

도시터널 공사의 안전시공(下)

(SHIELD 공법의 국내 정착을 위한 개선방안)

김 성 준
삼성건설(주) 이사
건설안전기술사

다음은 노동부 주최, 본협회 주관으로 개최된 (제5회 건설안전세미나)의 제1주제 발표내용으로서 지난 호에 이어 수록한다.

4. 일본의 Shield 공법 수준 및 현황

Shield 공법은 일본에서 가장 많은 시공사례를 가지고 있으며, 현재도 가장 발달된 Shield 기술을 보유하고 있으므로 본장에서는 일본의 Shield 공법 현황을 Shield 공법 및 Shield 기계의 종류별로 조명하여 봄으로써 국내 Shield 공법의 향후 발전방향을 제시하여 보고자 한다.

4.1 Shield 계획

많은 경험을 가지고 있는 일본으로서는 발주처별로 Shield 터널의 설계 및 시공기준을 가지고 있으므로 각 발주처별로 자신의 시방서를 기준으로 하며 자신의 시방서에 기재되어 있지 않은 사항은 토목학회 등의 시방기준을 준용한다. 또한 Shield 공법 자체는 수압 및 토압의 크기, 굴착심

도, 굴착대상 토질, 굴진거리, Shield 형태, 굴진 단면의 크기, 곡선반경 등 어떠한 조건에서도 적용 가능하다는 전제하에서 계획이 되고 있으며 또 시공이 되고 있다.

4.2 Shield 공법별 특징

4.2.1 장거리, 고속굴진형 Shield

1) 장거리 굴진에 대한 기술개발

- ① 내마모재료 사용
- ② 특수도금
- ③ 특수도장

2) 고속굴진에 대한 기술개발

- ① Segment
- ② Doule Erector
- ③ 진공흡착식 Grip
- ④ 후방대차상부의 Roller Conveyor에 의한 Segment의 자동반송

- ⑤ 동시 배면 주입장치
- ⑥ 고회전, 고 Torque
- 3) 고수압 굴진에 대한 기술개발
- ① 특수 Bearing Seal
- ② 특수 Tail Seal, Seal재의 자동공급
- 4) 고속굴진에 대한 기술개발
- ① Segment
- ② Double Erector
- ③ 진공흡착식 Grip
- ④ 후방대차상부의 Roller Conveyor에 의한

Segment의 자동반송

- ⑤ 동시 배면 주입장치
- ⑥ 고회전, 고 Torque
- 5) 고수압굴진에 대한 기술개발
- ① 특수 Bearing Seal
- ② 특수 Tail Seal, Seal재의 자동공급
- ③ 특수 Screw Conveyor
- 6) 그 외의 기술개발
- ① Roller Cutter, Cutter Bit 병용
- ② Chamber 내의 부착방지

4.2.2 급곡선굴진 Shield

급곡선시공을 쉽게 하기 위해서는 Shield를 곡선형에 일치시킨 형상으로 하여, Copy Cutter 등에 의한 여굴량을 줄이는 것이 중요한 포인트이다. 이러한 점으로부터 기계적으로 여러가지 방법이 개발되어 실용화되어 있다.

4.2.3 다원형 Shield 공법

- 1) Multi Face Shield 공법(MF Shield 공법)
- 2) DOT 공법

4.2.4 현장 타설 Lining 공법(ECL 공법)

4.2.5 기타 공법

- 1) 확대 Shield 공법
- 2) 지중접합 Shield 공법

4.3 굴진관리 및 자동굴진 시스템

4.3.1 Shield 자동방향제어

Shield 자동방향제어에서는 Shield 위치의計測, 方向제어와 Shield 推進 Jack 操作 System이 必要하다. 따라서 位置測定에는 Laser와 Gyro를 利用한 自動測量 System이, 方向제어의 解析에는 統計處理方法을 活用한 解析 System이, 또 Jack 操作에는 Gyro 制御 System 등 Shield 自動方向제어에 關聯된 制御機器와 制御手法이 開發되어 使用되고 있다.

- 1) Shield 위치의 測定
- 2) 方向제어의 解析方法

- (1) Fuzzy 理論
- (2) Culman Filter
- (3) 그 외 比例制御方式
- 3) AI를 이용한 自動방향제어

4.3.2 Segment의 자동운반 및 자동조립

- 1) Bolt 체결式 Segment 自動組立 Robot
- 2) Pin 체결式 Segment 自動조립 Robot

5. Europe Shield 공법 현황

5.1 Europe의 Shield 역사가 일본보다 앞서 있으며 다양한 장비의 발전이 병행 추진되었다. Hard Rock 굴착장비인 TBM의 아래와 같은 특징적인 기능요소들이 Shield기에 응용 적용되고 있다.

- Drill ring for advanced proving
- Drill ring for pregrouting

5.2 Shield 기의 굴진연장길이가 일본의 평균 연장길이의 약 4배에 달한다.

- 일본의 경우 : 약 2km/대
- Voest Alpine(Europe) : 약 8km/대

5.3 대형구경의 소구경화로의 추세를 감안해서

MODULE 설계, BOLTING 조작, SPACE 계획등을 사전검토해서 적용하고 있음.

5.4 다양한 지질조건에 적용 가능하도록 아래와 같은 기능을 부여한 Poly Shield기의 개발이 이루어져 있다.

- Cohisive clayer soil(loam, clay, marl) : EPB Shield
- Soil with no or low cohision(gravel, sand, silt) : Hydro Shield
- 기타 지하수위 상부토질 : Mechanical shield

5.5 Segment Type의 특징(CONEX SYSTEM)

- Taper Segment가 필요 없다.
- Mould 조작용이 필요
- Counetor의 특징
 - Dowel at Circumferential Joint
 - Guiding Rod at Radial Joint
- CONEX SYSTEM의 장점은 아래와 같다.
 - Simple Organization
 - Easy Production
 - High Precision Assembling
 - Reduced Parallelisation
 - Reduced Assembling Time
 - Reduced Mould Cast
- CONEX SYSTEM의 도입시의 효과
 - Segment 조립시간의 단축으로 전체공기의 단축 가능
 - 기계화 조작용이 가능하므로 현재 시행하고 있는 Bolting 조립인원의 1/2로 조립작업이 가능
 - 따라서 현재 일본에서 도입하여 설계, 제작한 Bolt Box System보다 Cost면에서 약 15% 이상의 절감효과가 기대되므로 Shield 공법 설계 시 본 CONEX System의 도입이 요구됨.
 - Back Up System의 일체화 및 단순화
 - Back Fill Plant

- Mud Injection System

6. 국내정착을 위한 개선점

국내에서는 아직 초보단계인 Shield 공법을 정착시키고 향후 늘어날 것으로 예측되는 Shield 공사의 성공적인 시공을 위하여 개선되어야 할 사항을 발주, 설계 및 시공의 단계별로 분류하여 보면 아래와 같다.

6.1 발주상의 개선점

- ① 1대의 Shield 기계로 성격이 판이한 지반을 굴진하는 계획은 피하는 것이 좋다.
- ② 작업구의 위치는 도로상에 설치하는 것을 피하여 자동차 통행에 장애를 주지 않도록 한다.
- ③ 설계심사는 Shield 공법 심의위원회를 별도로 구성하는 것이 좋다.
- ④ Shield 기계는 1개의 터널 굴진이 끝나면 기능상 또다른 공사에서의 사용이 어려우며 개보수비 또한 새 장비의 50% 이상 투입되어야 하므로 Shield 기계(Skin Plate)는 땅 속에 묻어버리는 것이 가장 경제적이다.

6.2 설계상의 개선점

- ① Shield 공법에서는 정확한 지반조사가 공사의 성패를 좌우하는 열쇠이므로 가능한 한 많은 지질조사를 실시한다(50m 마다 1공).
- ② 터널의 노선은 가능한 한 하나의 토층을 따라가도록 설계하며 民地를 통과하는 것을 피하고 가능한 한 도로 아래를 굴착하는 것으로 한다.
- ③ Segment는 평판형만이 아니고 터널의 목적에 따라서 적절하게 선택하여야 한다.
- ④ 단면이 적은 터널의 경우 Steel이나 Ductile Segment를 채용한다.
- ⑤ 대형 터널의 경우 일본의 관용계산법을 적용하면 Segment의 두께가 과대해지는 영향이 있으

므로 충분한 검토를 요한다.

⑥ 사행수정을 위한 Taper Segment를 5% 정도 반영시켜야 한다.

⑦ 인근에 지하매설물 및 주요구조물이 있는 경우 이들 구조물을 방호할 수 있는 시설(Underpinning 혹은 지반개량)을 설치한다.

⑧ 발진 및 도달부의 지반개량깊이는 Shield 길이보다 2m 이상 길어야 하며 강도가 너무 크지 않도록 공법을 선정하여야 한다.

⑨ Cutter의 교체는 중간작업구에서 실시하는 것이 가장 좋으며 지반 중에서 실시할 때에는 J.S.P 공법으로 지반보강을 하여 주는 것이 좋다.

⑩ 굴착토사가 산업폐기물로 취급되어 사토에 문제가 발생할 소지가 있으므로 가능한 한 Bentonite의 사용을 억제한다(기포 Shield나 이수압식 Shield를 권장).

⑪ 고함수비의 굴착토사가 배토되는 경우에는 고화 Plant를 설치하여 굴착토사를 고화시키는 것이 좋다.

⑫ 배면 주입재의 Cement는 조강 Cement가 적절하며 물유리는 점성이 낮고 Gel화 시간이 빠른 것을 사용한다.

⑬ 연약지반에서의 배면주입은 동시주입이 가장 바람직하며 동시주입을 실시할 때에는 Gel Time이 7-10초가 되게 배합을 정하여야 한다.

⑭ 초기굴진시의 소모성 자재를 모두 설계에 반영이 되도록 하여야 한다.

⑮ 계측시공이 반영되어야 한다.

6.3 시공상의 개선점

① 작업구는 가능한 한 적은 공간을 사용하여 시공이 가능하도록 계획되고 시행이 되어져야 한다.

② 선형의 관리를 위한 굴진관리 시스템을 채용하여 Shield 기계의 데이터를 얻을 수 있는 데이터 수집 시스템을 활용한다.

③ Shield의 Cutter Head에는 가능한 한 편압이 걸리지 않도록 Shield Jack을 조정하여야 한다.

④ Shield 기계의 조작 Pattern을 결정할 수 있는 계측을 실시하며 이 때에는 자동계측을 실시하는 것을 원칙으로 한다.

⑤ 지표의 침하 및 중요구조물의 거동을 측정하는 계측을 실시한다.

⑥ 토압식에서 배토방식으로 Muck Car를 Crane으로 끌어올리는 방법은 공정 Cycle상 문제가 있는 경우가 많으므로 충분한 검토를 하여 굴진된 토사가 빨리 반출이 될 수 있도록 한다.

⑦ 기포가 많이 함유된 토사는 Pump 압송이 어려우므로 주의를 요한다.

⑧ Disc Cutter의 교체는 7-8개의 Disc를 1개의 군으로 묶어서 일단 교체시에는 군별로 교체하는 것이 좋다.

일본터널공사의 재해사례 조사

1) 개요

- 1987년부터 1991년까지 5年間 死亡 災害 發生狀況(1987-1991)을 조사

- 調査資料(事例) 回收件數

| 種別 項目 | 山 岳 | 쉴 드 | 推 進 | 計 |
|----------|-----|-----|-----|-----|
| 災害事例 | 57 | 28 | 29 | 114 |
| 얇차事故 | 110 | 81 | 48 | 239 |
| 計 | 167 | 109 | 77 | 353 |

- 坑外 作業에서의 死亡發生 比率

- 山岳 25%
- 쉴드 29%
- 추진 0%

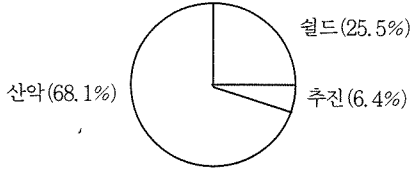


그림 1. 工事別 死亡災害 比率

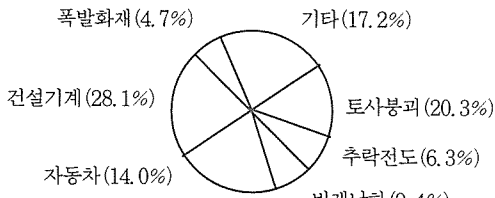


그림 2. 山岳터널 災害의 種類別 比率

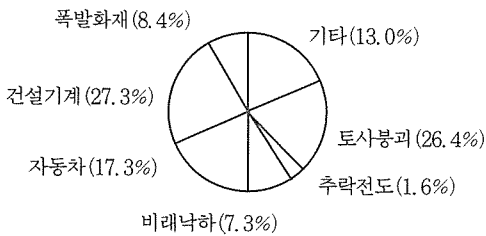
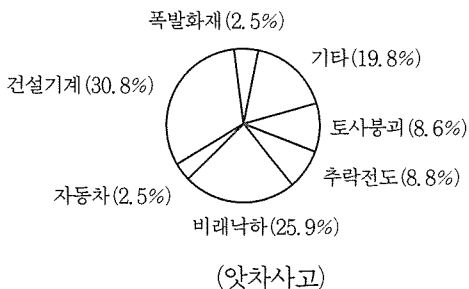
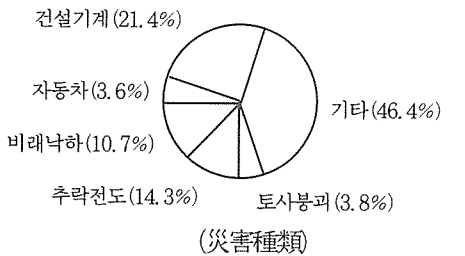
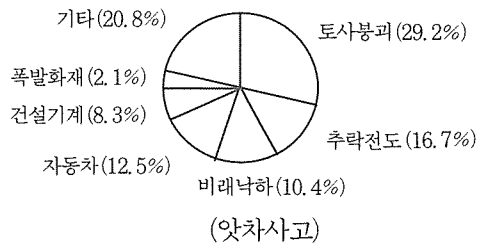
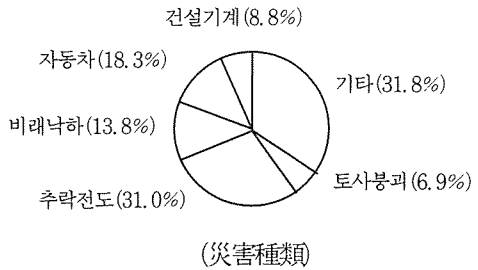


그림 3. 철도 推進災害 種類

2) 철도 工法

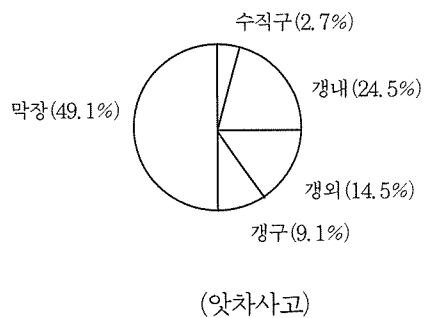
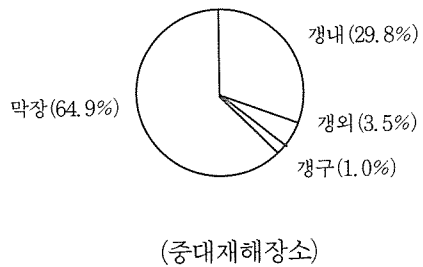


3) 推進工法

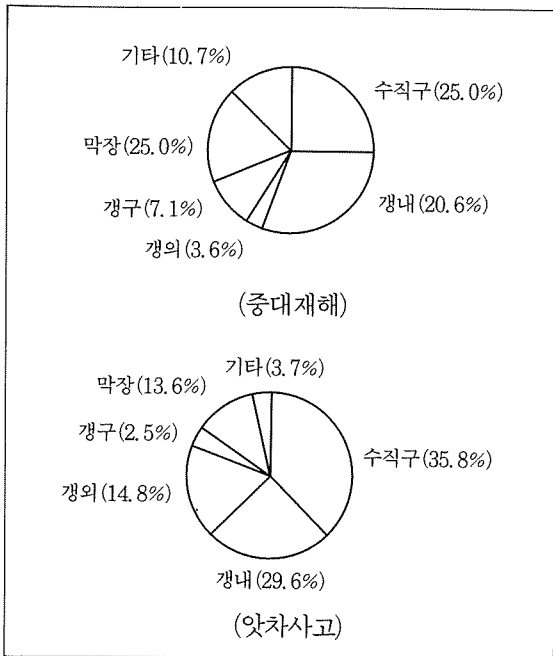


다. 발생場所

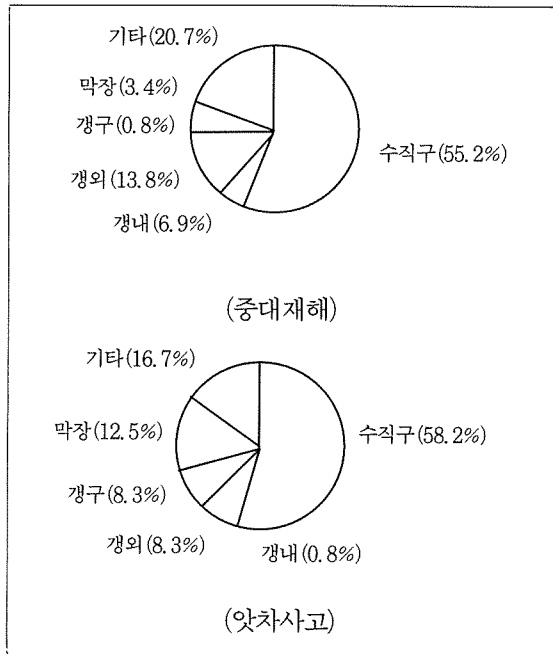
1) 山岳工法



2) 쉘드工法



2) 推進工法



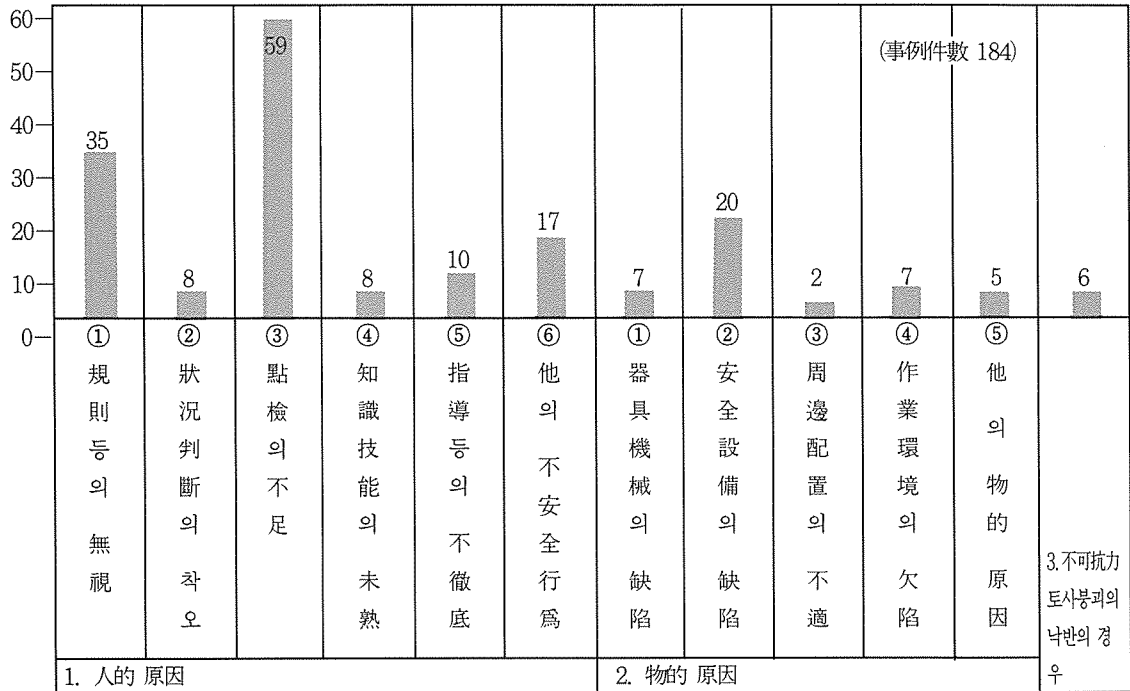
라. 發生原因

1) 山岳工法

〈重大災害〉

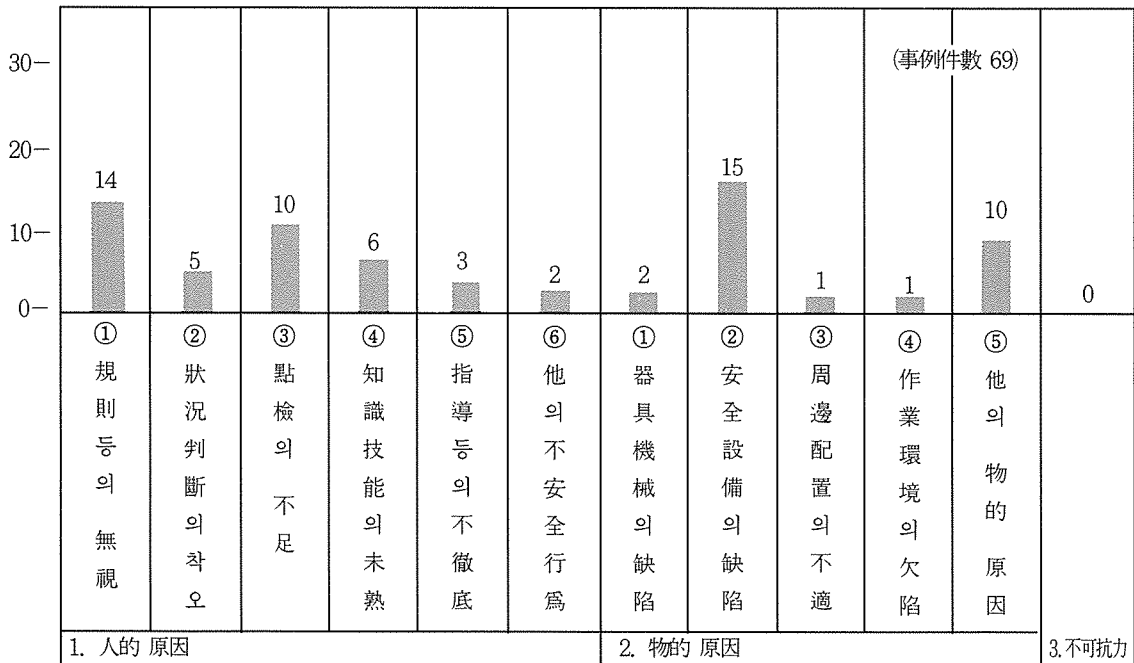
| | | | | | | | | | | |
|---------------------|----------------------|----------------|----------------------|----------------------|----------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------|
| 30 | 29 | 16 | 16 | 8 | 5 | 1 | 5 | 1 | 1 | (事例件數 116) |
| 15 | 12 | 7 | 5 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | |
| ① 規則 등의 無視 | ② 狀況 判斷의 착오 | ③ 點檢의 不足 | ④ 知識 技能의 未熟 | ⑤ 指導 등의 不徹底 | ⑥ 他의 不安 全行爲 | ① 器具 機械 의 缺陷 | ② 安全 設備 의 缺陷 | ③ 周邊 配置 의 不適 | ④ 作業 環境 의 欠陷 | ⑤ 他의 物的 原因 |
| 1. 人的原因 | | | | | 2. 物的原因 | | | | | 3. 不可抗力 |

〈앗차 事故〉

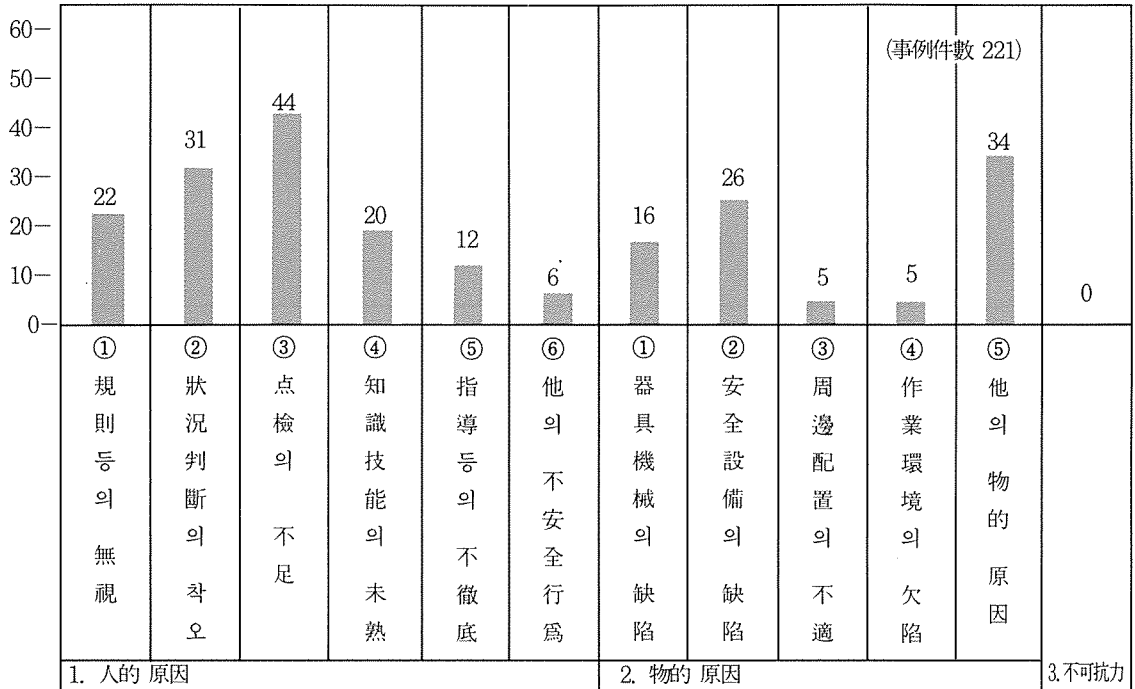


2) 설비工法

〈重大災害〉

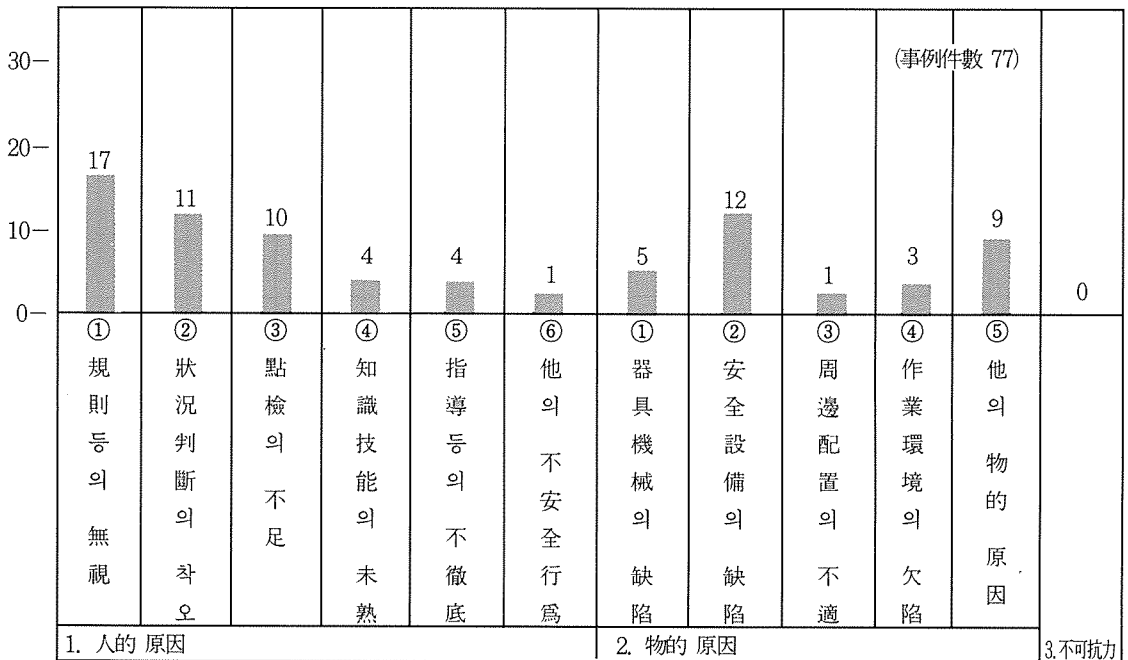


〈앗차 事故〉

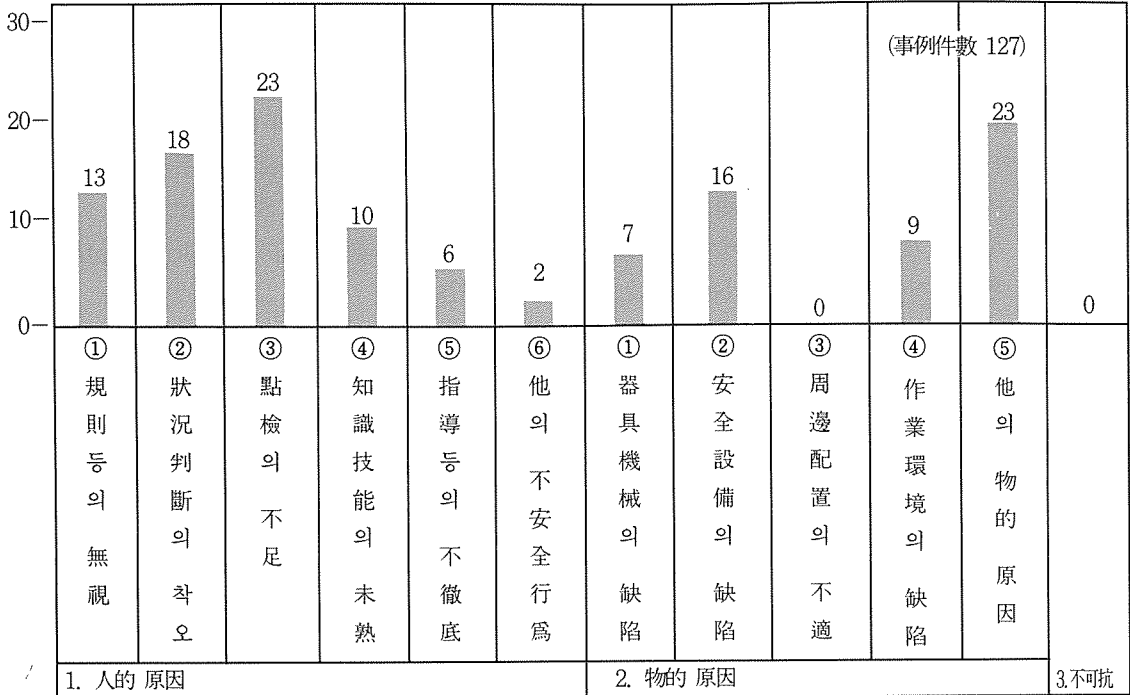


3) 推進工法

〈重大災害〉

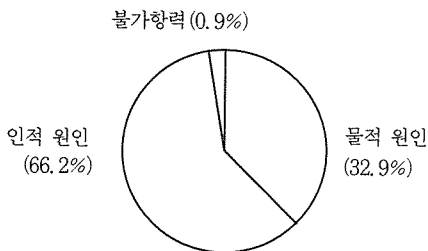


〈꺁차 事故〉

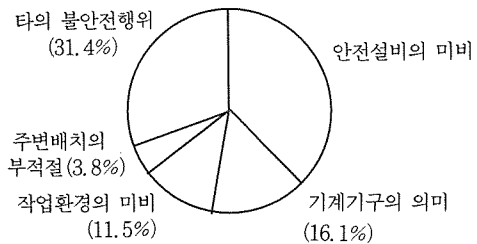


마. 터널공법의 災害原因 分析

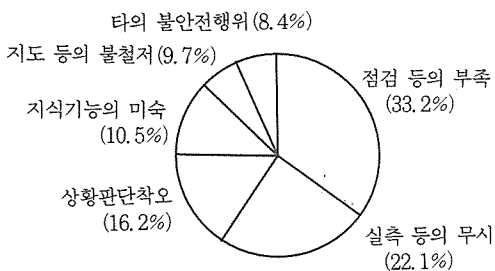
1) 災害原因(件數 794)



3) 物的 原因(件數 26)



2) 人的 原因(件數 526)



SHIELD 공법

1. SHIELD 工法の 概要

SHIELD 공법은 都市集中化로부터 필연적인 地下鐵, 電力溝, 通信溝, 上下水道, 가스管 등에 整備事業과 함께 發達한 施工法이다. 그리고

SHIELD 공법은 SHIELD 掘進機를 地中에 밀어 넣고 주변의 붕괴 방지를 위한 세그먼트를 지지시키면서 추진하는 방법이다.

SHIELD기는 지질조건, 시공성 및 경제성에 따라 그 종류가 다양하다. 개발 초기에는 개방형 인력굴착식이었으나 중적 연약층에서의 공사량이 증대하므로 어려운 공사조건에 대처하기 위해 개선, 개발을 계속해 개방형 인력굴착에서 기계굴착으로, 또한 환경문제에 대응할 수 있는 泥水加壓式 SHIELD 등으로 발전하였다. 그 이후 이수가 압식의 단점인 값비싼 PLANT 설비와 이에 필요한 작업장 등으로 인하여 泥土壓式의 개발로 이어졌다.

현재 일본의 경우 이수가압식의 이토압식

SHIELD가 여타 SHIELD 공법에서 점유하는 비율은 70% 이상이며 이중 각각의 비율은 30% : 70%로 이토압식 SHIELD의 비율이 높다.

SHIELD기의 구조는

- 前部 卽 Hood部の Cutting Edge
- 中間部 卽 Girder部の 구동장치
- 後部 卽 Tail部の Segment 組立

그리고 本體外殼部分인 Skin Plate로 構成되어 있다.

2. 工法の 歴史 및 우리나라 導入 現況

1) 우리나라 導入 現況

| 區 分 | 工 社 名 | 施 行 廳 | 施 工 社 | 工 事 期 間 | 工 事 金 額 | 掘削延長 | 工 法 | 製 作 社 |
|---------|--|--------|----------------|-----------------------|---------|--------|-----------------------------------|----------------------|
| 完 工 | <ul style="list-style-type: none"> ○ 부산 광복동 전력구 건설공사(토성동-광복동간) ○ 법원 앞 통신구 건설공사 | 한국전력공사 | 한 국 중 공 업 죽림건설 | '86.11- '89.1.25 | 37.3억원 | 1,033m | φ 3,280mm E. P. B | 日本小松 |
| | | 통신공사 | " | " | 13.6억원 | 416m | " | " |
| 進 行 工 事 | <ul style="list-style-type: none"> ○ 부산시 154KV 모라변전소-사상양수장 ○ 345KV 구포삼거리-감전충전소 ○ 부산시용호하수처리장 건설공사(차집관로) 문현동-용호동 ○ 부산시장립하수처리장 건설공사(차집관로) 폐법동-덕천배수장 | 한국전력공사 | 삼성건설 | '90.12- '93.12 | 70억원 | 940m | φ 4,350mm E. P. B(TBM경용) | 日本三菱 중 공 업 小 松 |
| | | " | " | '93.3- '95.12 | 465억원 | 6,745m | φ 5,030mm E. P. M | |
| | | 부산직할시 | 대우 반석 건설 | '92.12- '95.2 | 250억원 | 4,300m | φ 3,350mm E. P. B | 川 崎 |
| | | " | 삼성건설 | '92.12- '94.8 | 226억원 | 2,077m | φ 2,140mm 泥水加壓式 Semi-Shield | ISEKI |
| 추진공사 | 천안시 통신구 | 통신공사 | 남광토건 | '93.7- '95.9 | 130억원 | 900m | φ 3,060mm E. P. B | HITACHI |
| 추진공사 | 천안시 통신구 | 통신공사 | 범양건영 | '94.5.24- '96.8.10 | 102억원 | 1,080m | φ 3,050mm E. P. B | 미 정 |

2) 歷史

- 1818 Marc Isambard Brunel 考案
- 1825 런던 테임즈강 하저 터널 최초 시공
- 1939 일본에서 철도 터널에 처음 시공
- 1986 우리나라 부산 광복동 전력구 공사 처음 도입

3. 工法의 特徵

- 광범위한 土質에 적응한다.
- 막장 안정에 높은 신뢰성을 발휘한다.
- 주변 지반의 변형을 최소화한다.
- 토사의 배출을 원활하게 한다.
- 배출토사는 자유로운 방법으로 수송한다.
- 기계에 무리없이 굴진한다.

4. 工法의 長·短點

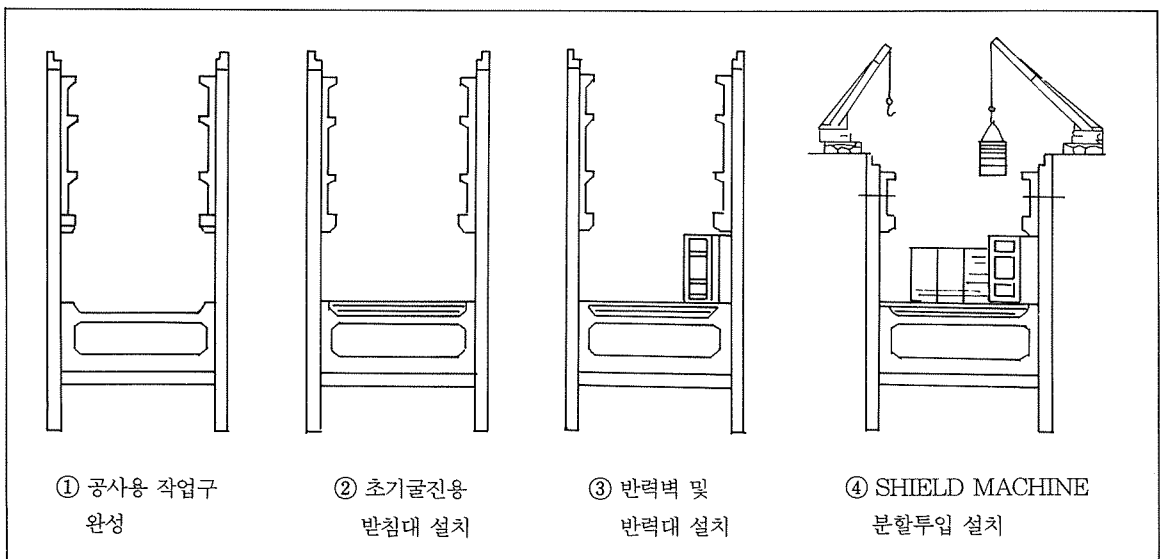
1) 長點

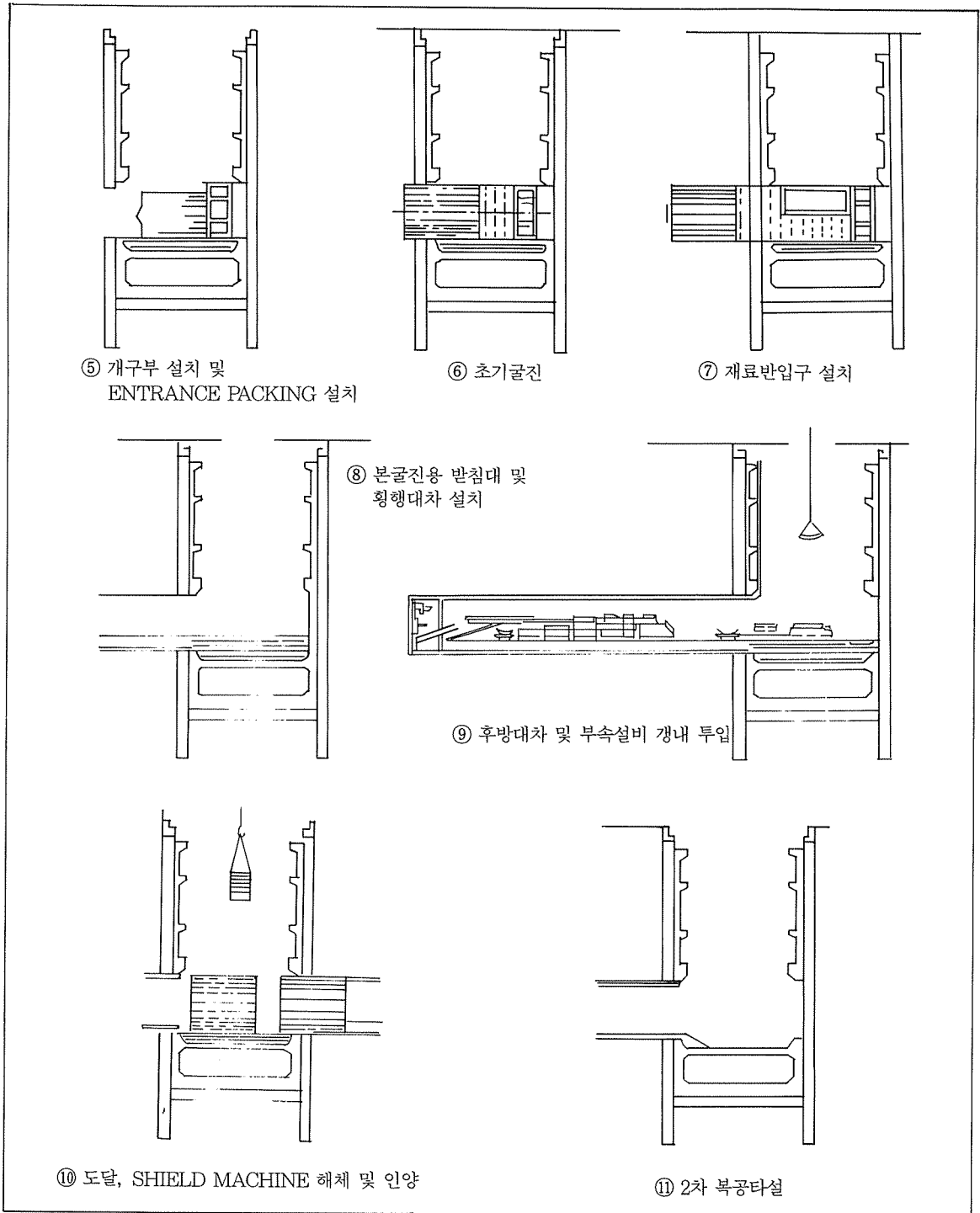
- 공사중에 地上에의 영향이 적다.

- 地下 深部에서도 시공이 가능하다.
- 地中 埋設物을 철거, 이설하지 않고 시공이 가능하다.
- 항타작업과 같은 소음, 진동을 수반하지 않는 공법이다.
- 교통의 지장을 초래하지 않고 시공이 가능하다.
- 공기단축 등 이점이 많은 공법이다.
- 작업과정이 반복적이므로 관리 및 省力化가 유리하다.

2) 短點

- 地盤 沈下의 위험이 있다.
- 土質調査에 많은 시간과 경비가 소요된다.
- 장소에 따라 補助工法의 安全對策이 요구된다.
- 터널의 토피가 얇은 경우 시공이 곤란하다.
- 급곡선부의 시공에 한계가 있다.
- 굴착단면의 변경이 용이치 않다.
- 단거리 공사일 경우 공사비가 비싸다.





SHIELD 工法 施工 順序圖

5. 공법비교

| 區 分 | SHIELD | NATM |
|---------|--|---|
| 工 法 概 要 | <ul style="list-style-type: none"> -SHIELD 本體는 全面部(CUTTER HED)와 中央部(油壓 JACK), 後尾部(TAIL)로 區分되며, 外部는 강재판(SKIN PLATE)으로 構成되었다. 掘進方法은 地中掘鑿에 따른 土壓, 水壓作業荷重 등의 外力을 支持하면서 全面部에서는 掘鑿을 施行하고 後尾部에서는 복공(SEGMENT 組立)을 設置하여, SEGMENT를 支持하여 油壓 JACK을 使用反力으로 推進하면서 連續적으로 반복 完成해가는 工法이다. | <ul style="list-style-type: none"> -地盤의 狀態가 良好하고 自立性이 좋은 土質에 適用하며 이 터널 工法은 自體의 支持力을 最大로 活用하면서 지보재 (SHOTCRETE, ROCK BOLT)를 利用 周邊地盤의 弛緩을 防止하는 軟性지보理論에 의한 신터널 掘鑿工法임. |
| 長 點 | <ul style="list-style-type: none"> -工事中에 地上에 미치는 影響이 적다. (交通障碼, 騒音, 振動, 周邊沈下) -掘鑿深度가 깊은 境遇에도 施工이 容易하다. -地下埋設物의 移設이나, 保護할 必要가 적다. -適當한 防護를 하는 데 따라 大型建築物 下部施工이 可能하다. -作業工程이 反復的으로 管理 및 省力化가 有用하다. -廣範圍한 土質에 適用할 수 있다. (軟弱地盤-연암) | <ul style="list-style-type: none"> -동바리 斷面이 적음(SHOTCRETE, ROCK-BOLT, WIRE-MESH) -計測管理로 合理的인 施工 可能 -變形에 의한 補強 容易 |
| 短 點 | <ul style="list-style-type: none"> -터널의 토피가 얇은 境遇 施工이 困難하다. -急曲線部의 施工에 限界가 있다. -短距離工事일 때 高價이다. -掘鑿斷面의 邊境이 容易하지 않다. | <ul style="list-style-type: none"> -自立性이 弱한 土質에 對한 安全度 -용수, 漏水에 對한 對處 困難 -工法이 複雜 -地下水 下降에 따른 地表面 침하 憂慮 -發破工法으로 大型 安全事故 및 民願 憂慮 |
| 工 事 費 | ₩ 7,035,000/M | ₩ 6,020,000/M |

| 區 分 | A. S. S. M | T. B. M |
|---------|---|---|
| 工 法 概 要 | <ul style="list-style-type: none"> -발파에 의한 굴착과 동시에 강지보공 설치 -주변지반의 하중을 강지보공에 의해 지지 -지반조건이 양호한 경우 효과적 | <ul style="list-style-type: none"> -전단면 기계굴착공법 -주변암반 자체를 지보체로 활용 -역학적으로 안정된 원형구조 형성 |
| 長 點 | <ul style="list-style-type: none"> -시공경험 풍부 -공정이 단순하다. -소단면에 유리하다. | <ul style="list-style-type: none"> -비발파로 안전도 증대 -원형구조로 구조적으로 안정됨. -암반지역 굴착 가능 -공정단순 |
| 短 點 | <ul style="list-style-type: none"> -연약지반일 경우 시공 곤란 -지반 이완 및 침하 우려 -대단면일 경우 공사비 고가 -장대터널시 공사기간 장기화 | <ul style="list-style-type: none"> -정확한 지질조사가 요구된다. -기계중량이 무겁고 고가이다. |
| 工 事 | | |

6. SHIELD 工法の 施工 절차

