

인천국제공항 여객터미널 굴토공사 계측 사례 Field Instrumentations of Incheon International Airport Passenger Terminal Excavation Project

류연택¹⁾, Yeon-Teak Ryu, 한석희²⁾, Seok-Hee Han, 성준혁³⁾, Joon-heok Sung
이양구⁴⁾, Yang-Ku Lee

¹⁾ (주)유신코퍼레이션 건설기술연구소장, ²⁾ (주)유신코퍼레이션 지반공학부 이사
³⁾ (주)유신코퍼레이션 건설기술연구소 대리, ⁴⁾ (주)유신코퍼레이션 건설기술연구소 사원

SYNOPSIS : A case study of field instrumentations of Inchoen international airport passenger terminal excavation was performed to compute the result of instrumentations and theoretical analysis. The behavior earth retaining structures on the soft ground is different from the analysed results, thus using of the optimized soil parameters closed to field conditions is very important in designing of earth retaining structures. The ultimate frictional resistance of ground anchor which observed in pull-out capacity test is nearly closed to design value. However the Korean specifications of pull out test is required since the procedures of anchor testing are some different in each country. In addition, It is required that the feed-back analyzing technique which represents the field conditions and effective monitoring systems are indispensable to construction management.

1. 공사개요

인천국제공항은 인천광역시 중구 영종도와 용유도 사이에 위치하며 해수의 조석차에 영향을 받는 간석지로 남북측에 방조제를 축조한 후 인근 바다저면을 준설매립하여 건설되는 공항으로서 부지면적이 1,700만평에 이르는 동북아 중심공항으로 2000년에 개항을 목표로 추진되고 있다. 공사는 단계별로 시행되고 있으며 최종완공단계에는 4,000m급 평행활주로 4개가 건설되어 연간 여객 1억명과 화물 700만톤을 수용할 수 있는 시설로 건설되는데, 여객터미널은 공항부지 중심부에 위치하며 건물의 길이 1,060m, 폭 149m, 높이 33m의 지하 1층, 지상 4층의 구조로 총면적 108,000평에 이르며, 여객의 동선을 고려한 단면도를 나타내면 그림 1과 같다.

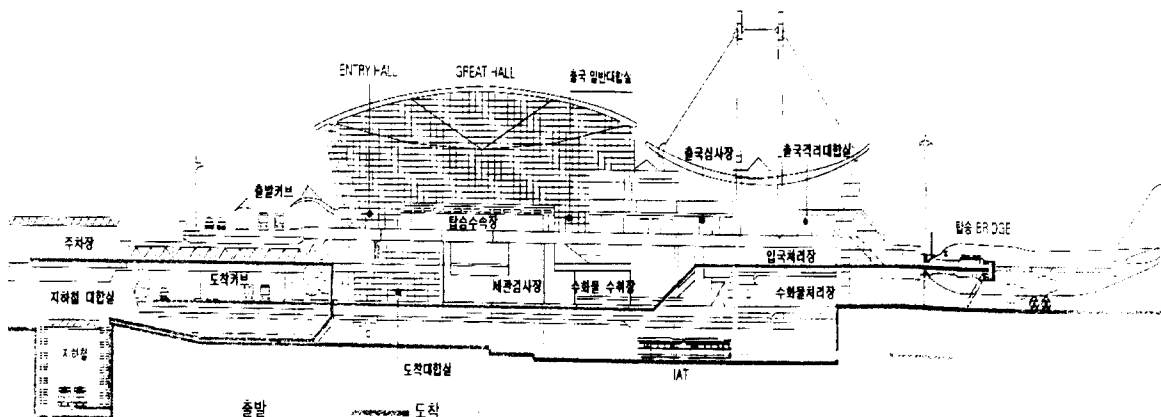


그림 1. 여객의 동선을 고려한 단면도

여객터미널의 굴토공사는 준설매립(EL.4.6m)에 의한 부지조성이 완료된 상태에서 매립층의 지하수의 유입을 막기 위하여 건물예정지 주위로 sheet pile을 타입하고 부지내 매립토를 유용한 다음 건물에 인접하여 영구 sheet pile을 타입하여 earth anchor로 지지하면서 굴착하는 공사로서 부지면적이 넓고 연약한 해성점토를 다량으로 굴착하므로 공사에 많은 어려움이 예상되는 공사라 할 수 있다. 공사의 주요내용은 표 1과 같으며, 부위별로 나타내면 그림 2와 같다.

표 1. 주요공사 내용

공종	내용 및 규모
진입도로공	sheet pile : 23,618m 사토장 진입로 : 42,040m ³
절토공	준설층 : 989,176m ³ 해성층 : 819,350m ³
흙막이공	상부(준설매립층) : 1:2 경사로 open cut 하부(해성퇴적층) : sheet pile + earth anchor sheet pile : 190,777m earth anchor : 88,177m
차수 및 배수공	외부유입지하수 : sheet pile로 차단 내부 지하수 : well point 공법을 적용하여 trench 유도 배수 - well point (1,885공), trench (3,665m)

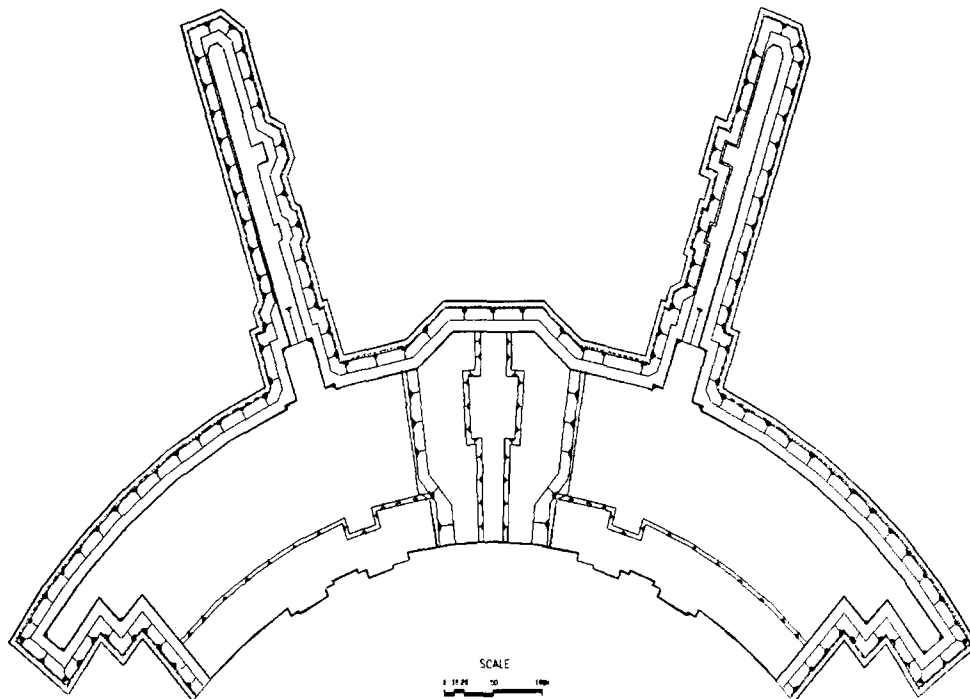


그림 2. 굴토 평면도

1.1 지층구성상태

지층구성은 상부로 부터 준설패립층(모래), 상부해성퇴적층, 하부해성퇴적층, 풍화잔류토층 및 기반암의 순으로 분포되어 있다. 상부해성퇴적층은 연약한 점성토로 이루어져 있으며, 하부해성퇴적층은 비교적 굳은 점성토 또는 실트와 모래, 자갈 등으로 구성되어 있으며 굴착은 주로 연약한 상부해성퇴적층에서 수행된다. 하중지지구조는 sheet pile 토류벽과 earth anchor 지지구조로 이루어지며, earth anchor의 정착부는 하부해성층에 위치한다.

본 지역의 기반암은 중생대 유라기의 대보화강암으로 주 구성광물은 석영, 흑운모, 장석 등으로 중립 내지 조립질로 나타나며, 전지역에 걸쳐 제4기의 충적층이 두껍게 피복되어 있다.

각 지층의 성층상태와 토질특성을 나타내면 표 2와 같으며, 주 굴착대상층인 상부해성퇴적층의 토질특성은 표 3과 같다.

표 2. 성층상태와 토질특성

지층	통일흙분류	두께(m)	N 치	비고
준설패립층	SM,SP	1.0 - 5.3	0 - 32/30	전지역
상부해성퇴적층	ML,CL,SM	2.1 - 14.8	0 - 12/30	전지역
하부해성퇴적층	CL,ML,SM,SP, GP,GM,CH	19.2 - 38.0	4/30 - 50/4	-
잔류토층	SM	0.6 - 5.1	27/30 - 50/16	전지역
기반암층	-	-	-	전지역

표 3. 상부 해성퇴적층의 토질특성

구분		최대	최소	평균	표준편차
입도	#200통과량,%	100.0	61.7	94.4	7.9
	점토량(<2 μ),%	87.2	12.0	47.6	20.0
컨시스턴시	LL,%	52.2	25.4	31.7	5.2
	PI,%	29.4	1.8	8.9	6.5
현장조건	W _n ,%	45.6	18.3	35.3	4.8
	γ_t , g/cm ³	1.977	1.644	1.867	0.073
	γ_d , g/cm ³	1.575	1.211	1.372	0.081
	γ_{sub} , g/cm ³	0.994	0.762	0.865	0.051
	G _s	2.74	2.68	2.70	0.01
	S _r ,%	100.0	47.7	94.5	10.3
압밀특성	e ₀	1.230	0.721	0.980	0.113
	p _c , kg/cm ²	2.20	0.53	1.11	0.42
	C _c	0.360	0.080	0.208	0.056
	OCR	5.9	1.0	2.4	1.1
강도특성	q _u , kg/cm ²	0.78	0.11	0.34	0.13
	c _u , kg/cm ²	0.78	0.16	0.32	0.14
	c _{cu'} , kg/cm ²	0.43	0.05	0.20	0.10
	$\phi_{cu'}$, deg.	35.8	0.0	28.1	9.7
	c _{cu} , kg/cm ²	0.36	0.08	0.17	0.06
	ϕ_{cu} , deg.	34.2	8.8	15.4	5.8

1.2 계측항목 및 수량

본 공사의 계측항목은 굴착에 따른 지중응력 해방으로 인한 토류벽체와 주변지반의 거동 파악을 위한 목적으로 선정되었으며, 계측항목별 설치수량은 표 4와 같으며, 그림 3은 계측기기 배치도를 나타낸 것이다.

표 4. 계측항목별 설치수량

계측항목	목적	계획수량 (개소)	설치수량 (개소)
지중경사계	굴착지반의 변형, 거동상대 파악 허용변위와 실측변위의 비교 안정성 검토	29	17
지하수위계	굴착시 토류벽 배면의 지하수위 파악	16	9
간극수압계	토류벽 배면지반의 간극수압 파악	16	9
하중계	earth anchor에 의한 반력변화 측정 허용 anchor력과 비교 안정성 확인	38	3
지표침하판	토류벽 주변지반의 침하측정	16	-

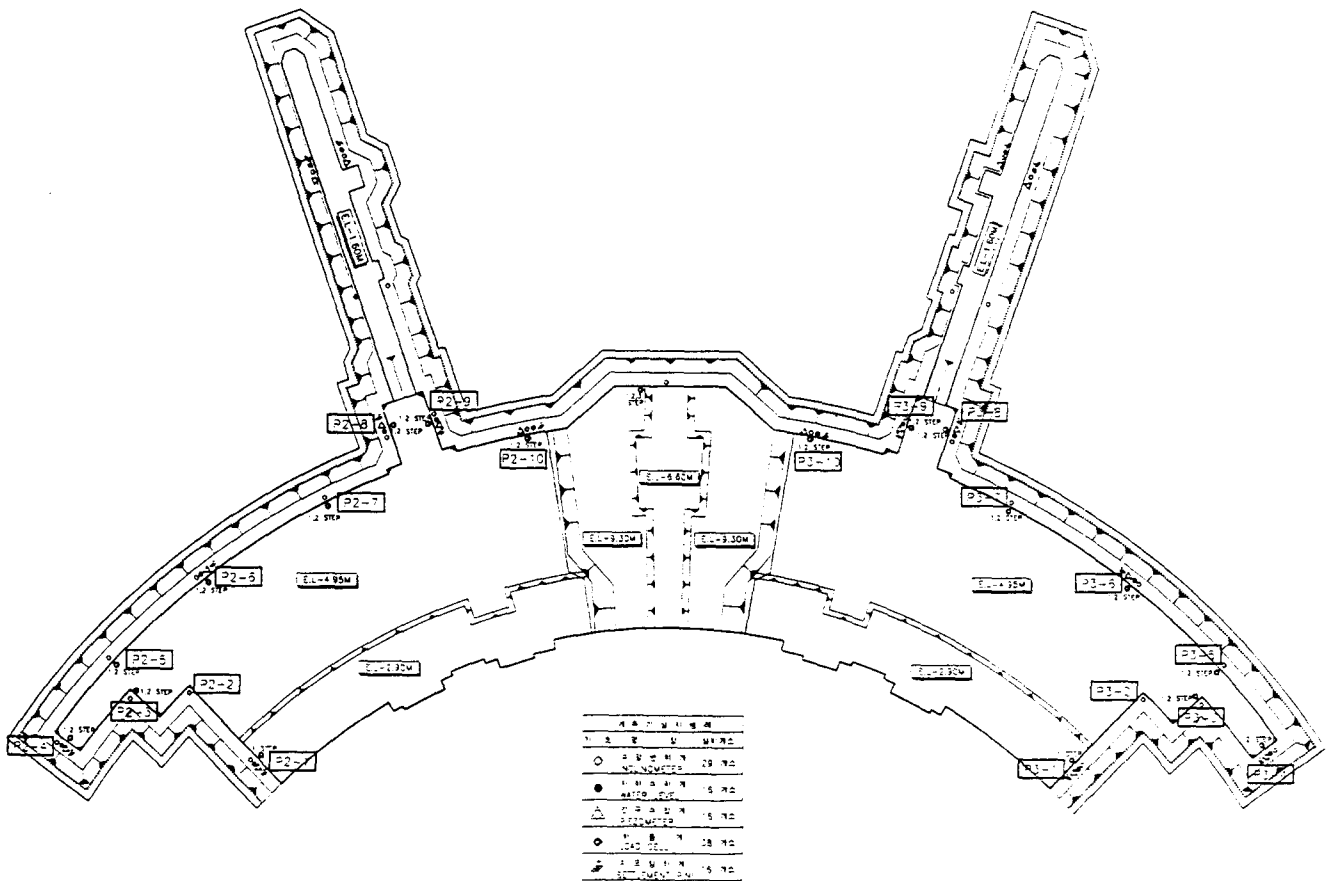


그림 3. 계측기기 배치도

2. 굴착사면의 안정

굴착공법의 선정시 지반토의 종류와 강도정수, 지하수위, 사면보호방법, 사면 및 굴착저면의 안정성, 인접구조물의 영향 등을 고려하여야 한다.

굴착사면의 기울기, 굴착심도, 지하수위는 모든 굴착공사에서 검토되어야 하지만 사질토지반에서는 침투압을 조절한다면 굴착면의 안정은 굴착저면까지 확장되지 않을 것이며, 암반에서는 굴착사면의 심도나 기울기도 중요하지만 절리의 패턴에 대한 영향이 크게 작용한다.

점성토 지반에서는 굴착저면의 토질특성을 포함한 굴착사면의 기울기, 압성토를 포함한 굴착사면의 형상, 지하수위 및 굴착방법 등이 안정에 중요하다고 할 수 있다.

토질특성별 굴착사면의 안정을 지배하는 인자와 설계시 고려사항을 설명하면 표 5와 같다.

표 5. 토질특성별 굴착사면의 안정을 지배하는 인자

토질 구분	사면설계시 중요고려 사항
굳은 점토 또는 혈암	일반적으로 현장상태의 토질강도는 실내시험에서 나타난 값보다 작다. 진행성 사면파괴가 주로 발생하므로 전단강도는 큰 변형에 해당되는 잔류강도를 사용한다. 시공사례에 의하면 장기사면안정검토시 잔류전단저항각은 12° 보다 작은 경우도 있으므로 현장상황을 상세히 조사하여 설계한다.
황토 또는 붕적토	습윤상태보다 상대적으로 건조측에서 붕괴되기 쉽고 침식을 받기 쉽다. 황토지반의 굴착면은 침투수만 발생하지 않으면 수직굴착을 하여도 안전할 수 있다. 유효경사각을 감소시키기 위하여 bench형 굴착을 하기도 한다.
잔적토	모암의 풍화 정도에 따라 토질특성의 변화가 심하다. 관찰기록자료은 기초한 설계가 중요함.
예민점토	지반교란에 따른 강도저하가 크며, 비압밀비배수조건인 강도정수나 현장배인시험 결과를 기초로 해석한다.
애추	암절벽 밑에 싸인 암편의 느슨한 집합체로서 안정된 사면 기울기는 보통 1:1.25-1.75 정도이며, 사면의 붕괴는 눈이 녹을 때와 같이 수량이 많은 경우에 발생한다.
느슨한 모래층	발파진동에 의한 액상화 현상으로 침하가 발생되며, 포화시 강도가 감소하여 침식이나 파이프의 우려가 있다.

또한 굴착시 적용 가능한 안정공법의 목적과 검토사항을 설명하면 표 6과 같으며, 흙막이벽체의 형식과 대표적인 휨강성(EI)의 범위를 나타내면 표 7과 같다.

표 6. 굴착안정을 지배하는 인자

대책공법	목적	비고
수위저하	굴착저면의 보일링, 연화 또는 허빙 방지 토류판의 수평토압 감소 굴착면의 침투수압 감소 토류판을 따라 발생하는 세립자의 파이핑 제거.	흙의 압축성과 인접구조물의 침하에 대한 수위저하의 영향을 조사하여 슬러리 벽체등 차수대책 검토, 하부의 대수층의 유무 확인 후 수위저하 필요. 필요시 간극수압계 설치, 공동이 존재하는 석회암지대에서는 수위저하에 대한 효과 검토, 굴착에 앞서 수위를 저하시켜야 함
굴착 및 굴착저면 정리	유공관에 의한 배수관 설치 저면굴착 지반정리	사면안정에 대한 해석 및 브레이싱의 필요 여부, 연약점토나 팽창성 토질 또는 혈암에서 과압밀에 의한 응력 감소 효과 검토, 굴착에 따른 인접지역의 지반변위 및 인접구조물의 영향 검토, 건설장비나 자재는 굴착선단으로 부터 안전한 거리로 이동
토류벽체 시공	수직굴착벽면지지, 제한된 공간에서 트랜치의 안정.	엄지말뚝 전면프렌지에 토류판을 설치하여 지반이동이나 브레이싱의 응력 감소, 시트파일이나 H파일 관입에 의한 진동 영향 검토, 벽체의 관입심도를 고려하여 벽체의 안정이나 필요한 지하수위 저하 검토, 계측관리 필요
발파	굴착암반 처리	진동에 의한 침하등 인접지역의 피해여부 검토, 발파한계지역 및 계측에 대한 검토, 공사전 인접구조물의 측량 실시
앵커 또는 버팀재 설치 및 긴장	지지구조의 강성 및 상호작용 유지	세심한 계측관리 필요 : 붕적토지반의 앵커구멍의 케이싱, 앵커 및 버팀재의 응력 측정 등

표 7. 굴착벽체의 형식 및 대표적인 휨강성(EI)의 범위

형식	대표적인 EI/ft값 (ksf)	비고
강판	900-90,000	불투수성, 취급 및 시공이 쉬움
엄지말뚝과 토류판	2,000-120,000	취급 및 시공이 쉬움, 배수가능, 타입 및 매입 가능
현장 또는 기성 콘크리트 슬러리 벽체	288,000-2,300,000	불투수성, 상대적으로 강성이 큼, 영구구조물로 사용 가능, 프리스트레스 도입 가능, 상대적으로 벽체의 측방이동이 작음, 초기투자비용 과다, 시공시 특별한 주의 요망, 깊은 굴착에 적용 가능, 벽체의 항복과괴는 적으나 하부지반의 항복과괴 가능성이 있음
원주상 말뚝벽	115,000-1,000,000	말뚝체는 불투수성, 상대적으로 강성이 큼, 수직말뚝으로 설치하지 않는 경우 특수장비나 슬러리가 필요 없음

버팀벽의 설치나 타이백벽에 의한 굴착시 고려사항을 기술하면 표 8과 같다.

표 8. 버팀벽 또는 타이백벽 굴착의 설계 고려사항

설계인자	비 고		
수압	불투수벽체에서 토압보다 큰 경우가 있음, 시공중 수위 측정 필요, 가능한 배수를 통하여 작은 수압이 작용토록 함, 수위저하공법을 적용하여 수압감소, 벽체 저면으로부터 침투는 저항토압을 감소시킬 수 있음		
안정	압성토 등 노출사면의 사면안정 검토, 벽체저면이나 타이백 뒤부분을 통하는 활동 가능성 검토, 연약토층이 있는 경우 하중에 의한 지지력에 대한 파괴 검토 필요, 굴착부위에 인접된 상재하중이나 기타 시설물에 의한 안정성 검토 필요		
파이핑	높은 지하수위와 실트질 모래에서 지반 유실, 벽체저면에서는 발생빈도가 높지 않으나 불량한 조인트나 차수처리를 하지않은 sheet pile에서 자주 발생, 수위저하가 요구됨		
변위	변위는 프리로드된 타이백 벽체나 버팀벽체에서는 작게 발생함		
수위저하, 물보충	수위저하는 벽체에 작용하는 하중을 감소시키며 파이핑에 의한 지반 손실을 최소화시킴, 침하에 원인이 되며 지지구조 외측에서 물의 보충이 필요할 수 있음		
상재하중	공사자재, 중기 등이 벽체 부근에 위치하는 경우가 많으므로 상재하중에 대한 고려가 항상 필요하다		
프리스트레싱	벽체가 횡방향으로 이동하여 변위가 발생하는 것을 방지		
시공 연속성	벽체의 변위량은 굴착심도에 좌우되며, 타이백에 작용한 하중은 설치전 발생한 벽체변위량에 좌우된다. 벽체변위량은 시공단계마다 측정하여야 하며 상단 버팀대는 가능한 빨리 설치하여야 한다		
온도	버팀대는 온도변화에 따른 하중을 받으므로 장기버팀대에서는 특히 중요함		
동결심도	추운지방에서 지반동결은 벽체에 하중을 유발하므로 특히 구조체 지표부에서는 안전측으로 검토되어야 함. 앵커는 가열하여야 하는데, 이는 지반동결로 지하수의 흐름을 차단하게 되면 예기치 않은 수압이 작용할 수 있음		
지진	지진발생시 지진하중을 유발하게 됨		
안전율	공 종	전반적인 안전에 대한 최소안전율	
		영구적	일시적
	·압성토	2.0	1.5
	·경사굴착	1.5	1.3
	·굴착저면 위 융기	1.5	1.5
	·안정(일반조건)	1.5	1.3
	·기초저면에서 융기	2.0	1.5
주: 이들의 안전율은 지침으로 제시한 것으로 설계안전율은 프로젝트의 요구조건에 따라야 함			

3. 흙막이벽의 해석기법

3.1 탄소성보법

탄소성보법은 토류벽체의 굴착단계별 수평변위와 토압산정을 위하여 그림 4와 같이 흙막이 벽체는 탄성보, 지보공은 탄성스프링, 지반은 탄소성 스프링으로 모델링하여 탄성보에 초기토압을 가하여 발생하는 변위를 계산하고 그 변위에 상응하는 지반의 탄소성상태를 판단한 후 토압을 보정하여 다시 변위를 계산하는 반복과정을 통하여 흙막이 벽체의 변위, 응력 및 지보공의 반력을 계산하는 해석법이다.

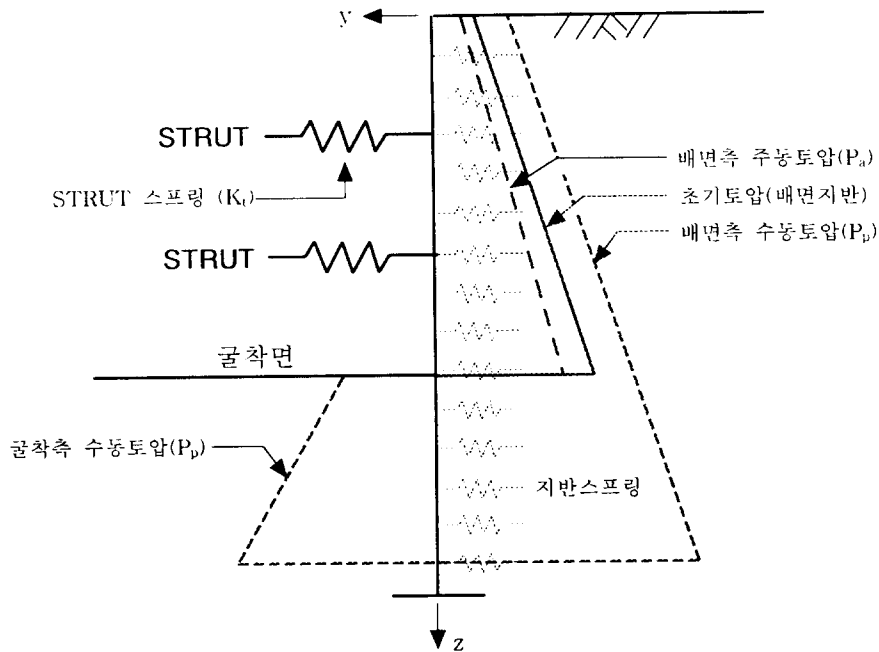


그림 4. 탄소성보법의 기본구조 Model

탄소성보법을 사용한 모델에서 하중과 변형에 대한 기본식은 다음과 같이 표시된다.

$$EI \frac{d^4 y}{dz^4} + \frac{AE'}{L} \cdot y = P_i - K_s \cdot y \quad (1)$$

- 여기서, E : 흙막이 벽체의 탄성계수
- I : 흙막이 벽체의 단면 2차 모멘트
- A : 지보공의 단면적
- E' : 지보공의 탄성계수
- L : 지보공의 길이
- P_i : 초기토압(정지토압이 사용됨)
- K_s : 지반의 수평방향 지반반력계수
- y : 깊이 z 지점에서의 벽체의 y 방향 변위

식 (1)에서 우변의 $(P_i - K_s \cdot y)$ 는 초기토압 P_i (보통 정지토압(P_0))이 사용됨에 지반의 변위로 인한 보정치 $K_s \cdot y$ 를 가감한 것으로 실제 작용토압이 되며, 벽체의 변위에 대한 토압과의 관계를 나타내면 그림 5와 같다.

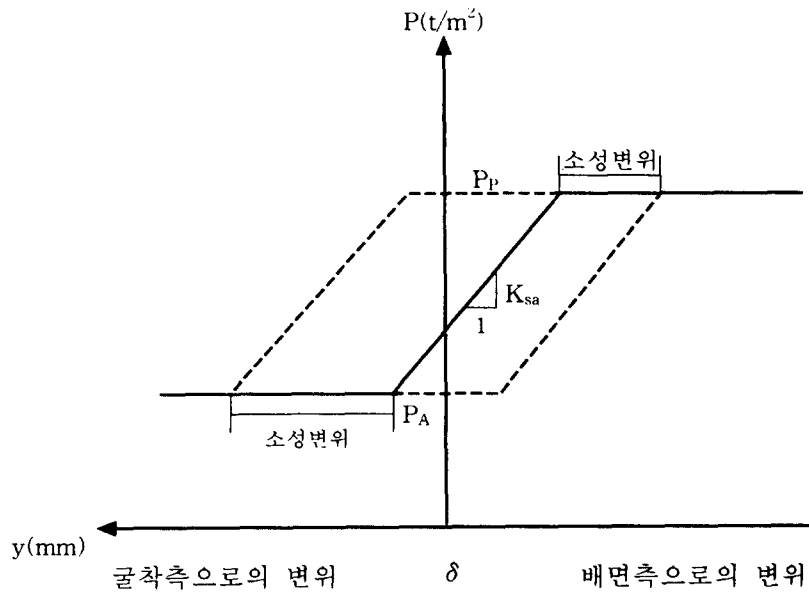


그림 5. 벽체의 변위와 토압의 관계

이때의 작용시킨 토압은 벽체의 변위에 1차함수관계로 증감되지만 토압의 범위는 한계토압인 주동토압과 수동토압의 범위 이내에 있어야 하며, 이 범위를 벗어나는 변위가 발생하면 토압만 고려하고 지반반력계수는 0 으로 한 후 반복계산을 한다. 계산의 반복과정을 통하여 전단계에서 계산한 토압과 현단계에서 계산한 토압의 차가 미리 정해둔 오차 이내에 들어가면 계산이 종료되게 된다. 탄소성보법의 기본원칙과 가정조건은 다음과 같다.

- ① 지보공 설치지점의 수직벽에는 지보공의 수평간격(S), 단면적(A), 길이(L), 설치각도(θ) 및 재료의 탄성계수(E')로 구해지는 탄성 스프링 지점이 부가된다.

$$K_{support} = \frac{A \cdot E'}{L \cdot S} \times \cos \theta \quad (2)$$

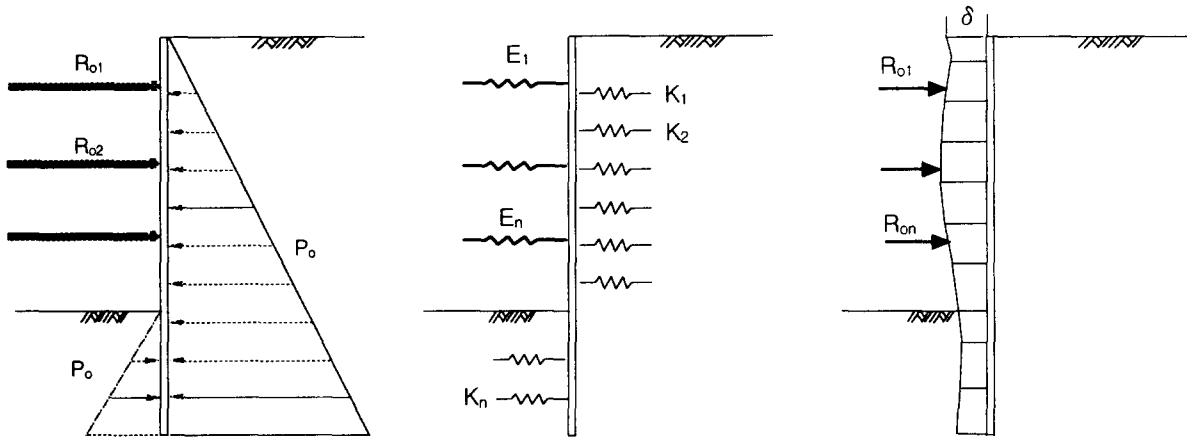
- ② 지보공의 탄성지점은 그 지보공이 설치될 때 이미 발생되었던 변위량에 해당하는 선형변위를 고려한다.
- ③ 각 굴착단계에서 작용토압은 계산초기의 정지토압을 작용시키고 토류벽체의 변위에 비례하여 수정되며, 다음 한계를 넘지 않는다.

초기토압 : P_i

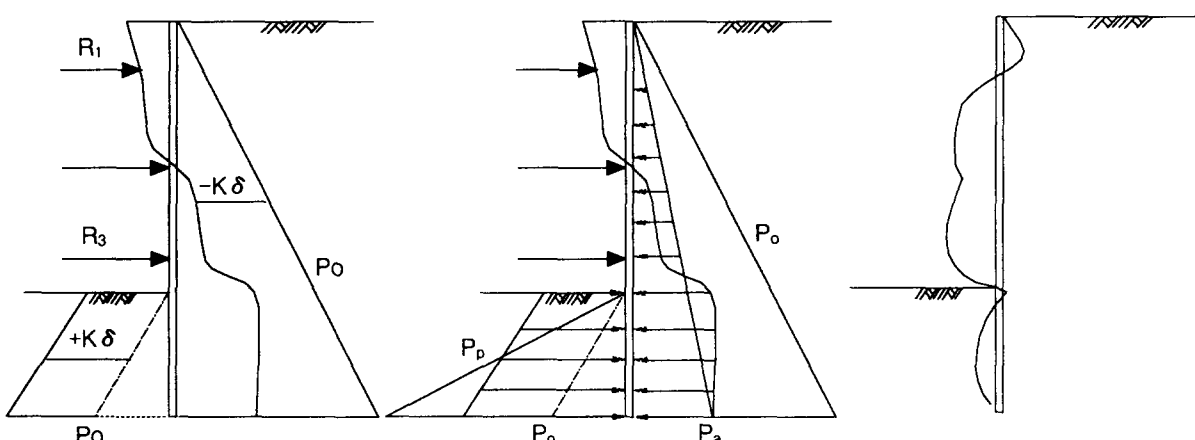
수정토압 : $P_i \pm K_{soil} \cdot y_{displacement}$

한계토압 : 주동토압 \leq 토압 \leq 수동토압

위의 범위를 벗어나는 조건이 될 때 토압은 한계토압이 되며 지반반력계수는 0 으로 된다. 탄소성보법에 의한 흙막이벽의 설계과정을 나타내면 그림 6과 같다.



(1) 정지토압 P_0 및 STRUT의 선행 하중 또는 온도수축에 의한 R_0 (2) 지반계수 K 의 결정 (3) 변위의 계산



(4) $P = P_0 \pm K \delta$
 $R = R_0 \pm KR \delta$ (5) P의 보정 (6) 모멘트의 계산

그림 6. 흙막이벽체의 기본적 설계과정

국내에서 사용되고 있는 탄소성보법에 의한 해석프로그램은 WALLAP(retaining WALL Analysis Program, Geosolve(영국)), SUNEX(elasto-plastic analysis of Step UNDERground EXcavation, (주)천일지오컨설턴트), EXCAD(underground EXCavation Analysis & Design program, (주)다산컨설턴트), EXCAV(program under design of propped retaining walls for EXCAVation by numerical method, (주)한국지오컨설턴트) 등이 있으며, 이들의 프로그램들의 기능을 비교하면 표 9와 같다.

표 9. 탄소정보법 해석 Program의 비교

구 분	WALLAP	SUNEX	EXCAD	EXCAV
해석가능범위				
토층수	20	무제한	10	10
지보공단수	20	무제한	20	30
절점수	무제한	무제한	70	100
해석단계	무제한	무제한	무제한	20
지반				
동일토층내에서 깊이별 물성변화	○(점착력만)	○	×	×
주동측과 수동측 물성이 달라도 가능한가?	×	○	×	×
굴착도중의 지반개량	×	○	×	×
흙막이 벽체				
깊이별 형상이 달라도 가능한가?	×	○	○	○
토압				
Peck등의 경험토압	×	○	○	○
Rankine 삼각토압	○	○	○	○
정지토압	×	○	○	○
임의의 토압	×	○	×	○
벽과 지반의 마찰고려	○(간접적)	○	○(간접적)	○
굴착면 이하의 토압작용폭	×	○	×	○
토압의 입력최소치 설정	×	○	×	○
수평이 아닌 지반고려	×	○	○	×
과재하중				
등분포하중	○	○	○	○
부분분포하중	○	○	○	○
집중하중	○	○	○	×
수압				
정수압	○	○	○	○
감소된 정수압	○	○	○	○
임의의 수압	○	○	○	×
초기하중고려				
Strut	○	○	○	○
Strut의 좌굴	×	×	×	×
Anchor	○	○	○	○
Anchor : 정착부의 미끄러짐 (진행성파괴, creep 고려가능)	×	○	×	×

3.2 유한요소법

컴퓨터와 수치해석 기법들의 눈부신 발달로 인하여, 유한요소법과 같은 방법을 이용함으로써 흙막이 구조물의 실제 현장지반에서 나타나는 지반-구조물 거동을 어느 정도 효율적으로 예측하는 것이 가능해졌다. 그러나 이러한 방법을 이용하여 실제 지반의 흙막이 구조물을 해석하기 위해서는 대상 지반자체의 거동을 비교적 정확히 표현할 수 있는 지반재료의 응력-변형률 관계가 필수적으로 요구되며 이와 함께 사용되는 계수들의 정확한 도출이 얻어지는 결과의 타당성에 큰 영향을 미치게 된다. 일반적으로 유한요소법을 이용하여 흙막이 구조물의 거동을 해석하고자 할 때 그 결과에 영향을 미치는 주요한 요소들은 다음과 같다.

- 1) 지하굴착 진행과정을 모델하는 방법
- 2) 지반자체의 거동모델
- 3) 지반거동 모델에 사용된 모델계수값
- 4) 그 외 실제 시공당시에 발생한 예상치 못했던 변화등

또한, 유한요소법에 의한 벽체의 부재력과 지지구조의 반력은 종래의 방법에 의한 해석결과와 현장계측결과에 비해 과소평가되는 것으로 알려져 있는데 이는 흙이 탄성체도 아니고 더구나 연속체 물질도 아니기 때문이다.

유한요소법을 이용하여 토류구조물을 해석하고자 할 때의 방법으로는 등가하중을 고려한 해석 방법이 주로 이용되나 등가하중은 보간법이나 경계면에서의 평형상태등을 고려하여 구하므로 전체 평형 관계와 일치하지 않을 수 있다. 이를 위해 전체 평형 방정식에 입각한 굴착 해석 방법이 여러 학자에 의하여 제안되어 있으나 이 방법은 매우 복잡하므로 등가하중을 고려한 해석법만을 간략히 설명하면 다음과 같다.

1) 해석대상의 모델링

- ① 지반은 삼각형 또는 사각형의 탄소성 요소로 모델링
- ② 토류벽은 탄소성 보요소로 모델링 하는데 보요소는 압축과 인장을 전달하는 외에 모멘트도 전달하므로 축력과 모멘트 모두를 계산할 수 있다.
- ③ strut과 anchor등 주로 축력에 저항하는 부재는 rod요소나 트러스요소로 모델링
- ④ 암반의 절리, 단층 등의 불연속성을 표현하기 위해서는 절점요소(혹은 cable요소)로 모델링 하는데 연속체 요소에서 표현할 수 없는 활동 등의 거동을 해석하기 위해서 사용된다.

2) 하중

- ① 작용하는 하중으로는 과재하중, 자중에 의한 초기하중, 굴착에 의한 굴착 등가하중 등이 있다. 과재하중으로는 지표면에 1~2 ton/m²의 등분포하중을 가하는 경우가 많다. 초기응력은 자중에 의한 응력을 계산하여 입력한다.
- ② 임의의 요소 중앙에서의 수직 및 수평방향 초기 응력은

$$\sigma_y = \Sigma \gamma \cdot h \tag{3}$$

$$\sigma_x = K_o \cdot \sigma_y$$

- ③ 굴착이 진행됨에 따라 각 굴착단계마다 굴착으로 인한 굴착 등가하중을 입력한다. 굴착등가하중은 $\{F\} = -\{N\} \cdot \{\sigma\}d_s$ 이다.

여기서, $\{F\}$: 굴착등가하중

$\{N\}$: 형상함수

$\{\sigma\}$: 굴착되는 부재의 굴착 직전 단계에서의 응력

d_s : 경계면

3) 지배방정식

그림 7과 같이 x, y방향으로 각각 σ_x, σ_y 의 응력을 받아 변형하는 4변형요소에서는 다음과 같은 방정식이 성립한다.

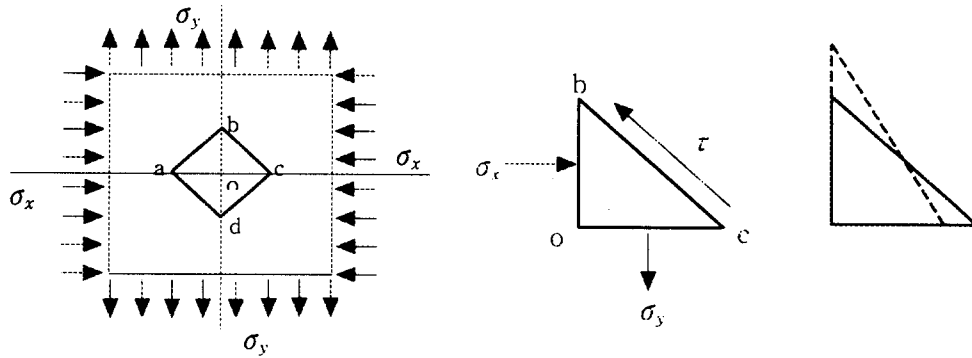


그림 7. 응력을 받아 변형하는 4변형요소

① 평형방정식

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + F_x &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + F_y &= 0 \end{aligned} \quad (4)$$

② 변형-변위관계식 (기하학적 조건식)

$$\begin{pmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} \quad (5)$$

③ 변형의 적합조건식

$$\frac{\partial^2 \epsilon_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \epsilon_y}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 \gamma_{xy}}{\partial x \partial y} \quad (6)$$

④ 응력-변형 관계식(물리적 조건식)

- 평면응력상태(z방향의 응력=0)

$$\begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix} \quad (7)$$

이 경우 변형성분 γ_{yz} 와 γ_{zx} 는 0이 되지만 ϵ_z 는 다음과 같다.

$$\epsilon_z = \frac{\nu}{1-\nu} (\epsilon_x + \epsilon_y) \quad (8)$$

- 평면응력상태(z방향의 변형=0)

$$\begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1+2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & 0 \\ \nu & 1-\nu & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix} \quad (9)$$

이 경우는 응력성분 $\tau_{yz} = \tau_{zy} = 0$ 이 되며 σ_z 는 다음과 같다.

$$\sigma_z = \nu(\sigma_x + \sigma_y) \quad (10)$$

⑤ 경계조건식

$$\begin{aligned} \sigma_x l + \tau_{xy} m &= X_v \\ \tau_{xy} l + \sigma_y m &= Y_v \end{aligned} \quad (11)$$

식(4)~(11)의 방정식에는 8개의 미지량($\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}, \epsilon_x, \epsilon_y, \gamma_{xy}, u, v$)이 포함되어 있기 때문에 경계조건을 만족하도록 하여 절점의 응력과 변형을 구하게 된다.

4) 모델의 재료특성

자연상태의 지반재료는 콘크리트나 강재와는 달리 입상재료로서 이방성을 나타내며 하중변화에 따라 탄소성 거동을 하므로 유한요소법에서 지반의 거동특성을 어떻게 가정하느냐가 중요하며 일반적으로 다음과 같은 모델로 가정한다.

- ① 선형탄성 모델 : 등방성(Isotropic), 이방성(Anisotropic)
- ② 부분적 선형탄성 모델(Bilinear, Trilinear or Multilinear)
- ③ 탄소성 모델(Elastic-Plastic) : 탄성-완전소성(Elastic-Perfectly plastic), 변형경화(Hardening), 변형연화(Softening)
- ④ 점탄성모델(Visco - Elastic)

5) 지반의 항복기준

지반내의 응력이 지반강도 이하에서는 응력-변형관계는 어느 정도 인정되지만 응력이 지반의 강도 이상이 되면 항복상태에 도달하게 되어 추가응력이 작용하지 않은 상태에서 변형만 크게 발생하는 소성변형상태로 된다. 응력상태는 체적변화를 주는 정수압응력(Hydrostatic stress)과 전단 변형을 주는 축차응력(Deviatic stress)으로 구분할 수 있는데, 지반의 안정을 좌우하는 변형은 주로 전단변형으로 전단항복응력과 전단강도와와의 관계를 어떻게 규정하는가는 매우 중요한 사항으로 항복기준은 제안자의 이름을 따서 Tresca의 기준, Von Mises의 기준, Mohr-Coulomb의 기준, Drucker-Prager의 기준, Cam clay model 등이 있다.

6) 해석과정

위와 같이 모델링된 흙막이 벽체는 그림 8과 같은 과정으로 해석한다. 이 과정을 다음과 같이 요약할 수 있다.

- ①주어진 자중과 하중에 의한 초기변위, 변형률 및 응력들을 산정한다.
- ②굴착되고자 하는 부분 A로부터 원지반 B에 전달되는 등가하중 P_0 를 산정한다.
- ③A지반과 관련된 부분의 강성도를 제거한다.
- ④굴착경계면 위에서 구해진 등가하중 P_0 를 반대방향으로 작용시킨다.
- ⑤구해지는 변위증분, 변형률증분 및 응력 증분을 전과정에서 구해진 변위, 변형률 및 응력에 더 해서 A지반 굴착과정으로 얻어진 결과들을 도출한다.

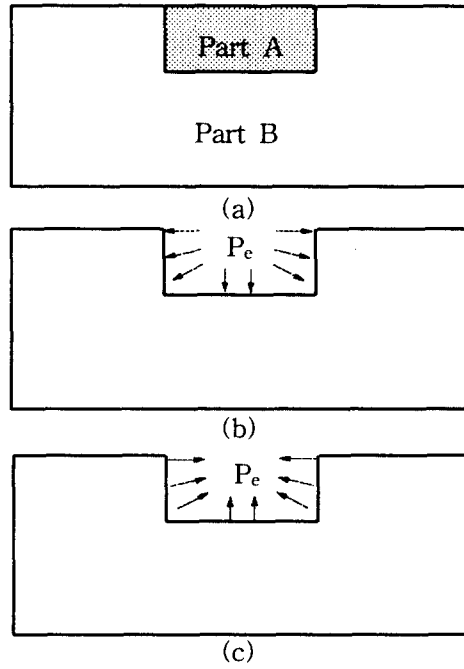


그림 8. 지하굴착의 FEM 해석과정

3.3 유한차분법

유한차분법은 유한요소법에 비해 계산방법이 간단하여 유한요소법보다 먼저 개발되어 사용되었다. 유한차분법은 그림 9와 같은 직교 grid를 형성하고 형성된 grid상의 임의의 점에서의 미지량 (x 방향변위, y 방향변위, 응력)을 구하는 방법이다.

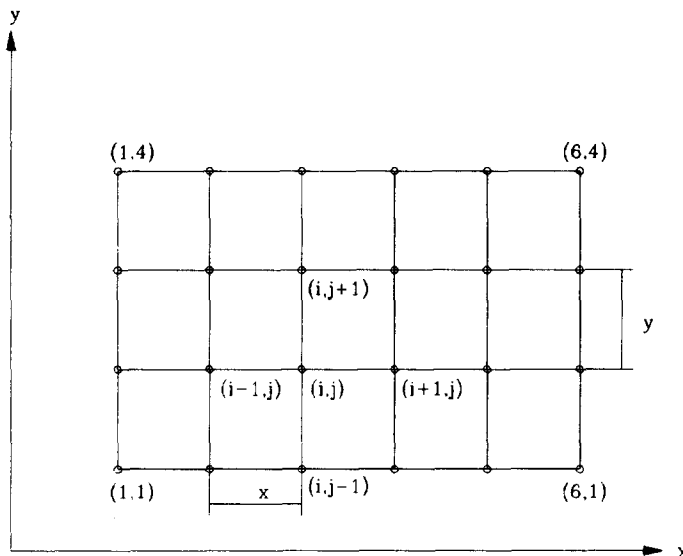


그림 9. 유한차분법에 사용되는 Grid와 절점번호

FLAC과 같은 일반화된 유한차분해석 프로그램에서는 요소의 각 절점에 구성된 방정식을 아주 적게 세분된 time step (실제의 시간이 아니고 논리적인 시간임)에서 이전 time step의 값을 초기값으로 하여 방정식의 해를 구하고, 평형상태에 대한 criteria에 도달할 때까지 반복계산을 수행하여 최종해를 구한다. 유한차분법에서는 해석하고자 하는 대상에 적용된 운동방정식에서 새로운 운동량(가속도, 속도, 변위)을 구하고 재료의 물성치와 관계식에서 내부응력과 상호작용력을 구하는 과정으로 이루어진다. 이 과정을 그림으로 나타내면 그림 10과 같다.

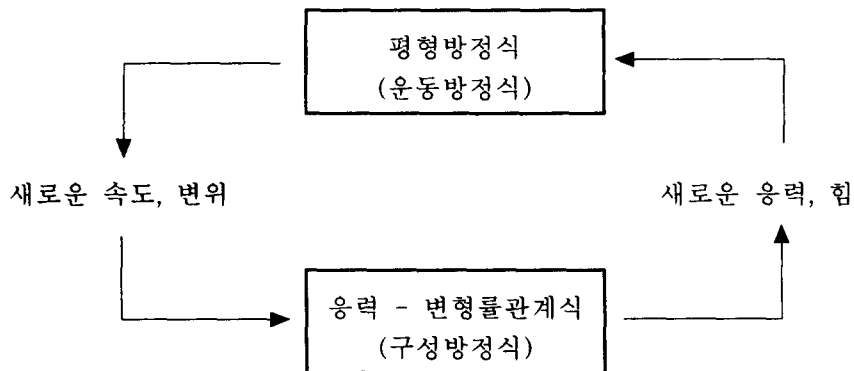


그림 10. 유한차분법의 해석과정

도함수를 포함한 운동방정식을 풀기위해서 수치적분을 이용한다. 해석과정은 다음과 같다.

- 1) 기하학적형상, 경계조건, 지반 및 재료의 물성치를 결정한 후 요소를 분할
 경계조건 : 절점변위, 속도의 고정(x, y방향)
 초기조건 : pressure적용(면, 선), force적용(절점의 x, y방향), 초기응력, 중력
- 2) 굴착에 의하여 경계조건 및 재료물성치, 모형이 변화함
- 3) 각 절점에서의 운동방정식을 수립한다.
- 4) element 응력에서 절점의 불균형힘이 결정되고 이에 따른 가속도, 속도, 변위가 계산된다.
- 5) model의 변형-응력 구성방정식에 의해 변형률, 응력 증분량을 계산한다.
- 6) 평형조건을 만족할 때까지 3~4의 과정을 반복한다.

모델의 재료특성, 항복기준등은 유한요소법에서 사용되는 것과 유사하다.

4. 계측 및 해석 사례

계측 및 해석 사례로 삼은 구간은 P3-6, P2-5의 2개 구간으로 P3-6구간은 현재 계획굴착고인 5.65m(E.L.4.95)까지의 굴착과 earth anchor의 설치가 완료된 상태이며, P2-5구간은 굴착이 계속 진행중이며 earth anchor는 1단에만 설치되어있다. 구간의 위치는 그림 11과 같다.

계측결과와 비교를 위한 해석은 탄소성 흙막이 해석 프로그램인 SUNEX3.6과 EXCAD2.1, EXCAV4.0 그리고 유한차분 해석 프로그램인 FLAC3.3을 이용하였다.

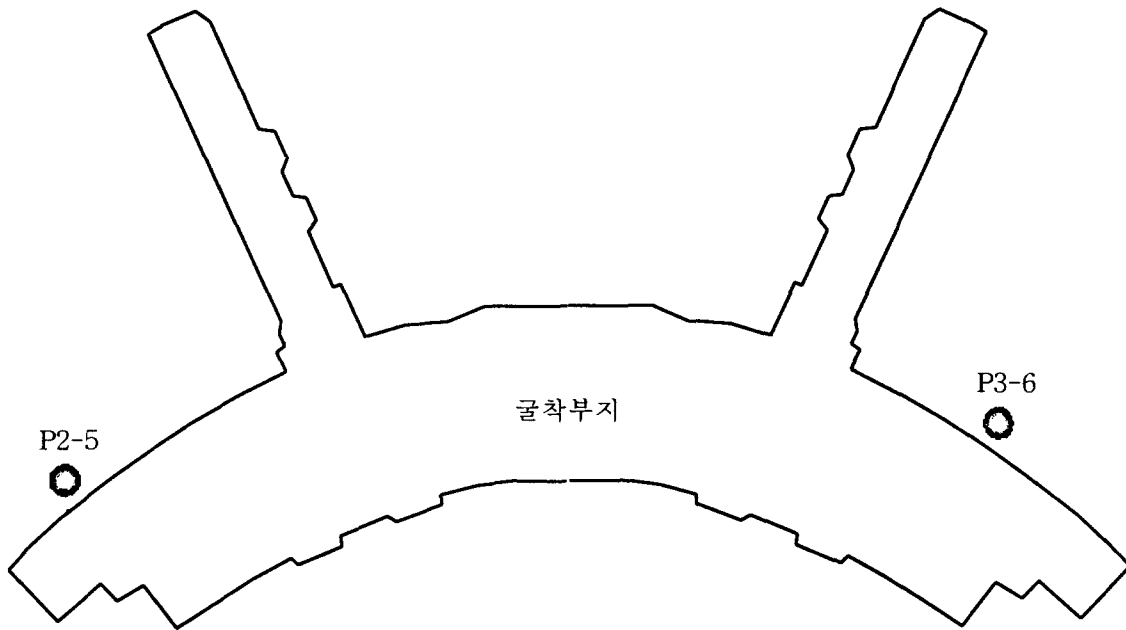


그림 11. 해석 대상구간

4.1 사례 1 : P3-6구간

P3-6구간은 여객터미널 동측 중간부에 위치하며 굴착고는 5.65m, anchor 설치단수는 2단이다. 단면의 형상은 그림 12와 같으며 단면내 지층의 물성은 표 10에 나타낸 바와 같다. P3-6구간은 경사계, 간극수압계, 지하수위계 및 1단 anchor에 대한 하중계 계측이 이루어지고 있는 구간이다. 사례 1에서는 경사계 계측에서 얻어진 벽체의 변위와 해석에 의해 얻어진 변위를 비교하고 하중계 계측으로부터 구한 anchor의 축력을 해석값과 비교하였다. 또한 해석에서 구한 각 벽체의 전단력과 모멘트도 비교하였다. 해석을 위한 지반물성은 P3-6구간과 인접한 곳에 위치한 토질주상도(공번 : PT42)와 실내실험결과를 이용하여 구하였다. 해석점토층의 점착력은 “신공항 여객터미널 기초굴토공사 설계설명서”에서 제시한 값을 이용하였다.

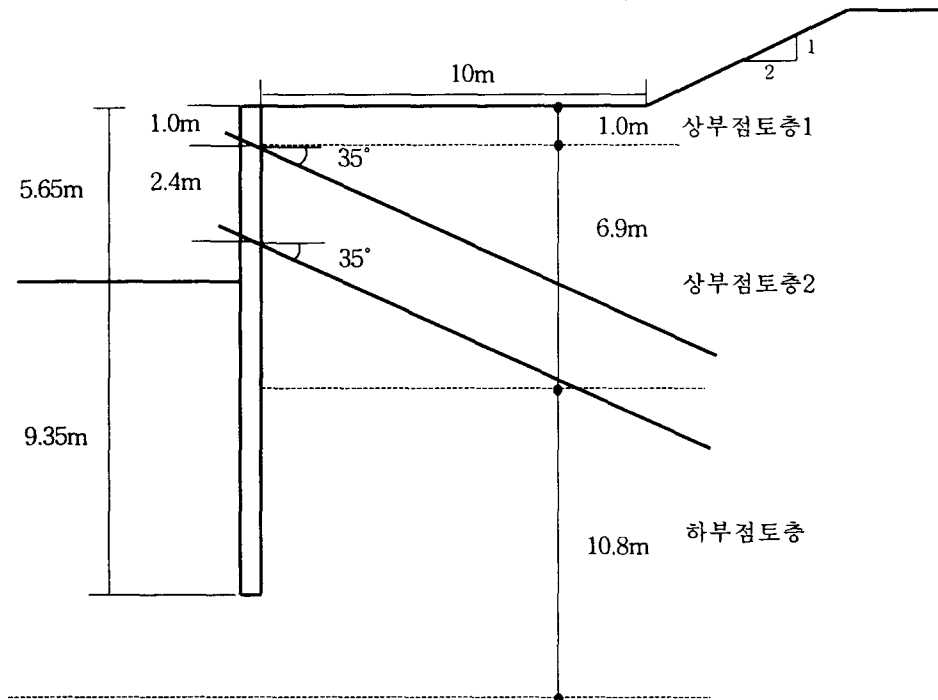


그림 12. P3-6구간의 단면형상

표 10. P3-6구간의 지반물성치

지층	γ_t (t/m ³)	γ_{sub} (t/m ³)	c (t/m ²)	ϕ ($^{\circ}$)	K_h (t/m ²)	평균 N값	E (kPa)	ν	G (kPa)	K (kPa)
상부점토층	1.804	0.827	2.6	0	691	1	2000	0.45	689	6667
하부점토층1	1.760	0.827	4.0	0	1079	3	3000	0.43	1048	7143
하부점토층2	1.760	0.827	6.0	0	1686	9	18000	0.40	6429	30000

표 10에서 γ_t , γ_{sub} 는 토질조사 보고서에 제시된 G_s , e , w 로부터 구하였으며 c , ϕ 는 설계시 이용되었던 값을 사용하였다. 탄소성보법을 이용하는 프로그램에서 중요한 역할을 하는 수평지반 반력계수(K_h)는 지반의 N값을 이용하는 후쿠오카의 경험식(식 (13))을 이용하여 구하였다. 지반의 N값은 각 지층 내부의 평균 N값을 이용하였다.

$$K_h = 691 \times N^{0.406} \quad (\text{t/m}^2) \quad (13)$$

FLAC 해석시 모델은 Mohr-coulomb 모델을 사용하였으며 여기에 필요한 물성값인 전단변형계수(G)와 체적변형계수(K)는 지반의 Young 계수(E)와 포아송비(ν)를 가정한 후 식(14)와 식(15)을 이용하여 구하였다. 지반의 Young 계수 및 포아송비는 Bowles가 제시한 일반적인 값을 사용하였다.

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (14)$$

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)} \quad (15)$$

4.1.1 실측변위와 해석변위의 비교

경사계로부터 얻어진 실측변위와 각각의 해석프로그램으로부터 얻어진 해석변위를 그림 13에 도시하였다. 해석변위를 얻기 위한 물성은 설계값을 기본으로 하여 해석구간에 해당하는 토질조사 보고서를 참조하여 입력하였다.

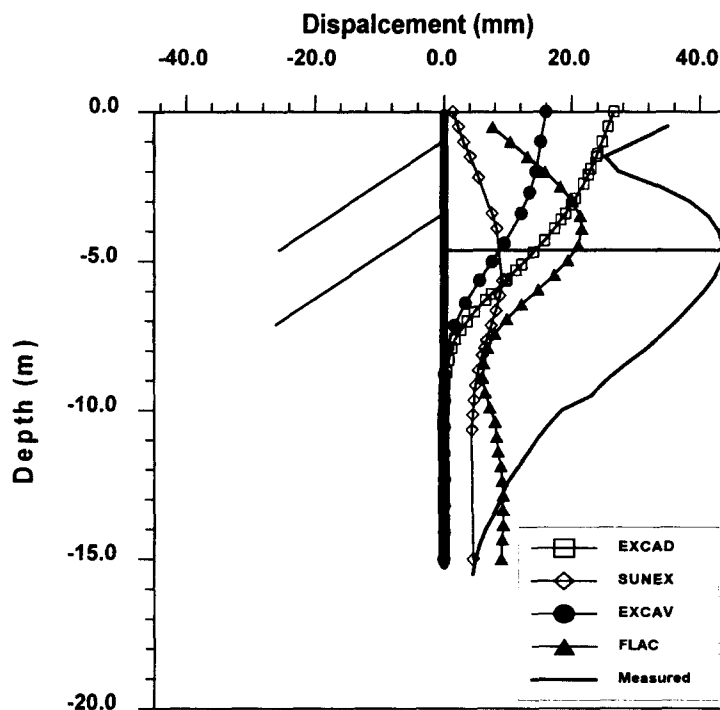


그림 13. P3-6 구간에서의 계측변위와 실측변위의 비교

경사계 계측결과에서 Sheet pile 벽체의 최대변위는 43.65mm로 굴착바닥면 부근에서 가장 큰 변위가 발생했으며 벽체가 근입된 Sheet pile의 최하단 변위는 5.64mm로 벽체 전체가 측방향으로 밀려났음을 알 수 있다. 이러한 원인으로서는 첫째, 원지반이 연약한 해성점토층으로 이루어져 있고 Sheet pile이 N치 10정도인 점토층에 근입되어 있기 때문이며 둘째, 굴착면적이 대단히 넓기 때문에 굴토직후 빠른시간내에 anchoring이 이루어지지 않아 벽체에 과도한 변위가 생겼기 때문이라고 사료된다.

탄소성보법을 이용한 해석에서 EXCAD, SUNEX 그리고 EXCAV 모두 실제 계측값과 비교할 때, 변위의 크기와 형태라는 두 가지 면에서 큰 차이를 보이고 있으며 해석된 변위가 계측변위보다 작게 나타났다. EXCAD의 경우에는 벽체 근입부의 거동이 해석결과에 나타나지 않았는데 이는 program 특성상 벽체 근입부를 고정절점으로 처리하는 조건이기 때문인 것으로 판단된다. SUNEX의 경우에는 변위의 형상이 계측변위와 비슷하나 해석변위의 절대값은 계측값에 비해 큰

차이가 있었다. EXCAV는 SUNEX와 마찬가지로 벽체 하단을 인위적으로 구속하지 않았지만 그 결과는 EXCAD와 비슷하게 나타났다.

FLAC 해석결과도 계측변위에 비해서 작게 나타났다. 벽체 상부에서의 변위형상은 계측변위와 가장 유사하게 나타났으나 근입부에서는 계측치보다 2배 이상 큰 변위가 발생한 것으로 해석되었다. FLAC을 이용한 해석시 탄성계수 등의 입력 물성범위가 크기 때문에 해석자에 따라 그 결과가 다르게 나타나는 문제점이 있다.

위와같이 계측변위와 해석에 의한 변위간에 차이가 발생하는 것은 다음과 같은 2가지 원인에 기인한다고 예상할 수 있다.

첫째, 해석에 적용된 물성(설계시 사용한 물성치임)이 실제 현장조건을 적절히 대표하지 못했을 것이다. 즉, 실제지반의 강도가 설계시 적용한 지반의 강도보다 작을 가능성이 있다.

둘째, 굴토면적이 광활하므로 굴착후 anchor의 인장이 늦어져 인장전에 벽체에 과도한 변위가 발생했을 것이다.

4.1.2 P3-6구간 Earth anchor의 축력비교

1단 anchor에 설치된 하중계로부터 계측된 anchor의 축력과 각각의 해석 프로그램으로부터 얻어진 축력을 비교하였다. Earth anchor의 거동은 통상 설치이후 일정수준의 초기반력 손실을 허용한 다음부터는 굴착공사 기간동안 주기적인 증감을 나타내면서 배면지반과의 응력평형을 유지하다가 서서히 반력감소를 나타내는 것으로 알려져 있다. 여객터미널 굴토공사 현장의 경우 지금까지 설치된 하중계가 일부구간을 제외하면 설치이후 경과기간이 3개월 또는 그 이하인 경우가 대부분이어서 아직까지 뚜렷한 거동특성을 파악하기 곤란한 상태이다. 그러나 P3-6구간에서는 Jacking force의 64%가 손실되어 설계축력(20ton)에도 못 미치는 10.7ton 정도를 유지하고 있는 상태이다. 그림 14는 P3-6지역의 하중계 계측결과를 나타낸다. 그림 14에서 2회에 걸친 축력의 뚜렷한 감소가 관찰되는데 이에 대한 원인은 다음과 같다. 첫 번째로 관측된 축력감소는 하중계가 설치된 부분의 Earth anchor가 먼저 인장이 이루어진 후 주변의 Earth anchor에 대한 인장이 이루어지므로 이로 인하여 상당한 prestress의 손실이 초래된 것이 원인이다. 두 번째로 관측된 축력손실의 원인은 2단 anchor의 인장에 따른 축력의 재배치 현상에 기인하는 것으로 사료된다. 각각의 프로그램에 의한 1단 anchor의 해석축력과 계측값을 비교하면 표 11과 같다.

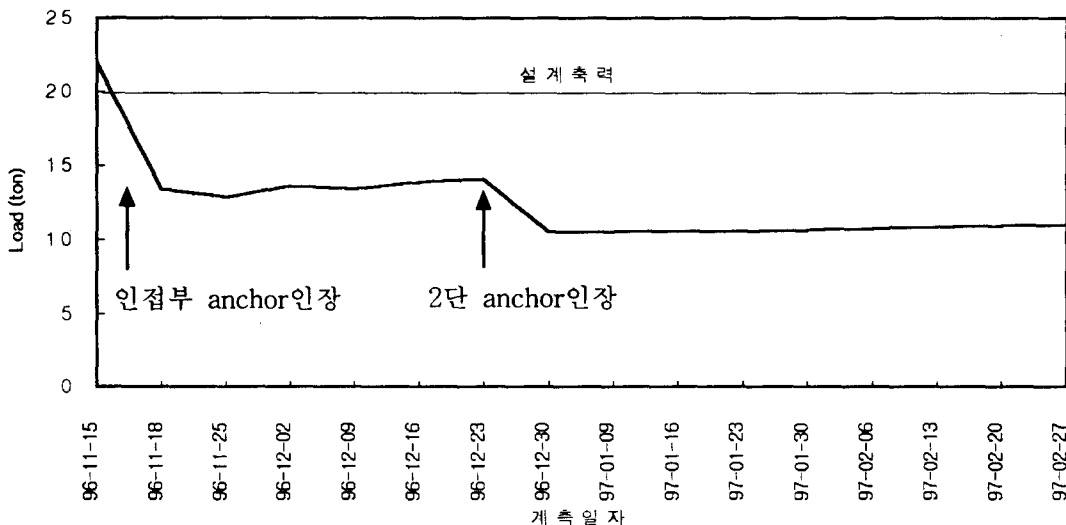


그림 14. P3-6구간의 Earth anchor 1단의 하중계 계측결과

표 11. P3-6구간 Earth anchor의 축력비교

구분 축력 (ton)	EXCAD	SUNEX	EXCAV	FLAC	계측값
1단 anchor	13.61	18.58	9.47	15.29	10.68
2단 anchor	56.97	20.47	11.34	16.87	-

EXCAD에 의해 계산된 축력은 1단 anchor의 경우 계측값과 비슷했으나 2단 anchor의 축력은 57ton정도로 설계하중의 3배 가량을 나타내고 있다. 이것은 해석과정에서 각 anchor에 대한 하중 분배가 실제 조건대로 이루어지지 않았기 때문이라 사료된다. SUNEX의 경우 1단 및 2단 모두 설계축력인 20ton에 근접하게 계산되었다. EXCAV의 경우 1단 anchor에서 계측값과 가장 가까운 결과를 보였으며 축력이 적절히 분배되었다. 그러나 1단 및 2단 모두 설계축력의 1/2 정도로 나타났다. FLAC해석의 경우 anchor축력은 1단에서는 15.29ton, 2단에서는 16.87ton으로 축력이 적절히 분배된 것으로 해석되었다. 연약한 점토층에 근입된 anchor의 경우 시간경과에 따른 creep현상으로 anchor력의 일부를 상실할 가능성이 많으므로 장기간 anchor를 설치할 경우에는 이에 대한 적절한 관리가 요망된다.

4.2 사례 2 : P2-5구간

P2-5구간은 여객터미널 서측단부에 위치하며 굴착이 계속 진행중인 상태이다. 굴착고는 3.9m, anchor 단수는 1단이다. 단면의 형상은 그림 15와 같다. 표 12는 단면내 지층의 물성을 나타낸다. P2-5구간도 P3-6구간과 마찬가지로 경사계, 간극수압계, 지하수위계 및 1단 anchor에 대한 하중계 계측이 이루어지고 있는 구간이다. 사례 2에서도 경사계 계측에서 얻어진 벽체의 변위와 해석에 의해 얻어진 변위를 비교하고 하중계 계측으로부터 구한 anchor의 축력을 해석값과 비교하였다. 해석을 위한 지반물성은 P2-5구간과 인접한 곳에 위치한 토질주상도(공번 : PT26)와 실내시험결과를 이용하여 구하였다. 해성점토층의 점착력은 “신공항 여객터미널 기초굴토공사 설계설명서”에서 제시한 값을 이용하였다.

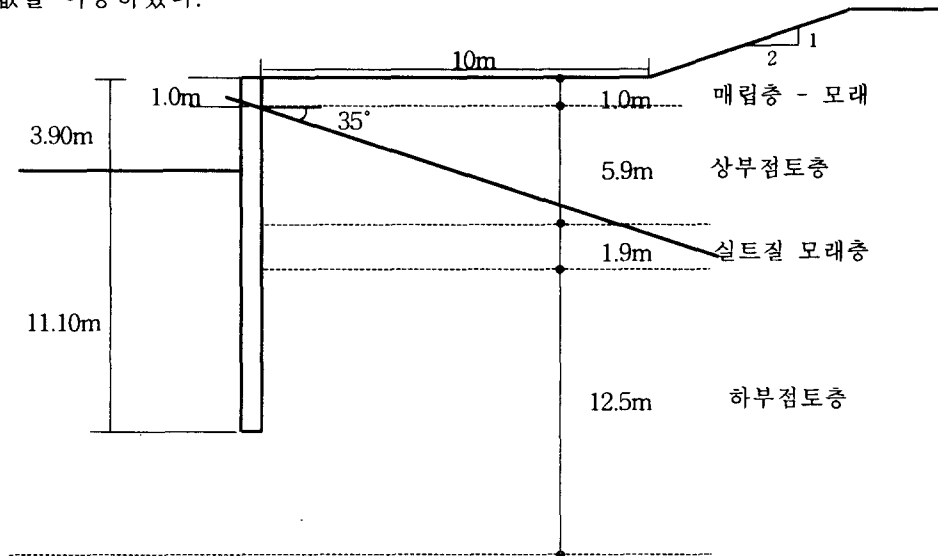


그림 15. P3-6구간의 단면형상

표 12. P2-5구간의 지반물성치

지층	γ_t (t/m ³)	γ_{sub} (t/m ³)	c (t/m ²)	ϕ (°)	K_h (t/m ³)	평균 N값	E (kPa)	ν	G (kPa)	K (kPa)
매립층	1.547	0.695	0	24	1328	5	10000	0.35	3704	11111
상부점토층	1.846	0.855	1.8	0	1079	3	5000	0.43	1048	11905
실트질모래층	1.802	0.845	0	32.3	2552	25	25000	0.33	9398	24510
하부점토층	1.834	0.866	7.6	0	1958	13	50000	0.40	17857	83333

표 12에 나타낸 지반물성치는 사례 1과 동일한 방법으로 산정하였다.

4.2.1 실측변위와 해석변위의 비교

경사계로부터 얻어진 실측변위와 각각의 해석프로그램으로부터 얻어진 해석변위를 그림 16에 도시하였다. 해석변위를 얻기 위한 물성은 설계값을 기본으로 하여 해석구간에 해당하는 토질조사 보고서를 참조하여 입력하였다. 계측결과 및 해석결과는 그림 16에 도시하였다.

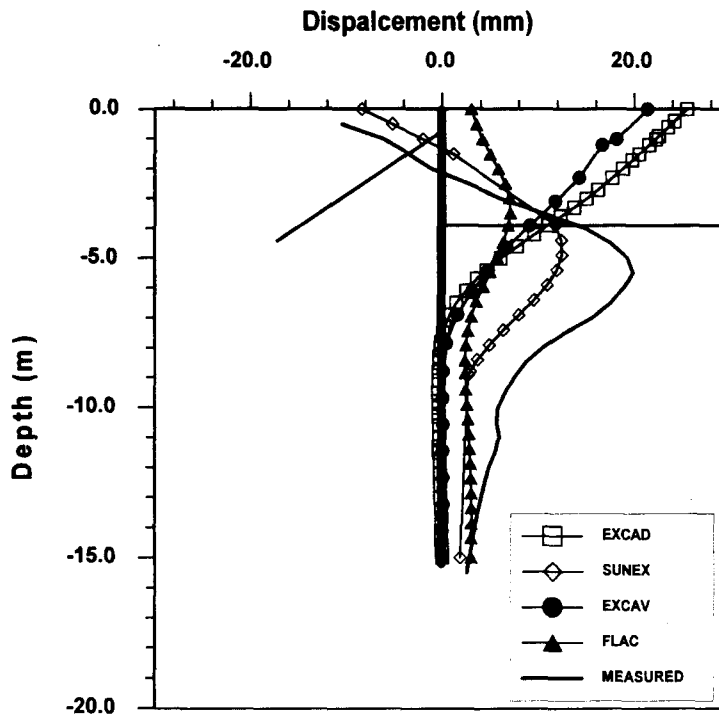


그림 16. P2-5 구간에서의 계측변위와 실측변위의 비교

경사계 계측결과에서 Sheet pile 벽체의 최대변위는 20mm로 나타났으며 벽체가 근입된 최하단의 변위는 3mm이었다. 사례 1의 P3-6구간에 비해 변위가 작게 나타난 이유는 심도가 깊지 않고 P3-6구간에 비해 지반상태가 좋기 때문인 것으로 사료된다.

각각의 해석결과와 계측변위를 비교해 보면 SUNEX에 의한 해석변위가 계측변위에 가장 근접

했으며 변위의 형상도 유사하였다. EXCAD와 EXCAV는 P3-6구간에서 나타난 해석변위와 비슷한 경향을 보였다. FLAC에 의한 해석변위는 실제 결과보다 매우 과소평가되고 있다. 변위의 경향은 유사한 것으로 보아 FLAC 입력물성인 전단변형계수와 체적변형계수등을 바꾸어 해석하면 실제와 더 유사한 결과를 얻을 수 있으리라 사료된다.

사례 1에서 언급함 바와같이 SUNEX등을 비롯한 각종 프로그램으로 합리적인 흙막이 구조물 설계를 하기 위해서는 실제 현장의 지반물성을 대표할 수 있도록 충분한 현장지반조사가 최우선 되어야 하며 설계자들도 지반 물성의 특성을 충분히 이해하여야 할 것이다.

4.2.2 P2-5구간 Earth anchor의 축력비교

P2-5구간은 P3-6구간에 비해 anchor가 약 2달 가량 늦게 설치되었으며 현재까지 이 구간에서 특별한 사항은 발견되지 않았다. 또한 anchor의 초기 긴장력 손실이외에 추가적인 anchor력 감소는 나타나지 않았다.

사례 1과 마찬가지로 1단 anchor에 설치된 하중계로부터 계측된 anchor의 축력과 각각의 프로그램으로부터 얻어진 축력을 비교하였다. 각각의 프로그램에 의한 1단 anchor의 해석축력과 계측값을 비교하면 표 13과 같다.

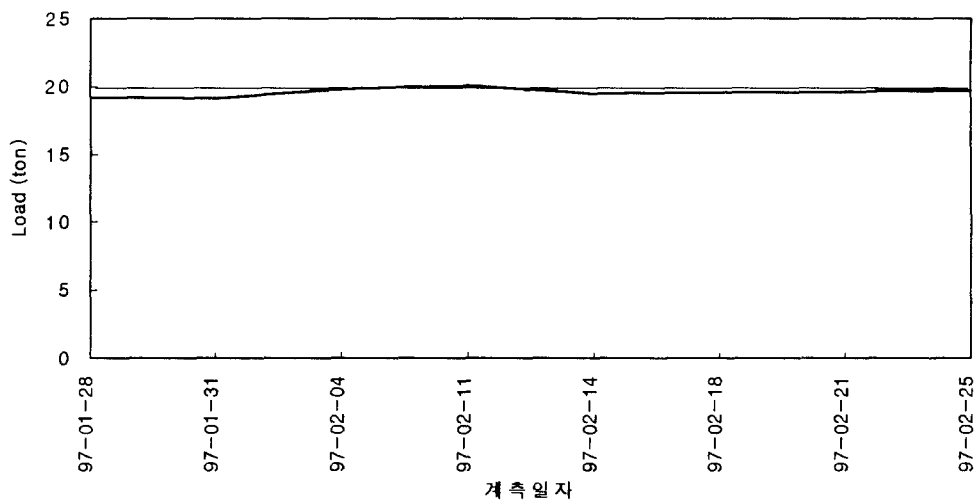


그림 17. P2-5구간의 Earth anchor 1단의 하중계 계측결과

표 13. P2-5구간의 Earth anchor 1단의 축력비교

구분	EXCAD	SUNEX	EXCAV	FLAC	계측값
축력 (ton)	24.0	17.42	20.57	20.74	19.70

표 13에 나타난 anchor의 축력을 비교하면 각각의 프로그램에서 얻은 해석축력이 계측값과 크게 다르지 않게 나타났다. 본 사례의 경우에는 anchor가 1단에만 설치되었기 때문에 특이한 상황이 관찰되지는 않았다.

5. Earth anchor 인발력 검토

Anchor시공에 있어서는 실제 시공에 앞서 시험용 anchor를 타설하고 인발시험을 실시함으로써 anchor의 극한 인발내력을 확인해야 한다. 이 결과는 설계에 feed back되고 불합리한 점이 있으면 설계조건을 수정하여 지반상태와 시공환경을 고려한 재설계 또는 보완이 이루어져야 한다. 본 장에서는 인발시험방법에 관한 개황을 살펴보고 여객터미널 굴토현장에서 실시한 인발시험결과와 문제점을 분석하고 향후 개선방향을 논하고자 한다.

5.1 인발시험방법

인발시험방법에 대해서는 일반화된 국내 시험규정이 없는 실정이므로 외국의 Test code를 준용하는 경우가 대부분이다. 인발시험에 대한 외국의 규정으로는 BS 8081 code (영국), PTI code (미국), DIN 4125 code (독일)등이 있는데 각 나라마다 시험방법에 대한 세부규정이 다소 상이하므로 적용시 주의가 필요할 것으로 본다. 이와같은 각종 인발시험 code에 대한 상세한 소개는 지면관계상 생략하고 시험방법에 대한 일반적이며 핵심적인 사항을 기술하면 다음과 같다.

- 1) 인발시험은 반복재하에 의한 Cycle test를 원칙으로 한다. (그림 18참조)
- 2) 시험최대하중은 Anchor tendon 인장강도의 80%를 초과하지 않아야 한다.
- 3) 초기하중(Alignment load)은 설계인장력의 5~10%범위가 되도록 한다.
- 4) 하중증분(Load increment)은 인장강도의 10% 또는 항복강도의 15%를 초과하지 않도록 한다.
- 5) 하중유지시간(Observation period)은 각국의 시험 code마다 기준이 다르므로 주의를 요한다.
- 6) 단계별 재하 하중과 변위 graph를 도시하되 anchor체의 탄성변위와 소성변위가 구분되어야 한다. (그림 19참조)

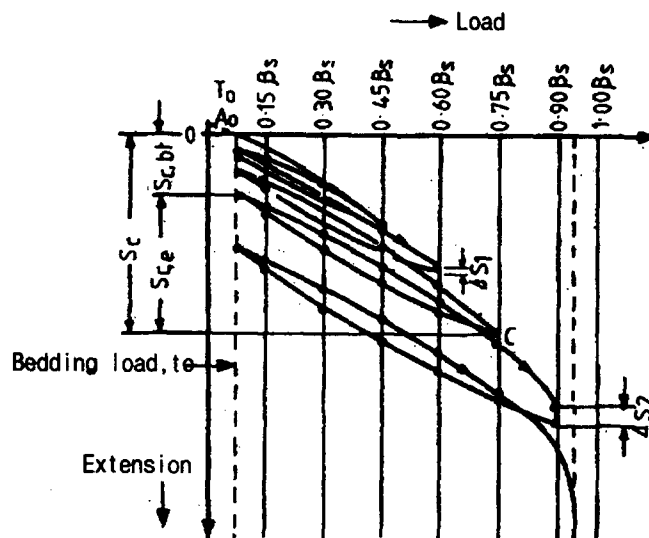


그림 18. 인발시험 재하 cycle의 예 (DIN 4125, 1972)

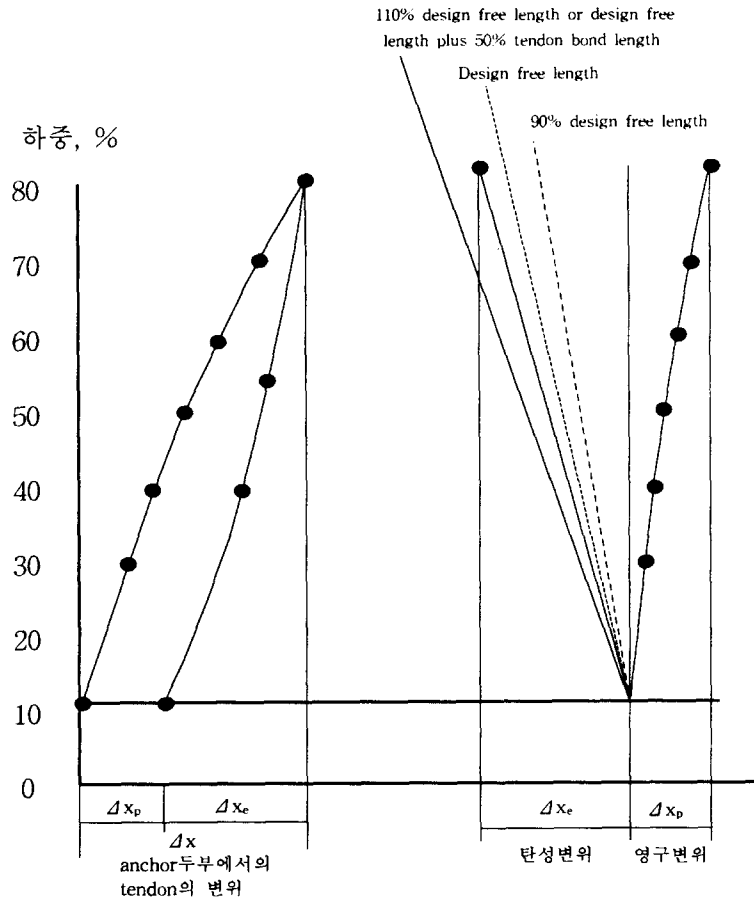


그림 19. Anchor체의 변위곡선 도시방법 (BS 8081, 1989)

이외에도 점성토와 같이 creep거동이 예상되는 지반에서는 작용하중에 의한 시간의존성 거동특성을 파악하기 위해 정착하중(Lock-off load)에 대한 시간-변위를 측정하는 별도의 creep test를 실시하여야 하나, 시험결과의 판정기준(criteria)과 그 이론적 근거가 불확실한 상태이다. 따라서 현장에서 Creep test를 실시할 경우 시험결과에 대한 분석방법과 anchor의 양부를 판정할 수 있는 기준을 명확히 해 두어야 할 것이다.

5.2 인발시험 사례

여객터미널 굴토현장에서는 공사 초기에 anchor인발시험을 실시하였는데 시험anchor의 제원과 인발시험결과를 요약하면 다음과 같다.

표 14. 시험 anchor의 제원

구분	총길이 (m)	정착장 (m)	자유장 (m)	strand수	tendon 단면적 (cm ²)	설계하중 (ton)
anchor 1	29	14	15	4	3.948	30

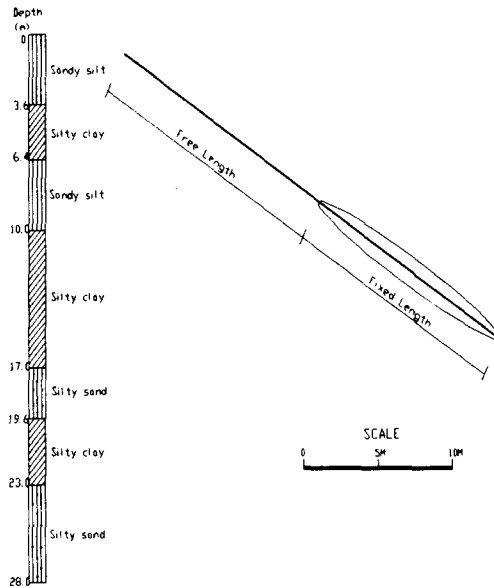


그림 20. 시험구간의 토질조건

인발시험은 BS code 8081에 준하여 실시하였는데 현장에서 보유한 유압인장기가 반복적인 하중재하(load)와 제하(unload) 조절이 불가능하여 항복하중에 도달할 때까지 단계적인 하중증가 후 최대하중 도달시 최종변위를 측정하고 하중제거 후 잔류변위를 측정하는 방법으로 실시하였다. 인발시험 최대하중은 Anchor tendon 인장강도의 80%인 60ton으로 적용시켰는데 그림 22에 도시한 하중-변위곡선을 보면 50ton이하의 하중에서는 변위곡선이 직선적으로 변화하고 있는데 이는 anchor체의 탄성거동을 의미한다. 그러나 53ton이상의 하중에서는 변위곡선의 기울기가 급격히 변화되고 있으며 이것은 anchor체의 항복현상을 나타내는 결과로 보아야 한다. 따라서 본 구간의 Earth anchor인발력은 약 50ton정도인 것으로 파악된다. 본 구간이외에 다른 2개소에서 실시한 인발시험결과에서도 anchor인발력은 50ton정도로 측정되었다.

anchor설계에 있어서 설계 anchor력과 극한 anchor력의 비율인 설계하중 안전율은 본 현장과 같이 가설 anchor인 경우 통상 1.5를 적용하게 되는데 상기 인발시험 결과에 의하면 설계하중 안전율은 1.6(50/30ton)로 산정된다. 따라서 기설계된 Earth anchor는 현장조건과 시공환경에 적절히 부합되는 것으로 검토되었다.

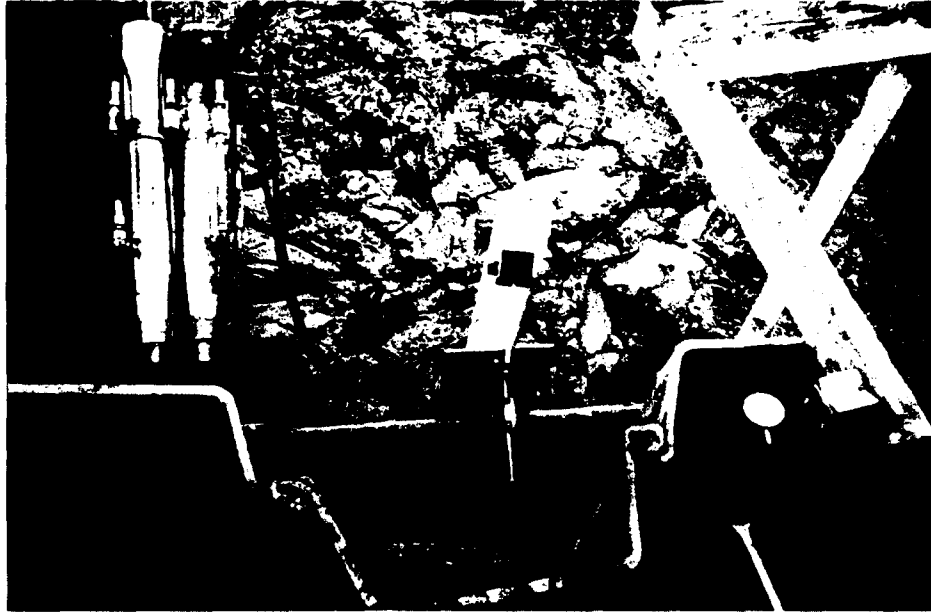


그림 21. 인발시험 장치

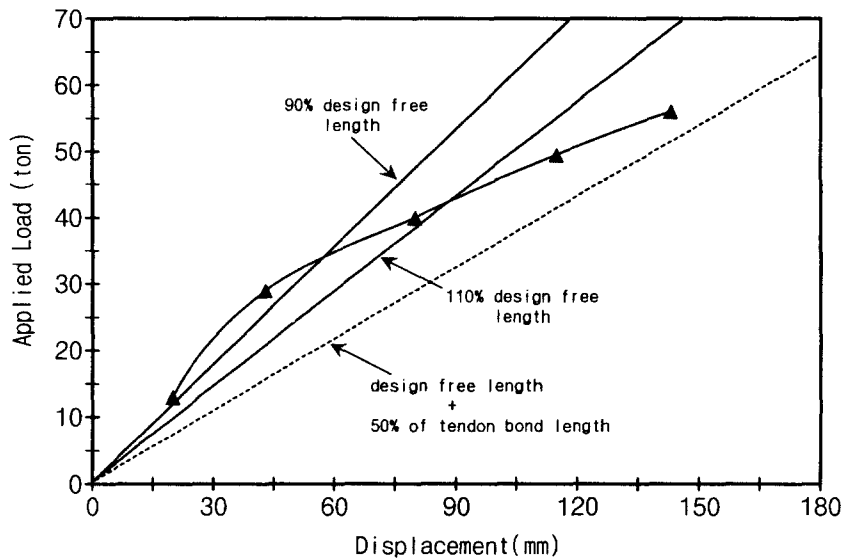


그림 22. 인발시험 하중-변위곡선

한편, anchor설계에서는 anchor 주면 지반의 마찰저항(τ)을 표 15와 같은 경험적인 마찰저항 범위내에서 가정하게 되는데 실제 anchor 주면지반의 극한마찰저항(τ_{ult})은 anchor체의 조립상태나 그라우트 구근의 형성상태 등에 따라 설계시 가정한 값과 일치하지 않는 경우가 많다. 그러므로 현장에서는 시험 anchor에 대한 인발시험을 실시하여 anchor 주면지반의 극한마찰저항을 파악해야 할 것이다.

표 15. anchor주변의 마찰저항 도표 (일본 Ground anchor 기술협회, 1986)

지반종류		마찰저항(kg/cm ²)	
압반	경 암		15 ~ 25
	연 암		10 ~ 15
	풍화암		6 ~ 10
	토 단		6 ~ 12
사력	N값	10	1.0 ~ 2.0
		20	2.7 ~ 2.5
		30	3.5 ~ 3.5
		40	3.5 ~ 4.5
		50	4.5 ~ 7.0
모래	N값	10	1.0 ~ 1.4
		20	1.8 ~ 2.2
		30	2.3 ~ 2.7
		40	2.9 ~ 3.5
		50	3.0 ~ 4.0
점성토			1.0 C

본 현장의 anchor 설계는 주변마찰저항(τ)를 E/A 1~2단에서 10t/m'으로 가정하였는데 인발시험결과에 의한 anchor 인발력으로 τ 값을 추정해 보면 다음과 같다.

$$T = \pi DL\tau_{ult} \text{ 이므로 } \tau_{ult} = \frac{T}{\pi \cdot D \cdot L} \text{ 이 성립한다.}$$

여기서, τ_{ult} : 지반의 극한마찰저항 (t/m')

D : anchor체 직경 (m)

L : anchor의 정착길이 (m)

T : anchor의 인발저항력 (ton)

$$\tau_{ult} = 50 \text{ ton} / \pi \times 0.12\text{m} \times 14.0\text{m} \approx 9.5 \text{ ton/m'}$$

따라서 당초 설계시 가정한 주변마찰저항치는 현장조건에 부합되는 적절한 수준인 것으로 검토되었다.

5.3 인발시험상 문제점과 개선방안

현장에서 anchor 인발시험을 시행할 때 발생하는 문제점은 시공환경에 따라 여러 가지가 있을 수 있겠으나 다음과 같은 주된 문제점이 있는 것으로 사료된다.

첫째, 인발시험방법에 대한 국내 규정이 없다는 점과 둘째, anchor 인장장치가 대부분 인발시험에 부적합하다는 것이다. 인발시험에 대한 외국의 규정을 보면 국가별 시공환경과 기술수준을 고

려하여 시험방법을 규정했기 때문에 시험의 세부규정이 나라마다 상이함을 알 수 있다. 이는 anchor의 파괴 mechanism이 아직도 명확히 규명되지 못했기 때문에 인발시험방법에도 기술자의 경험적인 판단요인이 다분히 내포되어 있음을 의미한다고 볼 수 있다. 이러한 상황을 고려할 때 우리나라에서도 시공환경과 전반적인 기술수준을 고려한 anchor설계기준과 시험방법을 규정해야 할 것으로 생각된다. 또한, 국내에서 anchor시공용으로 사용되는 대부분의 인장기는 반복적인 하중재하 조절이 곤란하고, 인장 jack의 경우 piston의 최대 행정거리(stroke)가 100mm 이하여서 인장시험시 Anchor tendon의 늘임량보다 작은 경우가 많다. 그러므로 인발시험시에는 단계적인 하중재하가 가능토록 감압조절장치가 설치된 인장기를 사용해야 하며, jack은 최대 stroke가 tendon의 늘임량보다 충분히 큰 것을 사용해야 한다.

6. 결론

인천국제공항 여객터미널 굴토공사의 계측사례를 분석 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 연약지반상에 설치된 흙막이 벽체의 해석시 해석조건에 적합한 지반물성치를 적용함이 중요하며, 계측결과로부터 벽체 거동이 검증되어야 한다.
- 2) 점성토지반은 일반적으로 하부층의 측방변위를 포함하여 변위가 크게 발생하므로 경사계 설치하는 지반변위가 없는 충분한 심도까지 설치하여야 한다.
- 3) anchor인발시험 규정이 나라마다 달라 시험방법의 적용시 어려움이 예상되므로 국내 anchor인발시험 규정의 제정이 요구된다.
- 4) 정보화 시공을 위한 계측관리의 중요성을 인식하여 시공조건을 충분히 반영할 수 있는 역해석 방법의 적용과 효율적인 계측관리 체계가 구축되어야 한다.

참고문헌

1. (주)다산컨설팅(1993), EXCAD Ver.2.20 사용설명서, 탐구문화사, pp.480.
2. 주식회사 천일지오컨설팅(1995), SUNEX 사용법설명서 (5th Ed.)
3. Hunt, R. E.(1986), "Geotechnical Engineering Analysis and Evaluation", McGraw-Hill Book Company, pp.730.
4. 건설교통부(1996), "토류벽의 굴착단계별 거동예보 시스템(Behavior Prediction System, BPS) 개발", 건설교통부 '95연구개발사업 연차보고서 R&D/95-008, pp.1-29.
5. 한국지반공학회(1995), "지반 굴착시 주변지반의 해석기법과 시공관리를 위한 계측 및 품질관리 방법에 관한 연구 I - 개착식 지반 굴착에 따른 흙막이벽의 해석기법", pp.440.
6. 신공항 건설공단(1996), "수도권 신공항 여객터미널 굴토공사 계측정기 보고서", 제4권,제5권.
7. NAVFAC(1982), "Foundations and Earth Structures, Design Manual 7.2", Department of The Navy, U.S.A.
8. 이승래(1992), "흙막이 구조물 강좌 : 흙막이 구조물(Ⅲ)", 한국지반공학회지 제8권 제2호, pp.142-148.
9. 日本 Ground Anchor기술협회(1986), "그라운드 anchor공법", pp.194-206.
10. 신공항건설공단(1996), "수도권 신공항 여객터미널 굴토공사 감리보고서", 제2권, pp.22-40.

11. 신공항건설공단(1995), "수도권 신공항 여객터미널 굴토공사 설계설명서", pp.86-149.
12. T.H.Hanna(1982),"Foundations in Tension - Ground Anchor", McGraw-Hill, pp.209-251.
13. GEOSPECI(1984), "Model specification for prestressed ground anchor", Geotechnical control office, Hong Kong, pp.9-15.
14. Bowles, J.E.(1988) "Foundation Analysis and Design", 4th ed., McGraw-Hill Book Company, pp.99-100.
15. 건설부(1992), "구조물 기초설계 기준", pp.461-504.