

日本の NATM 施工*

New Austrian Tunneling Method

技術士 角屋豊樹

NATM Execution in Japan

by Kadoya Toyoki. P.E.

Abstraction

NATM technic had been applied to Nakaya tunnel of Sin kan express R.R lines in 1975. on the worst expandable geological conditions, application of NATM method was carried out good result.

Measurement data which include convergencymeter, inclinometer, extensometer load-cell, strain gage data of shotcrete stress and steel arch. was explained with slides.

Induced NATM technic has been improved since 1975 as follows, specially adhesive method of shotcrete instead of spray method such as tunnel swift lining Sliding press lining, clean lining by pumping and sweeping kote lining ets.

1. 日本에 있어서 NATM 導入의 經緯

1. 日本의 터널 地質의 特徵

日本은 플레이트 테크닉스 理論에서 말하는 아시아 大陸을 包含한 유라시아 플레이트와 필리핀海 플레이트, 太平洋 플레이트의 境界部에 位置하기 때문에 韓國과는 달리 대단히 複雜한 地質로 形成되어 있다.

다시말해 冲積層, 洪積層, 古生層이 뒤섞인 地震이나 火山도 많다는 特徵이 있다. 또한, 平野部의 대부분은 冲積層의 軟弱地盤이기 때문에 실드(Shield) 工事의 施工延長은 世界 第一이라 일컬어진다.

한편, 山岳터널 地質에 있어서도 膨脹性 山地이며 硬岩山地이고 軟弱山地로서 대단히 變化에 多様な 地質로 되어 있다. 이렇게 複雜한 地質인데다가 나아가서 터널坑口部는 軟弱한 崖錐層을 이루는 일이 많아 圓弧를 그리며 미끄러짐을 일으키기 쉽거나 地表를 陷沒시키거나 하는 施工中의 事故가 끊이지 않는다. 또한 崖錐層을 突破後의 基岩層도 地質의 變化가 대단히 激甚하며 斷層이나 크리크 및 地下水의 湧出에 의하여 施工이 잘 進陟되지 않는 境遇가 많다.

2. NATM 導入의 經緯(※ New Austrian Tunneling Method)

여기에서는 어째서 日本에 NATM이 導入되었

* 本 報文은 9月 4日 角屋技術士를 本學會가 招請 서울市地下鐵建設本部講堂에서 現場監督官 80名에게 敎養講座를 實施한 內容이다.

는가에 대해 言及해본다.

우선 日本에 本格的인 NATM이 導入된 것은 上越新幹線·ナカヤマ(中山)터널(혼슈[本州]의 中部山岳地帶)竣工으로, 1975年頃に 導入된 것이다.

이 나카야마 터널은 在來工法으로(上部半斷面 先進工法) 掘進이 不可能하게 되었다. 이러한 困窮에 처했기 때문에 갑작스럽게 록볼트, 附着 콘크리트를 主體로 하는 NATM 工法이 採用되었고, 強膨脹性 山地를 突破하여 警異의인 成功을 거둔 것이다. 이것을 契機로 하여 以後의 國鐵(現在의 JR) 工事局의 各地에서 試驗工事が 施行되고 NATM의 實績이나 施工노하우 習得에 專念한 것이다. 이러한 經緯를 거친後에 日本 道路公團에 있어서는 標準工法으로서 NATM을 規程하고 實質的인 在來工法을 禁止한 것인데 道路公團의 膨大한 터널 工事施工延長의 影響은 커서 急速度로 國鐵·建設部·市道府縣廳으로 普及되어 現在 NATM은 日本의 標準工法으로서 定着하였고, 膨脹性山地, 硬岩山地, 軟弱山地 등 모든 山地에 採用되고 있다.

3. 在來工法과 NATM의 差異

工法區分	支保型式	支保理論
[在來工法]	H支保鋼~木矢板	厚肉覆工~剛性支保理論
	※2次覆工 콘크리트 두께(30~70cm) H支保鋼-125~200H, 木矢板-1~5cm	
[NATM]	록볼트, 附着콘크리트	薄肉覆工·柔性支保理論
	※2次覆工 콘크리트 두께(25~35cm) 附着콘크리트두께-5~20cm, 록볼트길이-2~6m	

兩 工法의 決定的 差異는 NATM이 山地의 潛在支保能力을 록볼트와 附着 콘크리트의 柔軟한(Flexible) 支保工形式에 의하여 이것을 積極的으로 利用하고 있는 極히 合理的인 工法이라는 것이다.

이 山地에 密着한 附着 콘크리트와 록볼트의 作用에 의한 터널의 最終 安定을 計測에 의하여 確認하고 나아가서 2次覆工 콘크리트를 附着方式으로 設置함으로 山等面에 빈틈이 없는 山地에 密着한 터널이 된다.

이와같이 山地에 密着한 터널이 되기 때문에 在

來工法과 같은 山等面의 빈틈에 起因하는 2次覆工 콘크리트의 破壞는 모두 없어져 耐久性的인 터널이 된다.

4. NATM이란...

NATM이란 ①附着 콘크리트, ②록볼트, ③計測의 三要素로 이루어져 있다고 한다.

日本에서는 1960年代頃부터 附着콘크리트, 록볼트의 施工은 個別的으로는 施工되고 있었으나 計測까지 包含한 綜合的인 생각은 전혀 없었다. 특히 計測의 생각(思考)은 在來工法에 있어서는 전혀 不在하였었다.

이와같이 NATM은 단순히 附着 콘크리트나 록볼트를 設置하기 위한 工法이 아니라 NATM의 創始者 뮤러博士나 골더教授의 말과같이 「NATM은 工法이 아니라 概念」이므로 이 한마디로 縮約할 수 있다. 즉 附着 콘크리트나 록볼트를 施工하지 않아도 山地의 힘을 合理的으로 利用한 工法이면 모두 NATM이라 하여도 過言은 아니다.

2. NATM 設計法의 變遷과 그 概要에 대해

NATM이 導入된 1975年代는 컴퓨터에 대한 지나친 期待를 품게되어 이 컴퓨터를 利用한 FEM 解析이 急速度로 進歩한 時期이기도 하다.

그러나 航空機나 工作機械, 鋼構造物과 같은 均質的인 素材를 다루는 것에 대해서는 成果를 거두었으나 터널 地質같은 不均質한 對象을 다루는 境遇에서는 計算의 精度를 아무리 높여도 現實的인 成果는 얻을 수 없다.

예를들면 NATM 設計計算에 있어서 當初의 컴퓨터 프로그램은 바위를 彈性으로 取扱하고 그후에 粘性和 塑性을 考慮한 FEM 프로그램으로 進歩하여 메쉬(mesh)도 細細하게 자를 수 있게 되었으나 결국 現場에서 도움이 되는 成果는 얻을 수 없었다.

그 理由를 列舉하면 아래와 같이 된다.

①日本의 地質은 均質하지 않기 때문에 入力하는 物性値와 實際와의 乖離가 크다.

※터널 縱斷方向의 地質變化가 激甚하며 또한 같은 막장 斷面이라도 左右·上下에서 地質

이 변화하는 등 일정하지 않으며 게다가湧水·crack·斷層·膨脹性岩 등의 力學性を評價하는 手段이 없기 때문에 FFM(Finite Element Method)에 의하여 컴퓨터로 아무리精密하게 計算할지라도 無意味하게 된다.

②岩石은 成層狀態나 壓縮方向 및 褶曲에 의하여 異方性이 있다.

※요컨대 縱橫方向의 力學特性(壓縮特性)이 크게 달라지는데 이것을 定量的으로 評價할 수 없다.

③특히 軟弱山地의 境遇, 막장은 時間과 함께 서서히 力學特性이 變하는데 이것을 計算에 넣기 위한 定量的인 評價를 할 수 없다.

④微小한 試驗片의 測量値와 實際의 막장物性値가 크게 다른 것.

※콘크리트 같은 것조차 테스트피이스와 實際로 들어간 強度에는 差가 있는데 이것이 바뀌라도 된다면 飛躍的으로 커져 막장地質의 正確한 物性値를 구하는 것은 不可能하다.

이러한 施行錯誤를 거친후 現在는 미리 A~D 타입의 標準支保型式을 規定해 두고 다음에 터널루트의 彈性波探查에 의한 地質縱斷面을 基本으로 한 각 타입의 施工延長을 決定하고 있는 것이

實態이다.

따라서 現場에서 當初의 規定과는 다른 境遇에는 發注者와 施工者가 協議한 후 優先 타입別의 施工延長의 增減을 考慮하며, 그래도 對應할 수 없는 境遇에는 各 타입에 枝番號를 매긴 支保型式을 定하여 對應하고 있다.

3. 附着콘크리트의 役割과 附着方式에 대해

1. 附着 콘크리트의 役割

NATM에 있어서 時間은 支保工의 重要한 要素(팩터)이다. 즉 掘鑿後의 時間經過에 따라 山地는 점점 弛緩되어져 버려 軟弱한 山地라면 무너져 내려 膨大한 地壓을 發生시킨다.

NATM의 基本은 山地가 지나는 潛在支保能力을 利用하기 위해 「緩和되지 않고 變形시키는 것」이므로 現實的으로는 掘鑿後 可能한 한 빨리 附着 콘크리트 및 록볼트를 施工할 必要가 있다.

그래서 어느쪽을 먼저 施工해야 하는가 하는 問題가 되는데 1次附着 콘크리트를 可能한 한 早期에 施工하고 2次附着 以後에 록볼트를 施工해야 한다. 이 理由는 1次附着 콘크리트를 附着함으로써 落石의 防止, 凹凸部位를 매끄러운 凹形態로

표 道路 Tunnel의 標準設計 Pattern(日本道路公團)

地山 等級	掘 進長 掘鑿工法 (上半) (m)	Rock Bolt			鋼Arch支保工		뿔어 붙임 두께 (cm)	覆工두께(cm)	
		길이 (m)	施工間隔		上 半 部	下 半 部		Arch 側壁 部	invert 部
			周方向 (m)	延長 方向 (m)					
B	上半工法 20	3.0	1.5	2.0	無	無	5	30	0
C I	上半工法 15	3.0	1.5	1.5	無	無	10	30	0
C II	上半工法 12	3.0	1.5	1.2	H-125	無	10	30	0
C I	上半工法 10	4.0	1.2	1.0	H-125	H-125	15	30	45
D II	上半工法 10 以下	4.0	1.2	1.0以下	H-150	H-150	20	30	50

Pattern C I와 C II에 대해서는 岩質中 龜裂의 間隔方向 등으로부터 天端近岩이 崩落하기 쉬운 地質이 있느냐 없느냐를 判斷하여 使用해야 한다.

B=硬岩 C=普通岩 D I=軟岩 D II=風化帶

(註) Type A · 表面漏落防止의 附着 콘크리트, 록볼트는 없음.

B · 2次覆工 콘크리트 없음 또는 25cm 全斷面 掘鑿

C · 附着 두께 10cm 標準길이 록볼트, 2次 콘크리트 30cm, 쇼트벤치掘鑿, H鋼支保: 有, 無

D · 부착 두께 20~25cm 長尺록볼트, H鋼支保 있음, 쇼트벤치工法, 2次감기 콘크리트 20cm~35cm invert 있음.

만드는 것에 의한 應力集中의 防止, 바위의 風化 防止 등의 即效的인 역할을 擔當하기 때문이다. 이 점에서 록볼트는 山地가 서서히 變形하는 過程 및 膨脹性 山地와 같이 뒤에서 作用하는 山地 무게(荷重)에 대해 有效하다. 즉 록볼팅에 의한 그란트 아치형성 效果에 의해 山地應力에 對抗하기 때문에 順序로서는 附着 콘크리트의 다음에 施工 된다.

예를들면 強膨脹性 山地의 境遇에 內空變位 50cm 以上이 되면 附着 콘크리트는 薄利되고, 또한 록볼트도 서서히 떨어져 버리지만 山地에 남은 록볼트에 의하여 山地의 安定은 維持된다.

※ 이러한 鋼膨脹性의 山地에서 變位量이 큰 境遇에 NATM이라면 增加 볼트를 施工後, 比較的 쉽게 더 체메는 것이 可能하게 된다.

2. 乾式附着方式과 濕式附着方式의 比較

附着方式	壓縮強度	可使時間	品質管理	粉 塵	急結劑量
乾式附着	크다	길다	쉬움	많다	中位
濕式附着	中位	짧다	어려움	中位	많다

NATM 導入 當初附着方式(ALIVA 260)이 壓倒的으로 많이 採用되었고, 現在는 濕式附着方式이 많이 採用되고 있다.

이 理由는 市街地 附近의 터널의 境遇에 夜間施工이 不可能하기 때문에 生콘플랜트에서 供給을 받는데 드라이 반죽의 出荷는 特殊하게 되기 때문에 困難한 點 및 現場乾式 콘크리트 混練을 섞어갈 境遇에 많이 使用되고 있던 連續 mixer의 計量方式이 容積計量이며 또한 乾式附着의 境遇에 노즐 앞(前)의 添加水의 컨트롤을 사람이 하기 때문에 品質管理가 徹底하게 되지 않음으로서 發注者가 좋아하지 않은 境遇가 있다.

(國民性=潔癖性)

※ 現場 混合 플랜트의 所要 構造: 能力 25m³/時間 以上
 強制교반: 0.75m³ 以上 반죽, 連續 mixer CM 250 以上
 5m³ 積載 아지테이터의 積送時間 12分, 附着 能力 8m³/H

3. 스틸 파이버 콘크리트 附着方式에 대하여 SFRC(Steel Fiber Reinforced Concrete)

스틸 파이버는 通常 ϕ 0.5mm $l=40$ mm, 混入量 1%/m³이 터널 附着에 施工되고 있다. 물론 보다 굵고, 길고, 大量으로 콘크리트에 混入하는 쪽이 效果의임은 말할 나위도 없다. 吸着 콘크리트에 이 스틸파이버를 混入하는 境遇의 問題點은 파이버의 均等한 分散性 確保, 섞어 갈때의 스틸 몰의 發生問題處理, 費用上昇(코스트업)等 多様な 技術的인 問題와 經濟的인 問題이다. 確實히 스틸파이버를 混入함으로 韌性이나 구부림의 強度가 改善되기 때문에 「금이가고 갈라짐」은 적어진다. 그러나 이들의 強度가 改善되었다하여 SFRC 附着 콘크리트의 附着두께를 얇게 할 수 있다는 생각은 잘못이다. 왜냐하면 附着 콘크리트는 어느정도 두텁게 내뿜으로서 터널 外周壁面의

凹凸을 平面하게 하여 아치形狀의 改善을 꾀하고 應力集中을 防止하는 그란드 아트 形狀을 꾀한다고 하는 重要的인 役割이 있기 때문이다. 따라서 스틸파이버 附着은 強膨脹性山地라던가 軟弱山地에서 山壓이 특히 큰것등 特殊한 部分에만 使用해야 할 것이다.

4. 록볼트의 種類와 附着方式에 대해

1. 록볼트의 種類

④鐵筋加工型: 3m 程度의 短尺 록볼트가 많다.

⑤트리스트 型: 4~6m의 長尺 록볼트가 많다.

③自穿孔式 앙카: 崩落性產地 단, 費用上昇이 된다.

④그라스 파이버 볼트: 막장面 打設用(掘鑿時 妨害가 되지 않는다)

一般的으로 3m 程度의 短尺 록볼트는 D25의 鐵筋을 先端加工하고 다른 끝을 나사 切斷 加工하여 使用하는 境遇가 많다. 그러나 4m를 超過하는 長尺 록볼트나 產地에 따라서 모르티즈의 脫水에

의하여 볼트의 插入抵抗이 增加하는 境遇에는 트 위스트볼트(스파이럴 型)을 使用하는 境遇가 많 아진다.

2. 록볼트의 定着方式

록볼트의 定着方式은 當初에는 壓力탱크에 의 한 모르타르 加壓方式이었으나, 現在는 로타리 펌 프에 의한 모르타르 壓入方式이 많이 使用되고 있 다. 여기에 대해 사이클타임의 短縮을 피하기 위 하여 캡셀에 넣은 모르타르를 使用 直前に 舍水시 키고나서 穿孔內에 插入하고 이 뒤에서 록볼트를 打撃으로 밀어넣는 方法도 있다. 이 록캡셀 方式 은 안이하게 使用하면 孔內(구멍內)에 틈새기가 생길 憂慮가 있다. 그러나 湧水山地로서 모르타르 壓入方式으로는 流失해 버릴 境遇에는 이 록캡셀 이나 레진方式이 適合한 境遇도 있다.

요컨대 穿孔內의 全體에 確實하게 모르타르가 充填하고, 또한 사이클타임이 적은 施工이 理想的 인 일은 말할 나위도 없다.

5. 計測의 種類와 計劃에 대해

1. NATM 計測의 種類

이상하게도 在來工法에 있어서는 이 計測의 概 念은 완전히 漏落(缺落)되어 있다. 즉 「感」이나 「느낌」 「經驗」으로 工學的인 요소(定量的인 要素) 따위는 전혀 없었던 것이다. 따라서 素堀의 터 널이라도 計測(空間變位測定)만을 해 넣으면 NATM 터널이라고 하는 사람도 있을 정도이다. NATM 導入 當初의 試驗工程에 있어서는 아래와 같은 여러 種類의 多樣한 計測이 施行되었다.

① 內空變位 測定: 卷末·內空變位(時間~變位 曲線) 圖表參照

※ 이 計測은 터널 壁面間의 距離를 1/10mm 程 度の 精度로 測定하고 壁面의 收縮(擴大의 事 例도 있음) 長을 測定한다. NATM 에서는 簡 單하고 가장 有效한 測定이며 다른 測定을 全 部 省略해도 좋으나 內空變位測定을 省略해서 는 안된다.

② 地表變位抗測定: 日本과 같이 坑口部 軟弱 山地의 境遇에는 坑口部의 지면미끄러짐에 가장 主意를 요한다. 이때문에 坑口 中心線上의 地表面 에 5m 피치 程度에 木杭을 박아넣고 이 杭標高와 大韓火藥技術學會誌

傾斜距離를 測定하여 地上의 變位를 調査하여 아 는 方法으로 ①과 마찬가지로 費用對效果가 優秀 하다.

③ 天端沈下測定: 특히 軟弱山地로 扁平斷面 (터널內의 非常駐車帶 擴大斷面, 터널內의 驛部分 等)의 境遇에 아치天井의 隆起現象이 일어나 이 것이 限度에 달하면 崩落하므로 天端測定이 重要 하게 된다.

測定方法에는 內空變位測定用的 볼트를 利用한 四面(三角側線)距離를 測定하는 方法이 있지만 直接 아치天端보다 리스틸 테이프를 내려 레벨로 읽는 편이 確實하고 正確도 높아진다.

④ 록볼트 推力測定: 록볼트의 推力을 스트레 인 게이지에 의하여 測定하는데 理論的인 피드백 은 期待할 수 없다. 또한 만약 볼트가 破斷하여도 터널이 즉시 壓壞하는 것이 아니며, 破斷(一般的 으로 入口部分에서 切斷)한 남은 땅속(地中) 록 볼트 效果에 의하여 그란드 아치가 形成되어 새로 운 安定을 얻을 수 있다. 록볼트가 破斷하는 程度 의 應力이 發生하면 內空變位는 50cm 以上으로 變位가 커지므로 결국 內空變位測定만으로 족하 게 된다.

⑤ 地中變位測定: 앞에서 言及하였듯이 地質은 一定하지 않기 때문에 地中變位를 測定하여 測定 値를 얻어도 아무런 效果도 없는 境遇가 많다. 즉, 이것도 地中變位가 커지면 당연히 內空變位도 커 지기 때문이다.

⑥ 覆工應力測定: 이 附着 콘크리트의 應力測定은 전혀 아무런 意味도 지니지 않는다. 즉 附着 콘크리트의 壓縮力이 커지면 最弱部에서 壓壞하 므로 計器가 없어도 쉽게 判斷할 수 있기 때문이 다.

⑦ 支保工應力測定: H支保工의 應力을 測定하 여도 이것도 전혀 效果가 없다고 할 수 있다. 附着 을 하여도 H支保鋼의 뒤는 틈새기가 남고 H鋼에 應力이 걸리는지 아닌지는 모두 偶然에 의해 作用 되는 問題이다.

2. NATM 計測計劃

前項에서 前述한 바와같이 가장 效率的인 NATM의 計測計劃은 內空變位이며 다음으로 日 本과 같이 軟弱山地인 坑口의 地表變位杭測定을

가한 計測시스템이다. 具體적으로 말하자면 터널 縱斷方向 20cm 피치마다에 內空變位用的 볼트를 메워넣고 山地가 變化(軟弱화)한 境遇에는 補助計測斷面을 設置하는 것이다.

여기에서 특히 注意해 두고 싶은 것은 內空變位測定用볼트는 掘鑿後 可能的 한 早期에 裝置하고 初期值를 몇번이고 測定하여 統計處理를 하는 것이다. 이것은 初期의 變位速度를 把握하는 것보다 正確한 判斷을 할 수 있는 資料로서 重要시 되기 때문이다. 測定項目을 重要度에 따라 區分하면,

◎ 반드시 행해야할 가장 重要的 計測: 內空變位測定, 地表變位杭測定(坑口部·흙表面이 얇은部分), 天端沈下測定(※ 특히 軟弱扁平山地)

-費用과 時間이 있으면 행하는 편이 좋은 計測: 록볼트 推力測定, 地中變位測定(※ 단, 有用한 데이터는 얻을 수 없다.)

-不必要的 計測: 覆工應力測定, 支保工應力測定

6. 特殊 NATM에 대해

NATM은 前述한 바와같이 鋼膨脹性산地的 對策工法으로서 導入되고 그후 標準工法으로서 規定되고나서 順次的으로 硬岩山地→軟弱山地→特殊部分으로 適用範圍가 擴大되었고, 그때문에 여러種類的 特殊施工 NATM이 採用되어 施工되게 되었다. 그 代表的인 特殊 NATM이 中壁式 NATM法이다.

新幹線·高速道路 터널등의 大斷面(70m²以上)으로 軟弱山地 혹은 扁平斷面 터널등의 施工에 즈음하여 막장을 左右 2斷面으로 分割하고 한편을 先行하여 施工하고 다른 한편을 中壁(假壁)으로 한다. 以後에 남은 斷面을 中壁撤去와 함께 掘鑿한다고 하는 工法이다. 즉, 加背을 2分割하여 先

行터널의 그란드 아치를 中壁에 의하여 臨時 閉合하고 安定시켜 以後에 先行터널에 오버랩을 하여 남은 斷面을 施工하고 最終斷面의 그란드 아치에 다시 쌓는다는 工法이다.

7. 日本에 있어서 最近의 NATM 話題에 대해

NATM의 施工經驗자는 누구든지 附着 콘크리트 施工의 猛烈한 먼지(가루)에 대해 어떻게 할 수 없는가 하는 疑問을 느끼리라 생각한다. 이 附着 콘크리트의 먼 가루와 「rebound」 콘크리트에 의한 損失의 減少를 생각 하는 것은 當然하다고 할 수 있다. 이러한 생각을 基盤으로 「附着」이 아닌 壁面に 「감기」로 한다는 思考의 轉換을 꾀하는 움직임이 具體化되어 왔다. 이것을 日本道路公團에서는 NTL(New Tunnel Lining)라 命名하고 中部地帶의 ナカノ縣(長野縣), にひんまつ(日本松)터널에 있어서 아래 4種類的 NTL 工法の 試驗施工을 행한 것이다.

① TSL(Tunnel Swift Lining)工法: 鐵建建設, 佐賀工業

※ 터널圓周方向移動거푸집~콘크리트 鑄어넣는 方式

② SPL(Sliding Press Lining)工法: フシタ·山支 工業

※ 터널圓周方向移動거푸집~콘크리트 流入 壓搾

③ CLP(Clean Lining by Pumping) 센틀 시스템·미쓰이(三井)建設·佐賀工業

※ 접는식 센틀거푸집~콘크리트 流入(홀려 집어넣음)

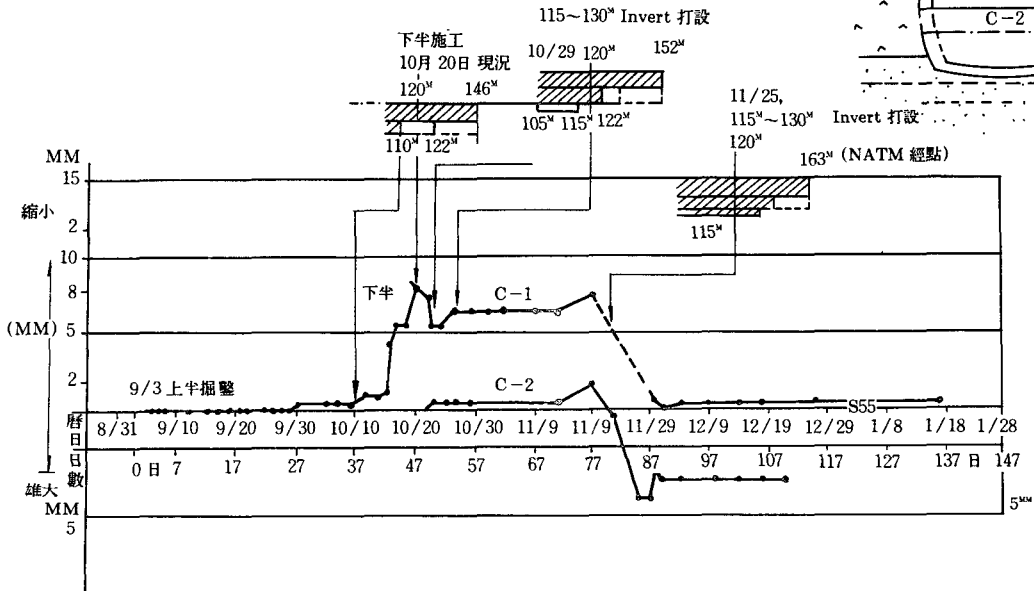
④ SKL(Sweeping Kote Lining)工法: 態谷組 小松製作所

인두(흙손)거푸집~콘크리트 바름

內空變位計

182^k 120^m (主計測點)

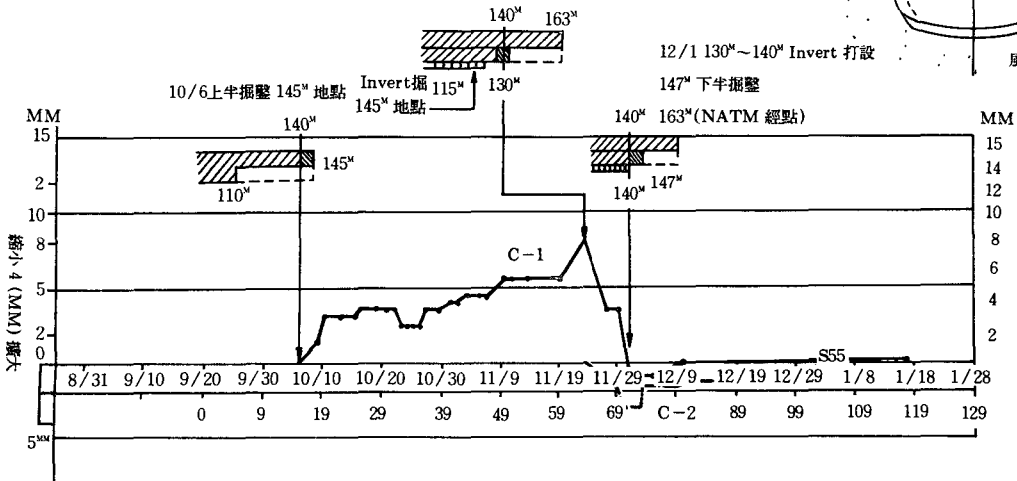
內空變位~時間曲線



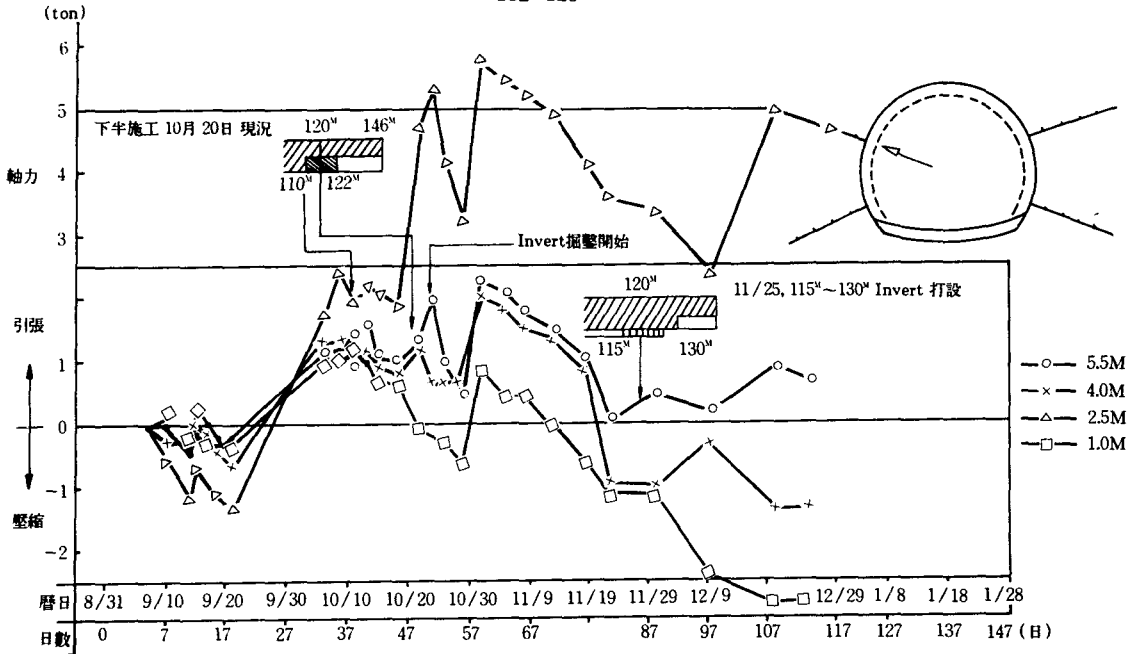
內空變位計

182^k 140^m (主計測點)

內空變位計~時間曲線



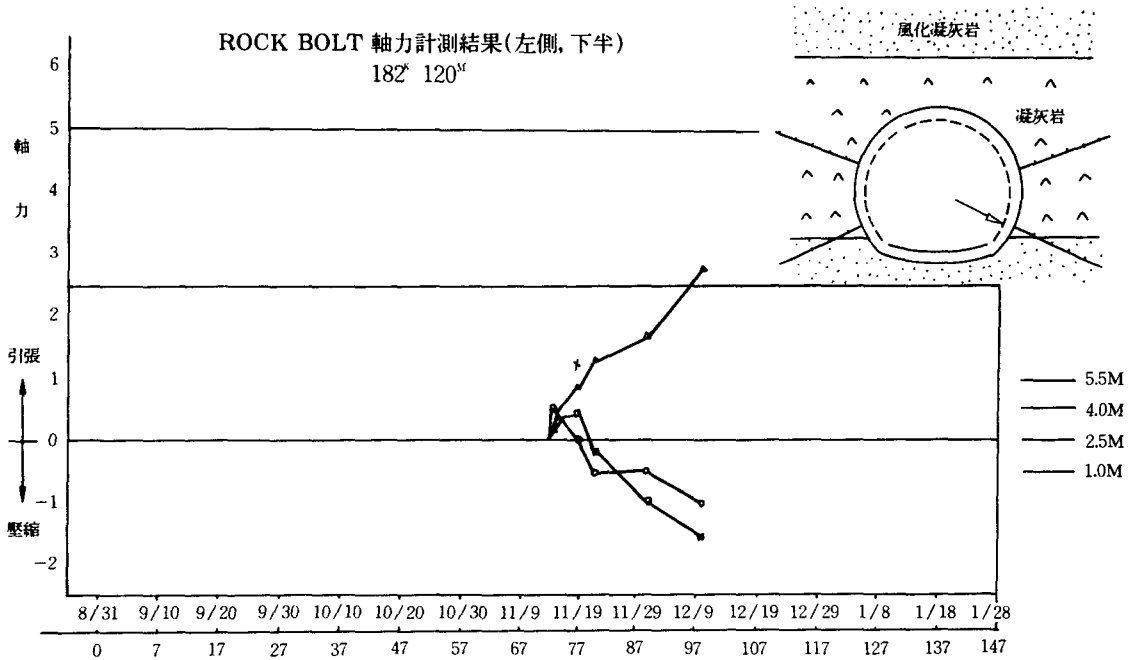
ROCK BOLT 軸力計測結果(左側, 上半)
182° 120°



備考: 天端 軸力計는湧水로 因하여 施工不可했다.

經過日數 및 曆日

ROCK BOLT 軸力計測結果(左側, 下半)
182° 120°



備考: 天端 軸力計는湧水로 因하여 施工不可했다.

Rock Bolt 軸力 分布圖
(182° 120°)

182° 120°

