

## 高雄捷運系統地下設施之防蝕措施

李國榮、黃國立\*、吳大川

### Corrosion Prevention against Underground Facilities on Kaohsiung Mass Rapid Transit System

G. R. Lii, K. L. Huang\*, and T. C. Wu

#### 摘 要

由於捷運系統大多採地下方式興建，在防蝕這個課題，地下結構物內混凝土及鋼筋的腐蝕現象尤需注意。又一般捷運系統係採非接地系統之牽引供電方式，部分電流會從軌道洩出，形成雜散電流，亦可能導致地下結構物內鋼筋及接地系統等之腐蝕，而此等金屬材料之防蝕措施便因此變得非常重要。本文乃分別針對混凝土的劣化及鋼筋與接地系統的腐蝕，提出防範建議，期藉由建議之防範方向與措施，達到有效的腐蝕控制。

關鍵詞：防蝕；混凝土；鋼筋；接地系統；雜散電流。

#### ABSTRACT

Most of mass rapid transit systems were built by underground structures. For the study of anti-corrosion, the corrosions of the concrete and steel particularly need to be concentrated inside of underground structures. On the other hand, the mass rapid transit systems usually use the type of non-earth system for the traction power supply but the part of current will be leaked out from the track bed of the railway and then forms stray current. It may also be caused the corrosion of steel and earth system inside of underground structures. Therefore, the performance of anti-corrosion is more important in the underground structures. The study is aimed at the recommendations of the anti-corrosion for the concrete, steel and earth system, respectively. It is also hoped that the anti-corrosion approaches could be implemented to effectively control corrosion.

Keywords: Anti-Corrosion; Concrete; Steel; Earth System; Stray Current.

## 一、前言

腐蝕係指金屬材料因電化學反應或氧化所產生之自然現象，防蝕措施則是結合理論與實際的科學，俾預防及減低材料發生腐蝕機率的方法。惟防蝕工程本身成本高，有時候以更換材料方式反而遠較防蝕措施更具經濟效益，故非所有材料均需採用防蝕措施不可。然而有關此方面之最佳化選擇與折衷，則有賴更深入之探討。

捷運系統概分土建工程及機電系統，其中土建工程包括潛盾隧道、地下結構、路工、高架橋、建築構造物及軌道工程等；機電系統則包括電聯車、供電、號誌、控制、通訊、自動收費、月台門、第三軌、電梯/電扶梯、機廠設備/維修機廠及訓練設施等。由於捷運系統之地下設施具有不易維修、更換及補強之特性，因此防蝕措施需優先加以考量。

回顧文獻所載，地下結構物之腐蝕現象，發生在混凝土內鋼筋之腐蝕，通常由於混凝土物理性（磨損、凍融或溫度變化等）侵蝕或化學性（酸侵蝕、鹼侵蝕、硫酸鹽侵蝕、氯離子侵蝕等），造成混凝土內、外部損壞，導致鋼筋腐蝕效應之產生。或因化學成分滲入裂縫至鋼筋表面，使酸、鹼等化學成分改變混凝土之 PH 值，隨即破壞保護鋼筋腐蝕之鈍化保護膜，造成鋼筋之腐蝕。

除此之外，於地下設施中佔有重要角色者，首推接地系統，接地系統要充分發揮其效能，又以埋置在大地內最為適宜，如此卻可能由於外在的化學物質而造成腐蝕，亦可能由於電流傳導而造成腐蝕；接地系統主要目的係在提供電力系統接地故障電流路徑，以及防止由於洩漏電流所造成的感電事故。一旦接地系統造成腐蝕而失效，將嚴重危及人員及設備等之安全，因此，接地系統的防蝕實有必要。

## 二、腐蝕成因

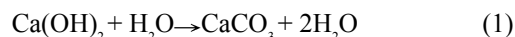
捷運系統地下設施發生腐蝕現象的來源主要有

四方面：（1）混凝土的劣化；（2）硫酸根離子的侵害；（3）氯離子的侵害；（4）電流的環境。而最終造成的為設施內鋼材的腐蝕，以下說明之。

### 2.1 混凝土的劣化

主要造成腐蝕的原因為混凝土的中性化（碳化現象），正常混凝土具強鹼性，PH 值介於 12~13，而混凝土經由表面吸收空氣中的二氧化碳，在適當的溼度下，與混凝土中的氫氧化鈣及 C S H 膠體起碳化作用，產生溶解性較低的碳酸鈣，如繼續碳化現象，碳酸鈣會轉變成溶解性較高的碳酸氫鈣，析出混凝土而增加孔隙。

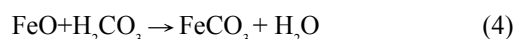
混凝土的碳化作用，其反應式如下：



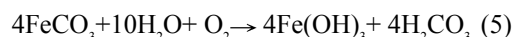
由於碳化作用造成混凝土之劣化及改變混凝土內之酸鹼值，使 PH 值降低，造成鋼筋腐蝕之環境<sup>[1]</sup>。

鋼筋方面的電化學反應式，如下所列：

陽極：



陰極：



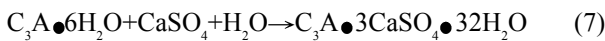
腐蝕生成物有氧化鐵（FeO；Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>；Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>）及氫氧化鐵（Fe(OH)<sub>2</sub>；Fe(OH)<sub>3</sub>；Fe(OH)<sub>3</sub>·3H<sub>2</sub>O）等，其體積將膨脹 2-6 倍，因而對混凝土內之鋼筋造成腐蝕<sup>[2]</sup>。

另外，混凝土的劣化並不僅止於碳化作用，餘如塑性收縮、自體收縮、乾燥收縮、溫度梯度、凍融循環、鹼骨材反應、水泥鍵性不良及水泥水化反應等，均可能導致裂縫或孔隙，助於腐蝕環境之發生<sup>[3]</sup>。

### 2.2 硫酸根離子的侵害

硫酸鹽侵蝕也是混凝土劣化的重要因素，存在於含硫酸鹽的海砂、海水或地下水的環境，硫酸鹽

的侵蝕將與混凝土中的鋁酸鈣進行化學反應，生成鈣鈣石；鈣鈣石具有膨脹性，將使混凝土內部產生裂縫，加速鋼筋的腐蝕。其化學反應式如下：



硫酸鹽侵害的形成，有賴於以下幾個因素：(1) 混凝土的滲透性；(2) 內部或外部水（濕氣）的存在；(3) 外在環境或混凝土中的硫酸鹽存在；(4) 水泥中  $\text{C}_3\text{A}$  的存在。

## 2.3 氯離子的侵害

當混凝土內部或外在氯離子的侵害，將導致鈍化氧化膜（Passive Oxide Layer）的破壞，以致於即使存在較高PH值，腐蝕仍易於發生（如圖1），氯離子侵害可能來自拌合時摻加海砂、海域環境、添加緩凝劑或除冰鹽等，其化學反應式如下：



上述生成物為單氯化鈣及鋁酸鈣水化物，容易稀釋，並使混凝土產生孔蝕現象，因而造成局部電池現象，加速腐蝕。

## 2.4 電流的環境

鋼筋的腐蝕，根據許多學者之研究，認為生鏽係一種電化學反應（Electro Chemical Action），由金屬表面電位的變化所形成。當鐵與大氣中之水分或水中或土壤中之電解質接觸，由於鐵之成分、組織、溫度、表皮等之不均性，或電解質之組織、濃度等之不同，使金屬表面產生電位之高低而形成腐蝕電池（Corrosion Cells），此腐蝕電池使兩極間產生腐蝕電流（Electric Corrosion Current）而於陽極部分造成腐蝕。

腐蝕電流之產生，不僅可由化學反應生成，亦可能來自外部的電流，例如電擊、感應、雜散電流及故障電流等。另外對於異種金屬的接觸，亦可能發生腐蝕現象，例如接地棒之銅金屬與碳鋼金屬間之界面產生伽凡尼腐蝕。

## 三、研究背景

本文係以高雄捷運為對象，探討地下設施之防蝕措施，必須先行瞭解捷運沿線之大地狀況及捷運設施之配置等<sup>[4,5]</sup>。

### 3.1 核定路網

高雄捷運工程分佈於高雄市、縣轄區（如圖2）。目前施工之部分含蓋紅、橘線路網。本計畫紅線起點由沿海一路二苓國小附近開始以地下方式自沿海一路、中山四路、經小港國際機場，沿翠亨南北路、中山路、博愛路，經重和路穿越半屏山，繼以高架橋結構沿翠華路、左楠路、加昌路經台一線跨越台鐵鐵道至終點橋頭火車站附近止。其結構型式共有地下段、高架段及平面段，地下段共約 18.4 公里，包括 15 座地下車站；高架段長約 10.4 公里，共有 8 座高架車站，平面段長約 0.15 公里，包括 1 座地面車站，並設有 2 座機廠。橘線起點為臨海一路中山大學附近，以地下穿越台鐵高雄港站調車場，沿大勇路、中正路、鳳山市自由路、光遠路轉中山東路於碑頂路轉進大寮機廠後出土，行經地面，於 OT1 車站為終點站。其結構型式為地下段及平面段，地下段長約 13.8 公里，共有 13 座地下車站；平面段共約 0.3 公里，包括一座地面車站，並設有 1 座機廠。

### 3.2 地質狀況

高雄市位於台灣西部麓山地質的西南緣，為台灣西部覆瓦狀摺曲與斷層山脈的殘餘，地質年代較新，多為第三世紀與第四世紀的地層，地質構造較為單純。根據鑽探結果顯示，橘線除近中山大學附近出現珊瑚礁岩、石灰岩及泥岩外，地層大都為沉泥質砂（SM）及黏土質沉泥（CL）互層，其中沉泥質砂佔較大比率，沿線局部地形起伏很小，整體地勢由西向東緩緩升高。地下水位約在現有地表以下 0.5 公尺至 8 公尺間，未來捷運結構大部分均位在地下水位以下。紅線除配合高鐵左營共構改線

穿越半屏山路段部分地質為明顯之泥岩及石灰岩膠外，其餘由北端至南端之大部分路線均位於高雄平原的現代沖積層，由黏土、沉泥、砂、礫石及有機質組成。沿線地勢由北向南逐漸減緩，除 R14 至 R16 及 R6 至 R8 路段之地下水位在原地表面以下 1.5 公尺至 3 公尺間，其餘路段地下水位約在原地表面以下 4 公尺至 6.5 公尺。

### 3.3 土壤及水質化性分析

為進一步瞭解沿線化性分佈，捷運局委託台灣營建研究院進行分析，共檢驗地下水及土壤二種樣本，其中土壤以檢測硫酸鹽為主，地下水則為 PH 值、導電度、硫酸鹽、酚、油脂、氯鹽、酸鹼度、金屬 (Pb、Mg、K、Na、Hg)，其中地下水 PH 值、硫酸鹽與氯鹽與腐蝕有密切關係，特繪製分佈狀態圖，示如圖 3~圖 5。初步分析顯示，地下水之硫酸鹽範圍介於 15.6ppm~454ppm，土壤則介於 7.1ppm~85.6ppm。氯鹽檢測值介於 5.99ppm ~ 10,441.8ppm，其中 WO-1、HO-2、WR-6 三個測站有偏高趨勢（測站示如圖 6），約位於橘線 O2-O4 車站及紅線 R5、R7-R8 車站，設計時必須特別重視防蝕措施。

### 3.4 接地系統設計

高雄捷運之機電系統，除主要之牽引動力採用直流電外，餘之車站用電及隧道照明、環控設備則採交流電。前者藉第三軌供應電聯車之動力，以不接地方式設計，此即雜散電流之來源之一，將對地下設施，尤其是接地系統造成腐蝕破壞。

接地系統一般由接地網及接地棒組成，置於結構底板之下，傳導故障電流、雜散電流、雷擊等至大地內，又稱系統接地。

當捷運系統行車軌道上的大電流形成接地軌對電源接地的電壓降，該電壓降造成由接地軌對大地的洩漏電流，此電流即為雜散電流。雖言捷運設施因為雜散電流的考慮，而在軌道下方設置回收網，但仍將有部分電流未能收集，流入結構體中，造成

結構體之鋼筋腐蝕；更有可能再流出至接地系統而導流進入土壤，造成接地棒腐蝕。由於接地系統之目的在傳導故障或電擊等之衝擊電流至大地，倘因雜散電流、化學侵蝕或伽凡尼腐蝕等而喪失應有的功能，將造成捷運系統莫大的危害，吾人當針對此課題研擬對策<sup>[6]</sup>。

## 四、防蝕措施

基於以上的腐蝕成因，高雄捷運在設計之初，就必須擬具防蝕措施及因應各種可能造成腐蝕之方式，以免造成未來營運之危害。

### 4.1 地下水滲透

對於結構體之外部包覆，高雄捷運訂有三級水密性要求：

- A 級：結構構件不得有漏水、滲漏或濕漬之情形。
- B 級：施工縫或隧道襯砌環片接頭處之混凝土表面容許有些微之濕漬，但不得出現肉眼可見之水流。
- C 級：容許滲水之發生，但僅限於水平施工縫混凝土表面之濕漬，及壁面垂直施工縫之垂流，且其滴流或噴流不在容許範圍內。

水密結構之構件應有防水膜之保護。結構體外部構件之所有垂直與水平施工縫均應設置止水帶，並應於施工縫之內側面施加封逢，惟 B、C 級則可不於施工縫之內側面施加封逢。對於包覆之要求，於地下車站採用全包覆；高鹽害區明挖覆蓋隧道亦需採全包覆；其他地區之明挖覆蓋隧道則至少需頂部包覆。

至於潛盾隧道內對於防止地下水滲透之對策則為採環片煤焦環氧樹脂 (Coal Tar Epoxy) 塗料被覆，並要求至少二道塗佈，固體含量 (體積比) 75 ± 2%，總厚度 700 微米以上。

另外亦可以選用適宜之防水膜材料，降低撕裂強度使其具柔軟、工作度。譬如採用預鋪型自黏性防水膜，使防水膜與混凝土充分膠結在一起，以防

止水在防水膜與混凝土間流竄。

## 4.2 混凝土結構劣化

此對策可從下列途徑防止，包括水泥材料、保護層厚度、環片厚度及配比等。

據先期調查之結果（詳 3.3），高雄捷運將紅線 R5-R8 及 O1-O4 車站及路段界定為高鹽害區，需特別重視防蝕對策；又由後續之量測，發現土壤中之硫酸根離子含量大於 2 % 或地下水之硫酸根離子含量大於 10,000 ppm 時亦需比照辦理。對於混凝土之選用如表1，其中所指重要永久性結構物為地下車站及明挖覆蓋隧道之底版、頂版、外牆（非指連續壁）、通風井及出入口構造體等及其他與土壤接觸之地下設施，惟連續壁如為單牆或複合牆構造體則比照辦理。在各種混凝土中水泥之選擇可如下所述：

- (1) 一般混凝土：CNS 61 或 ASTM C150，第Ⅰ型水泥或 CNS 3654 IS 型，高爐爐渣熟料所佔之百分率為  $30 \pm 5\%$  之高爐水泥。水泥中之酸溶性鹼含量，以  $\text{Na}_2\text{O} + 0.658\text{K}_2\text{O}$  計算所得之氧化鈉當量表示時，其重量比應少於 0.60 %。
- (2) 抗硫混凝土（中等程度）：CNS 61 或 ASTM C150，第Ⅱ型水泥，或 CNS 3654，IS-MS 型、IS(MS-MH) 型，高爐爐渣熟料所佔之百分率為  $45 \pm 5\%$  之高爐水泥。水泥中之酸溶性鹼含量，以  $\text{Na}_2\text{O} + 0.658\text{K}_2\text{O}$  計算所得之氧化鈉當量表示時，其重量比應少於 0.60 %。
- (3) 抗硫混凝土（嚴重程度）：CNS 61 或 ASTM C150，第Ⅴ型水泥，或 CNS 3654、IS-MS 型、IS(MS-MH) 型，高爐爐渣熟料所佔之百分率為  $55 \pm 5\%$  之高爐水泥。水泥中之酸溶性鹼含量，以  $\text{Na}_2\text{O} + 0.658\text{K}_2\text{O}$  計算所得之氧化鈉當量表示時，其重量比應少於 0.60 %。

對混凝土最小保護層而言，如結構物外露面與水、土壤或打底混凝土直接接觸者，或外域土壤環境為鹽水或含酸鹼者，保護層為 10 公分。至於預鑄混凝土隧道襯砌環片（28 公分）之保護層要求，環

片內部為 4 公分，其他面為 5 公分。

在混凝土配比上，除水泥之選擇必須具抗硫性外，為防止鋼筋腐蝕，在水、砂、石之選擇上必須參考相關規範，要求酸鹼離子、氯離子及鎂離子等最低含量，在新拌混凝土內之水、粒料、水泥及添加劑等成份所含之水溶性氯離子總含量則不得超過 CNS 3090 之限值，亦即鋼筋混凝土  $0.3\text{kg}/\text{m}^3$ ，預力混凝土  $0.15\text{kg}/\text{m}^3$ 。在粒料部分，海砂、海石或含水溶性氯離子之粒料，均不得用於預力混凝土工程，而鋼筋混凝土或巨積混凝土工程則嚴禁採用海砂。另為增加混凝土的耐久性，目前亦考慮使用高性能混凝土或自充填混凝土，俾以達到抑制腐蝕之效果。

## 4.3 鋼筋防蝕

此類防蝕對策為直接處理鋼筋表面，目前採用之策略係於有明顯腐蝕之虞處且其鋼筋保護層未有特別保護材料如防水膜或煤焦環氧樹脂（Coal Tar Epoxy）者，應施加鍍鋅或環氧樹脂塗佈處理。鍍鋅鋼筋應符合 ASTM A767、環氧樹脂塗佈鋼筋應符合 ASTM A77。

許多研究顯示，使用環氧樹脂塗佈或鍍鋅等方式，由於會在鋼筋表面形成保護面，其防蝕效果相當良好；惟使用後對於鋼筋之握裹能力較具不確定性，且如施工、搬運過程，造成鋼筋發生擦損，表面損害後，反不利於防蝕；另鋅與鐵為二種不同金屬，亦可能產生伽凡尼腐蝕效應。故雖有直接在鋼筋上防蝕之策略，但仍不優先考慮在鋼筋防蝕策略上應用。另外陰極防蝕及外加電流法亦為可選擇之防蝕對策，惟成本較高，亦不優先在鋼筋防蝕策略被考慮。

## 4.4 接地系統防蝕

本文已於前章敘述接地系統防蝕之重要性，且對接地系統而言，腐蝕可能來自雜散電流或故障電流或者來自外在環境。

在來自外在環境的腐蝕方面，就實際接地棒及

銅板進行試驗，初步認為若接地棒構造為內部直徑 18.4mm 的碳鋼，而外部包覆 0.3mm 厚的純銅，即可滿足要求。試驗溶液包括 200ppm、5000ppm、10000ppm 及 15000ppm 氯離子，以及不同濃度氯離子再混合 2000ppm 及 4000ppm 硫酸根離子。測試方法則包含直接浸泡試驗及電化學試驗，其中浸泡試驗係用來評估材料在不同環境之腐蝕速率；而電化學試驗則用來觀察及瞭解材料在不同環境中，系統條件若發生改變時，其腐蝕趨勢與反應速率之變化情形。由試驗結果吾人可獲致四項結論：

- (1) 以包覆銅片方式在單獨氯離子或氯離子混合 2000ppm 與 4000ppm 硫酸根離子之環境下，其耐蝕性質皆優於僅有中心碳鋼存在的情況下約 2-6 倍。
- (2) 包覆銅片及中心碳鋼之材料耦合方式，若發生腐蝕或外力破壞之情形致裸露出碳鋼時，更會發生伽凡尼腐蝕問題，此時中心碳鋼的腐蝕速率會大幅增加，約較單獨碳鋼的腐蝕速率高出約 2-4 倍。
- (3) 包覆銅片及中心碳鋼之材料耦合方式，無論在不同氯離子或氯離子加硫酸根離子溶液中之電化學極化曲線結果，顯示銅片的腐蝕電流密度較小。
- (4) 根據試驗結果清楚顯示，以 100 年為壽年，加上銅片在 4000ppm 硫酸根離子混合氯離子的腐蝕速率 0.88mpy 設計，若再加計安全係數 50% 之考量，包覆銅片需 4.47mm 之厚度；如安全係數以 80% 為考量，則包覆銅片僅需 2.8mm 之厚度即可。

因此，高雄捷運最終乃參考試驗結果，訂定所謂的施工規範，要求接地棒為需長度 3000mm，直徑 34mm（鋼棒直徑 25mm，銅層厚度 4.5mm），且係銅包鋼心之接地銅棒，以及需有用來結合接地棒以形成超出長度的接合配件，同時須具有相容且良好的電氣性及機械性。接地網導體依據 NEC250-95 所規定之銅製裸導體 325mm<sup>2</sup>。引上之主導體須有 600 伏特級綠色絕緣體，至少為兩條 325mm<sup>2</sup> 銅

導體，並設接地增強劑，以矽化鋁或含銅物質與碳素或化合物混拌而成，可提高導電率而降低接地電阻，使主接地系統電阻符合合約圖說之規定，進而防止接地棒之腐蝕。

另外對接地系統所採之防蝕措施及對策，亦有考量以陰極防蝕方式，其方法係利用陽極包（鎂陽極或鋅陽極）來有效抑制腐蝕的發生。

## 五、結論

對捷運系統地下設施而言，由於產生腐蝕將導致大成本之修復工程，如能事前加以預防，即使增加少許支出，亦較事後之處理更具經濟效益，本文最後提出幾點以供參：

- (1) 對土木工程而言，混凝土結構物腐蝕問題首當其衝，要提升混凝土耐久性，必須由內在因素（如材料、配比、結構設計、施工等）及外在因素（如防水膜、環氧樹脂、鍍鋅等）來擬定策略。
- (2) 對機電系統而言，埋置在大地內之鐵件，腐蝕將喪失其機能，必須就本身之材質、電流的來源、外加防蝕物的考量等擬定策略。另外雖可考慮改善大地之土壤環境、水域環境以截流等方式來達成防蝕工作，惟成本高低與效果如何，仍有待進一步研究。
- (3) 本文僅以對捷運地下設施之腐蝕問題加以探討，例如雜散電流亦可能造成地下管線之腐蝕，並不在本文範圍，惟此部分已有相當多的文獻可以參考。

## 參考文獻：

1. 趙文成，「新拌混凝土中氯離子含量檢測訓練班教材」，新竹，第 41-100 頁（1995）
2. 莊秋明，「防蝕工法」，交通部委託研究計畫，第 73-91 頁（2001）

3. 苗柏霖，「裂縫對混凝土耐久性之影響與對策」，混凝土結構耐久性技術，台灣營建研究院，第 105-140 頁 (2000)
4. 台灣營建研究院，「高雄捷運地下結構物抗鹽腐蝕調查研究」，高雄市政府捷運工程局委託，高雄 (1999)
5. 胡海潮、陳俊融，「高雄捷運抗鹽腐蝕考量」，2000 捷運工程技術研討會論文集，第 5.1-5.22 頁，高雄 (2000)
6. 黃楹昌，「捷運機電設施腐蝕防治理論與實務」，捷運技術，第十八期，第 101-108 頁 (2000)

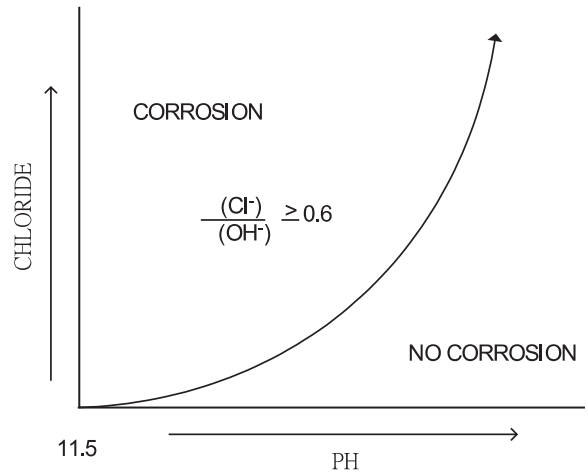


圖1. 氯離子濃度與酸鹼值關係圖<sup>[2]</sup>

Fig. 1 Relationship between the Chloride consistence and PH

表1. 混凝土使用表

Table 1. The Concrete menu

	高鹽害區	非高鹽害區
重要永久性結構物	抗硫混凝土 (嚴重程度)	抗硫混凝土 (中等程度)
其他結構物	一般混凝土	一般混凝土
連續壁	抗硫混凝土 (中等程度)	一般混凝土 (限使用IS型之高爐水泥)

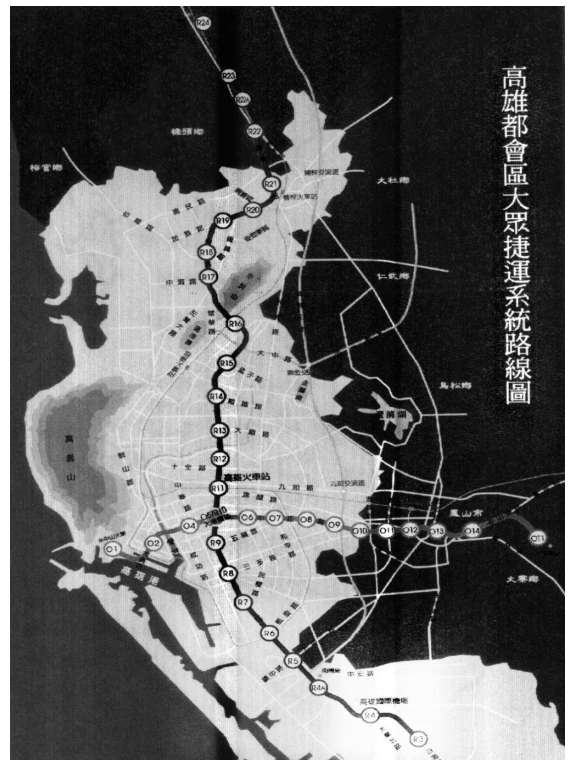


圖2 高雄捷運系統路線圖

Fig. 2 Kaohsiung Metropolitan Mass Rapid Transit system route map

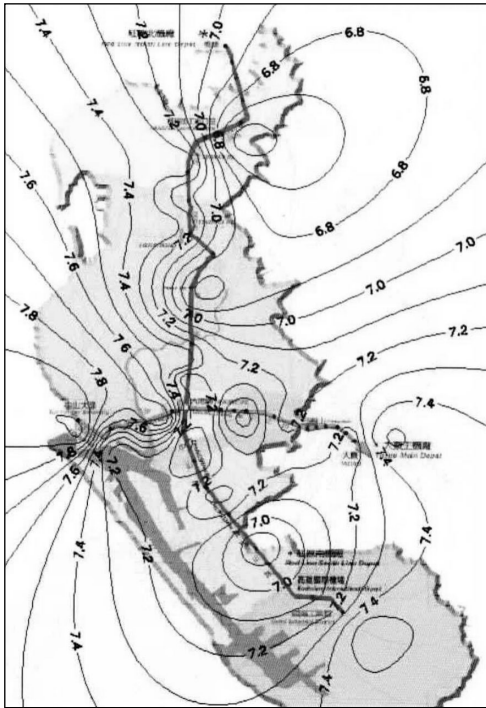


圖3. PH值分佈圖<sup>[5]</sup>  
Fig. 3 Distribution of PH

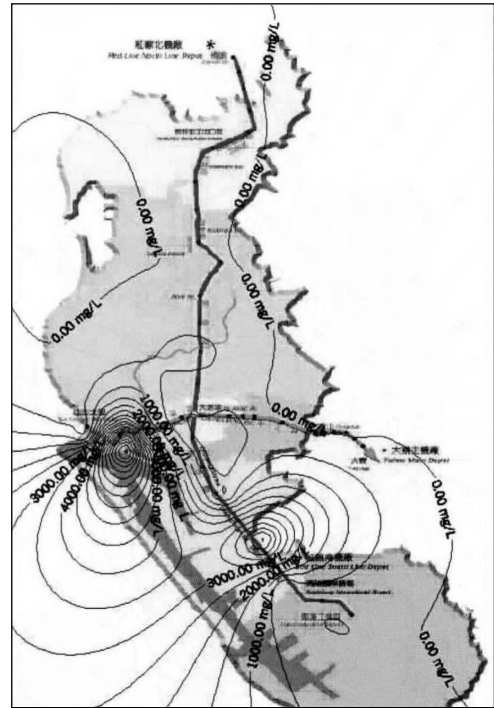


圖5. 氯鹽離子分佈圖<sup>[5]</sup>  
Fig. 5 Distribution of Chloride-ion

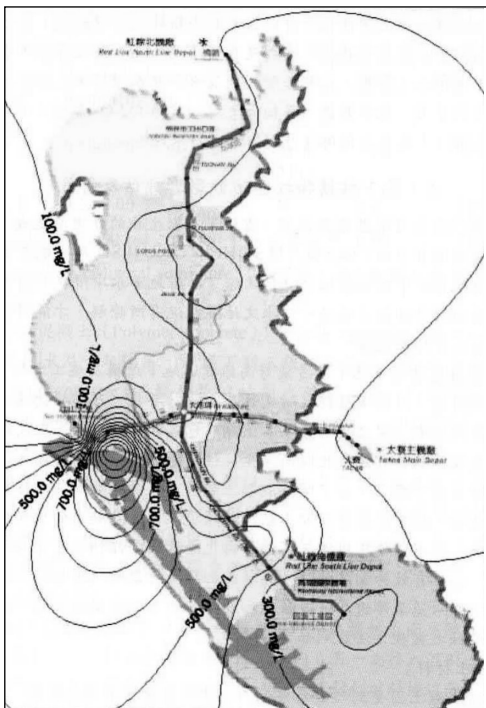


圖4. 硫酸離子分佈圖<sup>[5]</sup>  
Fig.4 Distribution of Sulfate-ion

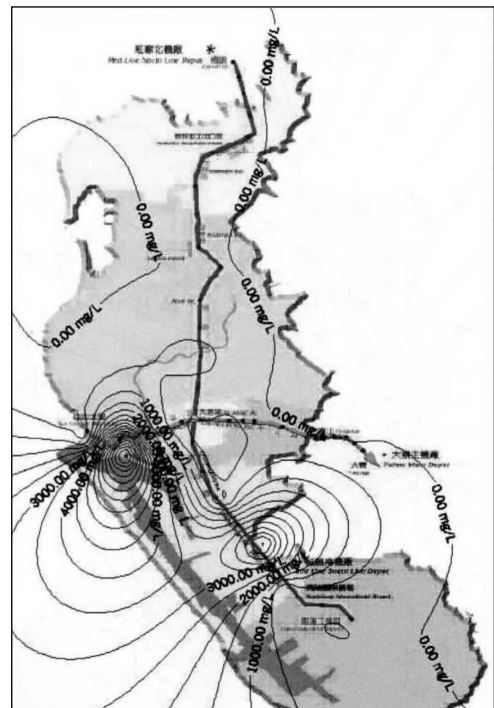


圖6. 測站分佈圖<sup>[4]</sup>  
Fig. 6 Distribution of Monitor Station