

[講演]

【Lecture】

터널 / 개착공사의 계측관리 및 분석사례

金 尚 煥*

A Study of the Gage Controled in Tunneling

This Study is Concerned about the Gage Controled analysis in Tunneling.

Gage Control was to analysis made by recording paper such as Convergence meter, Inclinometer and extensometer etc.

by s.w. Kim

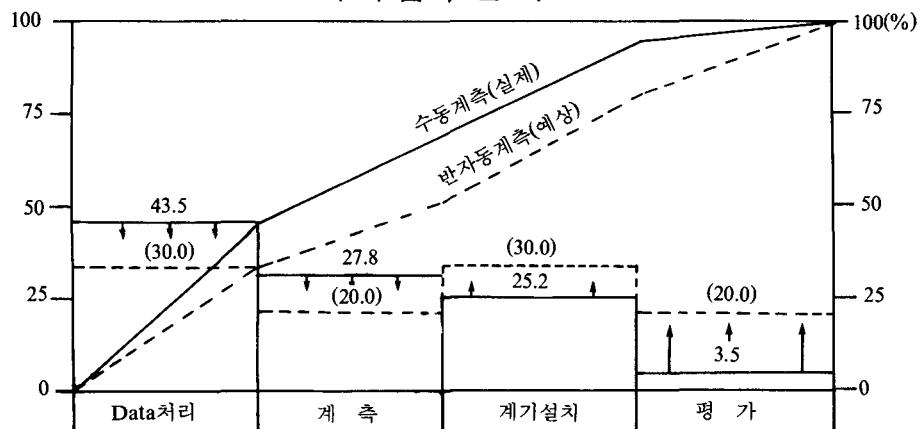
계 측 관 리 기 법 토목 공사별 계측 목적

공사	계측목적	시 공 감 리	안 전 관 리	설 계 확인	사 전 조 사	유 지 관 리	기 타	합 계	공사금액에 대한계측비 용비율(%)
굴 토 (기 초 공 사)	34.8	91.1	58.9	0	12.5	25.9	223.2	1.68	
굴 토 (개 착, 매 설)	34.0	74.0	64.0	2.0	28.0	22.0	224.0	2.19	
성 토 공 사	53.8	10.3	29.2	0	7.7	2.6	102.6	1.10	
댐 공 사	62.5	0	0	0	12.5	37.5	112.5	0.13	
매 립 공 사	18.8	6.3	18.8	0	18.8	37.5	100.2	7.21	
시 설 기 초 공 사	15.2	21.7	37.0	0	6.5	19.6	100.0	1.59	
터 널 공 사	31.4	59.0	67.6	0	10.5	42.9	211.4	2.31	
교 량 공 사	52.4	0	66.7	0	19.0	0	138.1	1.17	
기 타 공 사	35.6	17.8	40.0	6.7	4.4	22.2	126.7	1.35	
전 체	33.2	46.9	44.9	1.3	12.3	22.8	161.4	2.00	

※ 공사 금액이 작을 경우 계측비용 비율이 큼.

* 東亞 Eng.(株) 地盤工學事業部部長 技術士

계측업무 분석표



계측 계획 수립의 일반 시방

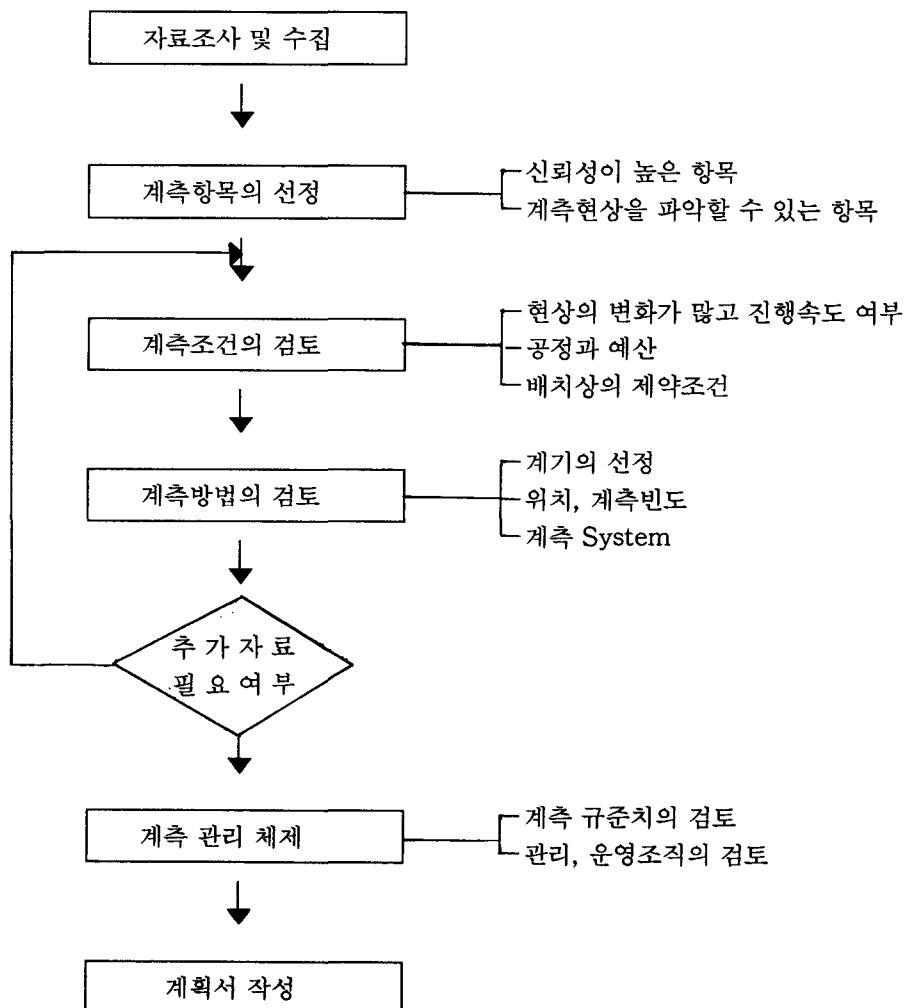
지하철 건설에 있어서 계측계획의 수립단계에서는 일반적으로 다음과 같은 사항들이 충분히 숙지, 검토되어야 한다.

항 목	내 용
1) 구조물 특성	<ul style="list-style-type: none"> 구조물 형태의 특성파악(정구조물 : Positive, 부구조물 : Negative) 지반 지지 주체의 특성 자연적 현상과 인위적 현상의 상호관계
3) 지질 및 토질 특성	<ul style="list-style-type: none"> 광역적 지형, 지질의 특성 해당 지역의 지지 기반층 생성과 발달과정 파악 지질 및 토질의 공학적 특성
3) 설계 특성	<ul style="list-style-type: none"> 하중분포 및 하중전달 Mechanism의 이해 지반 공학적 상수의 평가 재료 역학적 상수의 평가 적용 설계 기법의 이해 수치 해석 Model의 이해 수치 해석 결과의 평가 Safety Factor(안전율)의 적용
4) 지지부재 및 시공특성	<ul style="list-style-type: none"> 부재 및 뼈대구조의 거동 특성 시공순서 및 시공단계별 시간 개념 지층변화 및 지하수 유동 예측 시공성 및 취약요소의 파악
5) 계측 기기 특성	<ul style="list-style-type: none"> 작동원리 및 설치기법 측정 범위 및 측정 오차 측정 및 경제성 내구성 및 운영 System에의 호환성

계측 계획에 대한 검토사항

항 목	내 용
계측 빈도	계측 항목별로 시공 진행도 및 변화 속도 등을 검토하여 결정
계측 방법	수동, 반자동 자동 등의 방법 검토
처리 System	측정기, 컴퓨터 종류, 용량, 통신방법등을 결정 계측실 전원등의 환경정비 상태 검토
계측 체제	전임자 및 담당자 선정, System 구축, 조직에 대한 장기적인 체제 확립.

계측 계획 흐름도



공사별 계측기기의 고장을

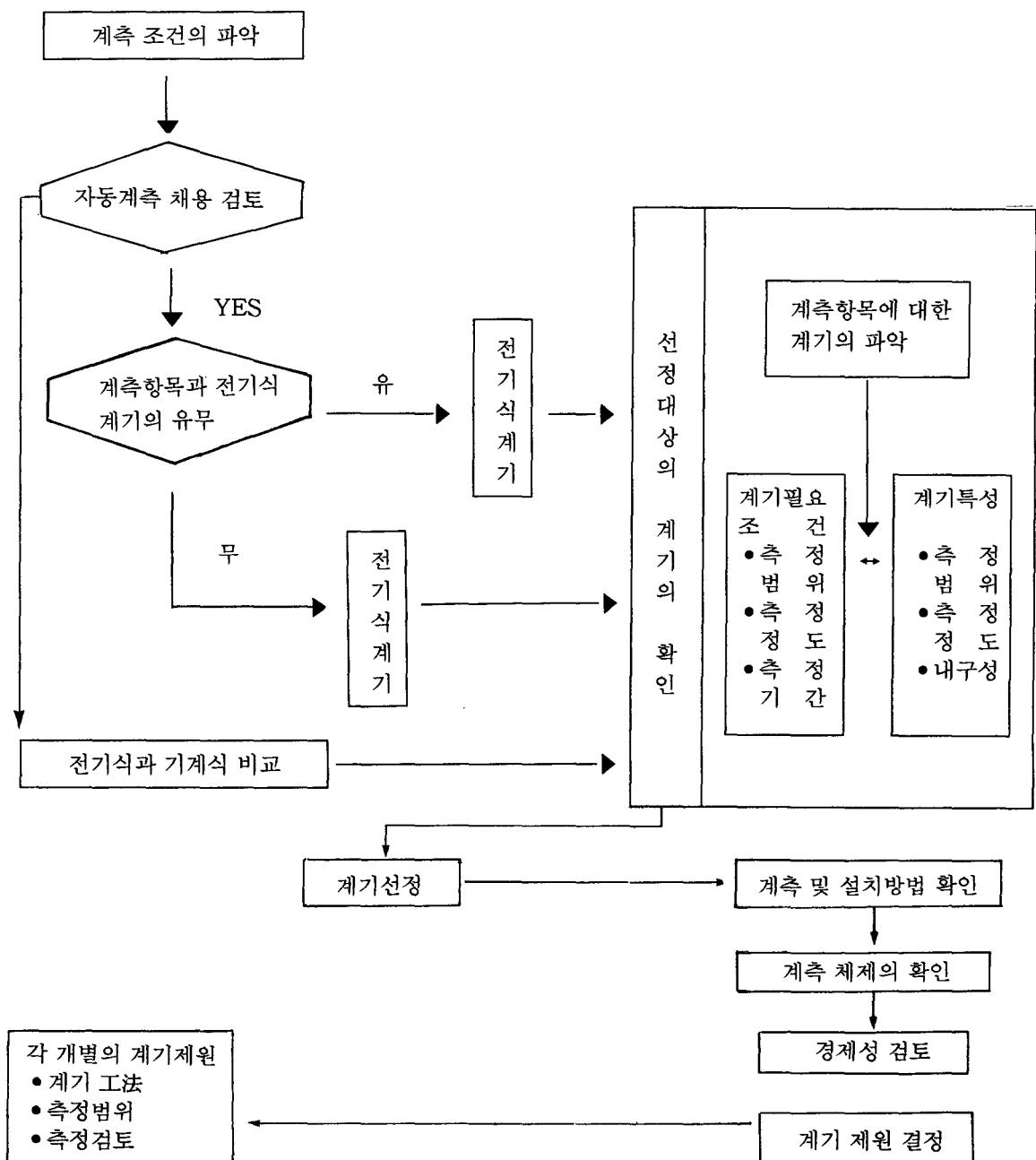
단위 : %

공사	계측항목 토 압 수 압	침하, 충별침하	응력 축력	변위	위치 경사	온도	기타	공사별 고장을
굴 토 (기초 공사)	7.0	14.0	3.9	4.6	1.3	16.1	0	4.2%
굴 토 (개착, 매설)	26.8	5.0	1.4	2.9	31.8	0	10.2	4.9%
성 토 공 사	2.1	5.3	0	1.9	14.3	0	0	4.1%
댐 공 사	0	25.0	0	10.3	0	0	10.0	7.4%
매 립 공 사	2.8	5.0	0	11.7	3.9	0	0	5.6%
시 설 기 초 공 사	0	2.2	0	7.2	6.7	1.5	7.1	3.2%
터 널 공 사	2.7	1.0	2.7	3.2	0.2	5.6	0	2.1%
교 량 공 사	25.0	0	3.4	1.4	0	14.3	0	3.2%
기 타 공 사	0	0	6.0	10.3	33.3	5.0	5.0	6.5%
전 체	9.2	3.0	3.0	1.8	1.8	4.6	7.4	3.6%

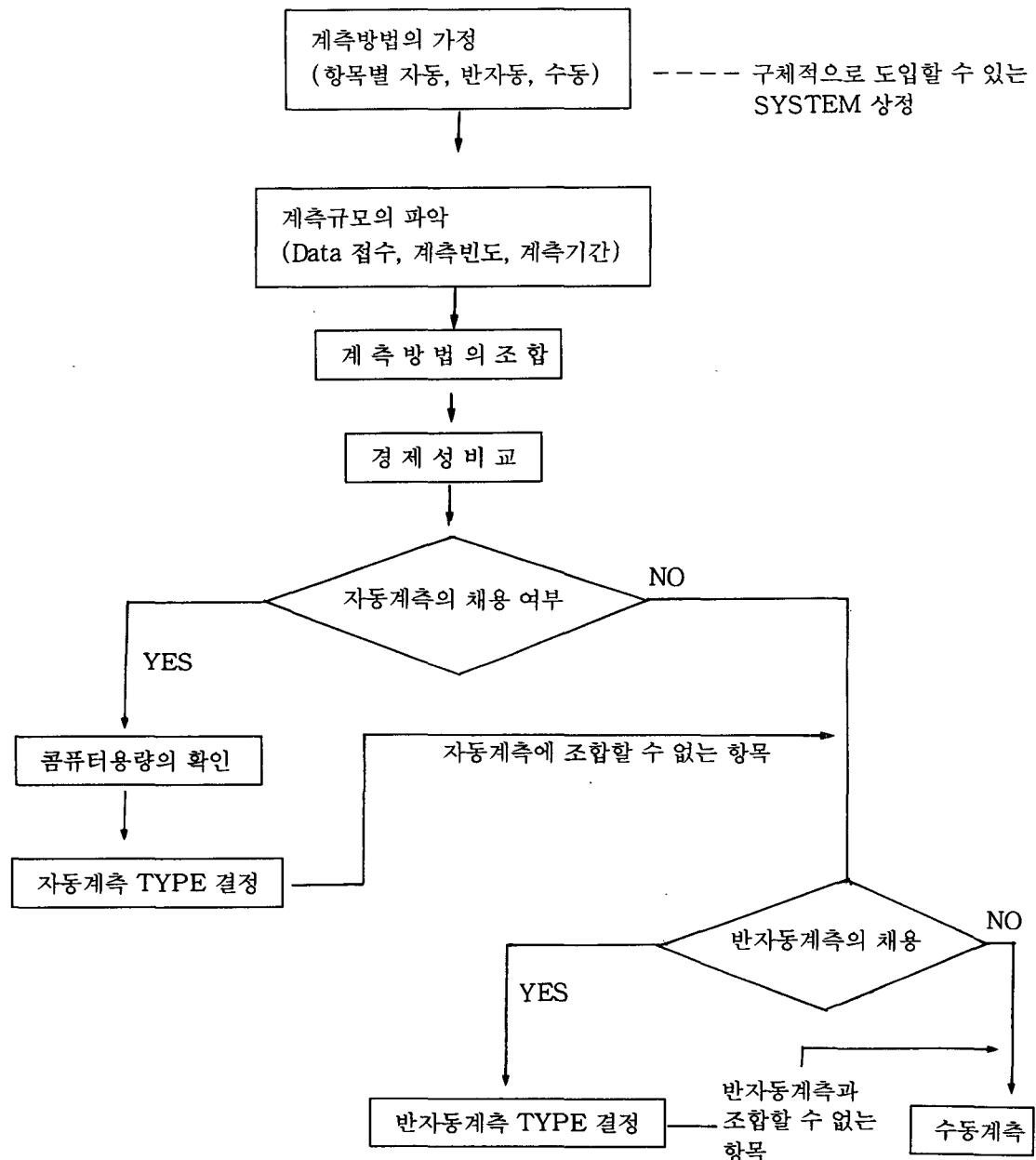
계측계획 배치에 대한 검토 사항

항 목	내 용
계측목적과의 부합성	<ul style="list-style-type: none"> • 계측목적 및 해석상 합치한 장소 선정과 배치간격, 수량 및 심도 검토
시 공 사 항	<ul style="list-style-type: none"> • 선행부분, 가장 취약하다고 판단되는 부분 검토 • 시공 과정에 대한 합리성 검토 • 자연 조건 및 주변 여건 고려
전체관리 및 집중관리	<ul style="list-style-type: none"> • 한계기가 COVER 할 수 있는 영역 검토 • 주 계측단면, 보조 계측 단면의 산정
계기의 보수	<ul style="list-style-type: none"> • 가설물, 중기등에 의한 장해 • 장기 계측 경우의 설비

계측기 선정

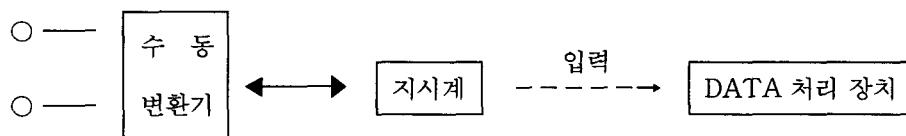


계측 방법 결정

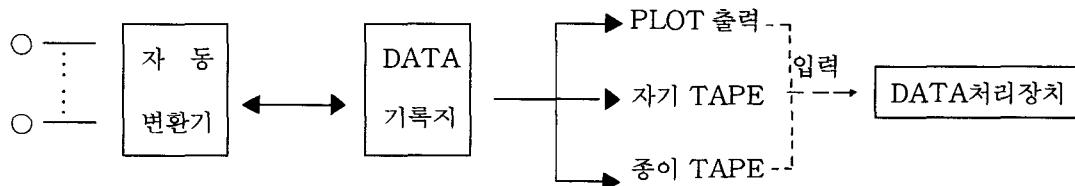


현장 계측 SYSTEM 구성도

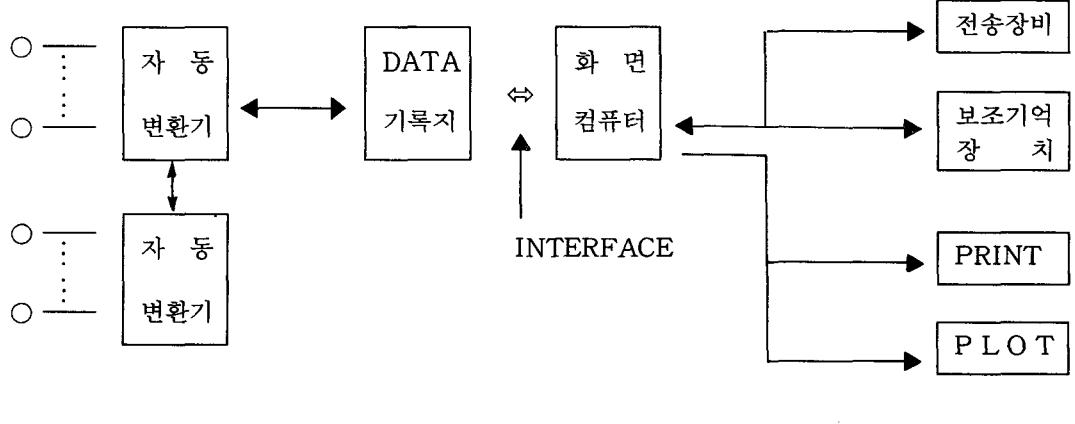
• 수동측정



• 반자동측정



• 자동측정



개착 구간 계측 분석

계측항목 및 방법

(1) 계측항목

종 류	설 치 위 치	설 치 방 법	용 도
경사계	토류벽 또는 배면지반	굴토심도보다 깊게 부동 층까지 천공	굴토진행시 각 과정의 인접지반 수평변위량과 위치, 방향 및 크기의 실측과 이를 이용·토류구조를 각 지점의 응력 상태 판단 가능
지하수위계	토류벽 배면지반	대수층까지 천공	지하수위변화를 실측하여 각종 계측자료에 이용, 지하수위의 변화원인 분석 및 관련된 대책수립
간극수압계	배면 연약지반	연약층 깊이별	굴착에 따른 파ing간극수압의 변화를 측정 안정성 판단
토압계	토류벽 배면	토류벽 종류에 따라 다름	주변지반의 하중으로 인한 토압의 변화를 측정하여 토류 구조체가 안정한지 여부 판단
하중계	Strut 또는 Anchor 부위	각 단계별 굴토시 설치	Strut, Earth Anchor 등의 축하중 변화 상태를 측정하여 이들 부재의 안정상태 파악 및 원인규명에 이용
변형률계	토류벽 심재, Strut, 띠장, 각종 강재 또는 Concrete	용접 또는 접착재	토류구조물의 각 부재와 인근 구조물의 각지점 및 타설 콘크리트 등의 응력 변화를 측정하여 이상 변형 파악 및 대책 수립에 이용
Tiltmeter	인접 구조물의 골조 또는 벽체	접착 또는 Bolting	주변건물, 용벽, 철탑 등 인근 주요구조물에 설치하여 구조물의 경사 변형상태를 실측, 구조물 안전진단에 활용
지중침하계	토류벽 배면, 인접구조물 주변	부동층까지 천공	인접지층의 각 층별 침하량의 변동상태를 파악 보강대상과 범위의 결정 또는 최종 침하량을 예측
지표침하계	토류벽 배면, 인접구조물 주변	동결심도 보다 깊게	지표면의 침하량 절대치의 변화를 측정, 침하량의 속도판단 등으로 허용치와의 비교 및 안정상태를 예측
균열측정기	균열부위	균열부 양단	주변구조물, 지반 등에 균열발생시 균열 크기와 변화를 정밀 측정하여 균열 발생 속도 등을 파악 다른 계측 결과 분석에 자료 제공
진동소음측정기		필요시 측정	굴착, 발파 및 장비작업에 따른 진동과 소음을 측정하여 구조물 위험 예방과 민원 예방에 활용

1. 現場計測에 의한 情報化施工

(1) 情報化 施工이란

土木建築工事에 있어서 現場의 주요한 部分은 各種計測器를 設置하여 時時刻刻 變化하면서 얻어지는 現場情報를 迅速하게 處理解析하여 다음 施工段階에 Feed back하면서 공사를 진행시키는 것이며, 이러한 目的을 위해서 “建設”이라는 行爲로서 추구할 事項은 다음과 같다.

- ① 安全性
- ② 經濟性
- ③ 機能性

(2) 開鑿工事(Open cut)의 技術管理에 有效한 理由

- ① 흙의 力學的性狀의 복잡성, 비반복성에 대처
- ② 現場情報 採取
- ③ 他部分 施工管理 System에 適用

2. 土留 構造物

2.1 開鑿工事에 있어서 變形원인(그림-1)

- (1) 土留壁 變形 및 引抜에 의한 주변지반의 变形
- (2) Heaving 현상에 의한 배면지반침하
- (3) 지하수위 저하에 의한 壓密沈下
- (4) 굴착시 挑水에 따른 土砂流出
- (5) 시공기계 진동에 의한 침하

2.2 土留工 設計時 檢討項目

- (1) 토류벽 안전성
 - ① 응력(힘모먼트, 전단력)
 - ② 变形(수평, 연직)

③ 침하 및 지지력

(2) 지보공 포장 등의 안전성

- ① 응력-축력, 힘모먼트, 전단력
- ② 变形

(3) 굴착저면 안전성

- ① Heaving
- ② Boiling
- ③ 저면팽상(膨上)

(4) 주변지반 및 구조물안전성

- ① 침하
- ② 수평이동

2.3. 土留工應力, 變形計算方法

2.3.1 설계용측압을 이용하는 방법

- (1) 假定側壓을 利用하는 方法
 - ① 지보공 반력만을 구하는 방법...
1/2분활법, 하방분담법
 - ② 지보공반력을과 토류벽응력을 구하는 방법...단순보법, 연속보법

(2) 實際側壓을 利用하는 方法

- ① 탄성법
- ② 소성법
- ③ 탄소성법
- ④ 가상지점법

2.3.2 설계용 측압을 이용하지 않는 방법

- (1) 유한요소법

2.4 주변지반 영향

2.4.1 예측방법

- (1) 실측예에 의한 상관, 분석
- (2) FEM에 의한 해석
- (3) 활동선을 이용하는 방법

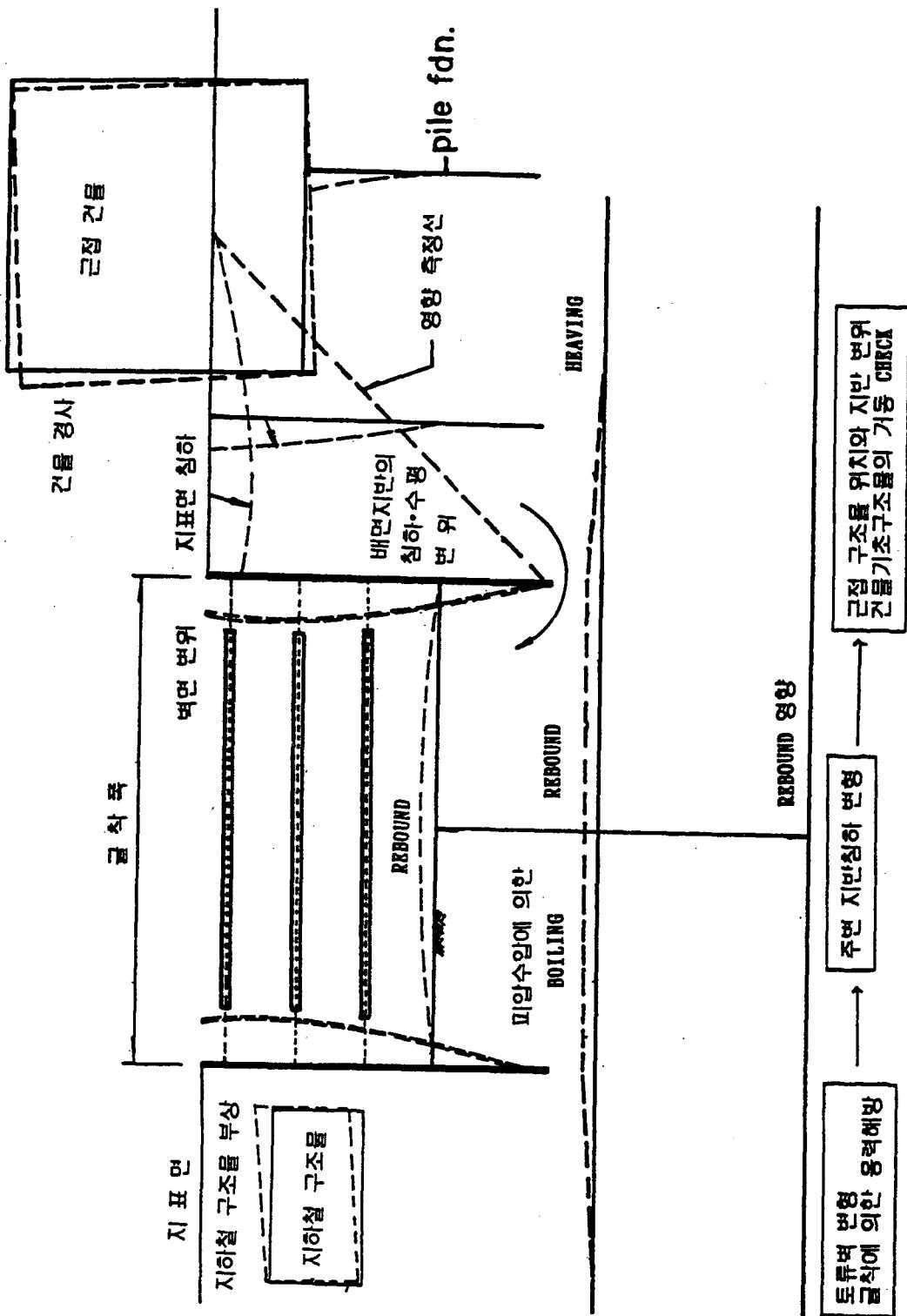


그림-1 開鑿工事에 있어서 变形原因

3. 計測管理

3.1 計測管理計劃

3.1.1 計測目的

都心地 개착공사에 있어서 근접구조물, 주변 지반 및 가설구조물의 거동을 설계지점에서 추

정하는 것은 지반의 복잡성과 충분한 평가방법 부족으로 곤란하기 때문에 계측을 하므로서 調査, 設計, 施工計劃, 各施工段階의 假定條件과 整合性을 항상 관리해 가면서 신설, 기존구조물의 변형, 발생응력도 등을 허용치 이내로 억제하는 것이다. (表-1)

表-1

정보화 시공 흐름도

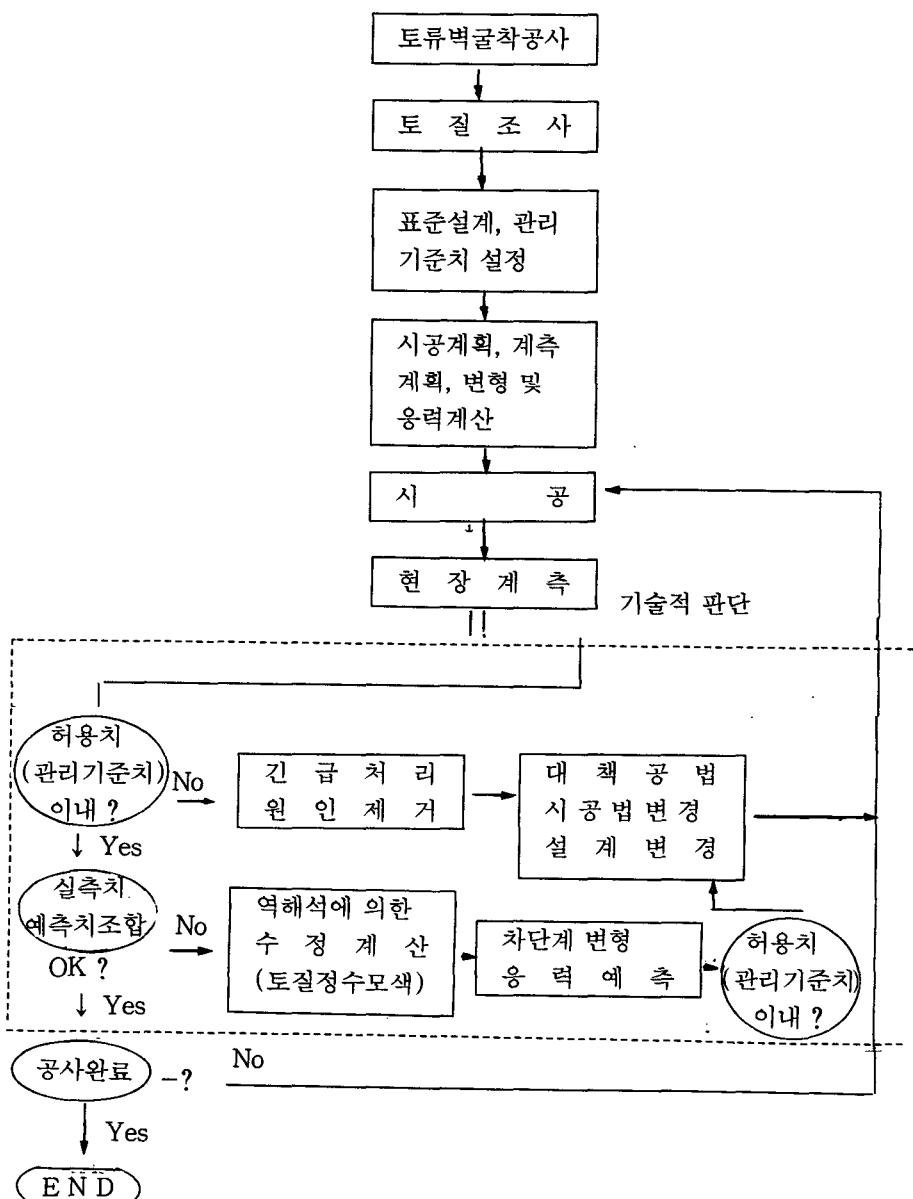


表-2

계측 및 검토항목

계측내용	계측항목	계측사항	○ 안정 수 (N)				검토항목
			< 3		3 ~ 4	> 5	
			△ 수위 (m)				
1. 토류기설 구조물 관리	1. 토류벽 체측	(1) 토압	△ ○				· 토압수압의 견동 및 설계치와 비교 검토
		(2) 수압	(△)	△ ○			· 주변지반과 수위 · 수압과의 관계
		(3) 휨변위		(△)(O)			· 압력 확인
		(4) 변형	△ ○	△ ○			· 토압 · 수압에 의한 변형량 비교
	2. 지보공 및 파장계측	(5) 측력과 변형	△ ○	△ ○			· 측력의 견동 및 설계치와의 비교
		(6) 미장의 휨, 비틀림	△ ○	△ ○			· 안정성 확인
		(7) 접합부 느슨, 국부파괴	△ ○	△ ○			· 안정성 확인
		(8) 온도변화	△ ○	△ ○			· 측력의 변화에 의한 거동 파악
		(9) 배면 지반 변형	△ ○	△ ○			· 굴착에 따른 주변 지반의 침하와 영향
		(10) 구조물 침하, 경사	△ ○	△ ○			· 건물에 미치는 영향 검토
II. 주변 지반의 관리	3. 주변지반의 변화체측						
	4. 주변구조물의 변화체측						
III. 배수누수 관리	5. 지하수위 관측	(11) 배수량과 침하수위 변동	(△)	△	△ ○		· 수위변화 확인 및 주변영향 검토
	6. 누수개소 점검	(12) 누수개소 점검	△ ○	△ ○	△ ○		· 안정성 확인

3.1.2 測定項目選定

계측 항목은 공사규모 및 근접 건물 분포, 주변 지반 환경 등으로 결정하지만 선정을 위한 기준으로서 일본건축학회 기초굴착공사 지침을 表-2에 표시하였다.

Peck은 굴착의 난이도를 나타내는 지표로서 안정수 N_s 를 다음과 같이 제안하였다.

$$N_s = \frac{rH}{S_u}$$

여기서 S_u : 점토의 비배수 강도

r : 단위 중량

H : 근입 깊이

$N_s \leq 2$: 배면도 탄성상태로 자립

$N_s = 3.14$: 수직면을 따라 탄성상태

$3.14 < N_s < 5.14$: 굴착 저부에 소성역이 확대됨

$N_s = 5.14$: 굴착 저부 전역에 걸쳐 소성상태

3.1.3 計測器 配置計劃

계측기의 배치는 측정 항목에 근거하여 하지만 토류공사에 있어서 모식적으로 나타내면 그림-2

와 같다. 토류벽 변형측정은 고정형 경사계를 2~4m pitch로 배치하여 자동 계측하는 경우와 Guide pipe만 매설하여 필요한 심도를 삽입식 경사계로 측정하는 경우가 있다. 또한 고정형 경사계의 배치는 H pile 강성이 낮은 경우 2m pitch 정도 콘크리트 연속벽과 같이 강성이 높은 경우는 3~4m pitch로 매설한다.

3.1.4 測定期間 및 測定

계측할 빈도는 계측 항목에 의하지만 기본적인 사고로는 다음과 같이 생각할 수 있다.

① 초기치 설정을 위한 계측(시공착수전)

② 시공단계마다 계측

③ 시공도중 계측

토류벽계측의 기본적인 측정빈도를 表-3에 표시하였다.

3.1.5 管理基準値

허용치, 변위의 추정치 및 그것에 근거한 관리 기준치의 설정은 대상구조물 관리자와 협의에 의해 결정되지만 일반적으로 表-4와 같이 3단계정도로 나누어 설정하여 각각 그것에 따른 관리방법, 대응책을 검토하는 것이 바람직하다.

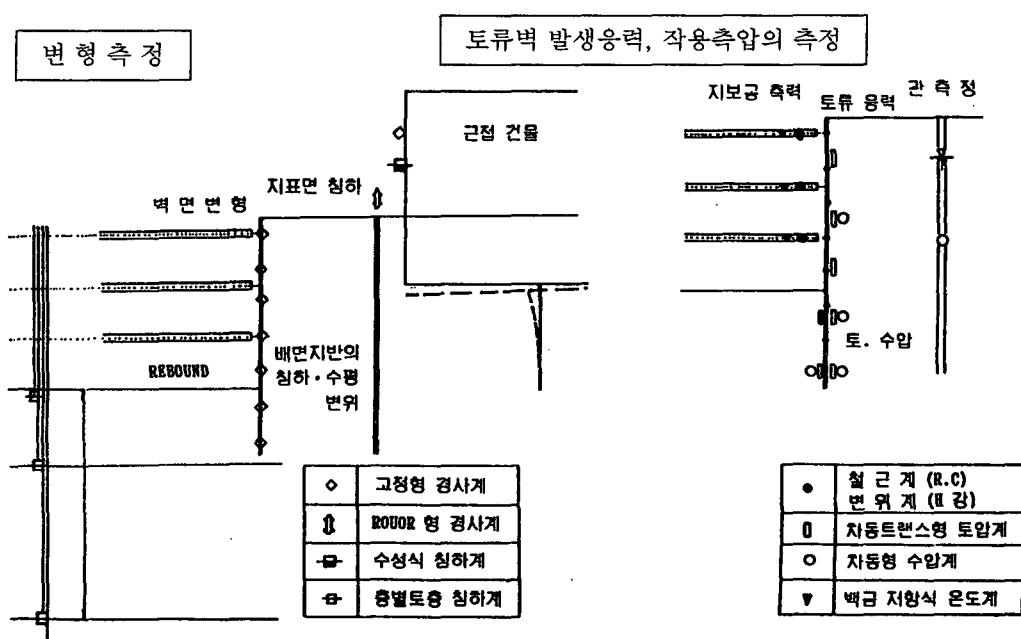


그림-2 토벽벽 공사의 계기 배치모식도

表-3 측정기간 및 빈도

측정 항목	0점 조정	H-PILE 타입작후	굴착개시까지	굴토종·구체시공종	뒷채움종	뒤채움후
토압측정	H-PILE 타입작전	타입작후 및 24시간 후	2일간격	1일간격 단, 체기설치구간의 굴착은 매일	2일간격	-
수압측정	H-PILE 설치작전	-	-	매일(3회 / 일)	-	-
지보공 축력측정	지보공 설치작전	-	-	설치구간의 굴착은 매일	매일(3회 / 일)	-
H-PILE 변위측정	H-PILE 타입작전	-	2일간격	-	-	-
H-PILE 수평변위측정	-	타입 24시간 후	-	-	-	-
지중수평변위측정	-	-	-	-	-	-
간극수압측정	-	-	-	-	-	-
지표점하측정	-	-	-	-	-	-
지중침하측정	-	-	-	매 일	-	-
지하수위측정	H-PILE 타입작전	-	-	-	-	-
구조물응력측정	-	-	-	-	-	2일간격

表-4

관리기준치

			관리기준치			측정계기
			LEVEL I	LEVEL II	LEVEL III	
신설구조물	가설토류벽	토류벽 변형 " 응력도				고정형 경사계 ROLLER형 경사계 철근계, 변위계
	구조물	지보공 축력				변위계, 온도계
주년지반	하층지반	중간말뚝 축력	LEVEL I : 허용치 OR 설계치 70% LEVEL II : " 90% LEVEL III : " 100%			변위계, LEVEL
	지반	지반내 측방변위 지반내측별침하 지하수위				고정형 경사계 ROLLER 형, 경사계, 층별침하 계 간극수압계
가설구조물		경사각 상대침하량 CRACK 발생				고정형 경사계 수성식 침하계 변위계

4. 土留解釋方法(彈塑性法)

토류벽해석은 토류가설구조물의 응력, 변형 상태를 문제로 하여 가설구조물의 保有耐力에 대해 안전여부를 검토하는 것이다. 해석은 토류벽변형, 응력데이타 및 STRUT측력에 의해 근거하여 토류벽에 작용하는 외력이나 지반정수를 추정하는 현상해석과 차단계굴착시 혹은 STRUT철거시에 토류거동을 예측하는 예측해석으로 구성되어 있다. 즉 정보화시공 흐름도에서 알 수 있듯이 역해석에 의한 수정계산(토질정수모색) 1차단계변형, 응력예측을 하는 것이다.

4.1 土壓모델

그림-3에 표시한 바와 같이 벽체에 작용하는 토압은 정지토압으로 부터 벽체에 변형에 의해 주동토압, 수동토압으로 이행한다. 즉 배면지반에서는 벽체변형에 의해 측압이 감소하고 또한 정지상태로부터 주동상태로 된다. 전면지반에서는 연직토압이 감소하고 벽체변형에 의해 수

동상태로 된다. 이와같이 토압은 정지상태로부터 변화하지만 그 변화는 심도와 함께 저감하여 어느 심도에서는 정지토압에 일치하는 것으로 생각할 수 있다.

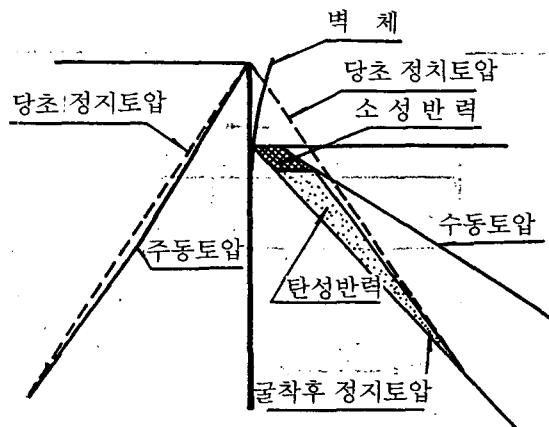


그림-3 토압모델

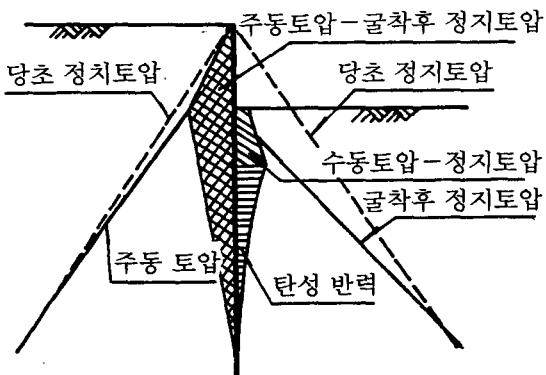
4.2 구조모델

구조모델은 그림-4와 같이 나타내는 모델로 하였다. 주동토압과 굴착후의 정지토압의 차를 하중으로서 작용시킨 것이다. 따라서 수동토압과 굴착후의 정지토압의 차가 최대반력으로 된다. 최대반력에 도달한 부문에 대해서는 소성역으로 생각하여 역하중으로서 작용시킨다. 소성역이하의 지반은 탄성체로서 연속한 Spring분포를 고려하고 있다. 또한 탄성지반반력은 Rankine 수동토압을 넘지않는 범위로 한다.

- 1) 굴착부분
- 2) 지중소성부분
- 3) 지중탄성부분

4.3 토류벽 거동예측계산

- ① 공사착공전 실제변형이 없으므로 실측에 fitting을 할 수 없다. 따라서 설계치를 사용하여 예측계산을 실시한다. 제1차 굴착 종료이후는 이 정수를 Base로 하여 실측과 fitting을 한다.
- ② 하중조건(하중분포, 측압계수), 토질정수 ($r_t : \phi, c, E_s$)을 변화시켜 현상의 변형(응력)거동에 근사시킨다.
- ③ 제n차 굴착에서 fitting했을 때 토질조건을 가지고 제n+1 굴착에 대한 예측을 한다. 예측계산에서는 벽체의 변형도 이외에는 흠모멘트, 전단응력도, 측압분포등의 근사도를 작성한다.



※ 사선부 하중이 토류벽에 작용한다.

그림-4 구조모델

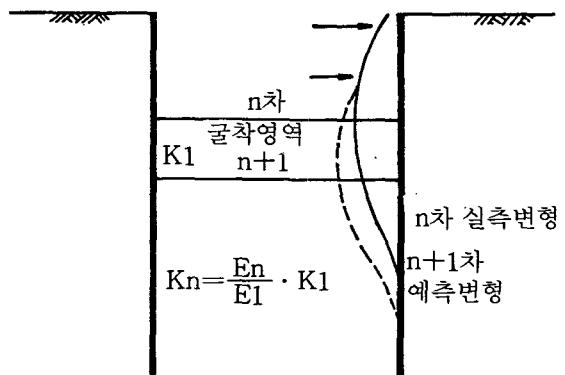


그림-5 토류벽 변형예측도

5. 유한요소법에 의한 토류해석

일반적으로 토류공의 설계에 이용되는 관용계산법이나 탄소성법은 배면측의 측압이 토류벽을 누르고 굴착면측의 지보공이나 지반이 측압을 지지하는 형식으로 되어있다. 탄소성법에는 굴착마다 구가하는 벽체의 응력이나 변형을 고려할 수 있고 입력조건이 비교적 간단한 이점을 가지고 있는 반면 지반 Spring이나 굴착면이하 측압등 계산결과에 큰 영향을 끼치는 것에 정확한 판단이 요구되므로 이 대책으로서 계측판리에 의한 설계시공에 Feed back이라는 방법이 이용되고 있다. 이것이 대해 FEM에 의한 토류벽해석은 지반벽체 STRUT을 각 요소로 분활하여 요소 전체의 평형을 생각하므로 굴착은 전단계의 요소응력을 해방시켜 토류공, 각부재 및 지반의 응력, 변형을 구할 수 있다. 탄소성법과 비교하여 지반과 구조물의 상호작용의 결과로서 측압의 복잡한 변화를 보다 쉽게 설명되고 있다. 그림-6에 각종공사의 모델 예를 나타냈다.

6. 堀鑿底面의 安定管理

토류가설구조물을 구성하는 각부재(벽체, 띠장, 지보공)는 재료특성이 명확한 Steel 혹은 Concrete이고 응력을 조명한다는 형태로 정량적인 안전성 Check가 가능하다. 4장에서 설명한 방법에 의해 차단계공사전에 있어서 Check

가 가능하다. 이러한 것에 비해 굴착저면에 안전성 Check는 정상적이고 파괴여부 판단도 그만큼 경험과 현장직감력에 의존하는 때가 많다. 여전히 Heaving검토에 대해서 일부에서 정량적 판정을 시도하고 있는 예도 있고 이러한 것을 포함해서 굴착저면의 안전성 Check방법을 다음과 같이 설명 할 수 있다.

6.1 Heaving에 대한 관리

- ① 굴착배면의 지표침하(그림-7)
- ② 굴착배면의 지표면 Crack
- ③ 토류벽침하
- ④ 굴착저면에서 토류벽의 변형 형상(그림-8)

⑤ 지반의 동원 전단응력과 전단내력의 비교

⑥ 중간 Pile의 부상(그림-9)

6.2 Boiling, Piping에 대한 관리

Boiling, Piping등의 각 현상은 토류벽의 전면과 배면의 수두차가 크게된 경우 발생한다. 따라서 토류벽 내외의 지하수두(水頭)을 측정함으로서 위험성을 예측한다. 또한 피압대수층이 존재하는 경우에는 각층마다 측정한다. 측정방법은 간극수압계를 이용하는 방법과 측Pipe를 설치하여 지하수의 수두를 측정하는 방법등이 있다.

문제점	(a) 지보금 건물 SHIELD 토류벽	(b) 토류 전체 이동 →	(c)	(d)	(e) 지보금 PRELOAD ANCHOR
해석법	주변 구조물의 거동예측 하중 BEAM 요소	양측조건 상이 (편토임) 양토류벽 해석	양수 영향	지반 개량	지보금 PRELOAD 금법 ANCHOR 금법 PRELOAD 도입후에 BEAM 요소 삽입

그림-6 각종 공사의 유한 요소 모델

터널구간 계측분석

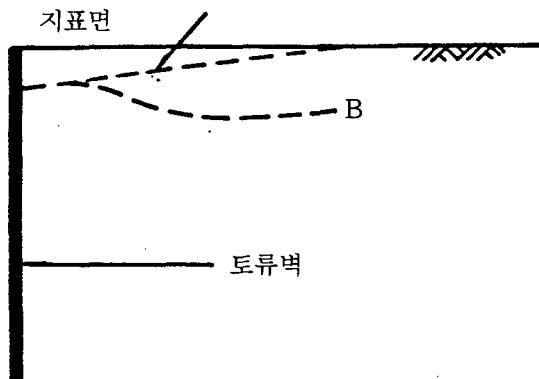


그림-7 지표침하

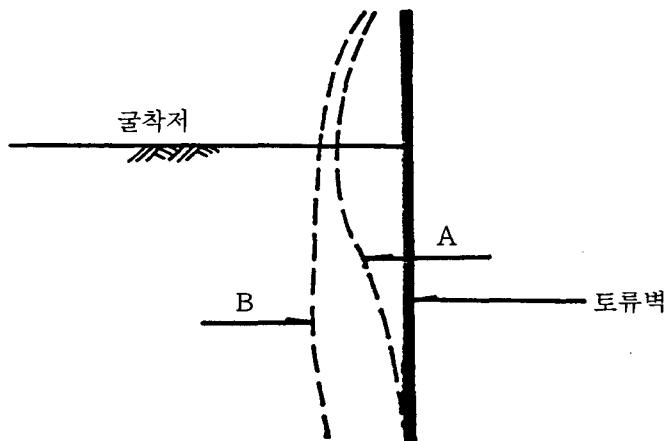


그림-8 굴착저면에서 토류벽 변형현상

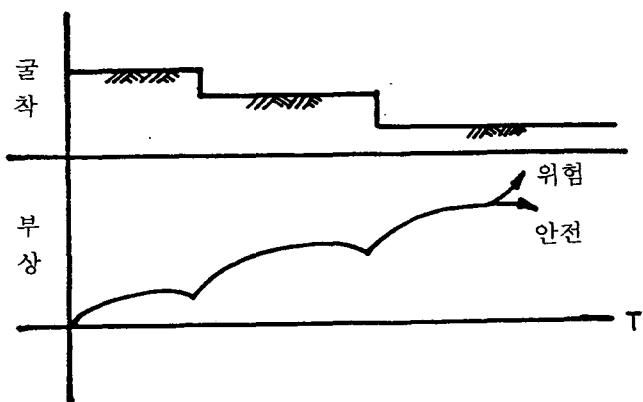
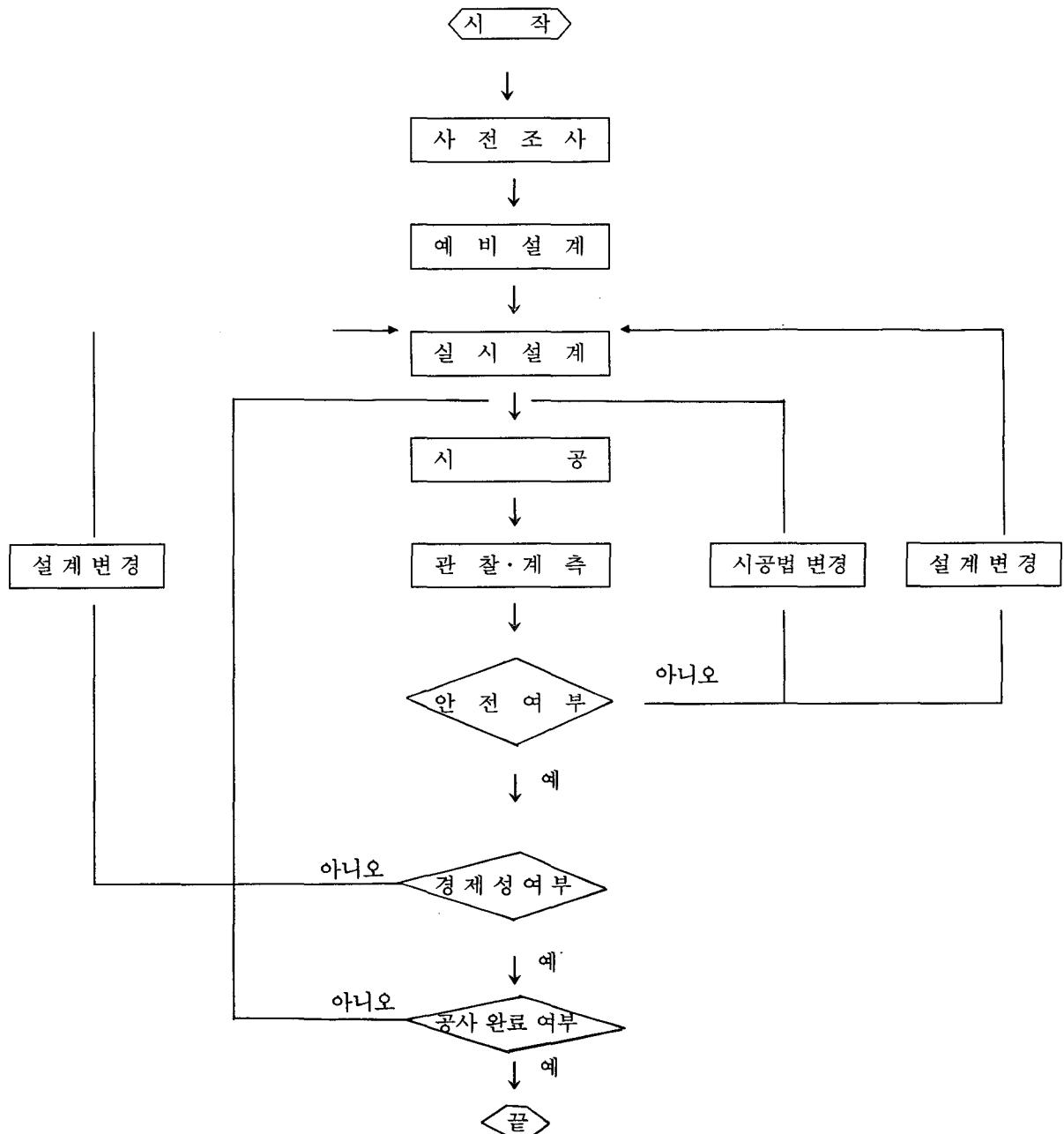


그림-9 중간 PILE부상

터널 계측의 목적

- ① 지반 및 터널의 안정 평가와 대책
- ② 설계의 타당성 확인과 변경
- ③ 주변 구조물의 영향평가 및 대책

터널 계측의 흐름도



터널 계측 항목

계 측 항 목		계측에 의해 구할 수 있는 사항
일 상 계 측 (A)	갱내관찰조사	<ul style="list-style-type: none"> • 지질상태 파악, 지보효과 확인
	내공변위측정	<ul style="list-style-type: none"> • 단면의 평형상태, 변위의 수렴상태 • 변위속도에 의한 지반의 안정성 • Rock Bolt의 길이, 수, Pattern, 증가여부 • 단면 폐합 시기결정
	천단침하측정	<ul style="list-style-type: none"> • 터널 천단의 절대침하량을 측정 • 지반의 붕락 검토
	Rock Bolt	<ul style="list-style-type: none"> • Rock Bolt의 인발내력, 정착효과 및 적정길이의 판단
	일반 시험	<ul style="list-style-type: none"> • Rock Bolt의 정착방식 및 종료를 결정
대 표 위 치 에 서 의 계 측 (B)	지중변위측정	<ul style="list-style-type: none"> • 터널 주변의 이완영역 분석 • Rock Bolt길이 결정의 판단자료 활용 • 지반의 안정도 판단
	복공응력측정	<ul style="list-style-type: none"> • 토압의 크기와 분포 • 1차 복공의 안정성 및 2차 복공의 두께, 시공시기 결정
	지표, 지중 침하 측정	<ul style="list-style-type: none"> • 터널굴착에 의한 지표에의 영향에서의 효과판정 • 터널에 적용하는 하중변위의 측정
	Rock Bolt 축력시험	<ul style="list-style-type: none"> • Rock Bolt의 측력을 측정, 응력분포에 적절한 길이 판정 • Rock Bolt의 증설여부와 이완영역 판단
	지중수평 변위측정	<ul style="list-style-type: none"> • 굴착에 의한 지표 및 지중침하의 중점과 더불어 지중심도별 수평방향의 변위를 측정
	갱내 탄성파 속도측정	<ul style="list-style-type: none"> • 막장의 자립성 판단 • 변위량의 개략 추정 • Rock Bolt 길이 판단(이완영역판단)

계 측 빈 도

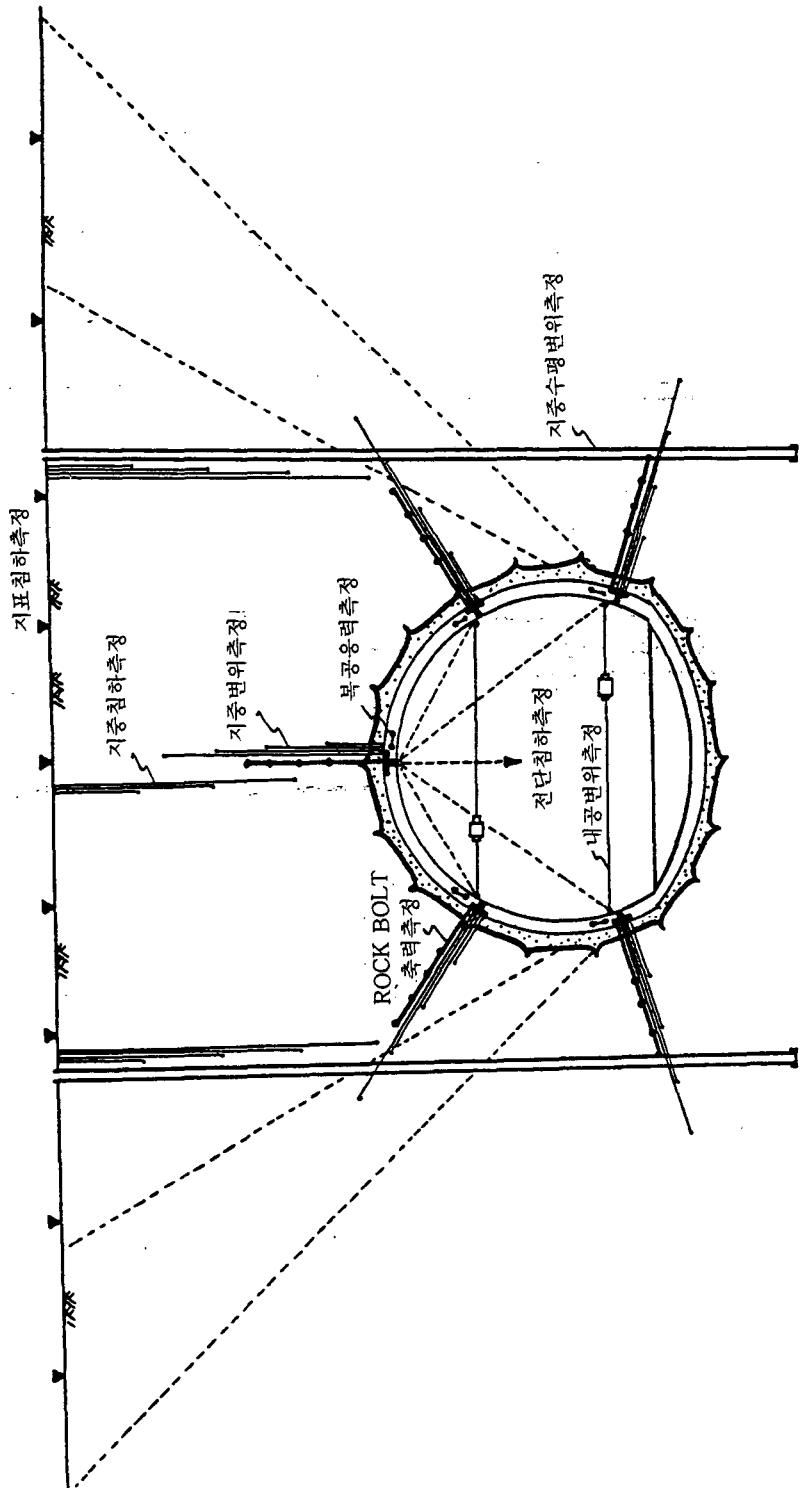
계 측 항 목		계측간격	배 치	빈 도				설치시기
				-2 -0일	0-15일 (0-7일)	15-30일 (8-14일)	30일 - (14일)	
일상	갱내관찰조사	전면장	각막장		1회 /일	1회 /일	1회 /일	
	내공변위측정	15-50cm	수평2측선	-	1-2회 /일	2회 /주	1회 /주	막 장 후방 1M
	천단침하측정	-	1점	-	1-2회 /일	2회 /주	1회 /주	
	Rock Bolt 인발시험	50본당 1본정도	1단면5본	-	-	-	-	정착효과발 발생후즉시
지표지중의 침하측정	지표지중의 침하측정	300-600M	터널상부 3-5개소	1회 / 2-7일	1회 /일	1회 /1주	1회 /2주	터널전방 15-30cm
	Shotcrete 응 력 측정	200-500M	점선, 반경방 향 3-5개씩	-	1회 /일	1회 /1주	1회 /2주	막장후방 1.3M
	지반시료시험	200-500M	-	-	-	-	-	
	지중변위측정	-	3-5개소 / 단면 3-5의 다른 심도	-	1-2회 /일	1회 /2일	1회 /주	막상후방 1-3M
	Rock Bolt 축력 측정	-	3-5개소 / 단면 3-5점 이상	-	1-2회 /일	1회 /2일	1회 /주	-
	갱내탄성파 속도 측정	500M	측선장 100-200M	-	1회	1회	1회	
	지중수평 변위측정	200-500M	터널상부 양측	1회 /2-7 일	1회 /1일	1회 /1주	1회 /2주	터널전방 15-30M

※ 빈도란중 ()은 수렴이 빨리 수렴해 버리는 경우의 빈도임

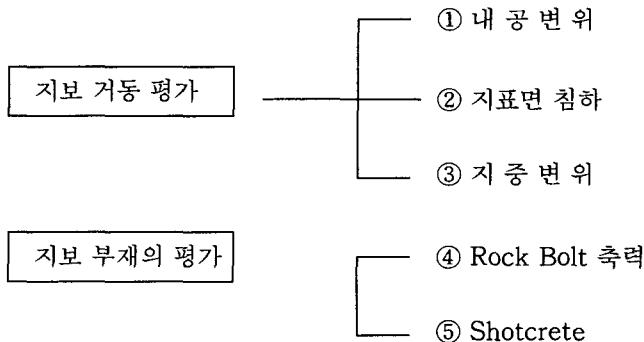
(주) 다음의 경우는 계측간격, 계측회수를 변경할 수 있다.

- (1) 팽창성 지질에서 장기간 지반이 안정치 않을 경우
- (2) 굴착의 진행이 현저히 빠르거나 안정치 않을 경우
- (3) Tunnel의 연장이 길거나 혹은 많은 경우
- (4) 양호하게 같은 형의 지질이 연속될 경우
- (5) 지질의 변화가 현저한 경우
- (6) 변위가 대단히 빨리 수렴해 버리는 경우

터널 계측 표준 단면도

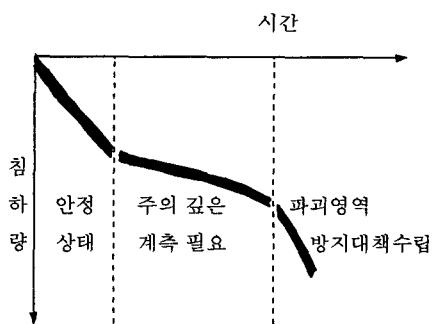


계측자료평가항목



① 내공변위

- 천단 침하와 병행 측정
- 내공변위량과 굴착면과의 거리에 대한 함수관계 (시간포함)



$$U = \alpha (1 - e^{-\beta t})$$

시간개념

U : 변위량
 α : 상수
 β : 상수
t : 경과시간

- Bench Cut 경우 굴착 단계마다 상기 관계가 반복 형성
- 막장에서 2D에서 3D 떨어진 지점에서는 변위가 수렴 한다.
(3차원 FEM 해석에 활용)
- 최대 변위량과 최대 변위속도 (mm/일)의 관계로 부터 초기에 적절한 변위 예측
- 변위속도가 일정하거나 증가하는 경우에는 위험.
- 토피가 얇은 토사층에서는 2차 라이닝을 초기에 실시(지반하중과 콘크리트 응력관계 검토)
- Shotcrete를 Invert에 타설시 Ring으로 폐합되면 내공변위는 급속한 수렴을 하여 지반하중, Shotcrete 응력이 급격히 증가되어 균열 발생 예상.
- 일반적으로 최대 허용 변위량은 터널 직경의 10%, 사용 Rock Bolt 길이의 10%까지 하고, 이상적인 변위는 3~4% 이내에서 시공을 고려.

$$U = U_m (1 - e^{-\beta(L/D)})$$

거리개념

U : 변위량
 U_m : 최종 변위량
L : 막장으로부터의 거리
D : 막장의 직경
 β : Creep 계수

각국의 내공변위 기준비교표

- FRANCE 공업성의 평가기준 (터널단면적 50~100m²)

토파의 깊이(m)	ARCH CROWN의 최대허용 변위량	
	경암지반(cm)	소성지반(cm)
10~50	1~2	2~5
50~100	2~6	10~20
500 이상	6~12	20~40

- 지하철공사시의 예상변위량(G.C. 설계)

암석 분류	예상변위량(cm)
CLASS I	0~0.5
CLASS II	0.5~1.5
CLASS III	1.5~3.0
CLASS IV	3.0~5.0

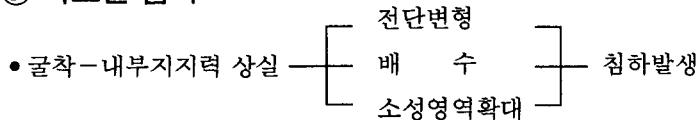
- 2차 복공의 콘크리트 강도와 타설시의 내공변위(ALBERG 터널)

내공변위(mm) (평균변위속도 mm/일)	콘크리트강도(28일 강도 kg/cm ²)
0~1mm / 30일 (0~0.03 / 일)	250
1~3mm / 30일 (0.03~0.1)	300
3~5mm / 30일 (0.1~0.17)	400

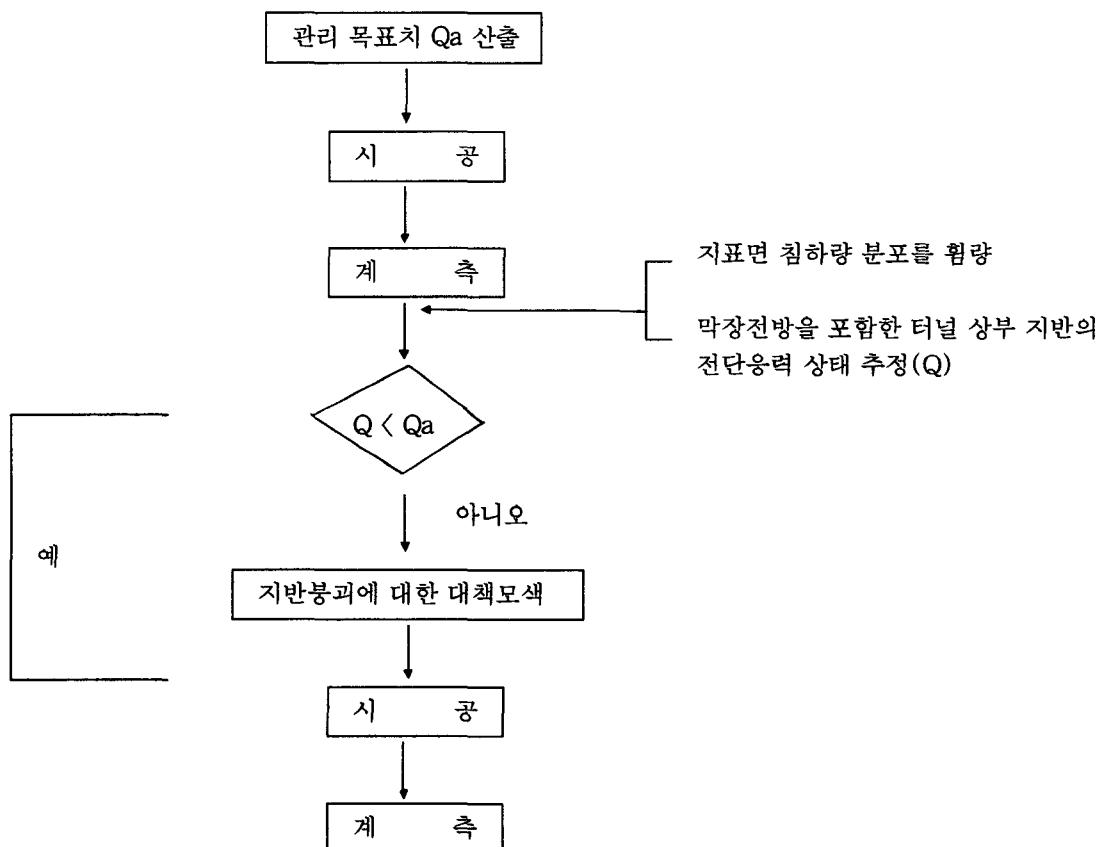
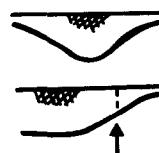
- 내공변위에 의한 시공관리기준(직경 10m 정도)

관리기준 지반	주의 LEVEL I		주의 LEVEL II
	내공변위(cm)	변위속도(mm/일)	내공변위(cm)
경암지반	2~3cm	5	3~5
	3~5	5	5~7
토사 지반	2~3	5	3~5
	3~5	1	5~7
팽창성지반	10	3	20~30
대책	계측결과, 현장상황을 종합적으로 분석하여 대책 수립과 아울러 계측 횟수를 많이 하여 주의깊게 관찰	대책수립.(보강공법 및 지보부재보강 등 강구)	

② 지표면 침하



- 침하형상 터널횡방향 (정규화를분포 곡선)
- 터널종방향 (Error Function 곡선)
- 지표 침하분포와 구조물의 거동을 병행검토
- 침하에 대한 안정성 검토는 구조물별 허용 기울기(부동침하)검토
- 평가방법 흐름도



③ 지중변위

- 터널 주변 지반의 변위분포, 특히 이완영역 추정
- 일반적인 이완영역 추정식(내압을 가지지 않을 때)

$$U_r = (1+v) a^2 P_0 / E \cdot r$$

U_r : 반증방향 변위

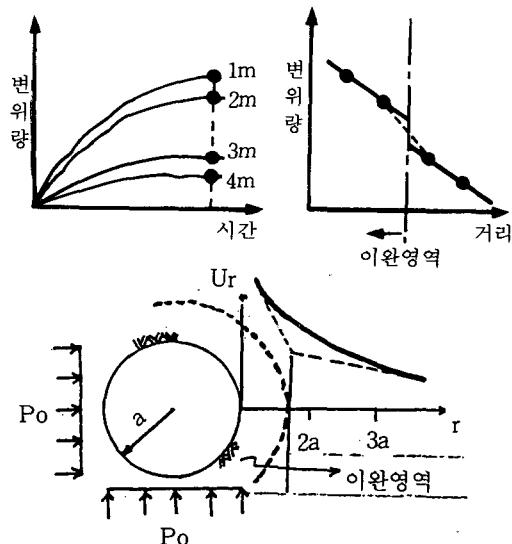
v : 지반의 포아송비

E : 지반의 탄성계수

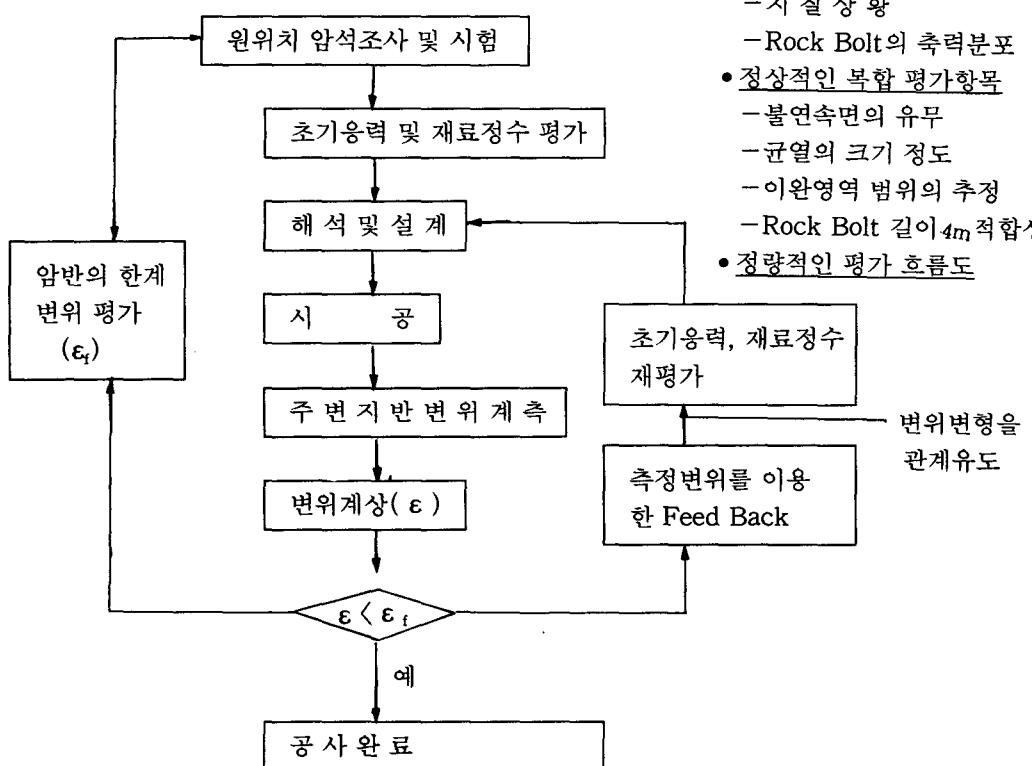
a : 터널 반경

r : 터널 중심으로 부터의 거리

P_0 : 초기 지반하중



• 정량적인 평가 흐름도



① Rock Bolt 축력

- 축력의 허용치(항복하중) 이하인것을 원칙
- 내공변위측정, 지중변위측정, Shotcrete 응력 측정 등의 결과와 비교하여 종합적으로 지반 거동 검토가 필요
- Rock Bolt 길이가 타당할 경우
 - 지중변위측정 결과로 부터 변위의 대부분이 Rock Bolt 타설 역내에서 발생될 때
 - Rock Bolt 축력의 최대위치가 Rock Bolt 의 중앙부근부터 터널측에 있는 변위의 분포를 뒷받침하고 있을 때
- Rock Bolt 길이를 변경해야 할 경우
 - Rock Bolt의 축력이 지반의 뒷편으로 향해 거의 0으로 되는 부분이 많을 경우(Rock Bolt 길이 감소 필요)
 - Rock Bolt의 축력이 선단까지 존재하여 지반과 함께 변위를 하고 있다고 판단되는 경우(Rock Bolt 길이 증가 필요)
 - 지반의 암질이 견고하지만 개내 관찰에 의해 암괴의 부분적 이완이 된다고 판단될 경우 Rock Bolt의 축력 재검토 요.
- 토사 지반의 두께가 얇아 지표면 침하를 억제하고 싶을 경우에는 Rock Bolt는 유효하게 작용하지 않고, Shotcrete나 강지보공등 강성이 큰 지보 부재에 의해 터널을 지지할 필요가 있다.
- 터널의 내공변위가 커져도 Rock Bolt 축력이 증가되지 않는 경우는 Rock Bolt의 정착 파손 또는 길이의 부족등을 검토하여야 함.
단) 정착이 파손될 경우에는 Rock Bolt 공경을 변경 시행.

② Shotcrete

- Shotcrete에 작용하는 지반 하중의 크기는 지보부재의 강성과 변위에 관계가 있다. (Shotcrete 자체의 강도, 강성변화 고려)
- 지반 하중 측정 결과의 평가는 공내변위량, Rock Bolt 축력, Shotcrete 응력등의 계측결과를 종합적으로 분석하여야 함.
- 일반적인 Shotcrete의 응력계산식(균일한 지반하중시)

$$\sigma_t / P = R / T$$

σ_t : Shotcrete 응력

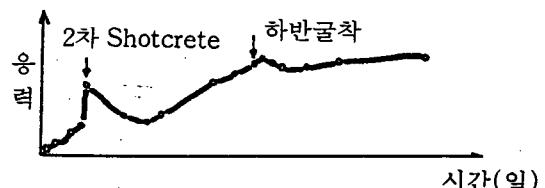
P : 지반하중

R : 터널방향

T : Shotcrete 두께

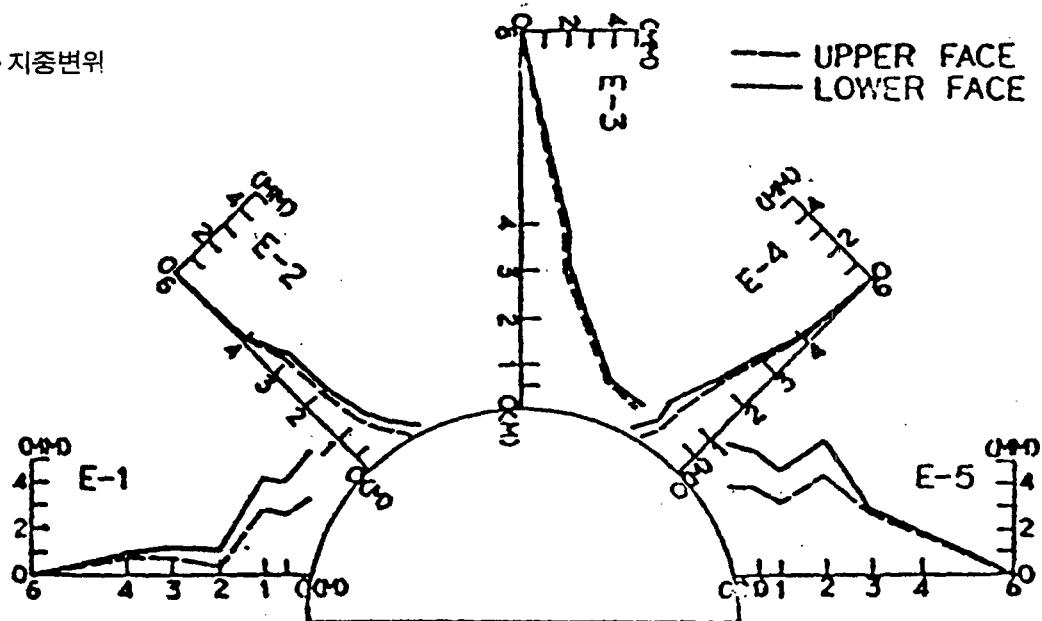
- 변위가 수렴하지 않고 점차적으로 증가하는데 Shotcrete에 작용하는 지반 하중이 증가하지 않을 경우의 판단
 - Shotcrete의 강도가 부족하여 파괴하는 경우
 - Shotcrete와 지반의 부착이 약해 활동이 발생하는 경우
 - Shotcrete 타설된 각진 부위에 간극이 존재 하중에 대한 반력이 유지할 수 없는 경우

〈굴착 및 2차 Shotcrete 타설시기〉

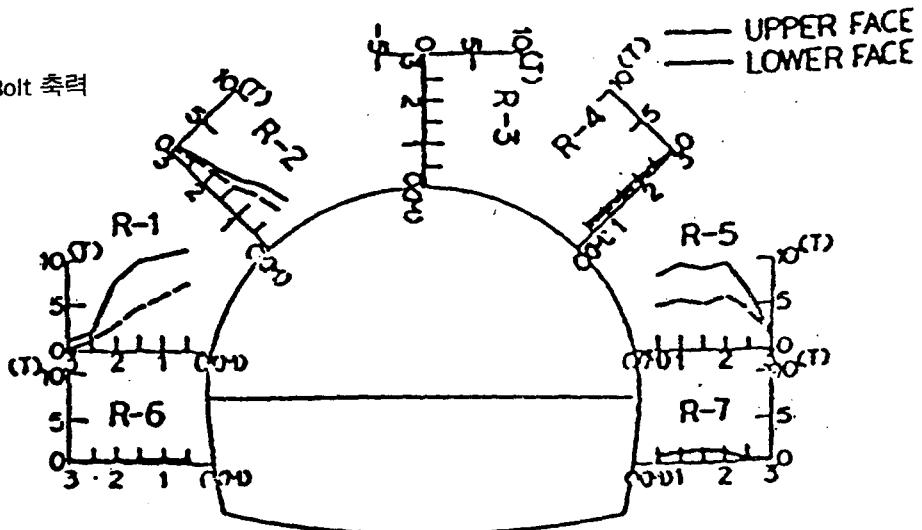


사례

• 지중변위

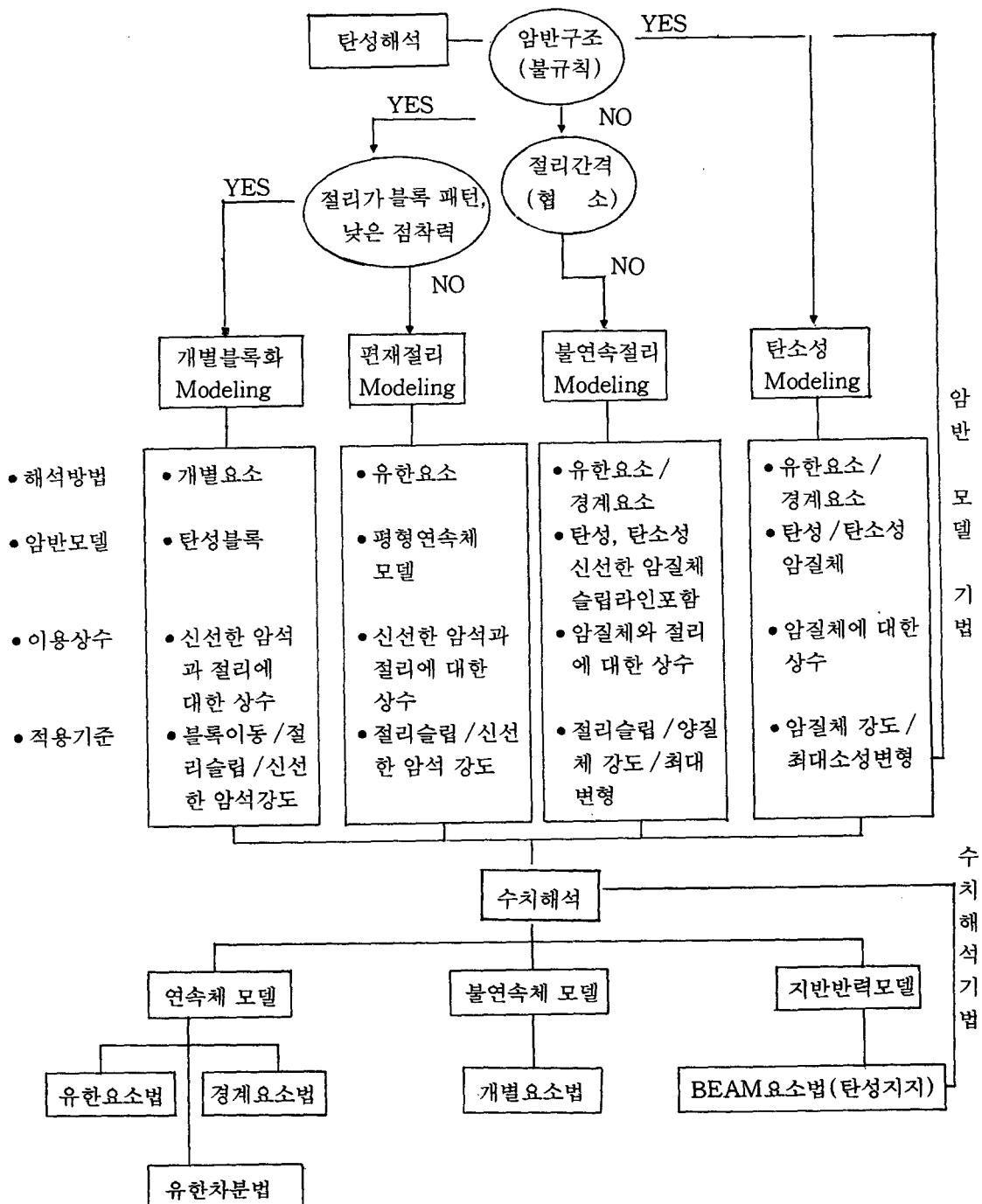


• Rock Bolt 축력



암반모델과 수치해석

설계해석을 위한 암반의 Model과 수치해석

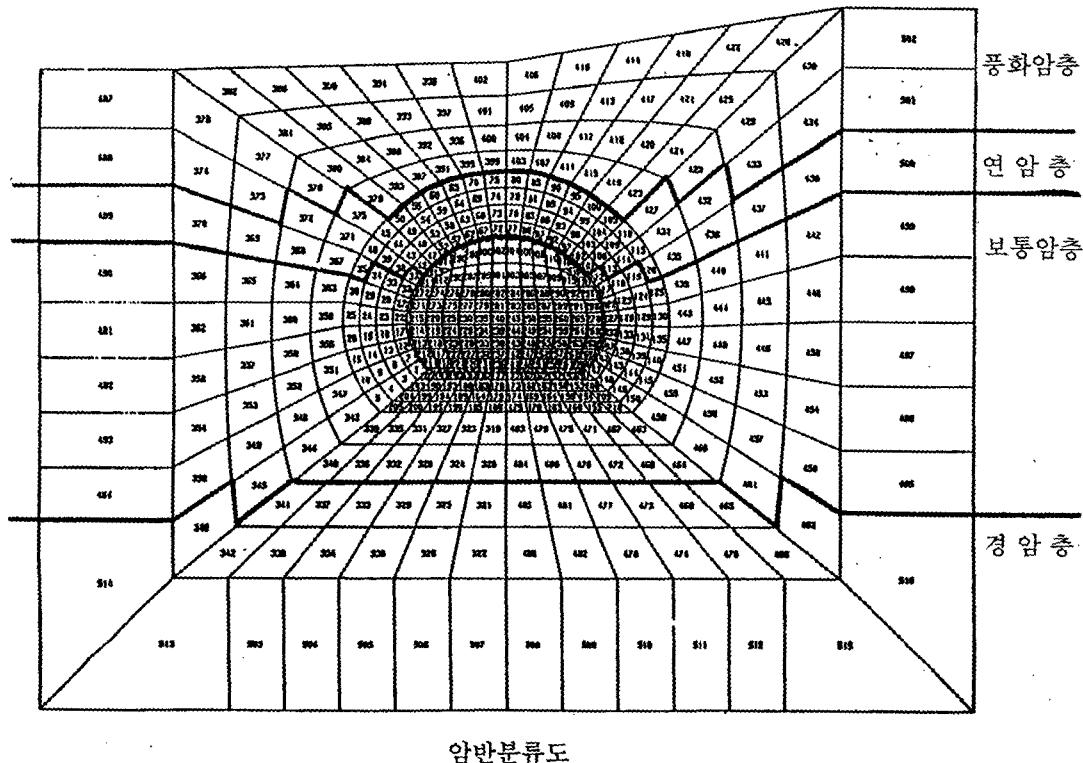


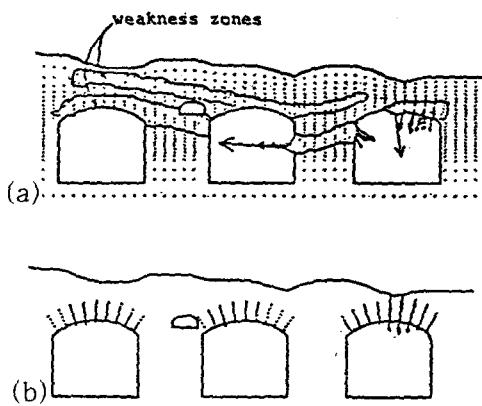
1. 유한요소법(Finite Element Method)

- 지반을 가상의 유한개의 요소로 분활, 각 요소는 절점으로 연결
- 장점
 - 복잡한 지반해석
- 단점
 - 계산시간과 저장량 요구
 - 컴퓨터에 대한 지식이 필요
 - 인위적인 경계조건을 정의
 - 재료의 불균질성을 해석
 - 시간의 존성을 고려

2. 유한 차분법(Finite Difference Method)

- Mesh등은 기본적으로 FEM과 유사하나 미지수를 푸는 방법이 Explicit Approach로 되는 점이 다르다.
- 장점
 - 단계별 해석이 가능
 - 계산시간이 짧고 저장용량이 적게 요구
 - 큰 변위 해석 가능
 - 동적 해석에 유효
- 단점
 - 많은 계산 시간이 요구





Continuum analyses of caverns with shallow rock cover in areas where rock is highly fractured and weathered : (a) results without support (arrow length proportional to displacement) : and (b) supported excavation showing distribution of forces in reinforcement.

3. BEM (Boundary Element Method)

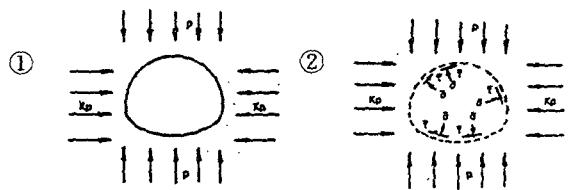
- 문제의 영역은 경계요소를 구속되며, 내부는 편미분 방정식으로 묘사.

- 장점

- 방정식 수가 적기 때문에 적은 계산이 요구
- 입력과 출력이 용이
- 정의된 경계가 가장 큰 관심사일 경우 BEM은 아주 경제적이고 효과적

- 단점

- 지반을 선형 거동의 재료로 고려
- 복잡한 건설 공정이나 재료의 시간 의료 특성 등을 쉽게 고려할 수 없다.



① The Problem to be solved

② Tensions on Potential boundary before excavation of hole in an infinite plate



③ Negative tractions representing effects of excavation

④ fictitious forces and stresses on elements of imaginary surface on infinite plate

4. Discrete Element Method

- 개별 요소법 또는 강체블록법이라 하는데, 지반을 연속체로 보지 않고 개개의 Rigid 블록으로 구성

- 장점

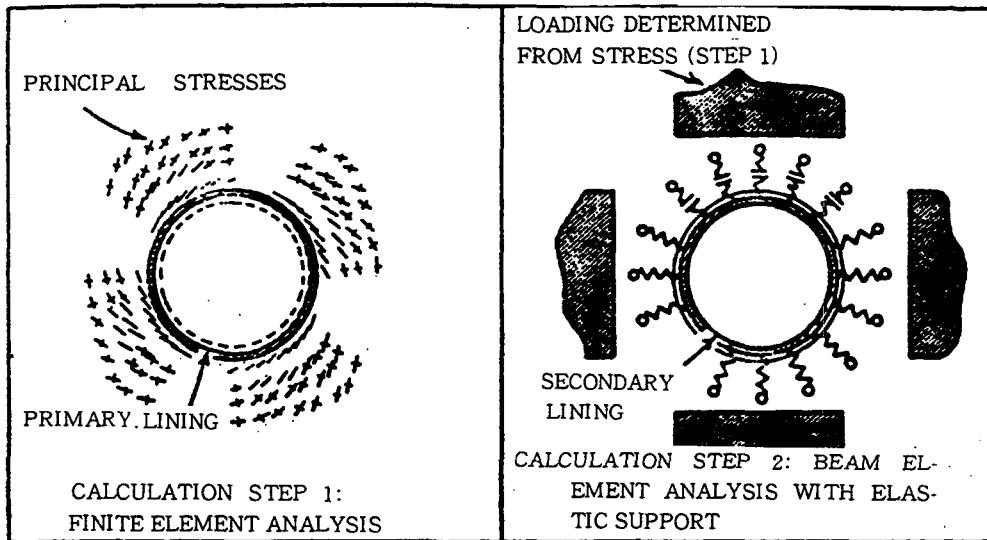
- 경암 터널에서 큰 암괴를 대상으로 할 때 유용
- 암괴의 이동은 다른 연속체 모델에 비하여 크다.

- 단점

- 절리의 방위나 위치를 입력하는데, 건설 전에 이러한 정보를 얻기가 어렵다.
- 절리의 강도 특성을 결정하기가 곤란.

5. Hybrid Model

– 각 방법의 장점을 고려하여 개발 적용.
FEM + BEMES



Hybrid Method-finite element method combined with beam element method with elastic support.

