 m（鑽孔最大深度），平均厚度大於 10 m，SPT-N 值大於 100。

地質調查成果，評估軌道路基承载力及差異沉陷是否滿足軌道角變量不超過1/1,000之設計需求。

統包廠商依日本「鐵道構造物等設計標



表 5 平面段地層平均參數表

里程	G04 0K + 530-G08 0K + 050 (地下水位深度 4.0 m) 平面段地層平均參數表						
層次	地層種類	深度 (m)	分類	N 值	γ_t (t/m ³)	su (t/m ²)	ϕ (°)
一	回填層	1.6	-	-	-	-	-
二	高塑性黏土/ 高塑性粉土	3.5	CH / MH	4~16 (9)	1.54~1.81 (1.78)	5.625	-
三	安山岩塊夾黃棕色 粉土質砂/ 凝灰質角礫岩 夾安山岩塊	12.0	BR	100	2.20	-	36

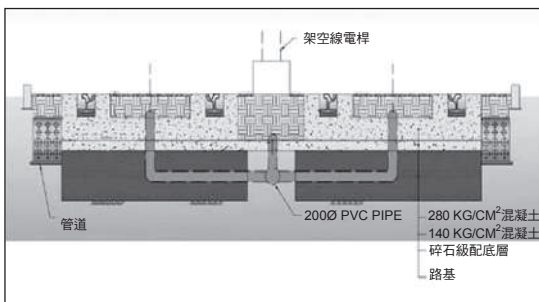


圖 13 嵌埋式軌道橫斷面配置

準同解說-省力化軌道用土構造物 (1999) 之標準」進行軌道版設計，有關軌道版最大變形量之設計需求，考慮行車舒適性，軌道版應滿足列車活載重AW3 (列車在空車狀況加上每一節車座位坐滿且立位密度以7人/m²站滿旅客之總重，總重約70t) 下彈性變位量小於2 mm之條件。

有關路基及級配粒料底層之設計需求，路基部分要求路基面下方3 m內之粉土質黏土層，其SPT-N值必須大於4，且K30 \geq 110 MPa/m；級配粒料底層部分則要求K30 \geq 150 MPa/m，且壓實密度比90%以上。

依列車載重分布，採用彈性基礎梁解析法，來求算軌道版的配筋需求量及彈性變位量。列車載重引致軌道版最大變位約1.38

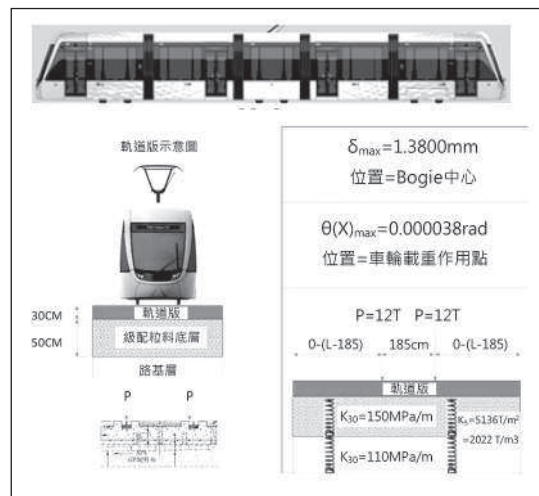


圖 14 軌道版最大變位、最大角變量檢核示意圖

mm，發生在轉向架之兩輪軸中間，小於2 mm之要求；最大角變量為 3.8×10^{-5} ，出現在車輪載重位置，如圖14所示。

3. 路基施工

平面段軌道工程的施工步驟之順序如下：

- (1) 於既有道路上，進行路基開挖至設計深度。
- (2) 於路基完成面進行夯壓與整平，並檢核是否達到工地密度之要求。
- (3) 達到工地密度要求後，進行級配粒料底



圖 15 路基施工



圖 16 路基平板載重試驗

層的分層夯壓填築並辦理相關品質檢試驗。

- (4) 級配粒料底層施工品質檢驗合格後，進行PC層的鋪設。
- (5) 綁設軌道版鋼筋，以由上而下 (Top-Down) 方式，於固定鋼軌並確認設計高程後，進行軌道版混凝土的澆置並進行後續養護 (如圖15)。

為驗證路基K30是否符合設計需求，現場依據CNS12392進行平板載重試驗。最大試驗載重為30 t/m²，以每階段增加3 t/m²方式分10階段加壓及解壓 (如圖16所示)，試驗結果如表6、圖17所示。試驗結果顯示可符合設計

表 6 平板載重試驗結果

編號	K30 (MPa/m)	對應 SPT N 值
1	>235.4	5
2	>235.4	6~9
3	164.8	4~5

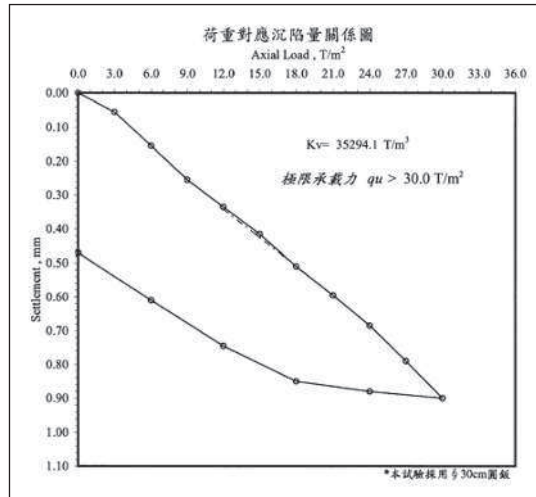


圖 17 平板載重試驗曲線 (以 G06 站為例)

單位K30之設計假設。

四、結論與建議

淡海輕軌運輸系統銜接臺北都會區大眾捷運系統，提供淡水地區及淡海新市鎮往來臺北市便利之交通服務，並將帶動區域之社經發展及休閒旅憩。

以平面、高架型式為主的輕軌運輸系統，雖避免大範圍地下深開挖工程的困難與風險，但臺北盆地周邊地形變化大、地質變異性高，是輕軌運輸系統基礎工程寶貴的經驗。



統包工程設計、施工并行的特性，在維持原功能需求的條件下，可彈性檢討不同設計方案，採取最有利的工程方案。如淡海輕軌金龍橋西側高架橋墩井式基礎工程，施工過程因地層變異性而面臨開挖面湧水的施工風險，在工程要徑工項的考量下，彈性修正設計方案並經後續檢測確認，在既定工期內、完成工程需求。

因應平面段輕軌運輸系統採用嵌埋式軌道之需求，如何避免因軌道版變位量大而影響軌道功能是軌道基層設計、施工之重點。以黏土層夾安山岩塊之火山堆積層為主的綠山線平面段，路基部分以 $K30 \geq 110\text{MPa/m}$ ，級配粒料底層部分以 $K30 \geq 150\text{MPa/m}$ ，且壓實密度比90%以上之路基及級配粒料底層設計需求，經現場靜載重試驗確認，完全符合系統功能需求。

淡海輕軌運輸系統第一期工程於109年底完工通車（圖18），累積之輕軌運輸系統工程之規劃、設計、監造、施工之技術與經驗，可作為國內其他都會區推動輕軌運輸系統參考。



圖 18 遠眺臺灣海峽之藍海橋

參考文獻

1. 新北市政府捷運工程局，“淡海輕軌運輸系統計畫第一期統包工程契約書（第二冊）業主需求書（一）整體服務需求及規定”，103年。
2. 新北市政府捷運工程局，淡海輕軌運輸系統計畫第一期統包工程契約書（第四冊）業主需求書（三）軌道工程功能規範”，103年。
3. 新北市政府捷運工程局，“淡海輕軌運輸系統計畫第一期統包工程契約書（第五冊）業主需求書（四）土建工程及其他一般機電工程設計規範”，103年。
4. 新北市政府捷運工程局，“淡海輕軌運輸系統計畫第一期統包工程補充地質調查工作成果報告書”，106年。
5. 新北市政府捷運工程局，“淡海輕軌運輸系統計畫第一期統包工程 G2A02P17 井式基礎雙環灌漿地質改良成果報告書”，106年。
6. 台灣大學軌道中心/台灣大學嚴慶齡工業發展基金會合設工業研究中心，淡海輕軌運輸系統計畫第一期統包工程綠山線平面段軌道版功能驗證報告”，106年。