

地下鐵터널의 診斷 및 安全管理

On the Safety Control and Diagonos's of Subway Tunnel

申 政 夫*
Shin, Jung Bu

1. 序 論

最近 各種 大型事故로 莫大한 財産損失과 貴重한 人命被害로 公共 및 多衆利用施設의 建設은 물론 그동안 소홀히 해 왔던 維持管理에 對한 品質 및 安全問題가 크게 社會爭點化되고 있으며, 特히 地下鐵 安全問題는 恒常 世人의 關心의 焦點이 되어 왔다.

우선 現在 運營中인 서울 地下鐵 1, 2, 3, 4號線 (1期)을 紹介하면 建設延長 140km(營業延長 131.6km), 114個驛, 5個 車輛基地이며, 構造의 形式은 터널, BOX, 高架, 橋梁, U-TYPE, 옹벽 이다. 本文에 論할 터널의 延長은 26.9km(全 延長의 19.2%)로서 在來式 터널은 10.7km, NATM터널은 16.2km이다.

터널을 포함한 構造物의 圓滑한 維持管理를 함에 있어 經驗이 풍부한 人力과 적정한 裝備로 週期的인 點檢(診斷)과 點檢結果 體系的인 適合한 補修를 持續的으로 施行하여 恒常 正常의 機能을 維持 함에 있다 하겠으며, 安全管理를 위하여는 制度的으로 專門化된 人力 및 組織의 精銳化, 檢査 및 補修用 尖端裝備의 保有, 點檢 및 補修等에 關한 諸般 指針 및 規定의 標準化, 充分한 豫算確保, 지속적인 教育 및 訓練等이 必需的인 일 것이다.

그러면 터널의 診斷(檢査), 補修 및 補強 對策에 對하여 簡略히 概括的으로 說明하기로 한다.

2. 터널의 診斷(檢査)

適切한 調查手段을 利用 變壓現象을 正確히 把握하여 原因을 推定, 安全度(健全度)의 判定, 對策工의 計劃(補修時期, 公法煽情 등)에 參考資料를 얻기 위하여 檢査計劃을 樹立 시행하며, 檢査의 項目, 適期, 方法과 檢査結果 安全度 判定에 대하여 說明하며,

가. 檢査計劃은 周邊環境, 設計, 施工 및 變壓 狀態 등을 考慮 樹立하며, 특히 變壓自體가 長期間에 進行되는 境遇가 많으므로 日常 監視體制가 必要하고 아울러 調查記錄의 整理, 보관(電算入力 등)에 유의한다.

나. 檢査項目으로는 여러 條件에 따라 適宜 選擇 하는데

- 資料調查: 터널 諸元, 履歷, 構造, 環境 등
- 環境調查: 地形, 地質, 地下水, 氣象, 土地利用 등
- 坑內調查: 龜裂, 剝離, 剝落, 變形, 漏水, 空

* 서울특별시 지하철공사 안전종합상황실 실장

洞, 材料劣化, 케도틀림, 汚損, 토사流入 등으로 檢査 目的에 따라 選擇 실시한다.

다. 檢査週期는 全般檢査와 個別檢査로 區分되는데

○ 全般檢査 : 터널 調査의 가장 基本이 되는 調査로서 定期檢査(2년 이내 실시)와 隨時檢査(必要時 실시)로 區分하며 第1次的인 安全度(健全度)의 判定을 한다.

— 定期檢査 : 變狀의 有無에 關係없이 肉眼과 간단한 器具(함마등)로 실시하며 調査 項目으로는 災害만 隣接工事 等에 의한 周邊 地形, 水理, 環境 變化 등의 環境調査와 覆工表面, 路盤, 坑內 異常 有無의 位置, 種類, 범위 등을 기록하여 개별조사 의 基礎資料로 한다.

— 隨時檢査 : 暴雨, 暴雪 등 災害 發生時 또는 인접시공 등으로 變狀發生이 憂慮되는 境遇 또는 必要하다고 인정할 때 행하며, 調査項目은 境遇等이며 觀察調査로 變狀이 發見되면, 位置, 種類, 範 委등을 記錄 또는 展開圖를 作成하고 必要시, 變狀 的 進行性 確認을 위하여 간단한 計測을 실시한다.

○ 個別調査 : 全般檢査의 結果를 基礎로 계속 變狀의 進行狀態를 監視할 必要가 있다고 判斷 되는 境遇에 行하며, 變狀의 精度, 進行性을 파악 補修對策의 수립을 위하여 정도가 높은 검사 즉 각종 計測機械를 이용, 變狀 狀態를 定量的으로 판단하는 것 에 역점을 둔다.

檢査후에는 安全度 判定基準에 따라 等級을 정하고 調査項目은 전반검사와 같으나 계측기로 進行性 및 규모를 測定, 감시하며

對策工의 豫備調査로서 必要시 內空變位, 覆工의 強度, 두께의 確認, 地下水의 흐름, 地質調査 等을 실시한다.

○ 補修工事시에는 터널 周邊의 力學 條件이 不安定하기 쉬우므로 복공 表面의 輕微한 보수공사를 제외하고는 계측등에 의한 감시의 계속 실시는 물론, 공사 후에도 일정期間 效果를 確認하고, 만일 기대 效果가 未洽할 때에는 즉시 對策工을 追加로 檢討해야 한다.

라. 檢査 方法은

○ 肉眼觀察, 寫眞撮影 : 覆工 劣化 要因이 여러 가지 이지만 肉眼으로 確認 可能한 現象(漏水, 龜裂 등)이 表面에 나타나므로 肉眼觀察이 變狀 發見의 第1段階이다. 현저한 變狀現象은 寫眞撮影도 並行, 客觀的인 判斷資料로 한다.

○ 龜裂測定 : 變狀중 가장 一般的으로 나타나는 것으로 龜裂의 形態, 規模등의 觀察로서 原因, 하중의 方向, 進行狀況등 大略推定이 可能하며, 龜裂의 龜裂의 길이, 폭, 깊이, 단차등을 기록하고 이를 展開圖로 作成, 그 進行 狀況을 계속 記錄管理한다.



△균열鏡 균열 調査

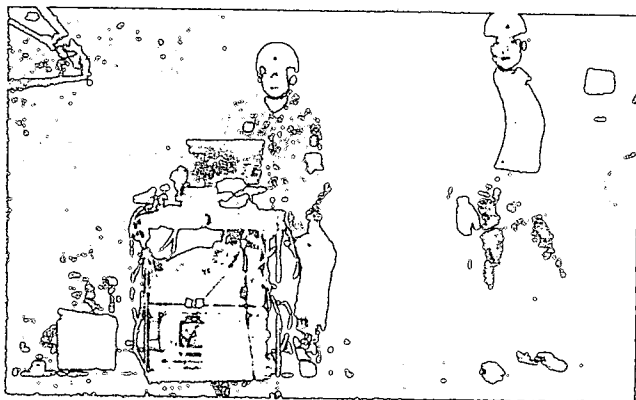


△ 超音波 測定

— 龜裂原因중 外力要因은 引張, 壓縮, 剪斷力의 작용으로서 종류에 따라 龜裂의 形態가 다르며, 內的要因은 材料의 性質, 設計未洽 및 施工不實 또는 環境 影響에 따라 龜裂등이 發生한다.

— 균열의 調査方法: SCALE, CRACK GAUGE 등의 測定方法, CORE BORING法, 超音波 探查法등이며 균열의 分布, 進行性이 重要하고 깊이, 폭, 길이, 진행상황등을 季節的, 시간대별로 調査, 記錄한다.

○ 覆工變位 測定: 斷面測定, 內空變位 測定, 水準測量등의 方法으로 行하며 最近에는 레이저를



△ Geo-Radar 探查

利用한 各種 尖端 自動記錄 計測機가 實用化되고 있다.

○ 覆工두께, 背面 地盤狀況 調査方法으로는

— 非破壞 調査

• 打音檢査: 함마로 복공 表面의 타격시 打撃音으로 感覺에 의한 이상 有無의 簡易調査이지만 복공두께의 適正性, 背面空洞 有無, 剝離, 龜裂部 調査, 表面의 劣化狀況調査에 널리 利用

• CONC TEST HAMMER: CONC 表面에서의 反발거리로 強度

推定

• 超音波 측정기: 복공의 두께, 강도, 균열 깊이 등 측정

• 電磁機측정기: 복공의 두께, 공동의 유무, 누수 등을 조사하지만 아직은 신뢰도, 작업능률등의 개선이 요망

— BORING조사: 복공두께, 배면공동, 지질상태 등의 조사와 CORE로 강도, 劣化시험등의 試料로 利用

FORE-SCOPE: BORING내에 삽입한 FIBER-SCOPE으로 복공 배면상태를 관찰하며 최근에는 光FIBER를 이용한 FIBER-SCOPE가 개발

○ 覆工材料 試驗(覆工劣化 試驗) 方法으로는

— 室內試驗(BORING CORE사용)

• 地盤의 力學的 성질에 관한 각종 土質시험

• 覆工에 관한 시험: 強度, P.H. 中性化시험, 力學分析등으로 내구성, 劣化정도와 영향분석을 하며, 이중

* P.H. 시험-P.H.值가 5.0이하는

危險, 5.1~6.0注意, 6.7~7.9는 약간 安全, 8.0 이상은 安全

* 中性化 試驗(Phenolphthalein 反應: 表面에서 발생점까지 착색된 길이 測定)-中性化되면 鐵筋의 부식, 녹 발생으로 Conc체적이 팽창되어 균열이 발생

* 化學分析-水酸化 칼슘, 炭酸칼슘등의 함유량으로 Conc劣化상태 推定

- 알칼리 骨材反應: 骨材의 Silica와 시멘트와 水酸化 알칼리가 물과 반응 생성된 Alkali Silica Gel의 吸收로 팽창壓이 생기므로 균열의 발생 및 劣化가 요인.

○ 地盤 變位測定: 地盤變位로 터널內部 및 表面에 變位가 생기는데 地盤내부의 變位測定은 BORING內에 計測器를 插入, 軸方向 變位(傾斜測定-地盤滑動, 變位確認)로 隣接工事의 影響 監視

○ 覆工 補強法 檢討를 위한 調査: 補強材(支保工, ROCK BOLT)의 軸力 등 強度측정으로 作用效果의 判斷

○ 湧水等 地下水에 關한 調査

- 流量, 水溫, 水壓, 水位 調査: 覆工의 均열상태와 수압과의 상관관계를 확인, 복공의 보강 및 배수대책 수립에 참고

- 土砂流入 調査: 流入土砂의 種類, 量, 位置, 湧水의 유무, 流量의 調査와 필요시 背面空洞의 調査

- 水質 調査: 覆工의 劣化 가능성에 대한 판단을 위하여 水溫, 外觀, P.H, 알칼리度, 電導度, 10N상태 측정

- 이의 微生物 및 軌道틀림 등의 調査를 必要시 實施

마. 調査 結果의 整理 및 活用

檢査後 調査 및 計測結果를 정리하여 變壓의 위

치, 종류, 部位 規模, 進行성 여부의 결과치와 이에 대한 위치도, 전개도 및 사진등의 기록 관리가 중요하고, 또한 계측 결과치는 電算入力하여 安全度 評價, 對策 樹立등 維持管理 業務에 참고한다.

바. 安全度(健全度) 判定

검사결과를 세부적인 判定基準으로 判斷토록하고 變狀의 危害정도에 따라 등급을 정하여 보수시기를 결정하는 것이 중요하다.

○ 測定 區分: 變狀의 정도에 따라 구분, 等級을 정하며 조치계획을 수립한다.

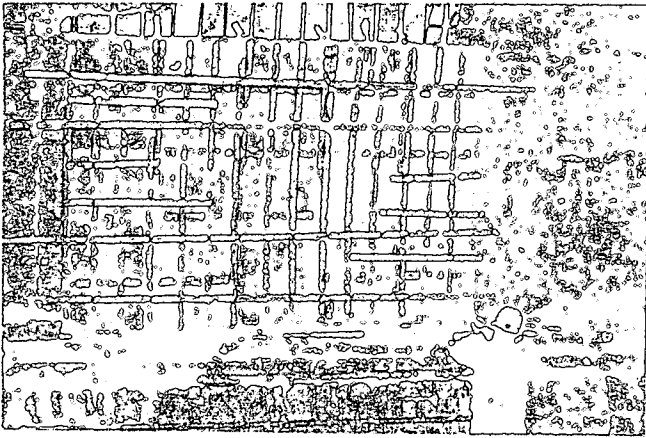
- 變狀이 重大하여 安全運行上 危險→即時補修

- 變狀과 機能 저하가 동시에 進行 異常 外力 作用시 위험→조속조치

- 變狀이 進行 기능저하의 우려 및 장래의 危害 要因→필요시 시기에 조치



◁ 覆工두께 不足 補強(平鐵板+ROCK BOLT)



◁ 覆工두께 不足 再施工(鐵筋, 거푸집 組立)

- 진행하면 안전에 지장 초래→감시하면서 필요 시 조치

- 경미하여 안전운행에 영향이 없음→충점적인 감시

○ 判定 基準 : 터널은 地中 구조물로서 自然 또는 人爲的으로 복잡하게 토압이 작용되므로 장래 예측이 극히 어려우며 變狀의 原因과 安全度 判定에는 풍부한 지식과 경험이 필요하며 다른 구조물보다 定性的, 定量的인 세밀한 判定기준을 설정, 지속적인 보완이 바람직하다.

3. 補修 및 補強 對策

진단시 變狀의 종류, 규모, 진행성등의 조사는 물론 變狀의 原因에 대한 정확한 分析 및 파악으로 이에 대한 적절한 對策이 강구될 수 있다.

가. 變狀原因의 推定

原因에 따라 나타나는 變狀狀態에는 특징이 있으므로 발생한 變狀現象의 정확한 파악과 지형, 지질, 환경조건등의 조사결과로 판단해야 하며 터널의 경우 대부분 外的, 內的 要因이 결합되므로 이

를 推定하는 데에는 터널 工學의 충분한 지식과 경험을 要한다.

나. 原因에 따른 補修對策

變狀의 原因은 주로 土壓(水壓)작용, 覆工의 劣化, 漏水로 크게 區分되며 각 사례의 原因 및 對策에 대하여는 개략적으로 다음과 같다.

다. 土壓 作用

(1) 事例別 要因

○ 外因 : 型性壓, 偏壓 및 斜面移動, 地盤活動, 地盤弛緩에 따른 鍊直壓, 地盤沈下 및 地耐力 不足에 따른 沈下 등

○ 內因 : 覆工의 構造的 결함(尖端部 背面의 空洞, 두께 부족, Invert 미설치 등)

• 地盤 與件 未考慮 補完設計 未洽

• 覆工의 既 變狀 및 劣化 發生

(2) 對 策

○ 原因을 分析하여 事例別로 補強 對策을 강구한다.

○ 構造的 缺陷 補完(배면 Grouting, 平鐵板 및 Rock Bolt 또는 支保工 補強, Invert 設置 등)

○ 覆工 Conc 部分 撤去 再 施工 또는 追加 打設 補強(建築 限界 여유가 있을때)

○ 地盤 Grouting 補強

○ 外的 原因 除去 즉 荷重 輕減 措置 등

라. 水壓 作用(在來式 터널등 完全遮汰式 터널에서 발생)

○ 外因 : 平時에는 터널에 거의 水壓이 작용치 않지만 지속적인 暴雨時에는 水壓이 急上昇

- 內因 :
 - 排水不良, 排水斷面의 부족으로 수압 증대
 - 복공 두께 부족 및 劣化, 側壁등의 구조적 결함
 - 복공 背面의 공극으로 受動土壓 작용
- 對策 :
 - 터널 內部-上部의 集水 개선에 排水路 및 盲暗渠 설치
 - 터널 外部-복공 주변에 有孔管 및 FILTER재 삽입
 - 排水路의 관경 확대 및 청소

마. 인접공사에 대한 事前 對策

- 外因 : 인접공사가 地下水位 저하, 地반 弛緩, 發破등 급격한 外力작용으로 터널주변 응력분포의 불균형
- 內因 : 既 變相이 있으면 再 발생 가능성이 높고, 구조적으로 弱화되므로 특별한 주의를 요하며 구조상 결함이 內在될 경우 위험하므로 충분한 사전조사 및 대책의 필요
- 對 策
 - 事前對策 : 터널에서 30M 이내 즉 영향권내의 인접공사시에는 공사로 인한 터널의 영향 分析 및 인접공사의 補完(土留 施設, 굴착방법, 지하수 저하 防止 GROUTING工등), 기존 터널의 變狀조사 및 補強, 계속적인 監視體制등에 대한 對策 강구
 - 工事中 : 계속적인 安全監視(觀察, 각종 計測器 設置, 필요시 精密 安全診斷), 단계적인 注意 施工

바. 覆工劣化 對策

(1) 原因 : 劣化는 장기사용에 따른 老朽化로 인식되지만, 누수와 관련되는 것이 많

으며, 또한 有害水, 鹽害, 煙害, 雪害에 의한 外的 原因과 單位시멘트量 부족, 품질불량, 알칼리 골재 반응에 의한 內的 原因으로 인해 발생되며 정확한 열화의 原因, 程度, 범위의 조사와 적절한 대책이 필요하며 앞으로 研究課題이기도 하다.

○ 長期使用 : 온도 변화에 따른 팽창 및 수축작용과 대기중의 CO₂가 CONC 중의 強알칼리성인 Ca(OH)₂ (P.H 12~13)와 결합하여 CaCO₃(P.H 8.5~10)이 되므로 알칼리성을 상실 中性化 되어 철근 부식의 原因이 된다.

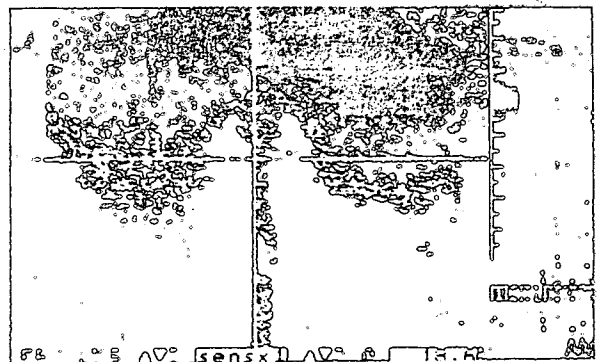
○ 漏水 : 中性化 原因

○ 有害水 : 有害物質이 함유되면 P.H值의 低下로 산성화

○ 凍害 : 凍結이 되면 체적이 9% 정도 증가되므로 CONC 引張強度 보다 팽창壓이 크면 균열이 발생

○ 鹽害 : 制염 부족 海砂의 사용, 海低터널등에서 海水의 누수로 염소와 나트륨 10N이 높아 水和熱과 반응, 劣化 生成物을 발생하여 알칼리 骨材반응과 철근이 부식되어 균열 발생 등 내구성의 저하 및 劣化의 촉진

○ 煙害 : 排氣가스의 질소산화물과 아황산가스가 누수로 용해되어, 초산과 황산의 강한 산성으로



△ 赤外線 熱畫像

되어 복공표면의 열화로 剝離, 剝落의 요인 및 알카리 反應등의 外的 要因으로 劣化가 發生한다.

○ 材質 및 施工不良 : 터널은 地盤과 覆工의 구속력과 온도변화가 다르므로 균열 발생이 용이하며, 또한 CONC 타설시 펌프로 壓送하므로 파이프가 막힐 우려가 있어 SLUMP值를 높임으로 單位水量이 많아 강도저하는 물론 硬化熱로 乾燥수축이 균열의 主원인이지만 철근 조립, 다지기, 시공이음 부등의 시공 불량등으로 품질이 저하되어 균열, 누수 및 劣化의 요인이 된다.

(2) 劣化覆工의 補修

劣化의 原因 및 깊이, 範圍등을 정확히 調査하여 補修工의 效果, 시공성을 고려하여 安全, 경제적인 공법을 채택한다.

○ 表面 清掃 : 열화의 원인이 되는 유해물질 제거

○ 撤去 : 落下될 복공조각, 표면의 국부적인 열화 개소를 제거하고 고분자재료(에폭시 수지)를 배합한 몰탈 충전 및 塗布

○ 平鐵板(平鋼) : 부분적인 열화(비교적 협소한 범위)는 劣化部를 坪鐵板(필요시 樹脂주입)등을 ANCHOR BOLT로 정착하여 補強

○ WIRE MESH : 부분적인 劣化(비교적 협소한 범위)로 터널단면의 여유가 없을때 표면에 WIRE MESH를 ANCHOR BOLT로 정착하며, 外力(土壓등)의 영향 고려 개소는 支保工, ROCK BOLT를 併用하면서 補強

○ 覆工(內卷) : 10m²이상의 광범위한 劣化部位는 狀態, 外力의 영향, 內空의 여유 등을 고려 SHOTCRETE나 CONC로 적의 보강

○ 補強支保工 : 적극적인 보강이 필요하고 內空의 여유가 있는 경우로서 支保工外 他 공법과 병용이 필요

○ 部分 改築 : 박리 등 劣化 정도가 현저하며, 깊게 영향이 있어 平鐵板으로는 불충분할 때에는 劣化 부분의 철거 및 CONC 置換으로 耐力, 耐久性 유지

○ 改築 : 터널 全 단면 또는 ARCH 및 측벽부에 걸쳐 광범위한 劣化가 현저하고, 복공의 기능을 유지하는데 他 공법으로는 곤란할 때 복공 제거후 再施工

사. 漏水 對策

누수는 韋도, 전기, 설비 등의 耐久年限 단축 및 機能 저하의 원인이 되며 특히 누수가 有害水인 경우와 凍結이 될 경우에는 劣化가 촉진된다.

(1) 조사 : 위치, 누수량, 수질, 온도 등의 조사는 물론 이로 인한 噴泥, 韋도재료 등의 부식, 토사 유입, 背水 不良, 복공 表面의 汚染 등에 관한 調査가 必要

(2) 보수목적 : 복공 등 각종시설의 내구성 및 기능유지와 계속 방치시 토사 유입으로 背面 空洞 형성에 따른 터널 안전성 확보 및 열차 안전운행 확보

(3) 공법 선정

○ 과거에 하자 보수한 誘導處理工(CONC 내에 排水管 매입)에서 장기간 누수로 인한 철근 부식으로 GEL상태의 水和物이 생성, 道床 자갈의 오염은 물론 耐久性에 문제가 있어 현재는 지양하고 있음.

○ 최근에는 균열부위에 시멘트系, 또는 高分子材料(에폭시 등)의 注入을 원칙으로 하고 있으며 수압이 상당한 개소는 부득이 부분적인 誘導處理排水工(鉛板, 銅版, PVC)을 CONC 표면에 설치하고 있으며 광범위한 누구 구간은 背面 注入工法이 바람직하다.

4. 地下鐵 構造物의 特性 및 維持管理上 考慮事項(問題點)

地下鐵 구조물은 주로 地下에 設置되어 있어 恒상 內的, 外的 影響을 받고 있으며 특히 계속 반복되는 전동차의 震動으로 타 구조물에 비해 安全運行 確保를 위해 恒常 點檢 및 維持 補修를 要하며 點檢 및 보수에는 많은 制限을 받고 있다. 즉,

○ 地中の 터널은 恒상 자연적, 인위적인 外力(토압, 수압, 발과진동) 작용과 동시에 계속 반복적인 전동차의 複線운행에 따른 진동으로 疲勞도가 증첩되고 있는 구조물로서, 變狀의 발생 및 擴大 가능성이 언제나 內在하고 있으므로 건설당시 품질 및 규격 미달(특히 복공두께 부족)과 배수처리 불량 등의 개소에서 개통된지 상당기간 경과한 후에도 구조적 문제는 물론 운행에 지장이 있을 정도의 變狀이 발생되어 長期間에 걸쳐 精密 安全診斷의 補修를 하여 왔고 앞으로도 계속 해결해야 할 課題이다.

○ 地下鐵 구조물의 危害 발생시에는 運行中斷 또는 列車 大型事故 유발로 사회적 물의 야기

○ 地下鐵 坑內 작업의 制限 조건

- 純 작업시간(영업종료후 深夜 3시간 정도) 및 작업공간의 制限(건축한계 제한, 각종시설의 설치)으로 보수작업의 품질 및 작업능률의 저하, 보수기간의 장기화 및 보수비의 과다

- 전동차 진동으로 균열, 누수 등 각종 變狀의 확대로 타 구조물에 비해 點檢 및 보수 물량의 계속적인 증가 추세

○ 運營을 充分히 고려치 않은 設計未洽 및 施工不實로 인한 구조적 취약(安全性 결여) 및 施設未備로 地下鐵 安全運行 저해 및 開通後 각종 改·補修工事 施行으로 豫算 浪費

5. 結 論

聖水大橋 및 大邱 地下鐵 붕괴사고 이후 施設物의 點檢 및 補修 등 安全管理의 必要性을 새삼 인

식하여 政府에서 '95. 1.15 法律 제4922호로 “施設物의 安全管理에 關한 特別法”의 制定과 '95. 6. 8. “地下鐵 安全管理 體系改善” 方案이 中央 安全點檢 統制會議에서 통과되어 地下鐵을 비롯한 시설물의 點檢보수 및 정밀 안전진단 등에 관한 강화 規程과 제반 安全管理 部문을 계속 개선하여 각종 運轉障礙나 사고를 예방토록 하였다.

그러나 이러한 制度 마련도 중요하지만 효율적인 安全管理을 위하여는 이를 實踐하기 위한 政策的인 配慮와 自體 努力이 必要하다고 본다.

- 傳門의인 人力確保 및 效率的인 維持管理 組織 精銳化

- 各種 尖端 檢査 및 補修 裝備의 保有

- 維持 補修費를 포함한 充分한 豫算確保

- 各種 施設物의 點檢 및 補修 등 細部 維持管理 標準 指針書 制定

- 從事員에 대한 專門教育, 訓練 機關의 育成 및 地下鐵 技術 研究所 設立

- 建設時 運營을 充分히 考慮한 補完的인 設計 및 완벽한 施工

- 建設時 脆弱個所(河川, 大型施設物 등 通過) 常時 監視體系(計測器) 設置의 義務化

- 앞으로 地震에 對備한 既存 施設物의 影響 評價 및 補完策 강구

그러나 무엇보다도 위의 여건을 造成하려면 이에 대한 財政확보가 필수적인데 現在 서울 地下鐵公社의 경우 地下鐵 1~4號線의 負債性 資金 建設로 '94年 末 2조 9,091억원의 負債로서 外國처럼 政府의 재정 지원 또는 지하철 요금 現實化가 이루어져야 겠다.

또한 그동안의 유지관리 경험에 비추어, 매년 유지 보수비가 급증하고 있는 현실에 비추어 볼 때 씨를 뿌린대로 거둬들인다는 自然法則을 받아들이는 겸허한 자세로 앞으로는 百年大計를 위하여 충분한 기간과 예산으로 철저한 설계, 완벽한 시공, 사망감있는 감리, 감독 및 정성드린 시공자세가 절실하며 각자 자기반성과 다짐이 무엇보다도 중요하다고 생각된다.