

지하터파기 버팀시스템의 전산해석 사례 및 평가 (Evaluation of Computerized Methods for Stepwise Underground Excavation and Support System)

장 찬 수, 우 흥 기
주식회사 천일기술단

Abstract

Analysis of supported excavation system by Elasto-Plastic Isoparametric Finite Element Method and Elasto-Plastic Beam Method have been conducted for the simulation of stepwise underground excavation.

Conventional methods, Fixed Supported Beam and Spring Supported Beam method, also have been examined and compared with the results of elasto-plastic beam method and field data.

Except unavoidable result of upward ground settlement near the top of retaining wall and relatively high bending moment of wall at each excavation level, satisfactory results have been derived using elasto-plastic isoparametric finite element method.

The results from elasto-plastic beam analysis program, developed by the author, are proved to be fit field data in acceptable variance as shown in the paper.

Displacement and bending moment of the wall by conventional methods, both fixed supported beam and spring supported beam, are always underestimated than field data, and attention must be given that the difference increases with deeper excavation depth and lower horizontal subgrade reaction of the ground.

1. 서론

도시로의 인구 집중에 따라 건축물을 비롯한 사회시설물은 고밀도화가 요구되며, 새로운 건축물의 건설은 광활지에서는 고려하지 않아도될 영향을 근접한 기존의 건축물에 미치게 된다. 이러한 영향으로는 소음, 진동, 지하수의 오염, 지하수위 저하, 지하수맥의 차단, 주변 지반의 변형으로 인한 장애등이 있으며 조사, 설계, 시공 및 계측등의 각 단계마다 각별한 관리가 요망된다. 최근들어 도심지 주차장 확보를 위하여 건축물의 지하 굴착 깊이가 더욱 깊어지고 있으며 굴착깊이 증가로 인한 인접건물의 피해방지가 중요하게 되었다.

지하터파기 버팀시스템의 설계도 종래와 같은 하중분담법이나 탄성보법이 아닌 탄소성 해석에 의한 단계별 굴착과정을 simulation 하는 설계법이 요구되고 있다.

이와같은 방법으로는

- 1) 탄소성 보법
- 2) 탄소성 유한요소법등이 있으며 평소실무에서 이러한 방법을 이용하여 해석한 예를 소개하고, 해석에 수반하는 각종 문제점과 앞으로의 과제를 제시하고자 한다.

계산에 사용된 PROGRAM 은 아래와 같다.

- 탄소성 유한요소법 MRSOIL (일본 CRC사 개발)
탄소성 보법 SUNEX (천일기술단 개발)

2. 버팀시스템의 해석방법의 비교

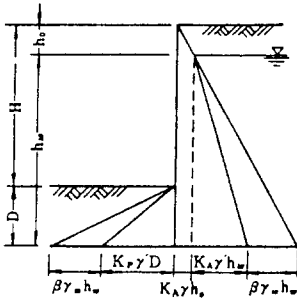
2.1 토류벽에 작용하는 토압의 산정방법 비교

토류벽에 작용하는 토압의 산정방법은 이론에 근거를 둔 RANKINE 또는 COULOMB 계의 삼각 분포 토압과 현장계측치에 바탕을 둔 TSHEBOTARIOFF 및 TERZAGHI-PECK 계의 토압이 있다.

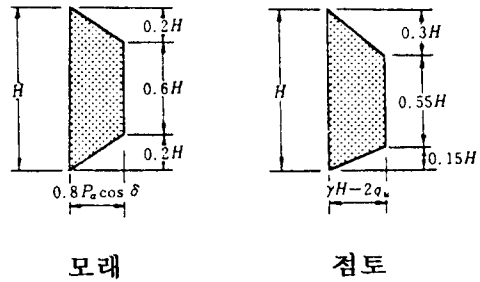
건설부 발행 구조물 기초설계 기준에서 정하고 있는 토압은 그림 1 과 같이

흙막이 벽자체의 검토시 - RANKINE 또는 COULOMB 토압

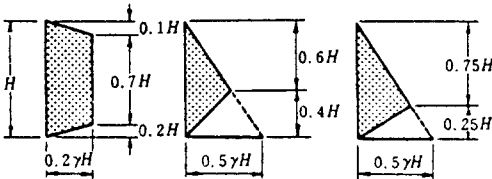
버팀 SYSTEM 검토시 ;
 ┌ 모래지반 - TSHEBOTARIOFF 토압 또는 TERZAGHI-PECK 수정토압
 └ 점토지반 일때 - TERZAGHI-PECK 수정토압을 적용하도록 하고 있다.(1)



Rankine 또는 Coulomb 계 토압

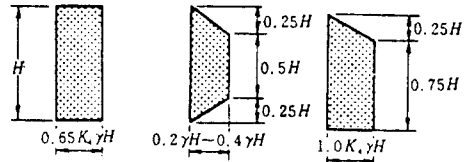


Terzaghi-Peck의 토압 (1948)



모래 균은점토 중간정도 균은점토

Tschebotarioff의 토압



모래 균은점토 무르거나 중간정도 균은점토

Terzaghi-Peck의 수정토압 (1967)

그림 1 토류벽설계에 사용하는 토압의 종류

최근에는 유한요소법에 의한 구조해석법을 토압의 분야에 적용하여 많은 연구가 이루어졌으며 재료의 비선형성과 지반 - 구조물의 상호작용을 고려함으로써 토압해석의 유력한 수단이 되고 있다.(2)

2.2 해석 방법의 비교

버팀시스템의 해석방법을 대별하면 다음과 같이 볼수있다.(3)

- 1) 단순 보법 [분할단순보법, 하방분담법
가상지점법(누가단순보법)
- 2) 연속 보법 [탄성보법
탄소성 보법, Spring Model - 탄소성보법
- 3) 유한요소법 [탄성 FEM 법
탄소성 FEM 법

단순보법은 수계산으로 가능한 간단한 방법으로서 비교적 소규모의 토류벽 계산에 사용된다. 탄성 연속보법은 Strut 와 Anchor 설치지점을 지지점으로 보고 해석하는 방법이며 이상의 해석방법으로는 지반의 변위를 구할수 없다.(4)

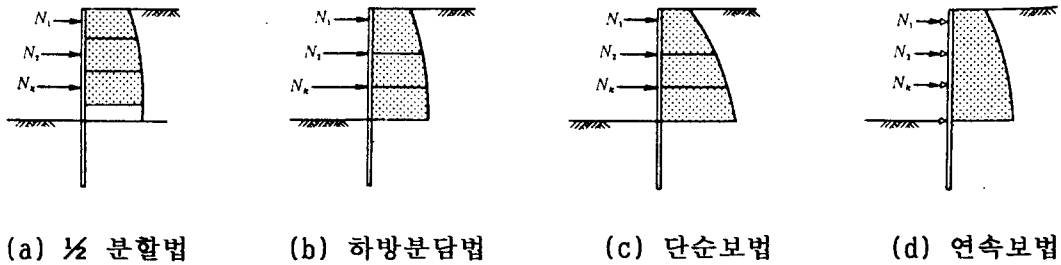


그림 2 관용 해석법

탄소성 보법은 지반과 버팀구조를 Spring 으로, 흙막이 벽을 연속보로서 Model화 하고 변위에 상응하는 지반의 탄소성상태와 토압을 적용하여 계산하는 방법으로서 단계별 해석이 가능하며 지반의 횡방향 변위가 계산가능하다.

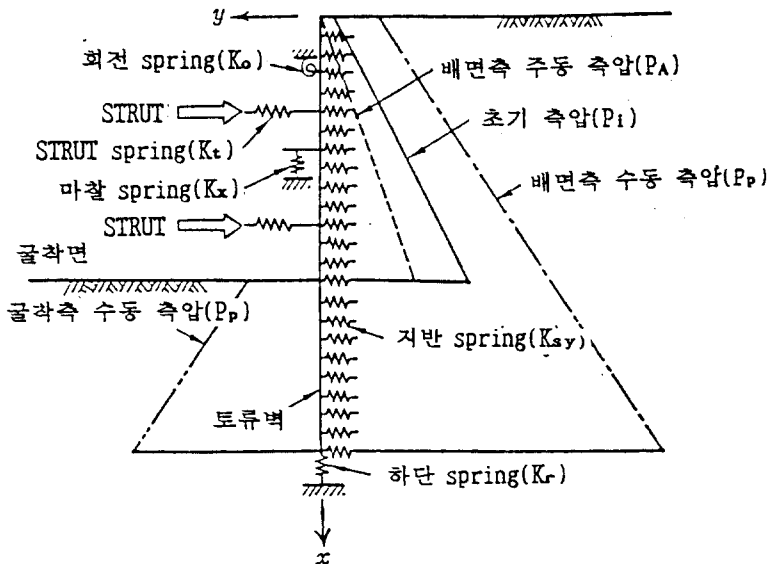


그림 3 탄소성보 기본 구조 Model

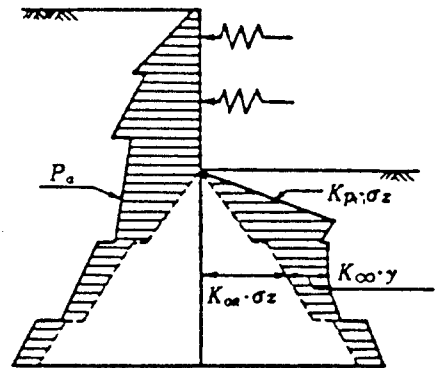
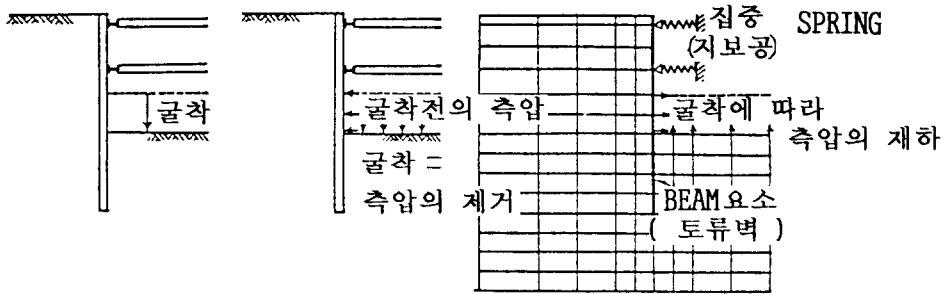


그림 4 탄소성보의 토압

유한요소법(FEM)은 최근에 토류벽의 계산에 적용하기 시작한 방법으로 토류벽의 응력, 변형 뿐만아니라 주변의 지반과 구조물의 변형도 동시에 해석되므로 주변지반이나 인접구조물에 의 영향이 큰 문제로 되는 대규모, 대심도의 토류벽 설계 및 시공에 많이 적용된다.(3)



(a) 실제 (b) 굴착의 영향 (c) FEM에 의한 해석법

그림 5 탄소성 유한요소법에 의한 해석법

3. 유한요소법에 의한 해석 예

3.1 설계 조건

위 치 : 서울시 강남구 대치동 889-11 번지 테헤란로변

굴착규모 : 폭 44.7 m, 길이 25.3 m, 면적 19.995 m², 깊이 33.1 m

흙막이 공법 : 엄지말뚝 H-Pile, Strut 12 단

지반조건 : 본 지역의 기반암은 편마암과 편암질 편마암으로 구성되어 있으며 지표로부터 풍화토 및 풍화암이 4 m 두께로 분포되고 하부로갈수록 연암 → 경암으로 점이적으로 변하고 있다. 시추공중에서 가장 풍화가 심하고 암질이 불량한 공의 성층상태는 그림 6 과 같다.(5)

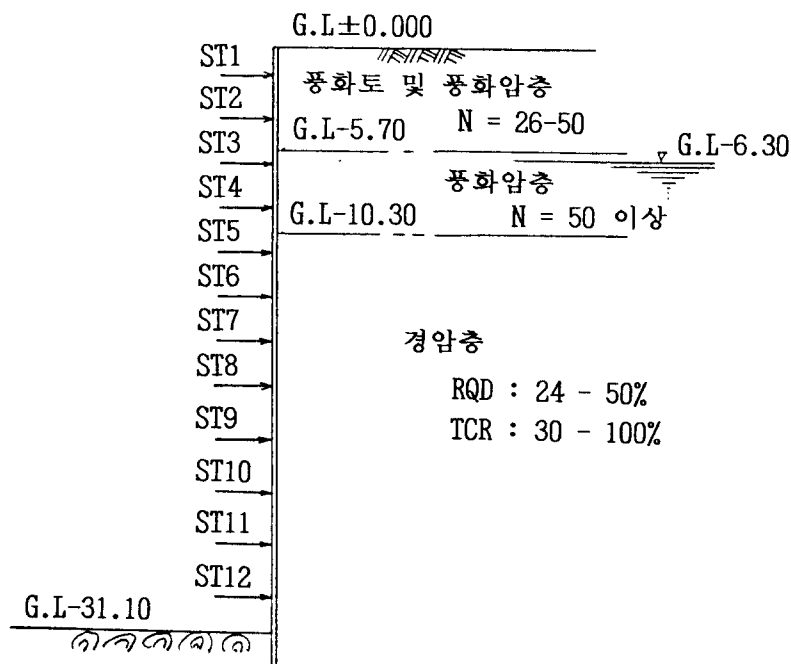


그림 6 지반의 성층상태(유한요소법)

3.2 해석 Model 및 입력자료

1) 해석 Model

해석 Model 은 그림 7 과 같이 폭 92.3m 높이 50m 총 절점수 535개 총부재수 514개의 유한요소 Model 로 하였다.

지반은 4변형 Isoparametric 탄소성요소로 하고 수직 H-Pile 은 보요소로, Strut 는 트러스 요소로 Simulation 하였다.

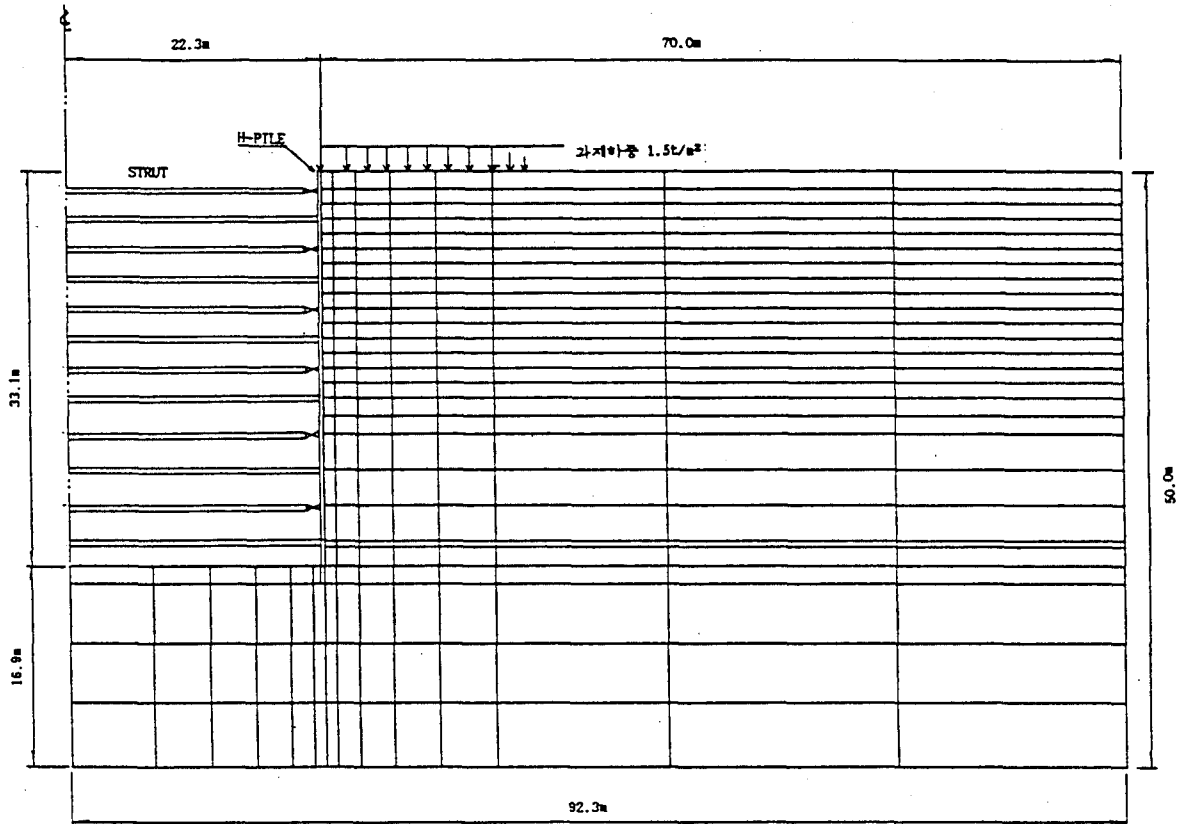


그림 7 유한요소 해석 Model

표 1 현장암반의 분류 비교

분류기준	지 질	CSIR 분류	NGI 분류	암 중 분류 (서울지하철)	본설계시 적용
분류목적	시추비 지불	굴착의 안전성 및 지보공선택	FEM 해석	FEM 해석	FEM 해석
	0-0.8 표토층	0-10 RMR = 20 Very Poor	NGI = 0.008 EXCEPTIONALLY POOR	0-5.7	0-3 풍화토
	0.8-5.7 풍화 잔적토			풍화토	3-10.3 풍화암
	5.7-6.8 연암층			5.7-6.8 연암	
	6.8-10.3 풍화암			6.8-10.3 풍화암	
	10.3m 이하	10m 이하	10m 이하	10-20 연암	10-20 연암
	경암층	RMR = 57	NGI = 0.9	20-33.1 보통암	20-33.1 보통암 1
		Fair	POOR	33.1 이하 경 암	33.1 이하 보통암 2

2) 암반의 분류 및 물성치의 결정

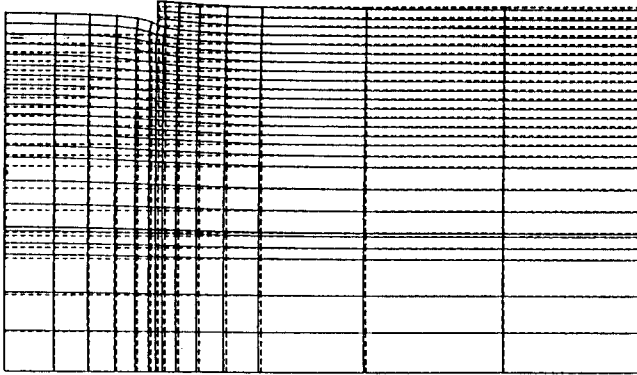
암반의 물성치를 결정하기 위하여 CSIR 분류법(6)과 NGI 분류법(7) 및 서울지하철 분류기준에 따라 분류한 후 물성치를 결정하였다. 각종분류 방법에 의한 비교결과는 표 1 과 같다. 이러한 분류기준에 따른 물성치는 서울 지하철에서 FEM 해석에 사용하는 값을 참고로 표 2 와 같이 결정하였다.

표 2 지 반 의 설 계 PARAMETER

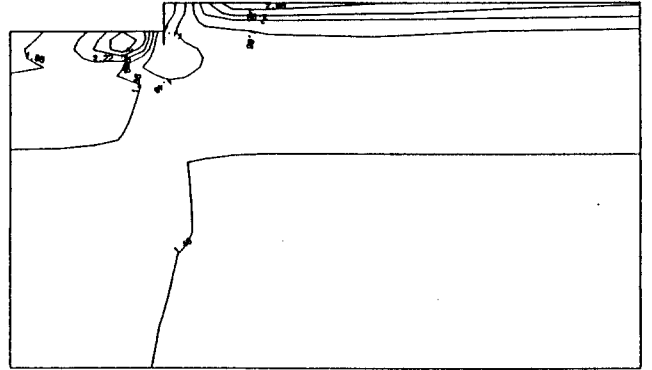
암 종		경 압	보 통 압	연 압	풍 화 압	풍 화 토
구 분						
탄 성 파 속 도		4.5km/sec 이상	4.0-4.5 km/sec	3.5 - 4.0	3.5 km 이상	2.0 km 이하
암 질 상 태		경도가 아주 좋고 균열이 적으며 풍화변질이 않된 상태	균열 및 절리가 다소 발달되어 있으나 풍화가 않된 상태	풍화작용으로 암상에 층리 및 절리가 발달되어있는 암체로서 파쇄질	물리·화학적교대 작용으로 파쇄대가 매우 발달되어있는 상태로 다소의 단층이 포함되어 있는 암상	완전히 풍화되고 암의 조직은 보존되어 있으나 토사화됨
관찰에 의한 규정		망치가 뿜겨 나옴. 강하게 칠 경우 신선한 면으로 갈라진다.	강하게 치면 균열면이나 절리면을 따라 크게 갈라진다.	망치로 쉽게 갈라진다. 비교적 균열면으로 소편으로 갈라진다.	망치로 쉽게 부서지며 망치가 아니더라도 쉽게 부서지는것	손으로 문지르면 게 부서진다.
보 링 코 아 상 태	채 취 율	90% 이상	70% 이상	40 - 70%	40 % 이 하	
	암 피	20cm 이상	5cm 이상	5cm 이하세편	모래상 또는 점토 N치 5/50 이상	좌동 N치 5/50 이상
	균열상태	주상코아	다소의 세편포함	다량의세편포함	세편으로이루고있음	
탄 성 계 수	초 기 시 (t/m ³) x e ³	(250-2,500) 500	(10 - 1,000) 40 / 50	(10 - 500) 30	(2 - 100) 10	(1 - 5) 2
	파 괴 시 (t/m ³) x e ³	50	4 / 5	3	1	0.2
포 아 스 비	초 기 시	(0.17-0.3) 0.2	(0.2 - 0.3) 0.3	(0.2-0.35) 0.3	(0.23 - 0.4) 0.35	(0.3 - 0.4) 0.35
	파 괴 시	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45
점 착 력 (t / m ²)		(10 - 500) 300	(5 - 300) 20 / 50	(2.5 - 200)	(2 - 50)	(0.5 - 50) 1.0
내 부 마 찰 각 (Degree)		(35 - 50) 50	(25 - 50) 45 / 50	(25 - 50) 40	(20 - 45) 35	(20 - 45) 30
단 위 중 량 (t / m ³)		(2.6 - 2.7) 2.7	(2.6) 2.6 / 2.5	(2.5 - 2.56) 2.4	(2.0 - 2.4) 2.2	(1.8 - 2.2) 1.8
적 용 심 도			33.1 / 20 - 이하 33.1	10 - 20	3 - 10.3	0 - 3

3) 하 중

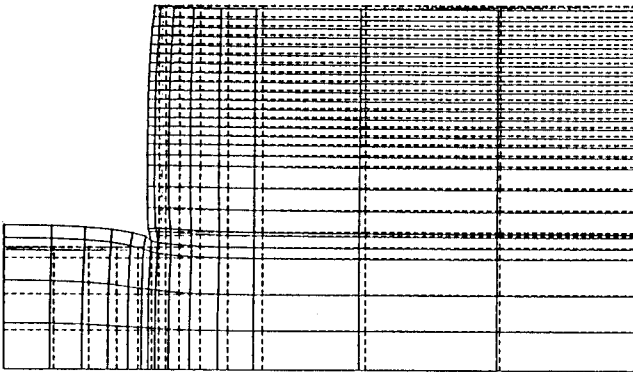
본 Model 에 작용하는 하중으로는 과재하중, 자중에 의한 초기하중, 굴착에 의한 굴착 등가 하중에 있다. 과재하중으로는 지표면에 1.5 t/m² 의 등분포 하중을 가하였다. 초기응력은 자중에 의한 응력을 계산하여 입력하였다.



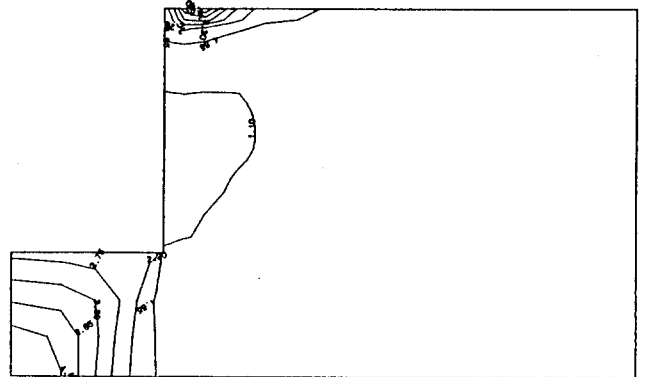
1 단계 굴착(깊이 4.0 m),
1 단 STRUT 설치후의 변 위



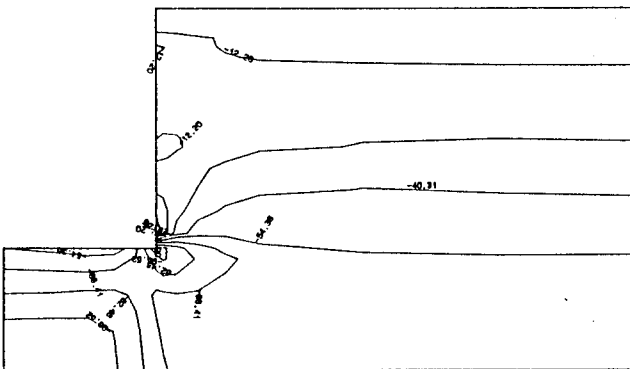
1 단계 굴착(깊이 4.0 m),
1 단 STRUT 설치후의 소성접근도



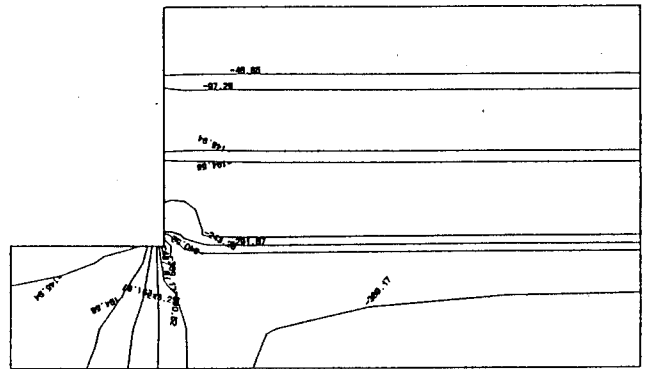
13 단계 굴착(깊이 33.1 m),
12 단 STRUT 설치후의 변 위



13 단계 굴착(깊이 33.1 m),
12 단 STRUT 설치후의 소성접근도



13 단계 굴착(굴착깊이 33.1 m),
12 단 STRUT 설치후의 최대주용력



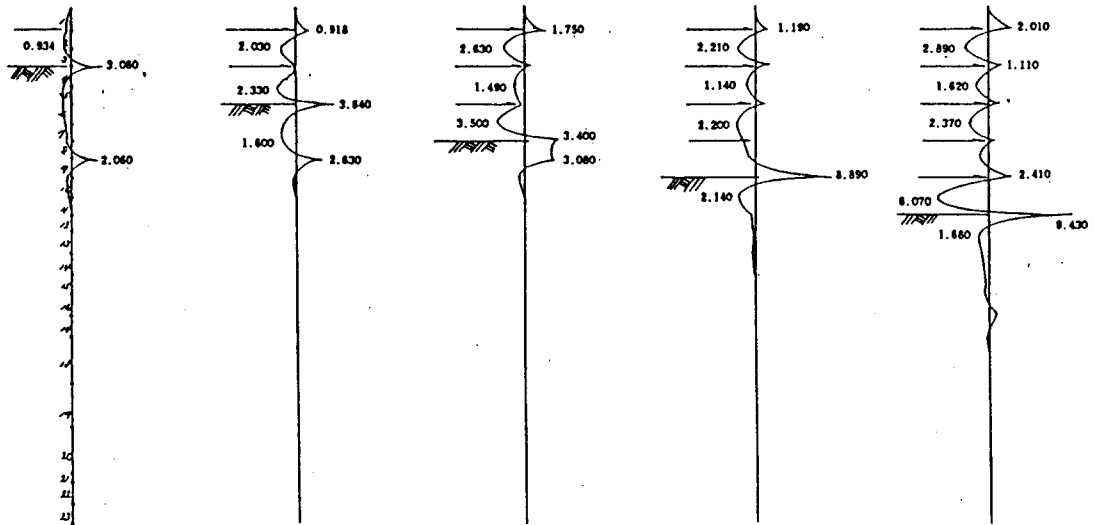
13 단계 굴착(굴착깊이 33.1 m),
12 단 STRUT 설치후의 최소주용력

그림 11 1단계 및 최종단계에서의 계산결과

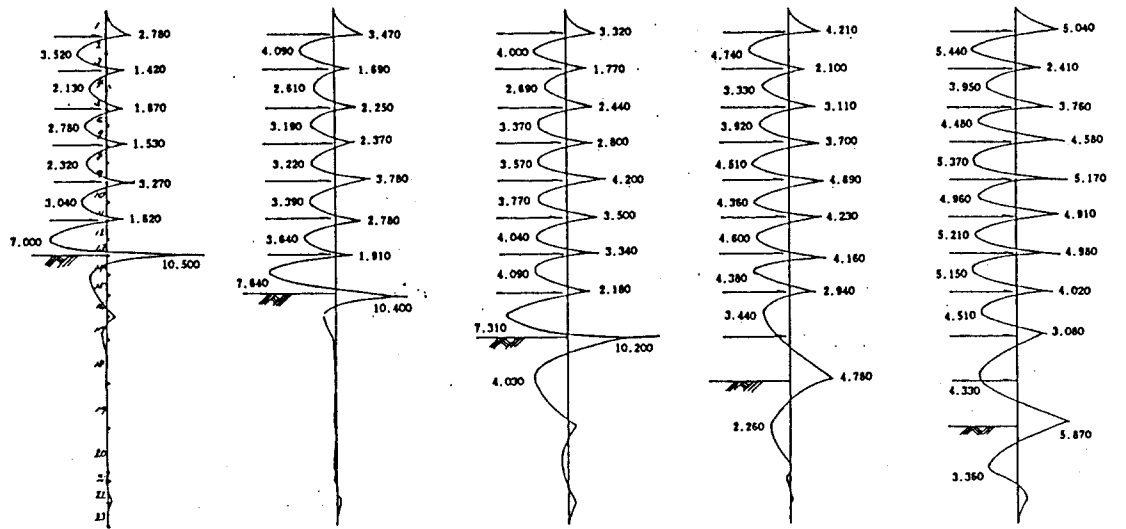
표 3 골작 단계 별 STRUT 축력 표

단위 : TON

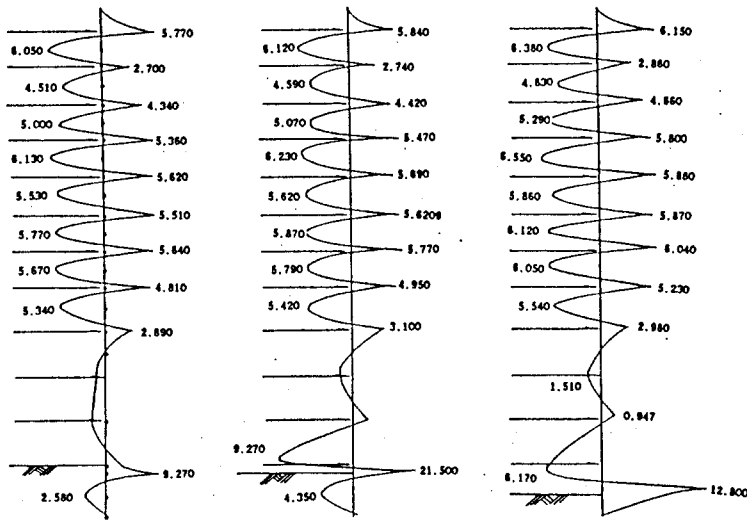
STRUT	1 단계		2 단계	3 단계	4 단계	5 단계	6 단계	7 단계	8 단계	9 단계	10 단계	11 단계	12 단계	최대치
	골작단계	4.0M	4.0M	6.5M	9.0M	11.5M	14.0M	16.5M	19.0M	22.0M	25.0M	28.0M	31.0M	
단수	위치													
1	1.5M	4.415	7.273	5.306	8.252	11.043	13.527	13.023	16.253	19.267	21.927	22.201	23.349	23.349
2	4.0M	-	4.227	2.924	6.943	10.813	14.304	14.551	19.002	23.263	27.082	27.546	29.189	29.189
3	6.5M	-	-	0.529	5.150	9.532	13.461	14.682	19.521	24.332	28.495	29.077	30.903	30.903
4	9.0M	-	-	-	6.782	12.352	17.089	19.489	24.922	30.222	35.021	35.735	37.775	37.775
5	11.5M	-	-	-	-	7.373	13.332	17.326	23.674	29.881	35.506	36.406	38.778	38.778
6	14.0M	-	-	-	-	-	7.047	12.843	19.473	26.000	31.939	32.974	35.457	35.457
7	16.5M	-	-	-	-	-	-	8.364	15.980	23.030	29.376	30.558	33.171	33.171
8	19.0M	-	-	-	-	-	-	-	9.201	17.173	24.292	25.658	28.477	28.477
9	22.0M	-	-	-	-	-	-	-	-	10.768	18.814	20.591	23.913	23.913
10	25.0M	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11.132	13.130	16.782	16.782
11	28.0M	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3.173	8.234	8.234
12	31.0M	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10.297	10.297



(STEP NO. 2) (STEP NO. 4) (STEP NO. 6) (STEP NO. 8) (STEP NO. 10)



(STEP NO. 12) (STEP NO. 14) (STEP NO. 16) (STEP NO. 18) (STEP NO. 20)



(STEP NO. 22) (STEP NO. 24) (STEP NO. 26)

그림 13 각 단계별 수직벽의 휨 모멘트

4. 탄소정보법에 의한 해석에

4.1 해석조건

굴착면적 : 폭 25.7 m, 길이 54.0 m, 면적 1,387.8 m²

굴착깊이 : 22.7 m

흙막이 공법 : Slurry Wall, 상부4단 : Strut, 하부6단 : Anchor

지반조건 : G.L-23m 까지 자연함수비 50% ~ 120% 의 연약한 해성 점성토층이며 그 이하에 수 10cm 두께의 사력층이 있고 기반암은 사질이암과 세사의 토층으로 구성된다.

4.2 해석 Model 및 입력 Data

시공단면 및 지반의 입력 물성치는 그림 14 와 같다.(9)

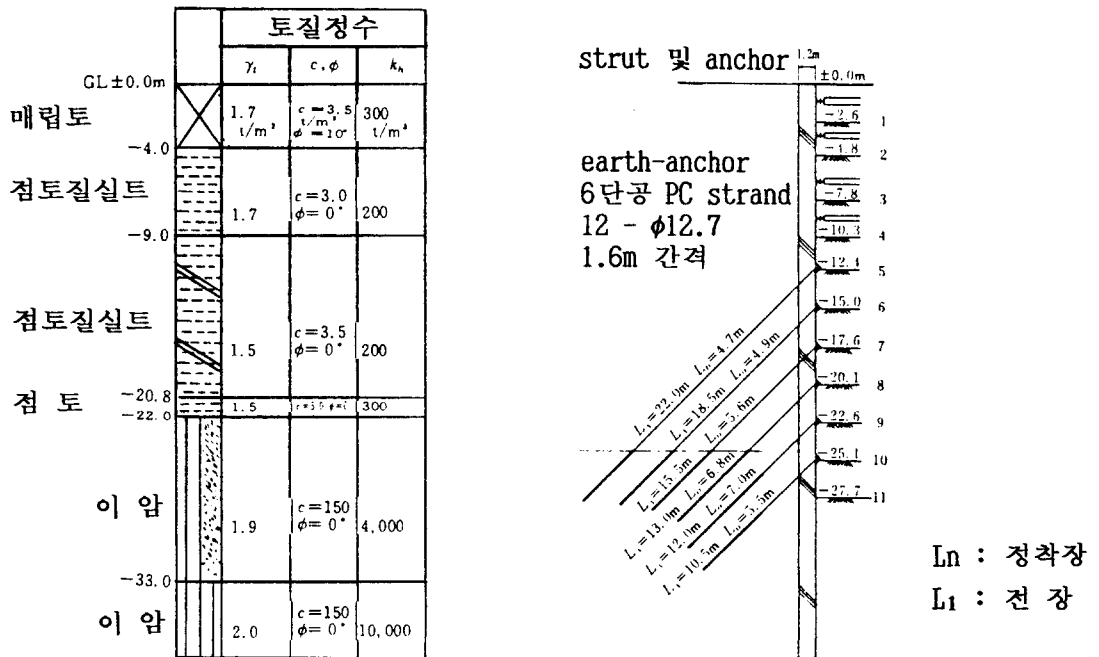


그림 14 지반조건 및 시공단면 (탄소정보법)

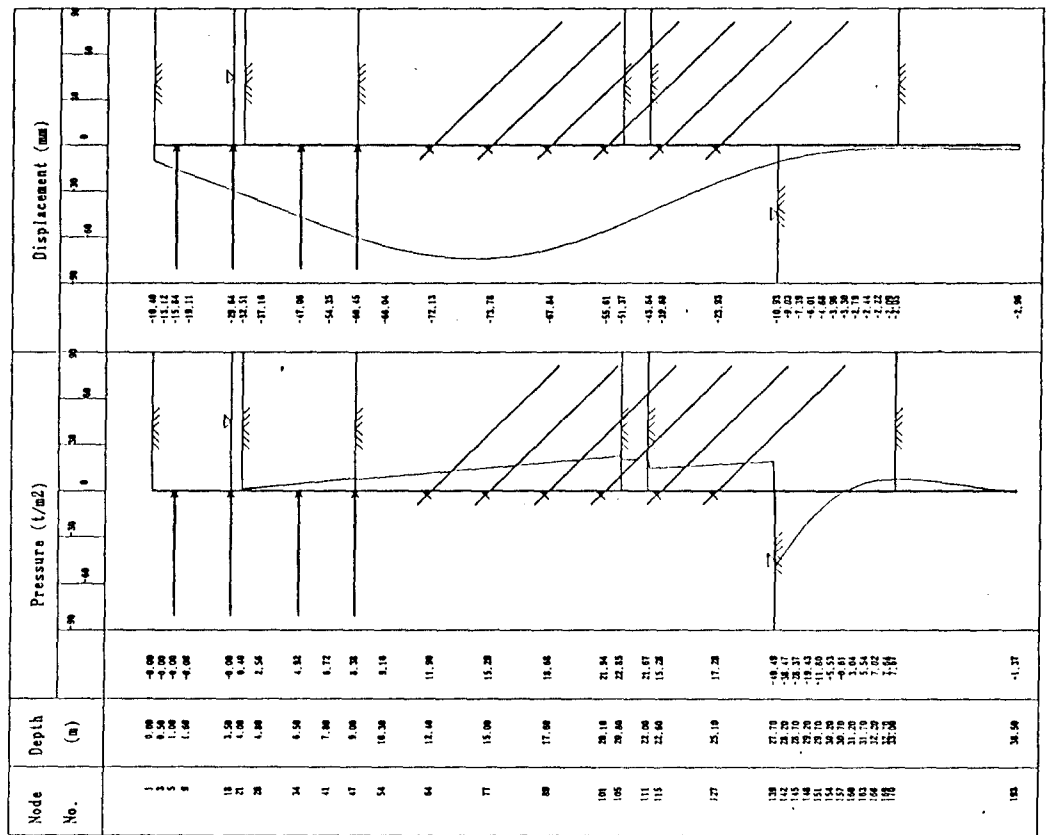
토압은 Rankine 의 토압을 기준으로 하였으며 수압은 계측결과치(정수압의 약 80%)를 적용 하였다.

4.3 해석결과 및 실측치와의 비교

해석결과 최종 단계에서의 토압, 변위, 전단력 및 휨모멘트는 그림 15 와 같으며 각 굴착단 계별 흙막이벽의 휨모멘트와 실측치를 비교하여 Plot 할것은 그림 16 ~ 그림 17 과 같다.

SUNEX Ver 2.2 , Copyright 1991 by CHUN-IL Engineering Consults Co., Ltd.
 Serial No. : 91-001.91.9.06 Licensed to : Dong Yang Engineering.
 Project : SUNEX DIAPHRAM TEST DATA
 Date : 10-15-1991
 Time : 10:45:01

Step No. 11 << EXCA TO 25.1 AND ANCHOR 6 >>



SUNEX Ver 2.2 , Copyright 1991 by CHUN-IL Engineering Consults Co., Ltd.
 Serial No. : 91-001.91.9.06 Licensed to : Dong Yang Engineering.
 Project : SUNEX DIAPHRAM TEST DATA
 Date : 10-15-1991
 Time : 10:45:05

Step No. 11 << EXCA TO 25.1 AND ANCHOR 6 >>

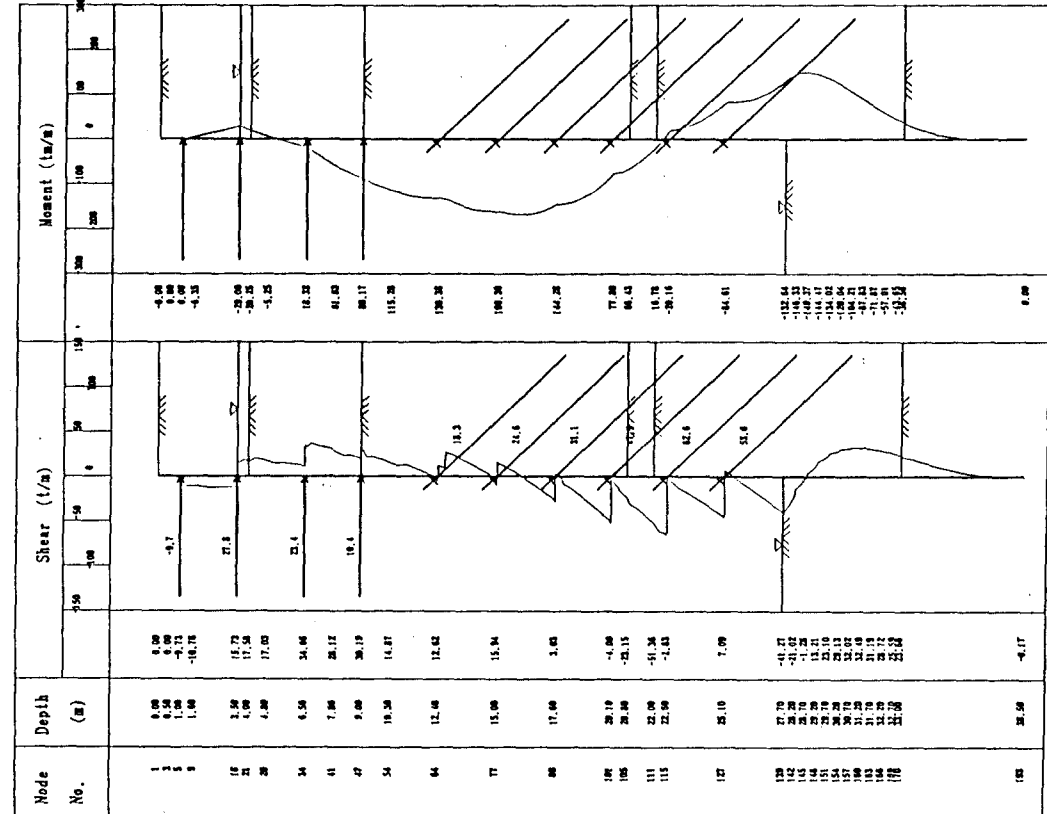
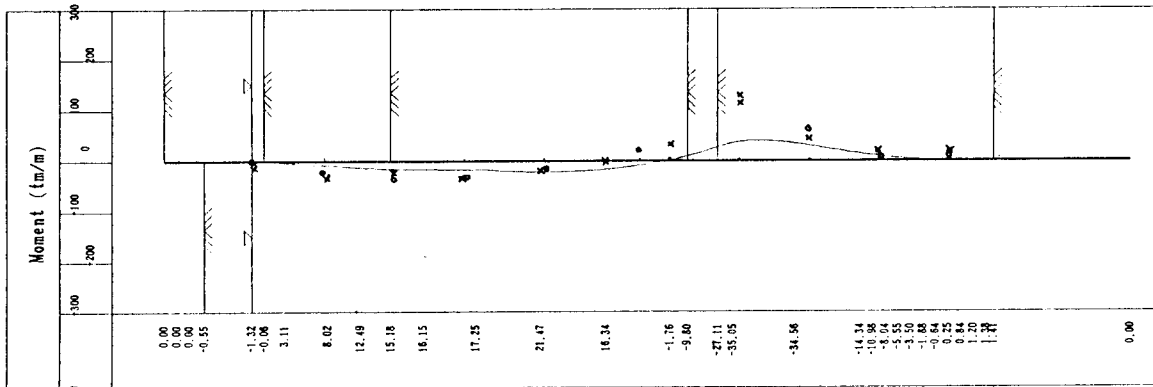
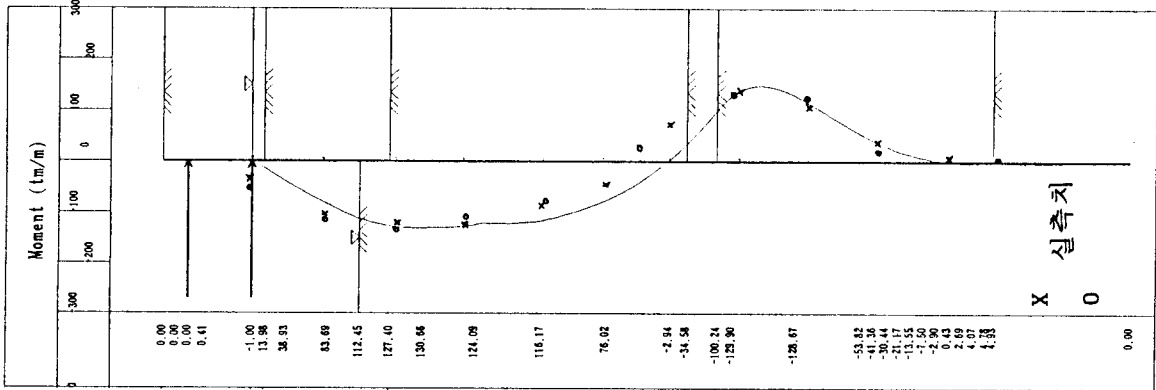


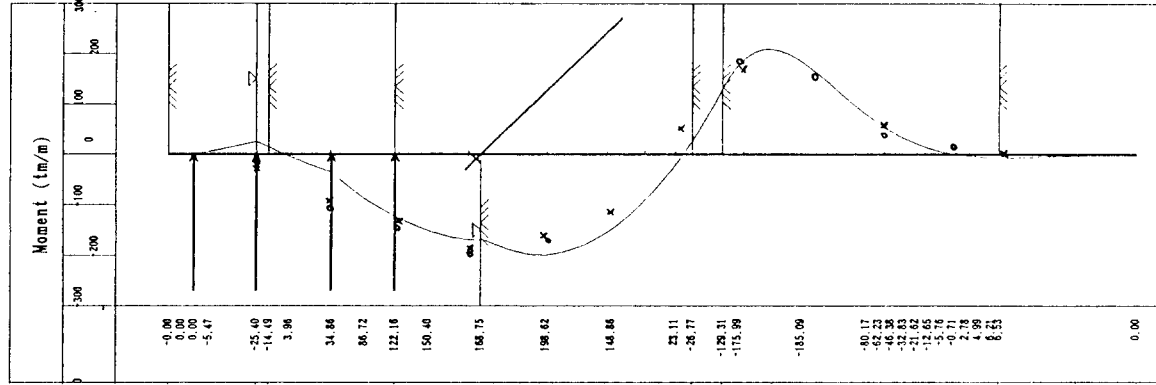
그림 15 최종단계의 해석결과(탄소성보법)



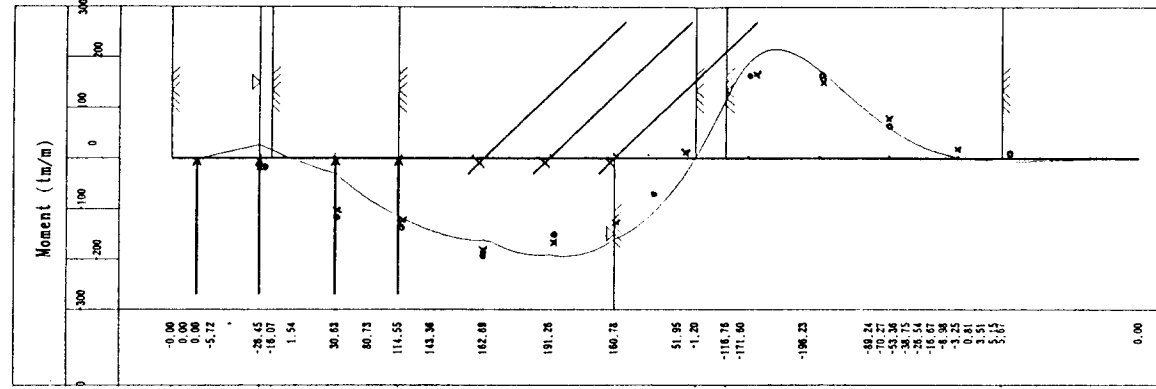
STEP 1



STEP 3

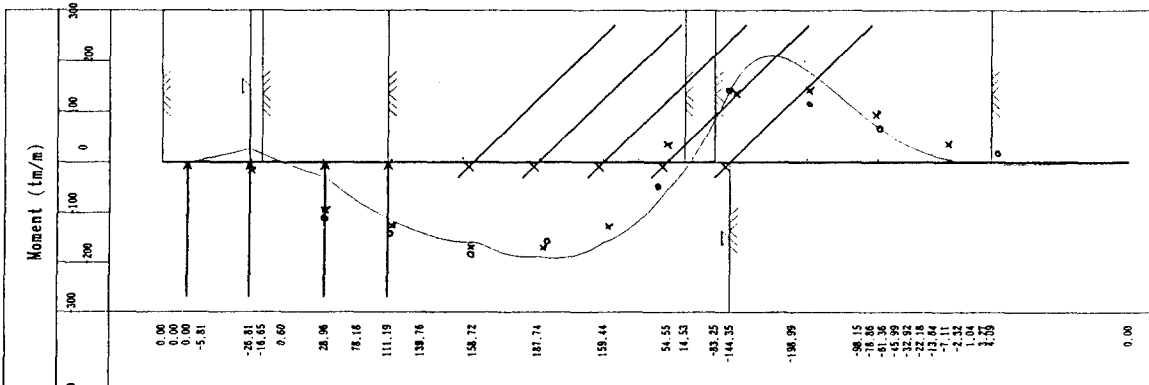


STEP 5

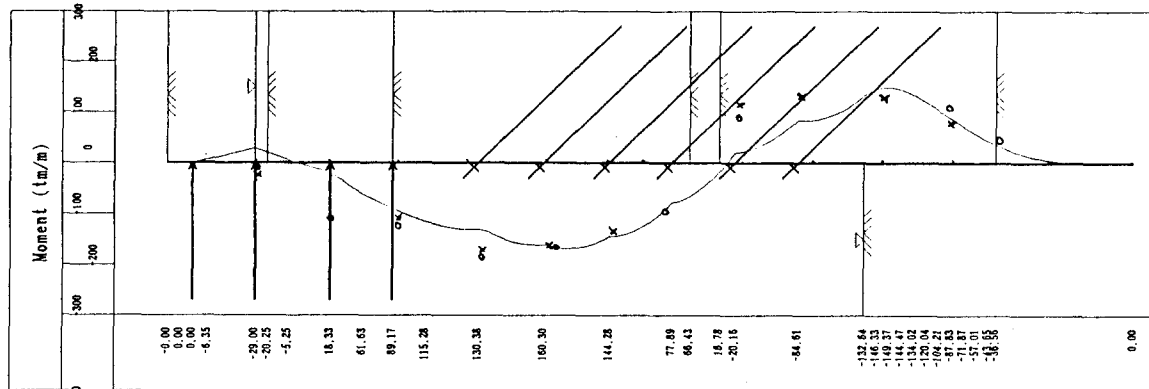


STEP 7

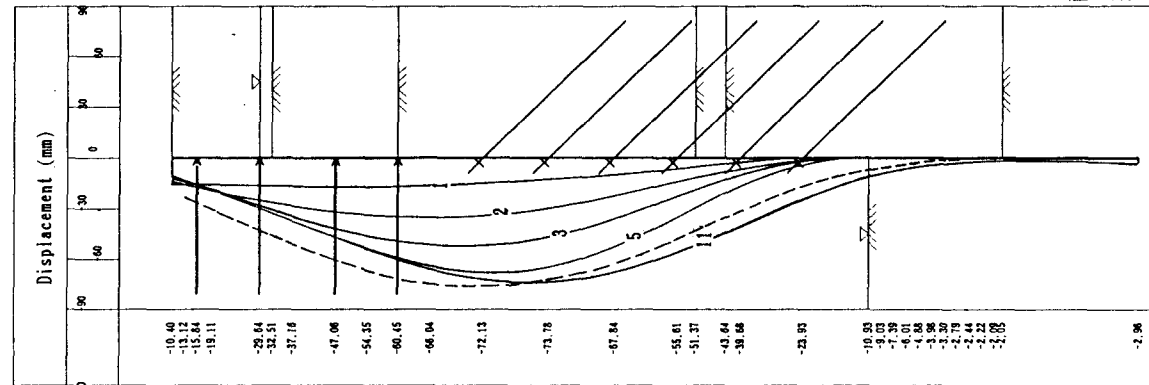
그림 16 계산된 Moment 및 실측치와의 비교(1)



STEP 9



STEP 11



단계별 계산변위 및 실측변위(점선)

그림 17 계산된 Moment 및 실측치와의 비교(2)

5. 탄성보법에 의한 해석에

5.1 해석방법

탄소성법에서 해석한 결과와 비교하기 위하여 종래에 사용해 오던 탄성보법에 의한 해석을 수행하였다.

해석은 그림 18 ~ 그림 19 와 같이 고정지점 연속보법과 Spring 지지 연속보법에 대하여 각각 하였다.

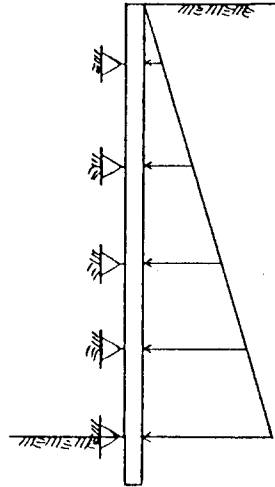


그림 18 고정지점 연속보법
(지보공 설치지점의 변위 = 0)

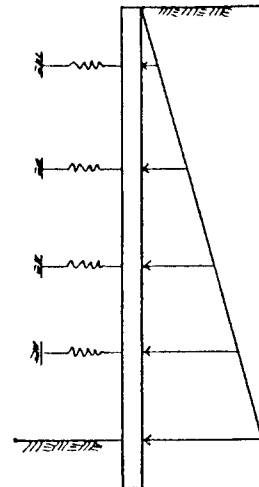


그림 19 Spring 지지 연속보법
(지보공 설치지점 = Spring 으로 지지)

5.2 해석결과 및 계측치와의 비교

해석결과 토압, 변위, 전단력 및 Moment 는 각각 그림 20 ~ 그림 21 과 같으며 Moment 를 계측치와 비교한것은 표 4 와 같다.

표 4 해석 방법에 따른 결과치의 비교

	탄 소 성 해 석	고 정 지 점 연 속 보 법	Spring 지지 연 속 보 법	비 교
1단 STRUT 최대축력	12.5 ton/m	5.0	1.7	
2단 STRUT 최대축력	31.8 ton/m	19.8	17.0	
3단 STRUT 최대축력	25.7 ton/m	27.4	36.5	
4단 STRUT 최대축력	10.7 ton/m	46.3	68.1	
1단 ANCHOR 최대축력	18.3 ton/m	56.7	24.5	
2단 ANCHOR 최대축력	24.6 ton/m	52.8	31.8	
3단 ANCHOR 최대축력	31.1 ton/m	61.6	36.3	
4단 ANCHOR 최대축력	47.9 ton/m	68.1	43.7	
5단 ANCHOR 최대축력	62.6 ton/m	58.4	43.9	
6단 ANCHOR 최대축력	53.0 ton/m	56.5	37.7	
벽체의 최대 MOMENT	199 ton/m	137.6	111.6	실측치 200
최 대 변 위	74 mm	2.4	17.3	75

SUNEX Ver 2.2 , Copyright 1991 by CHUN-IL Engineering Consults Co., Ltd.

Serial No. : 91-001.91.9.06 Licensed to : Dong Yang Engineering. Date : 10-11-1991

Project : SUNEX DIAPHRAM TEST DATA (FIXED SUPPORT) Time : 14:43:37

Step No. 1 << EXCAVATION TO 27.7 >>

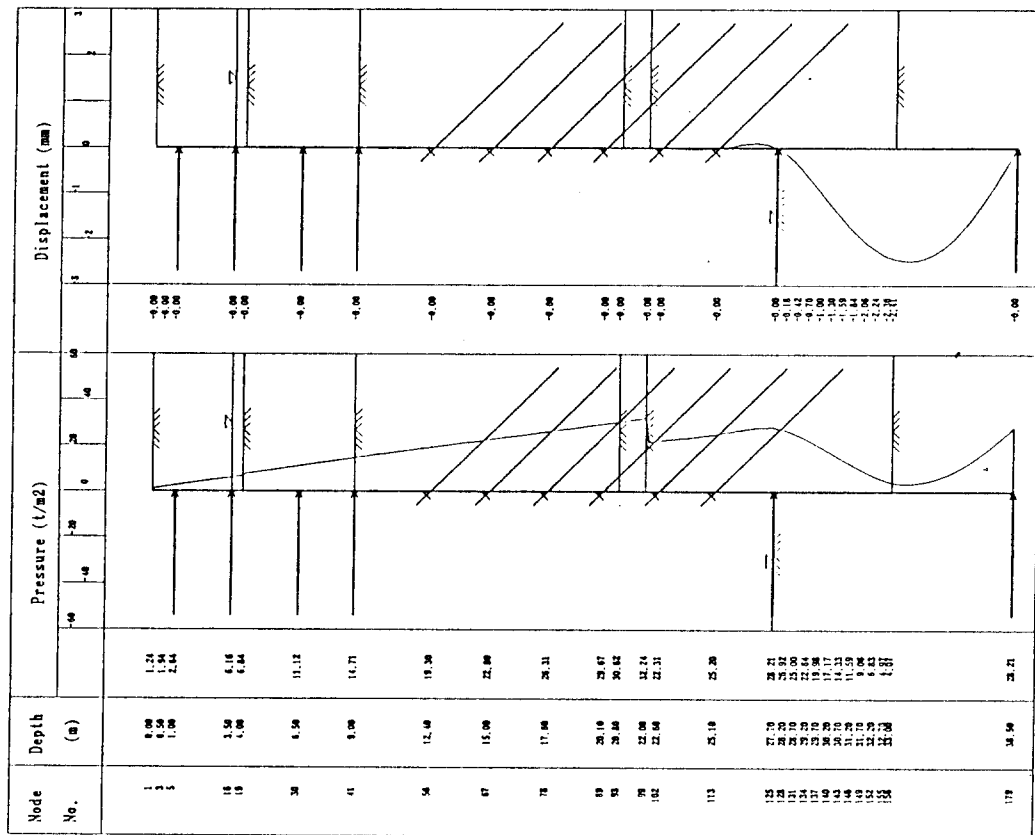


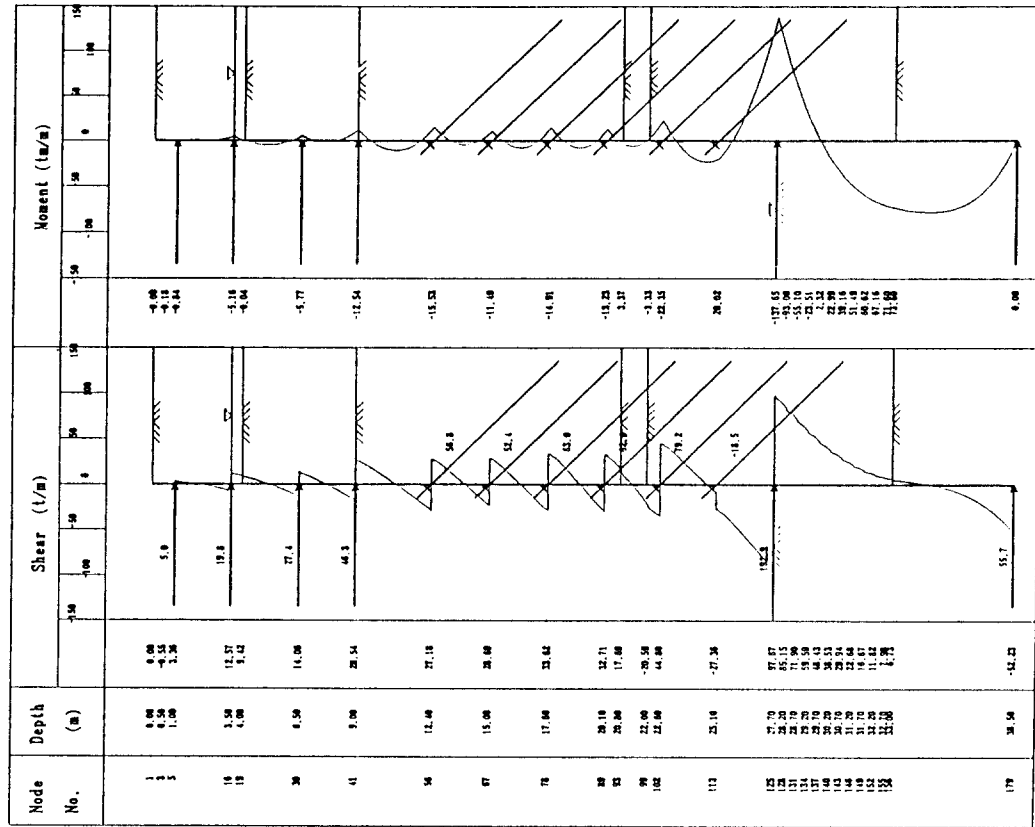
그림 20 고정지점 연속보법의 계산결과

SUNEX Ver 2.2 , Copyright 1991 by CHUN-IL Engineering Consults Co., Ltd.

Serial No. : 91-001.91.9.06 Licensed to : Dong Yang Engineering. Date : 10-11-1991

Project : SUNEX DIAPHRAM TEST DATA (FIXED SUPPORT) Time : 14:43:41

Step No. 1 << EXCAVATION TO 27.7 >>



S U N E X Ver 2.2 , Copyright 1991 by CHON-IL Engineering Consults Co., Ltd.

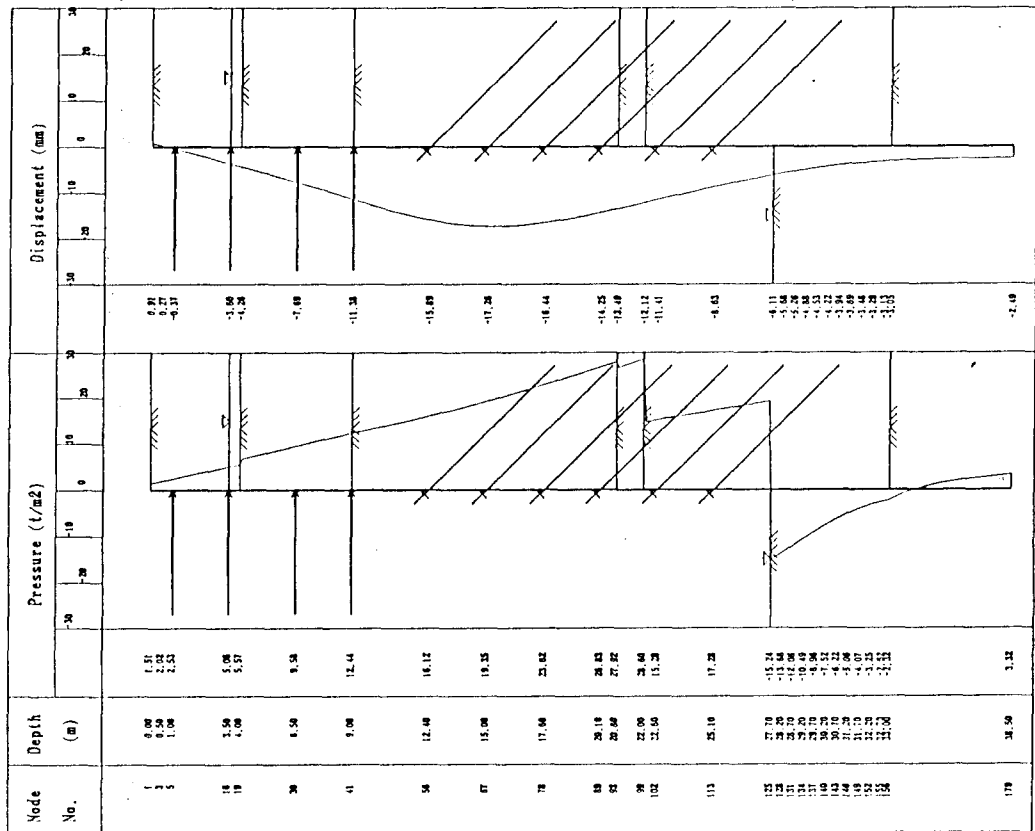
Serial No. : 91-001,91.9.06 Licensed to : Dong Yang Engineering.

Date : 10-11-1991

Project : SUNEX DIAPHRAM TEST DATA (SPRING SUPPORT)

Time : 14:51:41

Step No. 1 << EXCAVATION TO 27.7 >>



S U N E X Ver 2.2 , Copyright 1991 by CHON-IL Engineering Consults Co., Ltd.

Serial No. : 91-001,91.9.06 Licensed to : Dong Yang Engineering.

Date : 10-11-1991

Project : SUNEX DIAPHRAM TEST DATA (SPRING SUPPORT)

Time : 14:51:44

Step No. 1 << EXCAVATION TO 27.7 >>

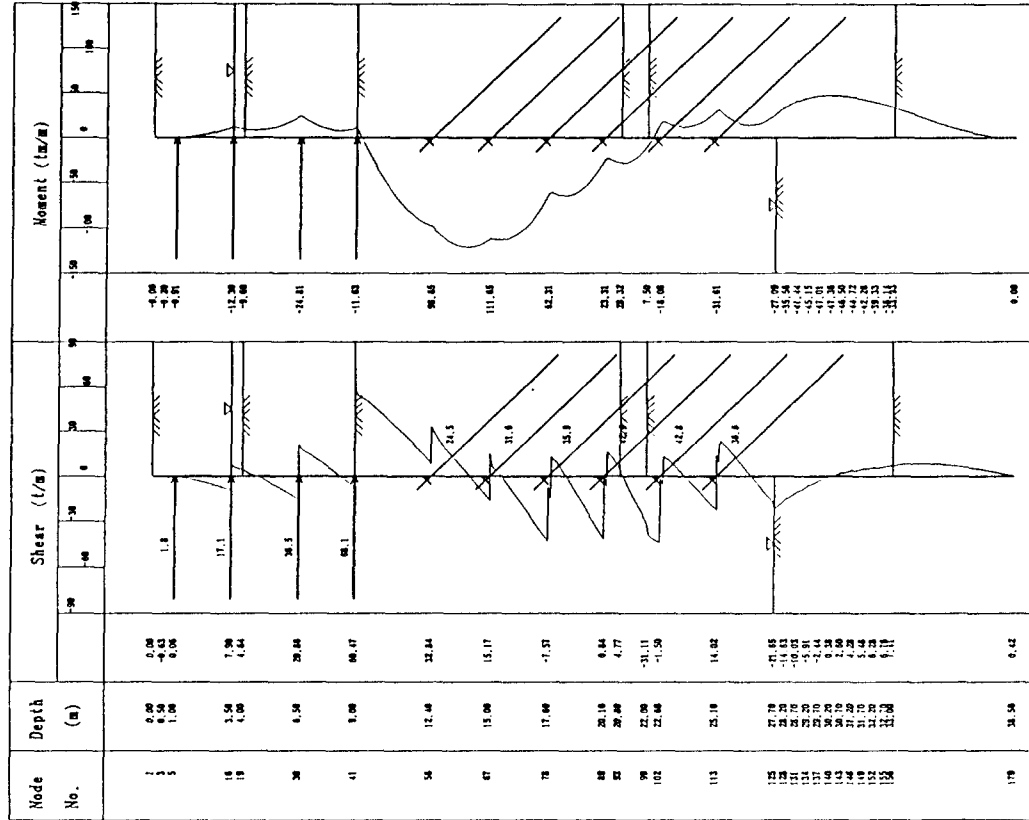


그림 21 Spring 지지 연속보법의 계산결과

6. 해석방법별 비교 및 평가

6.1 탄소성 유한요소법(MRSOIL)

본 사례 해석에 사용된 Program MR SOIL (일본 CRC사 개발)은 범용 Program 으로서 다양한 기능이 있으며 그중 지하터파기 버팀시스템의 해석과 관련되는 기능은 다음과 같다.

< 탄소성 유한요소법(MRSOIL)의 기능 >

- 1) 지반은 4변형 탄소성 요소로, 수직벽은 탄성 보요소, Strut 나 Anchor 는 탄성 Truss 요소로, 암반내의 균열에 대하여는 Joint 요소로 Modeling 된다.
- 2) 4변형 요소는 지반의 c , ϕ 및 발생하는 최대·최소 주응력에 따라 탄성한계내에 있는지를 판단하며, 탄성한계를 벗어나면 소성체로 취급된다. 지반의 이방성이 고려될 수 있다.
- 3) 토압은 별도로 입력되지 않으며 초기응력, 지보공의 강성, 지반의 변형계수 및 변위에 따라 결정된다.(10)

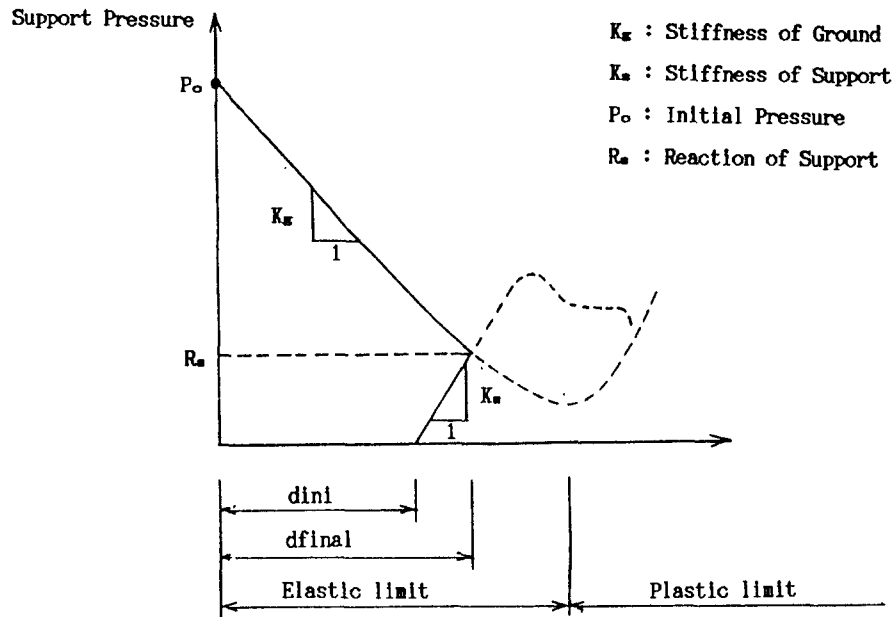


그림 22 Displacement - Support Pressure Relation

- 4) 굴착은 굴착되는 지반의 굴착전 응력과 부호가 반대인 절점력을 작용시킴으로서 표현된다.
- 5) Support System 은 설치시의 선행변위를 초기변위로 가지며 Preload 를 초기응력으로 가할수 있다.
- 6) 출력되는 사항으로는 지반내의 응력 소성접근도, Support System 의 응력, 각 절점의 변형등이다.

또 탄소성 유한요소법을 사용하였을 경우에 다음과 같은 불합리한 점과 문제점이 발생하였다.

< 탄소성 유한요소법(MRSOIL)으로 버팀 System 해석시의 문제점 >

- 1) 흙막이벽에서 가까운 주변지반은 침하하지 않고 상승한다.

이는 굴착되는 부분의 지반이 제거됨으로서 수직 응력이 감소되어 지반이 상승하는 현상이다. (11, 12, 13) 흙막이 벽에 횡방향으로 변위가 발생하면 이 부피의 손실량에 기인하는 지반의 침하가 발생한다.(14)

그러나 일반적인 유한요소법의 해석에서는 “ 부재는 변형후에도 위치를 변경하지 않는다 ”는 가정을 하고 있으며 변형전과 변형후의 Volume 에 대한 Check 가 되지 않으므로 일어나는 불가피한 현상이다.

2) 굴착바닥면에서 흙막이벽의 Moment 가 크게 발생한다.

현장계측결과와 탄소정보법에 의하면 굴착바닥면(또는 굴착바닥면 보다 약간위)에서는 Moment 가 0 인 변곡점이나, 유한요소법에서는 그 지점에서 최대치로 계산됨.

이는 흙막이벽이 굴착되지 않은 원지반과 일체로 작용하여 그 상부 굴착된 부분에서 보다 변위가 구속되기 때문인 것으로 판단되며 설계시에는 무시하였다.

3) Strut 에 가해지는 Pre load 는 Strut 자체를 약간 늘려줄뿐 지반의 변위구속 효과가 없다.

이는 흙막이벽의 휨강성(100t/m 단위)에 비하여 Strut의 축방향강성(5,000t/m 단위)이 크므로 발생하는 현상으로, 해석시 해당 Strut 를 설치하지 않은 상태에서 Pre load 에 의한 하중만을 가하며 변위를 구한후 Strut 를 설치하는 계산과정을 거쳐야 한다.

4) 입력 Data 의 작성과 오류수정에 많은 시간과 노력이 소요된다.

6.2 탄소정보법(SUNEX)

< 탄소정보법 SUNEX 의 기능 >

1) 지반은 탄소성 Spring, 토류벽체는 탄성 또는 탄소성 보, 지보공은 탄성 Spring 으로 Modeling 된다.

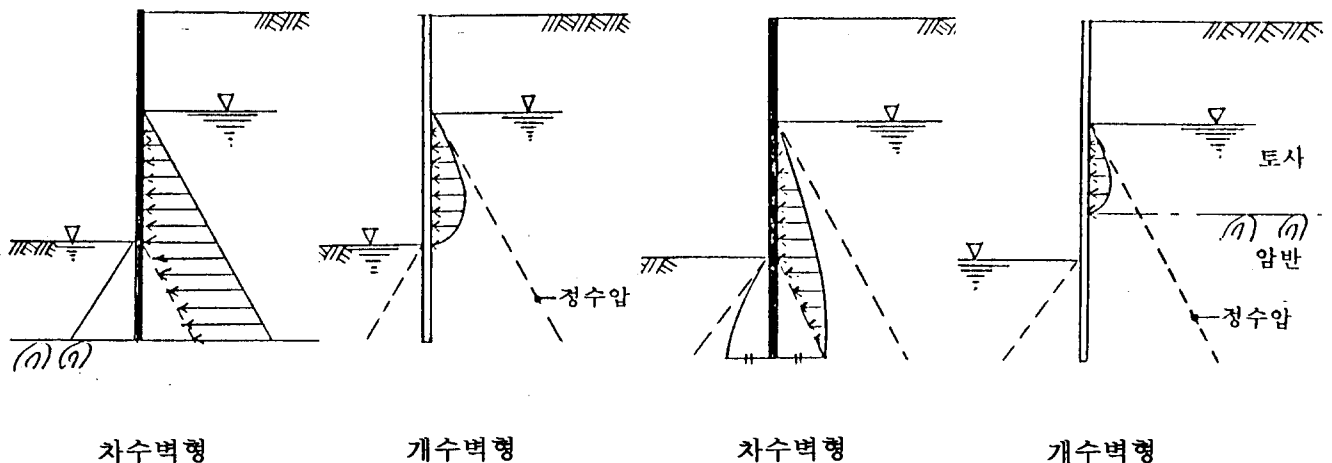
2) 토압은 Rankine 토압, Peck 토압을 선택적으로 사용할 수 있다.

$$\text{Rankine 토압 } P = A \cdot Pa \cdot + B \cdot Po$$

$$\text{Peck 토압 } P = C \cdot Ka \cdot \Sigma \gamma \cdot h$$

이때 토압의 최소치를 규정할 수 있다.

3) 정수압뿐만 아니라 특수한 형태의 수압적용이 가능하다.



그 립 23 정수압 및 특수한 형태의 토압

4) 토압은 벽체의 변위에 1차적으로 비례하여 결정된다. 단 최소 주동토압 이상이며 최대 수동 토압 이내이다.

- 5) 토압과 수압외에도 과재하중과 임의의 하중적용이 가능하다.
- 6) 지보공 설치시의 선행변위를 초기변위로 한다.
- 7) 지보공은 Pre load 를 가할수 있으며, Pre lode 는 손실을 감안할 수 있고, Strut 의 Pre8load 적용방법이 개선되었다.
- 8) Pre load 의 크기에 의하여 토류벽의 변위와 Moment 를 어떤 범위내에서 제어할 수 있다.
- 8) 동일 토층내에서도 수직방향으로 물성의 변화가 가능하다.
- 10) Bowles 방법에 따라 지표면에서의 침하량이 계산된다.
- 11) 현장 계측결과 변위를 알았을 경우는 Feed Back 에 의하여 그 이후 단계에서의 예측의 정확도를 높일수 있음.

< 탄소성 보법(SUNEX)의 문제점 >

- 1) 지반의 이방성을 고려할 수 없다.
- 2) Anchor 의 경우 인장에 대하여는 소요강성을 가지고 압축시에는 강성 $\rightarrow 0$ 이나 Program 에서는 인장 압축 공히 같은 강성을 가지는 것으로 됨 (Strut 에 대하여도 같음). 따라서 Pre load 를 가할때 기히 설치된 Anchor 및 Strut 도 Pre load 에 저항하므로 Pre load 에 의한 변위감소 효과가 줄어들 경우가 있음(MR SOIL 의 경우도 마찬가지임)
- 3) 토류벽체와 지반과의 마찰이 무시된다.
- 4) 지표면의 경사를 고려할 수 없다.

6.3 탄성보법(고정지점 탄성보법 및 Spring 지지 탄성보법)

탄성보법은 간단하고 편리하기 때문에 많이 사용되고 있으나 굴착깊이가 깊고 연약지반일 때는 다음과 같은 문제점이 있다.

< 탄성보법의 문제점 >

- 1) 지보공의 반력은 경우에 따라 과소평가 또는 과대평가 된다. (위험측 또는 비경제적)
- 2) 토류벽의 변위는 항상 과소평가 된다. (위험측)
- 3) 토류벽의 Moment 는 항상 과소평가된다. (위험측)
- 4) 지보공에 도입되는 Pre load 가 감안되지 않는다.
- 5) 단계별 해석이 불가하다. (단계별 해석을 하더라도 하중만을 분리하여 작용시키는 결과임)

6.4 금후의 과제

도심지 지하터파기로 인한 피해를 방지하기 위하여 조사해석, 설계 및 계측분야에서 많은 노력이 경주되고 있으며, 계측자료의 축적과 분석으로 부터 정립되어야할 과제도 많으리라 판단된다. 그중에는 다음 사항들도 포함되어야 할것으로 본다.

1) 조사단계

해석에 사용되는 지반의 물성치는 단위중량, 점착력, 내부마찰각, 변형계수(탄소성 유한요소법), 횡방향 지반 반력계수(탄소성 보법)이 있으며, 변형계수와 횡방향 지반반력 계수를 추정하기 위하여 깊은심도의 굴착공사에는 공내제하시험과 탄성파 탐사(Cross hole, Down Hole Test 또는 P.S logging)의 실시가 필요하며 지반에 따른 시험치-변형계수, 시험치-지반반력계수 관계가 도출되어야 할것임.

2) 설계단계

현재 단계별 해석시는 Rankine 토압을 적용하고 최종굴착단면에 대하여 PECK 토압으로 CHECK 하는 방법을 쓰고 있으며, 토사지반일때는 문제가 없는 것으로 보인다.

암반지역에서는 이러한 토압보다는 암반의 불연속변에 따라 토압이 작용하며, 많은 계측자료에 의거 암반에서의 적용토압의 정립이 요망된다.

3) 계측단계

지반조건, 인접건물의 구조, 굴착심도등에 대한 계측관리 기준치가 설정되어야 하며, 계측과정에서 수집된 자료는 역해석하여 이후공사에서의 예측 신뢰도를 높여야 할것이다.

7. 결 론

지하터파기 버팀시스템의 해석방법중 굴착과정을 Simulation 할수 있는 방법으로서 탄소성 유한요소법과 탄소성보법에 의한 해석을 수행하였다. 탄소성보법에 대하여는 종래 사용해오던 탄성보법과 비교하였다.

탄소성 유한요소법은 주변지반이 침하하지 않고 상승하는 결과가 나오는 점, 굴착바닥면에서의 벽체의 Moment 가 크게 나오는 점, Strut 에 가해지는 Pre load 는 지반의 변위구속에 효과가 없다는 점, 입력 Data 의 작성이 불편하다는 점등의 문제점이 있으나, 토압을 별도로 입력하지 않아도 지보공의 강성, 지반의 변형계수 및 변위에 따라 결정되며 다양한 조건에 대하여도 해석가능한 장점이 있다.

탄소성보법은 탄소성 유한요소법에 비하여 간편하지만 계측치와 비교하여 좋은 결과를 가져왔다. 지반의 이방성을 고려할수 없다는 점이 있으며 토압계산시 토류벽체와 지반의 마찰이 무시된다는 점과 지표면의 경사가 고려되지 않는점이 개선되어야 할점이다.

종래에 사용하여 왔던 탄성보법에 의한 해석결과 계측치에 비하여 지보공의 반력은 경우에 따라 과소 또는 과대평가되며, 토류벽의 변위와 Moment 는 항상 과소 평가된다. 이러한 현상은 굴착깊이가 깊고 연약지반일수록 그 차이가 커지므로 주의를 요한다. 또 지보공의 Pre load 를 고려할수 없는점, 단계별 해석이 불가능하므로 현장계측 Data 를 역해석에 이용하는 것도 불가능하다.

앞으로 해결해야 할 과제로서는 지반의 변형계수와 횡방향 지반 반력계수를 구하기 위한 현장시험(공내재하시험, 탄성파탐사) 자료를 축적하고 지반에 따른 시험치-변형계수, 시험치-지반반력계수 관계가 정립되어야 할것이다. 암반에서의 토압은 Rankine 이나 Peck 토압보다는 암반의 불연속변의 성질에 기인하므로 많은 계측자료에 의거 어떤 토압이 합리적인가가 정립되어야 할 것이다.

지반조건과 주변조건에 따른 계측관리 기준치가 설정되어야 하며, 계측과정에서 수집된 자료는 역해석하여 이후 공사에서의 예측 신뢰도를 높여야 할것이다.

참고문헌

1. “ 구조물기초설계기준 ”, 건설부, 1986. 11, pp471 ~ 478
2. 福岡正巳, “ 土壓の理論と實際 ”, 土と基礎, 1984. 6, p8
3. “ 地盤工學における 數値解析の實務 ”, 日本土質工學會, 1984. 6, p191
4. Chung Hyung-Sik, “ Some Problems in Design and Construction of Temporary Retaining structures ”, Proc. 1st Korea - Japan Joint Geotechnical Seminar on Excavation & Tunneling in Urban Areas, p91
5. 천일기술단, “ 대치동 00 빌딩 토질조사 보고서 ” 1991.
6. E.Hoek & E.T.Brown, “ Underground Excavation in Rock ”, IMM, 1980, pp22 ~ 30
7. Nick Barton, Lien, Lunde, “ Estimation of Support Requirements for Underground Excavations ”, ASCE, Proc. 16th Symposium on Rock Mechanics, 1975, pp163 ~ 177
8. “ MRSOIL User's Manual ”, 日本 CRC, p89
9. 布施勝 의, “ 下水處理場築造に伴う計測例 ”, 基礎工, 1985. 7. pp82 ~ 88
10. E.Hoek & E.T.Brown, “ Underground Excavation in Rock ”, IMM, 1980, pp244 ~ 324
11. Lee Seung-Rae, “ Unification of Design And Construction of Deep Excavation ”, Proc. 1st Korea - Japan Joint Geotechnical Seminar on Excavation & Tunneling in Urban Areas ”, 1990. 10, pp172 ~ 174
12. 장찬수역, “ 지반공학에 대한 유한요소해석 ”, 창우출판, 1989. pp189 ~ 194, p275
13. L.V.Medeidos etal, “ Modelling of the Construction of an Underground Station ”, Proc. 4th International Conference on Numerical Methods in Geomechanics ”, 1982, p932
14. Joseph E.Bowles, “ Foundation Analysis and Design ”, McGraw - Hill, 1982, pp527 ~ 529