



연약지반에서 보상기초 개념을 적용한 지하차도 기초설계에 대한 고찰

A Study on Optimum Design of Underground
Roadway on Soft Ground ; By Using Floating
Foundation Method Concept

신 중 훈¹⁾, 김 도 선²⁾

¹⁾ (주)석탑엔지니어링 지반공학부 상무

²⁾ (주)우송대학교 대학원 토목공학과 석사과정

1. 서론

현재 연약지반에서 지하차도 기초 설계시 시공성, 안정성 및 경제성을 고려하지 않고 구조물 자중 전체를 말뚝 기초가 지지하는 것으로 설계하는 사례가 많다. 연약지반에서 지하차도 기초를 말뚝기초로 적용할 경우 굴착에 따른 히빙에 대한 안정성, 말뚝의 부마찰력 고려에 따른 지지력 감소에 따른 본수 증가, 연약지반 상에서의 말뚝시공에 따른 시공성 저하 등이 문제점으로 발생할 수 있다.

따라서 연약지반 상에서의 지하차도 기초 설계시 말뚝 기초공법 대안으로 보상기초 개념으로 도입하여 심층혼합처리공법을 적용한 지하차도 기초의 설계사례를 통해 안정성, 시공성, 경제성 있는 설계내용을 소개한다.

2. 지하차도 기초설계 개념

2.1 보상기초를 위한 고려사항

보상기초를 설계하기 위해서는 다음 사항이 고려되어야 할 필요가 있다 (Tomlinson,1995; Golder,1975).

- 1) 보상기초에 영향을 미치는 깊은 굴착 등이 인접한 경우 기존 보상기초의 영향을 고려하여야 한다.
- 2) 굴착에 의하여 제거된 흙과 축조될 구조물의 중량이 균형을 이루어야 한다.
- 3) 지하수위의 변화에 따라 유효응력의 증가를 가져오지 않도록 유도한다.
- 4) 굴착에 의한 지반팽창과 건축물의 축조에 의한 재압축을 고려해야 한다.
- 5) 부등침하를 줄이기 위해 기초의 강성을 증대시킨다.

기술기사

구분	보상기초 개념	말뚝기초 개념
개요도		
설계 개념	<ul style="list-style-type: none"> 굴착 흙 무게 : $\sigma_z = \gamma \cdot h$ 지하차도 자중 : P 설계하중 : $q = P - \sigma_z$ 	<ul style="list-style-type: none"> 굴착 흙 무게 : 무시 지하차도 자중 : P 설계하중 : $q = P$
평가	• 설계하중 적정 평가 → 경제적 설계	• 설계하중 과다 평가 → 비경제적 설계

현황은 다음과 같다.

3. 지하차도 기초설계

3.1 과업현황

본 과업은 송도해안도로 확장공사로서 연장은 5.92km이며, 매립지반에 도로폭 75.1m (12차로)로 확장하는 공사이다. 주요 구조물로는 송도대교, 송도고가교 교량 2개소와 동춘, 송도, 해안 지하차도 3개소이며 지하차도 주요

3.2 지반현황

설계구간은 해안 매립구간의 확장도로상의 지하차도로 지층은 매립층, 퇴적층(점토) 풍화토 풍화암으로 형성되어 있다. 퇴적층(점토)은 매립층 아래로 0~24.1m 두께로 분포하며 연약지반 기준은 CPT결과와 N값의 상관관계를 분석하여 연약층이 10m 이상인 경우 N값 6이하, 일축압

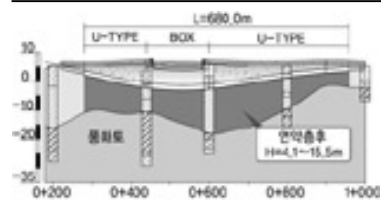
과업 현황



지하차도 현황

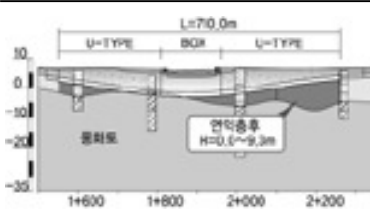
구분	① 동춘	② 송도	③ 해안
형식	U-Type + BOX		
연장	680m	710m	600m
폭	41.8	32.4	32.4
설계하중	63~176kN/m ²		
연약층후	1.1~21.3m		
굴착심도	0.7~8.7m		

동춘지하차도



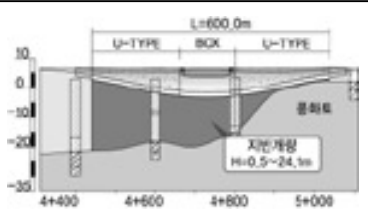
• 연약층 H= 4.1~15.5m

송도지하차도



• 연약층 H= 0.0~9.3m

해안지하차도



• 연약층 H= 0.5~24.1m

축강도 0.1MPa 이하, 콘지수는 1.2 MPa 이하로 연약지반을 산정하였으며 해안지하차도의 경우 연약층이 최대 24.1m 로 나타났으며 각 지하차도의 지반 현황도는 다음과 같다.

3.3 설계적용 물성치

지하차도 구조물 특성에 부합하는 충분한 조사 수행 및 조사항목은 다음과 같이 선정하였으며, 조사결과의 상호연계성 있는 분석을 통해 지반특성을 파악하여 설계지반 물성치를 적용하였다.

1) 지반조사 항목

구분	설계목표	조사항목선정
지하차도구간	기초형식 및 심도결정	• 시추조사
	기초의 지지력 결정	• 공내재하시험, 암석강도시험, 표준관입시험
	물리특성	• 토질 및 암석의 기본물성시험
	강도특성	• 점하중강도시험, 일축압축강도시험, 삼축압축강도시험, 콘관입시험, DMT
	변형특성	• 공내재하시험(LLT, PMT)
	동적특성	• 밀도검층, S-PS 검층, 공진주시험
	수리특성 및 투수성	• 현장투수시험, 현장수압시험
	지하매설물조사	• GPR탐사
수질 및 토양 오염도평가	• 지하수 수질분석 • 토양화학분석	

2) 설계 적용 물성치

지층	단위중량(kN/m ³)	점착력(kN/m ²)	내부마찰각(°)	프라이싱비(-)	투수계수(cm/sec)	지반반력계수(kN/m ³)	변형계수(kN/m ³)
매립층	18	-	30.0	0.35	1.9×10 ⁻³	12,000	11,000
연약층(점토, N≤6)	17	15	17.0	0.45	3.0×10 ⁻⁷	6,500	1,400
퇴적층(점토, N6)	18	25	18.0	0.40	3.0×10 ⁻⁷	18,300	4,000
풍화토	19	18	30.0	0.33	3.0×10 ⁻⁴	30,500	30,000
풍화암	20	30	32.0	0.30	1.7×10 ⁻⁴	50,000	130,000

3.4 지하차도 기초처리 필요성 검토

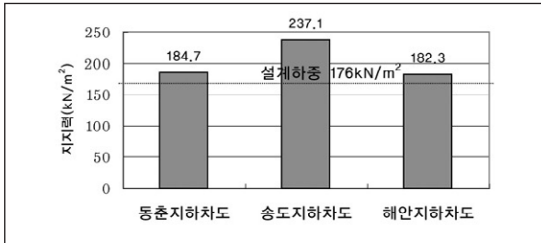
1) 지지력 검토

• 순허용지지력 : $q_a = q_{ult} / 3 + P(\text{제거하중}) > q_n(\text{설계하중}) \dots\dots\dots O.K$

Terzaghi 지지력 공식
• 설계하중(q_n)계산 : q_n
• 극한지지력(Terzaghi 지지력공식) : $q_{ult} = cN_c + 0.5\gamma BN_q + qN_q$
• 허용지지력 : $q_a = q_{ult} / 3 + P$
주요명칭
• q_n : 설계하중(kN/m ²)
• P : 전체토피압력(=제거하중, kN/m ²) $=\gamma D_f$
• q_{ult} : 극한지지력 (kN/m ²)
• q : 유효토피압력(kN/m ²) $=\gamma' D_f$
• c : 비배수 전단강도(kN/m ²)
• N_c, N_r, N_q : Terzaghi 수정지지력계수

기술기사

구분	설계하중	허용지지력	비고
동준지하차도	176kN/m ²	184.7kN/m ²	O,K
송도지하차도	176kN/m ²	237.1kN/m ²	O,K
해안지하차도	176kN/m ²	182.3kN/m ²	O,K



2) 침하량 검토

- 지하차도 구간에 기초처리 필요성을 검토하여 기초 보강구역의 선정
- 침하량(S) = 압밀침하(제거하중 이상 재하) + 재하중 (리로딩)침하 + 즉시침하(퇴적토, 풍화토)

기초 처리 필요성을 검토한 결과 하중에 대하여 기초 지지력은 안정한 것으로 나타났으나, 기초하부 연약지반의 침하량이 허용 침하량 이상 발생하므로 이에 대한 대책이 필요하여 하중에 대한 침하기준을 만족하고 부등침

- 압밀이론 : 미소변형 압밀이론식
- 압밀상태 : 정규압밀
- 배수조건 : 양면배수조건
- 하중조건 : 굴착 후 교통하중(13 kN/m²) 재하
- 1차 압밀침하 :

$$S_1 = \frac{C_c}{1 + e_0} \cdot H_1 \cdot \log \frac{P_c + \Delta P}{P_0}$$

P₀ : 유효상재하중(kN/m²)

ΔP : 유효응력 증가분(kN/m²)

C_c : 압축지수 e₀ : 현재 초기간극비



H : 압밀층 두께(m)

구분	연약심도	연직침하	허용침하	비고
동준지하차도	2.41~15.63m	2.66~8.17cm	2.5cm	N.G.
송도지하차도	0.00~9.23m	0.05~15.25cm	2.5cm	N.G.
해안지하차도	0.00~14.58m	1.97~21.78cm	2.5cm	N.G.

하를 최소화할 수 있는 기초공법을 검토하였다.

4. 지하차도 기초공법

연약지반의 지하차도 기초 공법에서 복합지반보강공법

구분	심층혼합처리공법	말뚝기초공법
개요		
공법개요	<ul style="list-style-type: none"> • 시멘트 안정처리제를 저압 주입 • 교반기의 회전에 의한 기계교반으로 원주체를 형성하여 지반보강 	<ul style="list-style-type: none"> • PHC말뚝을 기초지반에 향타 또는 굴착하여 지지층까지 근입함으로 지지력 발휘
안정성	부마찰력	• 주변지반 침하로 부마찰력 발생
	히빙	• 굴착시 히빙대책 필요
시공성	부력	• 말뚝 본수 증가 또는 부력앵커 추가
		<ul style="list-style-type: none"> • 보조말뚝 사용 등 수직도 관리 곤란 • 형하공간 제한구역 잦은 이음 발생 → 이음개소 증가로 지지력저하
경제성	1.0	1.8

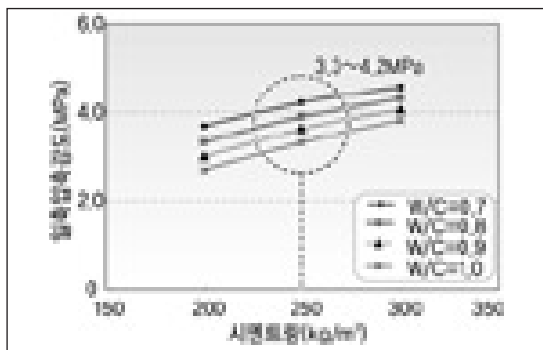
적용시 개량심도까지 개량체 형성이 가능하며, 침하에 대한 안정성과 지하차도 굴착시 히빙에 대한 안정성을 동시에 만족시킬 수 있는 심층혼합처리공법 선정하였다.

5. 심층혼합처리공법 설계

심층혼합처리공법 설계는 개량된 지반을 복합지반으로 고려하여 구조물의 침하기준과 개량체의 허용응력을 만족시킬 수 있는 구조물 하중조건에 따른 개량체의 치환율을 산정하고, 원지반에 설치한 개량체가 하중을 분담하여 연약지반에 작용하는 응력을 감소시킴으로써 원지반의 침하량을 억제한다.

5.1 배합시험에 의한 설계기준강도 산정

구분	일축압축강도 q_u (MPa)				
	w/c=0.7/1	w/c=0.8/1	w/c=0.9/1	w/c=1.0/1	
시멘트량 (kgf/cm ³)	200	3.7	3.3	3.0	2.7
	250	4.2	3.9	3.6	3.3
	300	4.6	4.3	4.1	3.8



시멘트량 250kgf/cm³ 에 물시멘트비 1.0으로 배합시 일축압축강도 q_u 은 3.3MPa 로 설계기준강도 q_{uck} 는 안전율 4 를 적용하여 0.75MPa 로 설계기준강도를 산정하였다.

5.2 심층혼합처리공법 치환율 산정

구조물의 침하기준과 개량체의 강도 기준을 동시에 만족시킬 수 있는 치환율을 산정하여야 하며 침하에 대한 치환율 산정식은 아래와 같다.

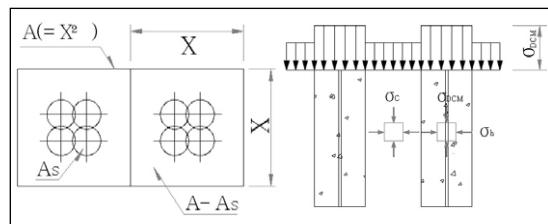
- 침하에 의한 치환율 산정

$$S : \beta \cdot S_0$$

$$\beta = \frac{a_c}{\sigma} = \frac{1}{(n-1)a_0 + 1}$$

$$C.T.C = \sqrt{\frac{a_0 \times (n-1)}{(1/\beta) - 1}}$$

S_0 : 무개량시의 침하량
 S : 개량후의 침하량
 β : 침하저감계수
 a_0 : 치환율
 n : 응력분담비



복합지반 응력분포 개념도

구분	침하량 (S0)	응력분담비(n)	치환율 (ap)	개량후 침하량	판정
동춘지하차도	2.66~8.17cm	20	10~25%	0.71~2.43cm	O.K
송도지하차도	0.05~15.25cm	20	10~30%	0.06~2.39cm	O.K
해안지하차도	1.97~21.78cm	20	10~35%	0.89~2.41cm	O.K

- 내부강도에 의한 치환율 산정

개량체의 내부응력 검토

$$F.S = \frac{q_{uck} \cdot a_p}{q_{max}} > 1.0$$

- q_{uck} : 개량체의 설계기준강도(0.75MPa)
- q_{max} : 개량지역 지반상의 구조물 설계하중

구분	치환율	안전율	비고
동춘지하차도	10~24%	1.19~1.23	O.K
송도지하차도	10~24%	1.19~1.23	O.K
해안지하차도	10~24%	1.19~1.23	O.K

구조물의 침하기준과 개량체의 강도 기준을 동시에 만족시킬 수 있는 치환율검토 결과 최대 치환율은 해안지하

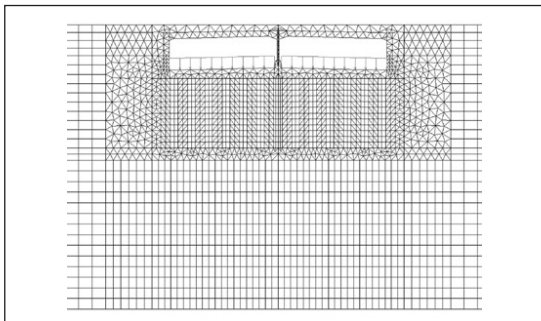
기술기사

차도에서 10~35% 적용하여 설계하였다.

6. 심층혼합처리 기초 지반 강성비에 따른 안정성 검토

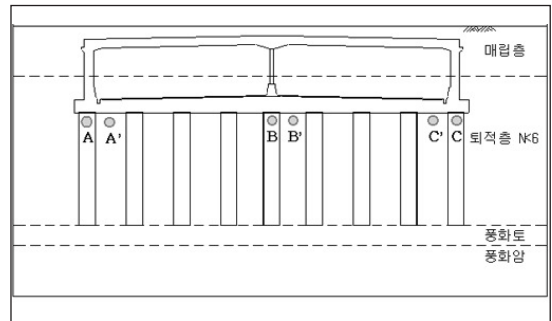
6.1 수치해석 모델링

지반과 개량체의 강성비와 타설중심거리에 따른 거동을 분석하기 위해 적용한 유한요소해석 프로그램은



해석요소망

VisualFEA이며, 지반구성모델은 Mohr-Coulomb 탄소성 모델을 적용하였고 176kPa의 재하하중을 적용하였다. 개량체의 변형계수는 여수항 건설사무소(1998)에서 제안한 회귀분석식 $E_{50}=58.6qu + 204.30$ 을 이용하여, 다양한 개량체와 지반의 강성비(개량체E/지반E = 5, 10, 15, 20, 30)와 타설간격(3m, 5m)을 모사한 후 강성비에 따른 지반과 개량체의 변위와 응력 발생 양상을 분석하였다. 입력물성은 3.3 설계적용 물성치를 사용하였으며, 해석요소망 및 측정위치는 아래와 같다.



변위 및 응력측정위치

〈 C.T.C = 3m 조건일때 지반과 개량체의 변위 및 응력 〉

C.T.C.	M.P.	Displacement (cm)				
		R5	R10	R15	R20	R30
3m	A	1.34	1.52	1.56	1.73	2.54
	B	1.69	1.84	1.95	2.01	2.92
	C	1.34	1.51	1.56	1.73	2.55
	A'	1.37	1.56	1.67	1.74	2.55
	B'	1.68	1.81	1.92	1.98	2.87
	C'	1.37	1.56	1.67	1.74	2.55

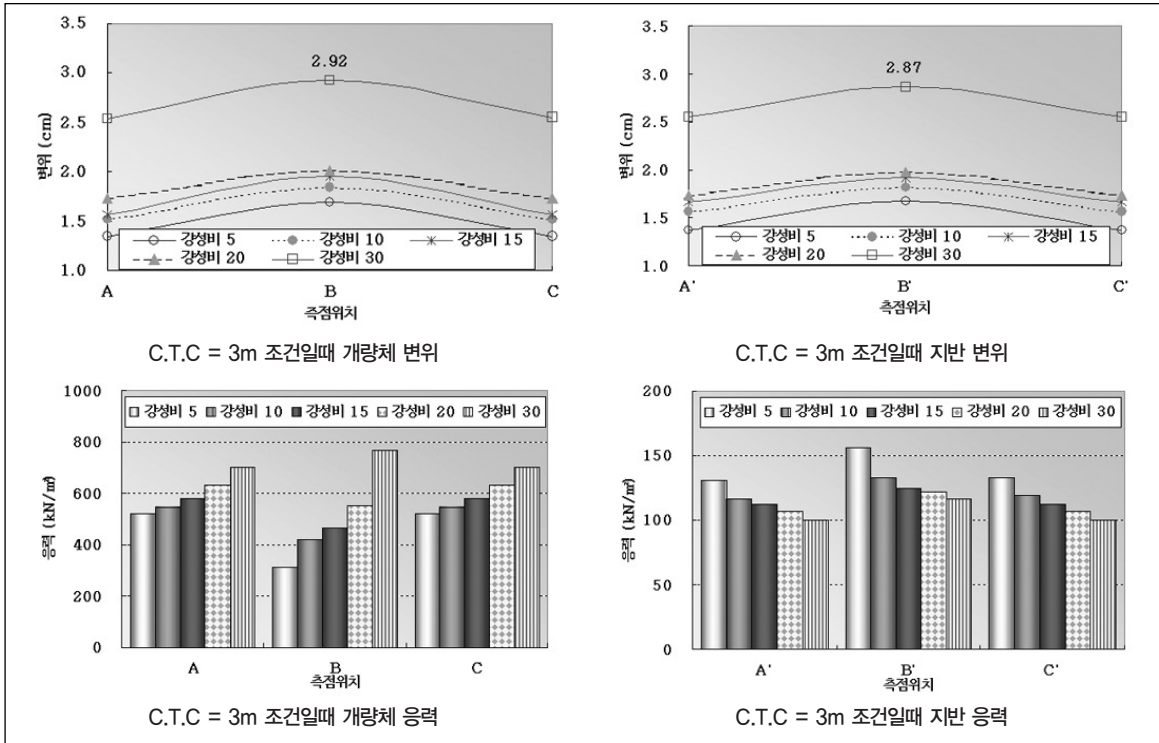
C.T.C.	M.P.	Principle Stress (kPa)				
		R5	R10	R15	R20	R30
3m	A	520.5	547.5	580.4	634.4	703.3
	B	312.7	417.1	465.5	551.4	769.2
	C	519.0	545.9	579.8	634.7	702.6
	A'	130.9	116.9	111.9	106.9	99.9
	B'	155.8	132.9	124.9	121.9	116.9
	C'	132.7	118.8	111.8	106.8	99.8

C.T.C = 5m 조건일때 지반과 개량체의 변위 및 응력

C.T.C.	M.P.	Displacement (cm)				
		R5	R10	R15	R20	R30
5m	A	1.48	1.80	2.00	2.14	3.23
	B	1.84	2.14	2.32	2.45	3.65
	C	1.48	1.80	2.00	2.14	3.23
	A'	1.55	1.84	2.02	2.15	3.22
	B'	1.83	2.11	2.28	2.40	3.55
	C'	1.54	1.84	2.02	2.15	3.22

C.T.C.	M.P.	Principle Stress (kPa)				
		R5	R10	R15	R20	R30
5m	A	552.4	571.4	595.4	640.4	763.7
	B	358.6	420.6	484.5	542.5	652.7
	C	551.9	569.9	596.8	641.4	762.6
	A'	137.9	122.9	107.9	97.4	94.4
	B'	148.9	132.9	120.9	108.9	102.3
	C'	137.7	122.8	107.8	97.3	94.3

여기서 C.T.C. : 타설중심거리 M.P. : 측정위치 R : 응력비



C.T.C = 3m 조건일때 지반과 개량체의 변위 및 응력

6.2 변위 및 응력 발생경향

심층혼합처리공법을 모사하여, 응력비 및 타설중심거리에 따른 변위 및 발생응력을 아래에 나타냈다. 지반 및 개량체에 발생하는 변위 및 응력 발생 경향을 분석한 결과 응력비와 C.T.C.가 커질수록 개량체 및 지반에 발생하는 변위 또한 증가하는 경향을 보였다. 개량체 변위와 지반변위를 비교할 때 개량체 변위가 개량되지 않은 지반보다 적은 침하량을 나타냈다. 개량체에 발생하는 응력은 지반에 발생하는 응력보다 2배~7배 정도 크게 발생하였다. C.T.C 3m에서 5m 조건으로 증가시켜 해석한 결과 응력비 5~20조건일때 개량체에 발생하는 응력은 서서히 증가하는 경향을 보이다가 응력비 30조건일때는 최대 769.2 kPa의 급격한 응력집중 현상을 나타내어 허용응력

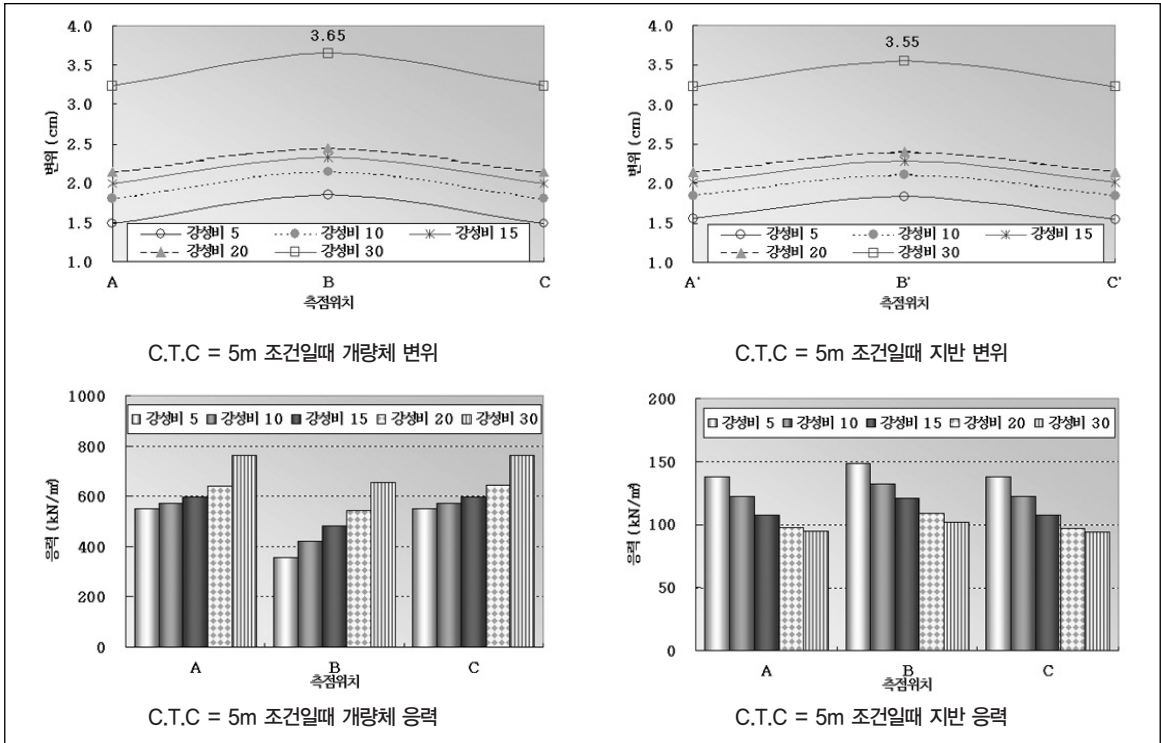
(750 kPa)을 초과하는 것으로 나타났다.

7. 지하차도 안정성 검토

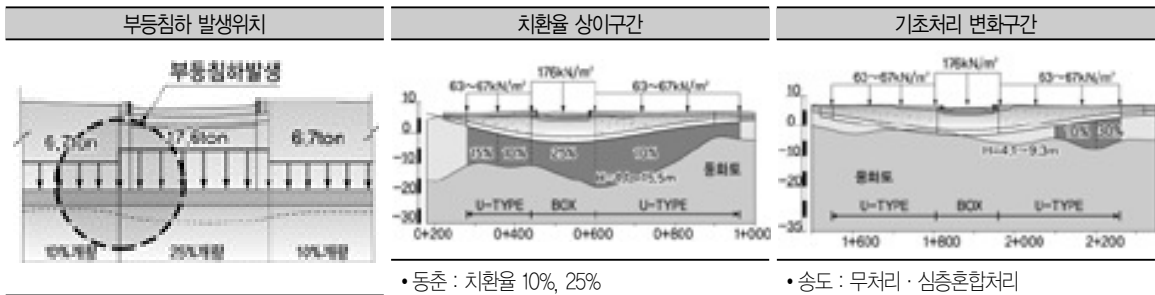
7.1 수치해석에 의한 부등침하 검토

지하차도 기초보강공법은 연약지반의 층후 및 상재하중의 크기에 따라 치환율이 상이하며, 기초처리 변화구간으로 구분된다. 따라서 상재하중 및 복합지반 치환율에 따라 지하차도 박스구조물 및 U-Type형 옹벽구조물에 부등침하 가능성이 존재하며 이에 따른 안정성 검토가 필요하다.

기술기사



C.T.C = 5m 조건일때 지반과 개량체의 변위 및 응력



7.2 복합지반 강도정수 산정

복합지반의 점착력은 다음과 같은 식으로 구할 수 있다.

$$c = c_p \times a_s + c_0(1 - a_s)$$

여기서, c_D : 개량지반의 평균 전단강도(kN/m²)

c_p : 개량체의 점착력($q_{duck}/2$)(kN/m²)

c_0 : 원지반의 점착력(kN/m²)

a_s : 치환율(%)

각각의 지하차도의 복합지반강도를 산정하면 다음과 같으며 내부마찰각은 원지반의 강도를 적용하였다.

구분	치환율 (a_s , %)	설계기준강도 (q_{Uck} , kN/m ²)	개량체 점착력 (c_D , kN/m ²)	원지반 점착력 (c_0 , kN/m ²)	복합지반강도 (c_D , kN/m ²)
동춘지하차도	10	750	375	15	51.0
	25	750	375	15	105.0
송도지하차도	0	-	-	15	-
	10	750	375	15	51.0

7.3 해석조건 및 해석방법

연약지반에서의 기초를 심층혼합처리로 개량하여, 안정성 검토에 사용한 해석프로그램은 Itasca에서 개발한 FLAC 2D, 3D 이며, 지반구성모델은 Mohr-Coulomb 탄소성 모델을 적용하였다. 해석위치는 동춘교차로의 치환율이 상이한 구간 U-Type (10%)구간과, Box(25%) 와 송도교차로의 U-Type (10%)과, 일부 보강 없는 기초처리 구간의 2구간에 대하여 검토하였다. 입력물성치는 3.3 설계적용 지반물성치와 개량체는 7.2복합지반 강도정수산정에 의한 값을 적용하였다.

지하차도 기초를 심층혼합처리공법을 적용하여 지반개량 하여 2,3차원 수치해석을 통한 지반의 부등침하에 대한 안정성 검토 결과 2차원 해석결과 연직침하 1.1~1.56cm 각변위 1/909~1/625로 나타났으며, 3차원 해석결과 연직침하 0.6~0.8cm와 각변위 1/667~1/510 으로 허용범위를 만족하는 것으로 나타났다.

7.4 해석결과

1) 2차원 해석에 의한 부등침하 검토

동춘지하차도			송도지하차도		
연직침하	1.56cm		연직침하	1.1cm	
각변위	1/625		각변위	1/909	
허용각변위	1/500		허용각변위	1/500	
판정	O.K		판정	O.K	

2) 3차원 해석에 의한 부등침하 검토

해석 결과		동춘 연직변위도(FLAC 3D)		송도 연직변위도(FLAC 3D)	
구분	동춘지하차도	송도지하차도			
연직침하	0.6cm	0.8cm			
각 변 위	1/667	1/510			
허용변위	1/500	1/500			
판정	O.K	O.K			

8. 결론

연약지반 상에 보상기초 개념을 도입하여 지하차도 기초 설계내용을 정리하면 다음과 같다.

기술기사

- 1) 굴착 흙무게를 고려한 보상기초 개념을 도입하여 지하차도 기초 설계에 대한 검토가 필요하며, 기초 지지력 보다는 침하에 대한 문제 해결이 중요한 것으로 나타났다.
- 2) 연약지반에서는 기초 침하가 허용기준을 초과하게 되면, 이에 대한 대책으로 지반개량공법을 적용하는 것이 말뚝기초보다 경제성이 있는 것으로 나타났으며, 지하차도 기초를 말뚝으로 적용할 경우, 굴착시 허빙에 대한 문제, 연약층의 말뚝기초 시공성 문제, 부마찰력 문제 등에 대한 대안으로 보상기초 개념을 도입하여 심층혼합처리에 의한 지반개량 공법 적용이 좋을 것으로 사료된다.
- 3) 지반개량으로 심층혼합처리공법 적용시 배합시험에 의한 설계기준 강도를 산정해야 하며, 침하기준과 개량체의 강도기준을 동시에 만족시키는 치환율을 산정하여야 한다.
- 4) 연약지반상의 지하차도 기초는 부등침하로 인한 피해 가능성이 많으므로 설계단계에서 치환율 상이 구간, 기초처리 변화구간 등에 대해 상세한 검토가 필요하며, 본 과업에서는 복합지반강도 정수를 산정하여 수치해석 한 결과 연직침하는 0.6~1.56cm, 각변위 1/909~1/510 으로 모두 허용기준을 만족 하는 것으로 나타났다.
- 5) 원지반과 개량체의 강성비 차가 30이상인 경우 개량체의 응력집중 현상이 발생하며 C.T.C 3m에서 5m 조건으로 증가시켜 해석한 결과 강성비 5~20조건일 때 개량체에 발생되는 응력은 증가하는 경향을 보이다가 강성비 30조건일때는 최대 769.2 kPa로 응력집중 현상을 나타내며 허용응력(750 kPa)을 초과하는 것으로 나타났다. 따라서 연약지반에 심층혼합처리 공법으로 개량시 원지반의 강성과 설치간 격을 고려하여 설계하여야 할 것으로 판단된다.

[참고문헌]

1. 양태선, 정경환, 여봉구, 이상수, 2000, "심층혼합처리공법에서 설계기준강도와 변형계수에 관한 연구", 대한토목학회 학술발표회 논문집, pp 615~618
2. 김영상, 허정원, 박옥주, 2005, "심층혼합처리지반에 설치된 인벽의 외적안정성에 대한 신뢰성해석", 대한토목학회 학술발표회 논문집, pp 2104~2107
3. 낙동강하구연약지반 연구회, 2005, "건설분야 고급기술자를 위한 단기교육 교재 - 낙동강하구 연약지반상에 세워지는 구조물의 기초설계", pp 106~115
4. 구임식 외 5명, 2006, "DCM 공법에 의한 방파제 기초 적용사례", 한국지반공학회 정기학술발표회, pp 372~382
5. 조성태 외 4명, 2006, "서해안 군장지역 DCM공법의 인벽기초 설계 사례", 한국지반공학회 준설매립기술위원회 학술발표회, pp 119~136
6. Tomlinson, M.J., 1995, "Foundation design and construction", Longman Scientific & Technical, 6th Edition, p 536
7. Chung, S.G. et al., 2003, "Performance of floating foundation of a building on Nakdong River estuarine delta" 12th ARC, Special session of ATC-7, p 15
8. 송도해안도로 확장공사 기본설계보고서, 2005, (주)포스코건설, pp 152~154