

연약지반에 있어서 침하대책공법의 효과예측과 실제



坪井 英夫
(Tsuboi Hideo)
(주)부동테트라 건설본부 국제부 부장
(hideo.tsuboi@fudotetra.co.jp)



深田 久
(Fukada Hisashi)
(주)부동테트라 건설본부
기술총괄부

1. 머리말

연약지반에 구조물을 건설하는 경우 침하문제는 피할 수 없는 과제이다. 침하는 장기간이거나, 부등침하를 동반하기 때문에 도로등의 구배변화나 말뚝기초에 지지된 구조물과의 불연속성을 발생시키는 경우가 있다. 이러한 침하대책으로는 프리로딩공법, 연직배수공법이나 SCP공법, 고화공법이 적용되고 있지만 여기서는 이러한 침하대책공법의 적용에 있어서 그 효과와 예측사례를 나타내고자 한다.



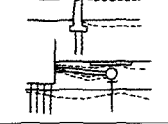

2. 침하에 의한 부등침하와 문제

표 1은 연약지반에 구조물을 건설하는 경우 발생하는 주요 문제중에 압밀(침하)에 관한 부분을 발췌

하여 정리한 것이다. 표에 의하면 침하에 의한 문제는 ① 침하에 따른 구조물의 변형문제, ② 구조물간의 불연속성문제, ③ 기존구조물과의 영향문제로 크게 나눌 수 있다.

①의 침하에 의한 구조물의 변형문제란, 건설된 구조물하중에 의해 발생하는 침하가 직접 그 구조물의 기능에 지장을 주는 경우이다. ②의 구조물간 불연속성문제의 대표적인 예로 주변지반의 침하에 의해 말뚝 지지된 구조물과 발생하는 단차문제가 있다. 이러한 경우 단순히 단차에 의한 경관문제뿐만 아니라 상하수도관이나 가스관 등 인프라설비의 연속성이 저해되는 경우도 있고, 복구에 과대한 비용이 발생하며, 주변지반의 침하가 장기적으로 진행되는 경우는 장기에 걸친 유지보수비용의 발생이 빈번해진다. ③의 기설구조물과의 영향은 근접시공에 의해 발생하는 문제이다.

표 1. 침하에 의한 부등침하와 문제점(福田倍穂, 1970)

	침하에 의한 부등침하	개요도
① 구조물변형 문제	a) 과대침하 또는 부등 침하에 의한 성토의 변상	
	b) 과대침하 또는 부등 침하에 의한 구조물의 변상	
② 구조물의 불연속문제	c) 구조물과 성토, 각 구조물간에 발생하는 부등침하 또는 등변형에 의한 단차, 변상	
③ 시설구조물의 영향	d) 성토 또는 구조물하중에 의한 측방지반 압밀 침하와 변위	

이러한 문제를 해결하기 위한 침하대책방법을 대 분류하면 다음과 같은 방법이 있다.

- ① 구조물 대책(가요성조인트 등)
- ② 연약한 지반제거와 양질재료로 치환
- ③ 지반특성의 일시적 또는 영구적 개량
- ④ 연약한 지반의 부족한 특성을 보완하는 재료로 지반보강

일반적으로 침하대책방법은 ③ 또는 ④의 방법을 기본으로 하는 경우가 되지만, 실무적으로 반드시 단독적으로 적용되는 경우는 없고, 대부분의 경우 ①~④의 조합으로 적용된다.

3. 침하대책공법의 개요

부등침하를 해결하는 방법의 하나로 지반개량공법이 있다. 그리고 지반개량공법은 다음의 관점으로 분류하는 방법이 있다.

- ① 개량목적(지지력증가, 침하·변형억제, 침투방지)
- ② 개량 목표표(잠정적·영구적개량)
- ③ 기존 지반의 상태를 변화시키는 방법(치환, 보호, 안정처리)
- ④ 지반개량의 원리(밀도증대, 고결, 배수, 지수)
- ⑤ 개량지반의 성질

개량목적의 시점을 바탕으로는 다음과 같은 분류는 흙의 기본적인 역학특성을 고려하여 연약지반대책을 검토하는 경우에 중요한 사항이 된다.

- ① 지지력증대(안정대책)
- ② 침하대책 또는 변형대책(침하, 지반응기 등의 대책)
- ③ 액상화대책(내구성유지, 증진)
- ④ 지수대책 (수압, 침투성의 감소없이 제거)

이러한 방법들은 개량공법의 원리와 상호성에 관계되며 적당한 공법을 선정할 시 중요하므로 정리하면 표 2와 같다.

표 2에 나타난 침하대책으로써 적용되고 있는 원리를 바탕으로 대표적인 공법을 대상으로 한다. 구체적으로는 탈수를 기본원리로 하는 연직배수공법, 다짐 및 탈수를 기본원리로 하는 Sand Compaction Pile공법, 고결공법이다. 이 공법들 중 여기서는 프리로딩공법과 연직배수공법에 대해 설명한다.

표 2. 개량원리와 개량목적의 관계

개량원리	개량목적	치환	탈수	다짐	고결	지수
지지력증대		○	○	○	○	
침하대책(또는 변형대책)		○	○	○	○	
액상화대책		○	○	○	○	
지수					○	○

4. 침하대책공법의 효과예측방법

4.1 침하대책공법의 효과예측과 정밀도

침하대책공법의 효과와 예측에 대해서는 현재까지도 많은 과제가 남아 있다. 예측정밀도는 다음과 같은 요인에 크게 좌우되는 것으로 알려져 있다.

- (1) 조사시험에 의한 원지반의 모델화(지층조건, 설계정수의 설정)에 의한 요인
자연지반을 대상으로 하는 조사에서는 그 지반 특성의 오차는 반드시 존재하는 것을 염두에 둘 필요가 있다.
- (2) 개량지반의 설계를 위해 선정된 방법의 적합성과 정밀도에 의한 요인
예를 들면 2차원적인 성토의 압밀침하를 1차원 해석으로 예측한 경우는 압밀변형과 함께 전단변형에 의한 침하가 포함된다.
- (3) 설계에서 가정한 개량과정과 개량지반의 모델화(개량공, 시공정밀도, 개량지반의 품질 등에 관한 이해)
실 시공의 흐름, 대책공이 원지반에 미치는 영향, 개량공의 재질특성을 이해할 필요가 있다.
- (4) 설계에서 가정한 외력이나 시공속도 등 상부구조물의 시공정밀도에 의한 요인
설계에서 가정한 공정대로 시공가능하다는 보증이 없고, 예측은 어느 정도 수정을 수행하는 경우가 있다.

이상과 같은 요인을 가정하여 침하예측을 수행할 필요가 있다.

4.2 무처리지반 또는 개량지반의 압밀침하량 예측방법

압밀침하량의 예측방법은 다음의 3가지로 분류할 수 있다.

(1) 이론·역학적수법

압밀이론을 바탕으로 흙의 성질을 결정하고 이에 대응하는 역학이론을 이용하여 지반의 압밀항복상황을 예측하는 방법

(2) 관측·통계적 방법

아사오카(浅岡)법, 카도타(門田)법, 곡선정규법, 호시노(星柵)법, 쌍곡선법 등을 바탕으로 흙의 특성을 구하지 않고 침하량과 연속적 시간의 관측값을 통계적으로 처리함으로써 관측시점이후에 발생하는 침하거동을 예측하는 방법

(3) 조사·실험적 방법

시험성토, 확인보링, 간극수압측정 등을 바탕으로 하는 개량효과의 확인에 필요한 간극수압이나 강도 등의 물리량을 현장계측이나 실험에 의해 직접 측정

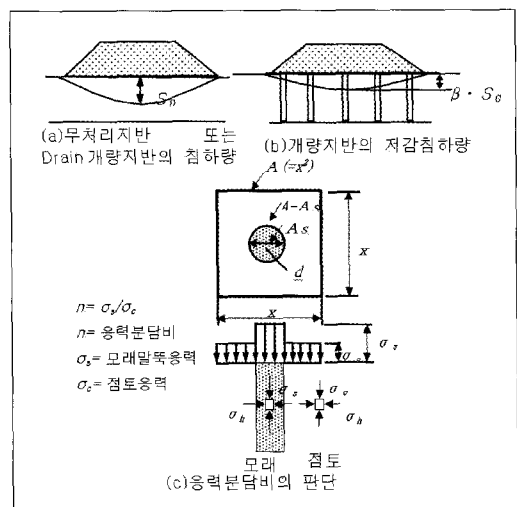


그림 1. 무처리지반과 지반개량지반의 침하량

하고 측정시점이후의 개량효과를 예측하는 방법
 상기의 3가지 방법으로 분류하였으나 실제로는 시공전에는 (1)의 방법, 시공중 또는 시공후에는 (2), (3)의 예측방법이 일반적이다.

4.3 침하대책공법의 침하량과 압밀시간

(1)침하량의 예측

침하대책공법의 선정과 적용시에는 당초 계획시의 유의사항을 충분히 정리하고, 그 목적과 일치하는 것을 유출하는 것이 중요하다. 침하대책공법으로써 연직드레인공법, 샌드컴팩션파일공법, 고화공법에 대해 최종 침하량과 침하시간의 관계는 표 4와 같이 정리할 수 있다. 또한 표 4에 나타내는 침하저감 계수 β 는 그림 1의 무처리시 침하량과 처리후의 침하량과의 비에서 구할 수 있는 계수이다.

표 3. 개량지반의 최종침하량과 압밀침하시간

공법	최종침하량	압밀침하시간
선행재하 (프리로딩)공법 연직드레인공법	$S = S_0$ 무처리지반침하 S_0 와 동일	하중-압밀시간은 층두께에 따른. (연직드레인의 경우, 드레인간격, 파일직경d에 따라 침하시간을 산정)
	m_v 법 : $S_0 = \Delta p \cdot m \cdot h$ (1)	
	C_c 법 : $S_0 = \frac{C_c}{1+e_0} \cdot H \log \frac{p_0 + \Delta p}{p_0}$ (2)	$t = \frac{H^2}{C_v} \cdot T_v$ (4)
	$e \sim \log p$ 법 : $S_0 = \frac{e_0 - e_s}{1+e_0} H$ (3)	H : 압밀층두께, T : 시간계수 Barron의 방법,
	여기서, Δp : 하중, H : 층두께 C_c : 압축지수 p_0 : 초기 연직응력 e_0 : p_0 에 대한 간극비 e_s : $p_0 + \Delta p$ 에 대한 간극비 m_v : $p_0 + 1/2 \Delta p$ 에 대한 체적압축계수	$S(t) = S_0 \cdot V(t) = S_0(1 - \exp(-\lambda t))$ (5) 시간 t-침하량 $V(t)$: 시간 t에 있어서 압밀도
		$\lambda = \frac{8 \cdot c_v}{F(n) \cdot d^2}$ (6)
		$F(n) = \frac{n^2}{n^2 - 1} \log n - \frac{3n^2 - 1}{4n^2}$ (7)
		$n = \frac{d_s}{d_w}$ (8)
		d_s : 드레인 유효직경, C_v : 수평압밀계수
		정삼각형 배치 : $d_s = 1.05d$ (9) 정사각형 배치 : $d_s = 1.13d$ (10) d : 드레인 간격
샌드컴팩션파일공법	$S = \beta \cdot S_0$ β : 침하저감계수 U_c : 응력저감계수 저치환율 $\beta = U_c = 1/(1+(n-1)a_s)$ ($n = 3 \sim 4$) 고치환율 $\beta = 1 - a_s$	조기종료 (드레인간격 x, 파일직경 d 및 치환율 a_s 에 따라 침하시간산정)
고결공법	$S = \beta \cdot S_0$ β : 침하저감계수 U_c : 응력저감계수 저치환율 $\beta = U_c = 1/(1+(n-1)a_s)$ ($n = 10 \sim 20$) 고치환율의 경우, 개량말뚝체의 압축량	개량말뚝체 : 즉시(탄성침하) 미개량부 : 무처리와 동일

S_0 : 무처리시의 최종 침하량, n : 응력분담비, a_s : 치환율

(2)압밀시간의 예측

표 3에 대책공법에 있어서 압밀침하시간의 계산 방법을 나타내었다.

5. 프리로딩(선행재하)공법의 예측효과와 실제

프리로딩공법은 구조물의 시공에 앞서 그 위치에 재하성토하여 기대치의 압밀침하에 도달하면 재하토를 굴착제거하고 구조물을 시공하는 공법이다. 계획고보다도 여성의 성토를 시공하여 압밀침하를 촉진한 후 여성토를 제거하여 소정의 성토고로 마무리하는 Surcharging 이라는 공법도 있다. 일반적으로 성토고는 지반침하나 구조물 운영후의 과압밀비 등을 고려하여 결정된다. 성토고가 한계성토고를 초과하는 경우는 단계재하를 수행하고, 단계별로 일정 방치일수를 두고, 다음 단계의 재하성토하중에 견딜수 있는 지반의 압밀강도증가를 기다린 후 다음 단계로 진행하여 성토를 완성시킨다. 또한 충분한 방치기간을 확보할 수 없는 경우 연직드레인 등을 병행하는 경우도 있다.

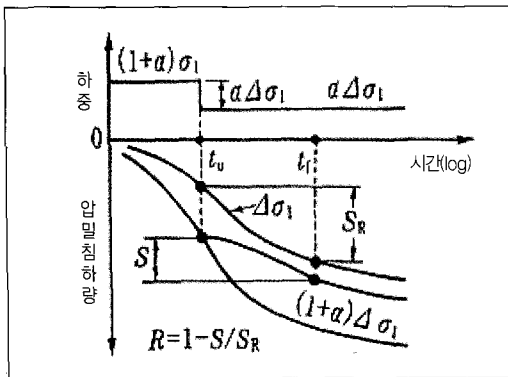


그림 2. 프리로딩공법의 원리와 잔류침하계수 R_s의 정의

그림 2에 프리로딩공법의 일반적인 원리를 나타내었다. 그림 2에 있어서 계획성토하중 Δσ₁에서 압밀된 경우의 압밀침하량-시간관계에서는 시간 t_u~t_i사이의 잔류침하량은 S_R로 나타내었다. 한편, 여성토하중 αΔσ₁을 재하하여 하중 (1+α)Δσ₁에서 압밀하여 시간 t_u에서 제거하는 경우의 잔류침하량은 S로 나타내었다. 여성토하중에 의해 압밀침하가 촉진되고 있기 때문에 S는 S_R보다 작아진다. 이때의 잔류침하량에 대한 대소를 나타내는 지수로써 잔류침하계수 R_s를 나타내었다.

그림 3은 실내시험과 계산결과로부터 R_s=1-1/S_R과 여성토하중제거시의 압밀도 U의 관계를 나타내었다. U의 증가와함께 R_s도 거의 직선적으로 증가한다. 따라서 여성토하중의 방치기간이 클수록 프리로딩공법의 목적인 잔류침하경감효과도 큰 것을 나타내고 있다. 프리로딩공법에 있어서 시공관리로는 성토를 수행할 때 안정관리와 압밀효과를 확인하기 위한 침하관리로 대별된다. 압밀침하관리로는 실측침하-시간관계로부터 압밀종료판정이나 잔류침하량을 추정하고, 필요에 따라 압밀촉진을 위해 성토를 추가하는 등의 대책을 강구한다. 사전계산과 실측침하와는 반드시 일치하지 않기 때문에 실제 시

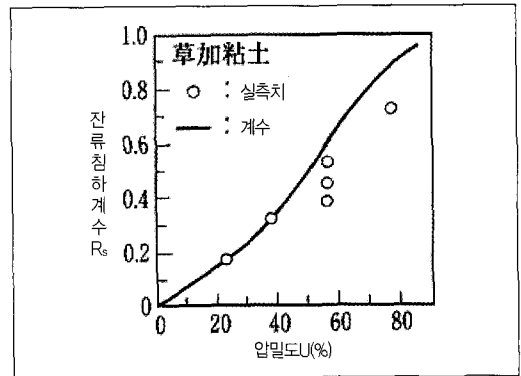


그림 3. 여성토로 하중제하시의 압밀도 U와 잔류침하계수 R_s

공공정이나 지하수위 등의 하중조건을 포함하여 압밀정수와 층구분 등을 재검토하고, 이론값을 실측값에 Fitting시키면서 시공관리할 필요가 있다.

반상의 광역매립지, 즉 1차원상태로 보이는 지역의 침하량, 침하기간, 강도증가에 대한 예측과 실제제거동과 함께 2차원상태로 볼 수 있는 고속도로성토에서의 무처리상태에 대한 침하량, 침하시간예측과 실제제거동에 대해 비교해 보자.

6. 연직드레인공법의 효과예측과 실제

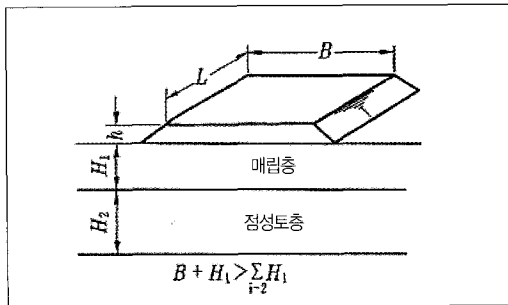
6.1 샌드드레인공법의 효과예측과 실제

(1) 1차원상태와 2차원상태에서의 거동에 대해서

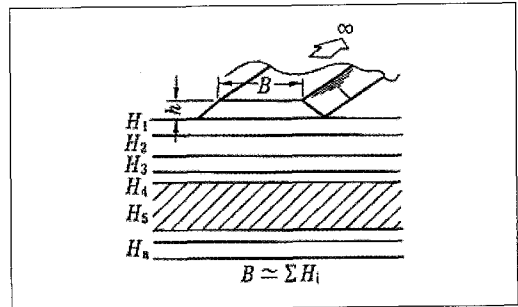
연직드레인(샌드드레인)공법으로 처리된 연약지

(2) 지층 및 재하형상

그림 4 (a)에 나타내듯이 연약지반상의 광범위한 매립하중이 재하되고, 지반은 매립하중에 대해 미압밀상태로 그 위에 광범위한 재하성토가 수행되어 1차원상태로 볼 수 있는 재하방범을 Type-A로 하자. 아울러 Type-A의 점토는 샌드드레인으로 지반개



(a)Type-A의 경우



(b)Type-B의 경우

그림 4. 지층구성과 재하방법

표 4. Type - A의 시공단위 개요

지역명	시공단위	토층(m)			재하형상(m)			샌드드레인 사양			
		H ₁	H ₂	H ₃	L	B	f ₁	간격(m)	직경	개량장	
고배	A ①	20	15	-	214	156	8	□	2.7	500	34.0
	B ②	21.5	12	-	260	15	8	□	2.8	500	32.5
	C ③	20.5	11.3	-	150	105	10	□	2.8	500	30.0
	D ④	20	11	-	300	80	6	□	2.8	500	29.5
	E ⑤	22.5	12	-	163	85	10	□	3.0	500	34.0
히로시마	A ⑥	8.5	26.5	-	420	405	5.5	□	3.0	500	32.0
	B ⑦	3.5	33	-	420	405	8.0	□	2.8	500	32.0
	C ⑧	3.5	32	-	420	405	8.0	□	3.0	500	34.0
	D ⑨	1.1	21	-	70	40	4.0	□	2.9	500	27.5-3
요카이치	A ⑩	4.5	8	25.5	455	331	7.0	□	1.8	400	35.5
					(90)	(90)					

Type - B의 시공단위 개요

지역명	시공단위	토층(m)										재하형상(m)	
		H ₁	H ₂	H ₃	H ₄	H ₅	H ₆	H ₇	H ₈	H ₉	B	h	
고배	A ①②③	4.1	7.7	19.3	2.3	-	-	-	-	-	35.2	8.9	
	B ④⑤	2.5	3.3	3.8	1.3	13.8	2.9	5.2	-	-	35.6	7.0	
조반	C ⑥⑦⑧	1.2	1.0	0.8	1.8	5.8	13.2	1.9	5.4	-	35.8	8.0	
	D ⑨⑩	2.5	3.4	1.9	2.2	12.6	4.2	1.8	-	-	42.2	8.5	
도로	E ⑪⑫⑬	1.7	1.3	3.0	3.9	11.6	7.0	2.0	-	-	51.2	10.5	
	F ⑭⑮	3.3	1.3	3.2	0.6	11.8	4.3	1.9	4.4	3.0	38.5	10.5	

연약지반에 있어서 침하대책공법의 효과예측과 실제

량되어 있다.

한편 그림 4 (b)에는 연약지반상에 직접재하되어 재하폭 B도 층두께정도로 2차원상태로 볼수 있는 재하방법을 Type-B라고 하자.

실제 대상현장으로는 Type-A에 대해서는 표 5에 나타내는 고베, 히로시마, 윗카이치(四日市)의 매립지, Type-B는 표 6에 나타내는 조반자동차도(常磐自動車道)의 성토로 했다. 모두 주요 침하대상층은 해성 층적점토이다.

(3) 침하량 예측방법과 실측치의 정리방법

1) 침하계산에 사용되는 계산식

여기서 데이터의 오차가 작을 것으로 판단되는 C_c / (1+ e_0)를 압축비 m_c 로 정의하자. m_c 는 p_{00} 또는 심도에 대해 관계없으며, 통계적 취급이 용이하기 때

문에 C_c 법으로 각 현장의 침하량을 계산하였다. 또한 토질의 오차를 객관적으로 평가하여 계산값과 실측값과의 비교하기 위해 토질오차를 $C_c / (1+e_0)$ 의 분포로 평가하고 계산식을 이용하여 침하량분포를 구하였다.

2) 실측침하로 구해지는 최종침하

실측 침하-시간곡선으로부터 최종침하량을 구하는 방법으로는 아사오카(浅岡)법, 카도타(門田)법, 곡선정규법, 호시노(星野)법, 쌍곡선법으로 검토하였지만, 이 중 가장 큰 침하예측량을 나타내는 쌍곡선법으로 정리하였다.

3) 계산값과 최종 실측침하와의 비교

상기 1), 2) 를 비교하기 위해 다음과 같이 수행하

표 5. 압밀배수공법에 있어서 고려사항

주요 과제	구체적인 고려사항	고려해야하는 분야
①압밀속도에 관한 과제	①-1 웰레지스텐스 매트레지스텐스	연직드레인과 모래포설 연직드레인 플라스틱 보드 드레인 플라스틱 보드 드레인 연직드레인 전반 재하중공법 외
	①-2 드레인재에 관해서 · 재질, 투수계수, 단면적, 길이 · 드레인의 등가배수경 설정 · 드레인재의 변형과 배수능력의 변화	
	①-3 개량대상지반의 변화 · 수평연직방향 압밀계수의 차이 · 드레인 타설시 지반교란과 압밀계수의 변화 · 드레인주변의 스미어	
	①-4 중간모래층이 있는 경우의 압밀	
	①-5 2차압밀	
②압밀, 변형(응력변형)에 관한 과제	②-1 1차원 압밀과 2차원 또는 3차원 압밀변형(축방변형)	지반을 다루는 전문가 지반을 다루는 전문가 지반을 다루는 전문가
	②-2 재하중과 지반내 작용응력(균일 탄성체와 지반 강성변화와 응력전달)	
	②-3 개량과 미개량영역의 경계부근의 거동 · 지반 개량지역과 미개량지역 · 지반 개량심도에 차이가 있는 지역 · 미관통드레인(연직방향 개량영역과 미개량영역)	
③강도에 관한 과제	③-1 압밀침하 발현과 강도발현의 시간차	압밀공법 전반

였다.

- (i) 각 시공단위 데이터별로 $C_c / (1+e_0)$ 의 분포를 실내토질시험결과로 구하였다.
- (ii) 각 시공단위의 모델지층에 따라 C_c 법인 다음의 식으로 계산침하량을 구하였다.

$$S_f = \frac{C_c}{1+e_0} \cdot H \log \frac{p_0 + \Delta p \cdot I_z}{p_{\infty}} \quad (1)$$

p_{∞} : 재하전 선행압밀응력, p_0 : 유효토포압,
 $\Delta p \cdot I_z$: 재하에 의한 증가응력
 C_c : 압축지수, e_0 : 초기간극비, H : 층두께

- (iii) $C_c / (1+e_0)$ 의 분포를 이용하여 계산침하량의 평균값 μ , 표준편차 σ 를 산출하였다.
- (iv) 2)에서 산출한 최종 실측침하량을 계산침하량의 분포에 나타내었다.

(4) 실내시험에 의한 압밀계수 C_{vL} 와 실측 압밀계수 C_{vI} 의 정리방법

실내시험에 의한 압밀계수 C_{vL} 는 침하대상층의 토포압 p_z 과 재하응력 $1/2 \Delta p$ 의 합에 해당하는 응력 $(p_z + 1/2 \Delta p)$ 에 대응하는 값으로 하였다. 한편 실측 압밀계수 C_{vI} 는 Type-A에 대해서는 쌍곡선법을 적용하여 최종 실측침하량 S_f 를 구하고 S_f 의 80%압밀 진행시기를 구하여 Barron의 드레인 이론식으로 산출하였다. Type-B에 대해서는 검토장소가 호층상태에 있기 때문에 실내시험에서 구한 C_{vL} 값과 실측에서 구한 C_{vI} 값을 직접 비교하기가 어렵다. 그래서 가장 층두께가 얇고 침하량, 침하시간에 크게 영향 받는 점성토층에 대해 그림 5에 나타냈듯이 Terzaghi의 압밀이론에 의한 계산침하시간곡선과 실측침하시간곡선으로부터 (2)식의 관계를 도출하고, (3)식에

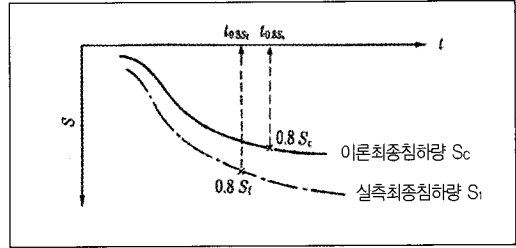


그림 5. Type-B지역의 실측 C_{vI} 산출방법

실내시험의 C_{vL} 값을 입력하고 실측 C_{vI} 값을 산출하였다. (2)식에서 (3)식을 유도할 수 있다.

$$t = \frac{H^2 \cdot T_v(U=0.8)}{C_v} \quad (2)$$

$$\frac{t_{0.8sc}}{t_{0.8sf}} = \frac{C_{vI}}{C_{vL}} \quad (3)$$

$t_{0.8sc}$ = 이론 최종침하량의 압밀도가 80%때의 시간
 $t_{0.8sf}$ = 실측 최종침하량의 압밀도가 80%때의 시간

(5) 계산값과 실측값과의 비교

1) 침하량에 대해서

현장의 데이터에 대해 동일기준으로 정규화하여 비교하기 위해 각 현장데이터별로 침하계산값의 평균 μ , 표준편차 σ 를 구하고 평균치를 중심으로 하여 $\mu \pm n\sigma$ ($n=1, 2, \dots$)축상에 대응하는 실측 최종침하량을 그림 6에 나타내었다. Type-A와 Type-B는 명확하게 경향이 다르며 Type-A에서는 계산침하와 실측침하는 평균치 μ 를 중심으로 분포하는데 비해, Type-B는 $\mu + 3\sigma$ 보다 $+9\sigma$ 에 분포하고 있어 실측 침하량이 계산값보다 크게 나타나고 있다. 그 원인은 각 Type의 재하상태가 1차원상태와 2차원상태와의 차이로 판단되며, 일반적으로 이용되는 침하계산은 1차원 압밀상태를 평가하기 때문에 2차원 상태에서 발생이 예상되는 전단변형에 따른 침하량

연약지반에 있어서 침하대책공법의 효과예측과 실제

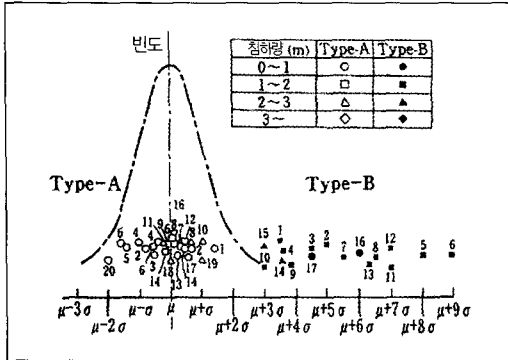


그림 6. 실내시험결과에서 산출한 침하와 실측침하의 분포 비교

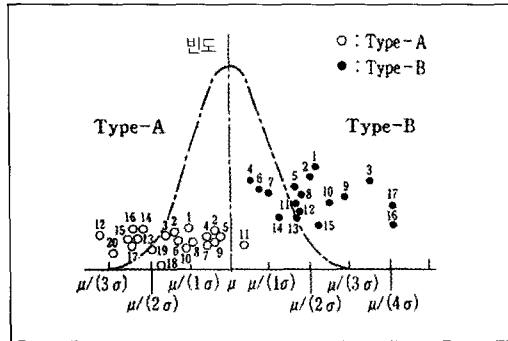


그림 7. 실내 C_v 와 실측 C_v 분포와의 비교

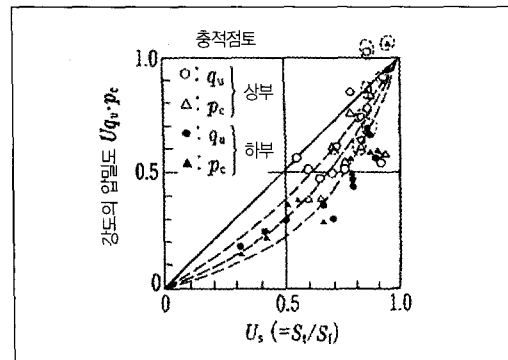


그림 8. $U_s \sim U_q, p_c$ 의 예측과 실측치관계

을 평가할 수 없기 때문에 판단된다.

2) 압밀계수 C_v 에 대해서

침하량으로 정규화하기 위해 C_v 에 대해서는 대

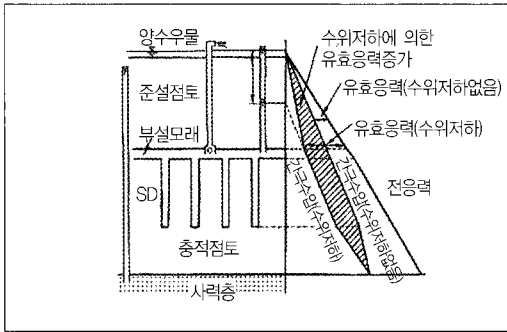
수분포로 그림 7과 같이 평균값 μ 와 σ 로 정리하였다. 각 Type의 정리방법에 차이가 있지만 Type-A에서는 샌드드레인의 타설에 의한 교란영향도 있으며, 실내시험에서 구한 C_v 보다도 작아지는 경향이 나타나고, 무처리의 Type-B에서는 반대로 커지는 경향이다.

3) 강도증가의 예측값

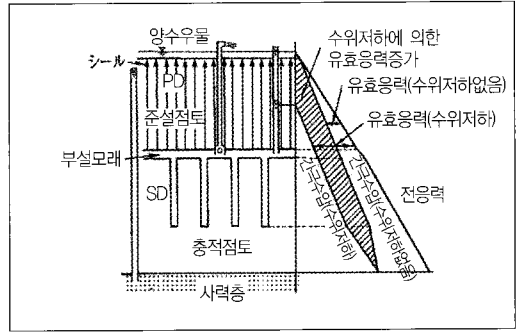
상기의 결과로부터 특히 Type-A와 같은 1차원상태에서 샌드드레인으로 지반을 개량한 경우의 실침하량은 계산치와 거의 비슷한 정도가 되는 것으로 나타났다. 또한 압밀은 느리게 진행되지만 강도는 증가했음을 알 수 있다. Type-A의 윗카이치(四日市)에서 그림 8은 실제 매립점도, 총적점성토상부, 총적점성토하부에 대해 실측침하시간곡선에서 구한 쌍곡선법의 최종침하량 S_f 에 대해 각 지점의 침하량 S_t 의 비로 나타나는 압밀도 U_s 와, 압밀항복응력 p_c , 일축압축강도 q_u 의 경시변화에 의한 압밀도 U_q, U_p 와의 비교를 수행한 것이다. 그림 중의 파선은 $e - \log p$ 의 비선형성에서 구한 이론곡선이다. 그림을 보면, 침하의 압밀도보다 강도에 의한 압밀도가 늦는 경향이 있어, 설계시에 미리 고려할 필요가 있다.

6.2 플라스틱보드드레인의 최근 적용사례

최근 플라스틱보드드레인의 적용방법의 한 예로 준설점토처리장의 수명연장(용량증대)을 목적으로 지하수위저하를 병용한 방법이 있다. 그림 9에 기존 방법과 비교한 개요도를 나타내었다. 기존방법은 미리 해저의 총적점토층에 모래를 깔고, 샌드드레인을 시공한 후 준설점토를 투입하여 모래층위에 준설점



(a) 기존공법



(b) 새로운 공법

그림 9. 기존 지하 수위 저하공법의 원리와 새로운 압밀축진공법의 원리

토에 의한 불투수층이 형성된 후 양수정의 펌프를 이동시켜 바다모래층 및 드레인내의 수위를 저하시킨다. 즉 준설점토의 자중과 수위저하에 의해 유효응력증가로 충적점토층은 압밀침하하여 용량증대를 꾀할 수 있다.

한편 새로운 적용방법은 바다모래층 위에 준설점토에 의한 불투수층이 형성된 후 양수펌프를 사용하여 바다모래층의 수위를 저하시켜 충적점토층을 압밀하는 과정은 동일하나, 준설점토의 투입이 완료된 시험에서 부유선을 사용해 준설점토층내에 플라스틱보드드레인을 바다모래층까지 타설한다. 이후 양수펌프를 이동시키면서 바다모래층 및 플라스틱보드드레인의 수위를 저하시킨다. 준설점토층은 플라스틱보드드레인에 의해 배수거리가 짧아졌기 때문에 압밀축진이 가능하다. 또한 플라스틱보드내의 수위가 내려가기 때문에 기존공법에 비해 수위저하에 의한 유효응력증가가 큰 것이 이 공법의 장점이다.

7. 압밀배수공법에 있어서 유의사항과 과제

7.1 압밀배수공법에 있어서 유의사항

압밀배수공에 있어서 표 7에 나타내듯이 ① 압밀 속도(시간)에 관한 과제, ② 압밀변형(침하변형)에 관한 과제, ③ 강도에 관한 과제에 대해 구체적인 고려 사항 및 고려해야 할 분야에 대해 정리할 수 있다. 설계단계부터 계측계획을 세우고 계측결과를 분석하여 시공에 피드백하는 이른바 정보화시공관리를 수행하는 것이 중요하다.

7.2 압밀속도(시간)에 관한 과제

(1) 레지스턴스의 과제

관용적 계산방법은 드레인재와 샌드매트재의 투수계수는 무한이지만 길이가 긴 드레인이나 투수성이 나쁜 드레인재나 샌드매트를 사용하면 압밀속도는 관용적 계산방법으로 예측한 것에 비해 늦어진다. 이 경우의 압밀예측은 吉國의해 웰레지스턴스 계수와 매트레지스턴스계수를 사용하여 예측하는 방법이 제안되어 있다.

레지스턴스의 수치계산방법으로는 드레인까지의

연약지반에 있어서 침하대책공법의 효과예측과 실제

배수속도를 근사식 (4) 또는 (5)를 이용할 수 있다.

Barron의 근사식

$$U(T_h) = 1 - \exp \left\{ - \frac{8T_h}{F(n)} \right\} \quad (4)$$

웰레지스텐스를 고려한 吉国의 근사식

$$U(T_h) = 1 - \exp \left\{ - \frac{8}{F(n) + 0.8L_w} T_h \right\} \quad (5)$$

$$F(n) = \frac{n^2}{n^2 - 1} \ln n - \frac{3n^2 - 1}{4n^2} \quad (6)$$

$n = d_e/d_w$, d_e : 드레인의 유효집수경(cm),

d_w : 원주드레인재의 직경(cm),

$U_h(T_h)$: 압밀도, $T_h = (C_v/d_e^2)t$, T_h : 시간계수,

t : 시간(d), C_v : 수평방향 압밀계수(cm^2/d),

L_w : 웰레지스텐스계수

$$L_w = \frac{32}{\pi^2} \frac{k_c}{k_w} \left(\frac{H_c}{d_w} \right)^2 \quad (7)$$

k_c : 점토지반의 투수계수(cm/s),

k_w : 드레인의 투수계수(cm/s),

H_c : 개랑층두께(cm)

한편, 매트레지스텐스계수 L_m 에 대해 吉国는 식 (8)을 사용하였다.

$$L_m = \frac{32}{\pi^2} \frac{H_m}{H_c} \frac{k_c}{k_m} \left(\frac{B}{d_e} \right)^2 \quad (8)$$

k_m : 샌드매트 투수계수(cm/s),

H_m : 샌드매트두께(cm),

B : 샌드매트의 배수거리(cm)

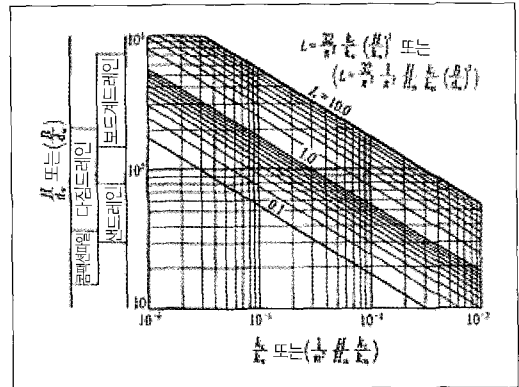


그림 10. 레지스텐스계수 L과 영향요인과의 관계(吉国)

이들 레지스텐스계수 L과 그 영향요인과의 관계를 吉国는 그림 10과 같이 나타내었다.

(2) 스미어존(smearred zone)의 과제

드레인을 타설하면 드레인 주변의 점토가 교란되어 투수성이 저하되는 영역이 발생한다. 스미어존으로 불리는 이 교란영역은 압밀속도에 영향을 미친다.

森脇는 스미어존에 대해 다음과 같이 설명하고 있다. 스미어존의 영향을 고려하여 Hansbo는 점토를 투수계수가 저하하는 스미어존과 투수계수가 변화하지 않는 비교란영역의 2가지 영역으로 분리하여 해석하는 방법을 제안하였다. Hansbo의 해석은 그림 11과 같이 스미어존의 직경 d_s 을 드레인직경 d_w 의 1.5배($d_s/d_w=1.5$), 스미어존의 투수계수 k_s 를 불교란시의 1/3($k_s/k=1/3$)로 저하시켰다. 網干도 동일한 해석을 수행하여 $d_s/d_w=1.4$, $k_s/k=1/10$ 로 하면 실제거동을 예측할 수 있는 것을 나타내었다. 한편, 尾上和 박영목은 스미어존을 완전히 교란된 퇴비상 상태의 영역과 투수계수가 드레인으로부터의 거리에 따라 저하하는 영역을 분리하고 투수계수가 변화하지 않는 비교란영역과 함께 3가지의 영역으로 해

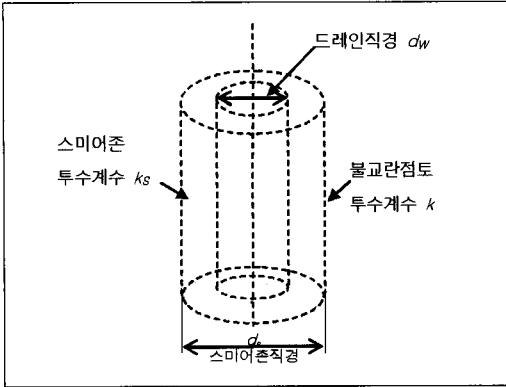


그림 11. 스미어존의 영향평가

석하는 방법을 제안하였다. 아울러 이들 해석에서 尾上는 $d_s/d_w=6.5$, $k_s/k=1/3$ 을, 박영목은 $d_s/d_w=15$, $k_s/k=1/5$ 을 적용하였다.

7.3 압밀변형에 관한 과제

(1) 재하중과 지반내 작용응력

1차원압밀과 다르게, 2차원 또는 3차원 하중이 작용하는 경우는 지반내에 작용하는 응력전달을 고려할 필요가 있다. 일반적인 설계에서는 Osterberg의 도표 등을 이용하여 균일한 선형탄성체로써 지반내

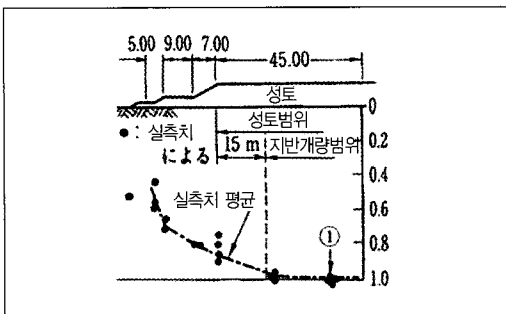
의 증가응력을 구하지만 실제로는 지반내 강성의 불균질성 및 개량영역과 미개량영역의 강성차이와 지지층의 심도로부터 응력분포는 변화하게 된다. 따라서 강성의 차이를 고려할 수 있는 계산방법을 사용할 필요가 있다.

(2) 침하개량영역과 미개량영역부근의 거동

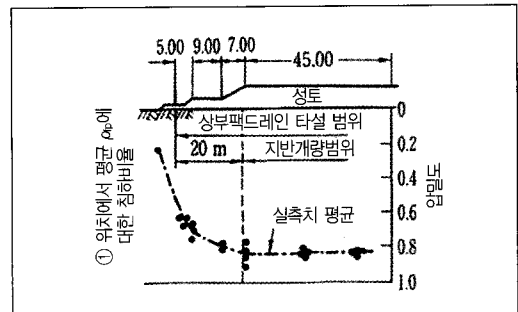
침하대책개량영역과 그 주변의 미개량영역부근에서는 압밀속도가 다르기 때문에 개량영역의 단부는 미개량영역의 경계부분이 되며, 부등침하나 연동침하가 문제가 되는 경우가 있다. 이러한 현상은 개량심도가 다른 영역에서도 문제가 되는 경우가 있다. 또한 경제성이나 시공능력의 조건으로부터 드레인하단을 점토층 중간까지 설치하는 미관통드레인으로 하는 경우도 하단 미개량점토층의 압밀지연이 상부개량점토층의 압밀에 어떤 영향을 미치는지 드레인하단면을 하부 미개량점토의 배수면으로 어떻게 평가하면 좋은지에 대한 검토가 필요하다.

그림 12는 지반개량범위와 미개량영역의 침하에 대한 실측결과를 나타내었다. 이 사례를 통하여 다음과 같은 범위를 결정하였다.

지반개량범위내에서는 성토제거후 잔류침하가



(a) 성토 필요범위



(b) 모래말뚝의 필요범위

그림 12. 성토 및 드레인의 필요범위

연약지반에 있어서 침하대책공법의 효과예측과 실제

발생하지 않기 때문에 성토에 의해 충분히 압밀시킬 필요가 있으므로 침하량은 성토에 의한 지중유효압밀응력의 증가분과 압밀도로 결정하였다. 그리고 침하의 실측치에 의한 예측 최종침하에서 각 지점에서의 성토에 의한 지중유효압밀응력의 증가분을 알 수 있고 침하실측치와 예측 최종침하량과의 관계에서 압밀도를 산출할 수 있다. 따라서 지반개량범위로는 성토중횡단방향의 예측최종침하량과 압밀도가 성토중양부와 동일하게 되는 위치까지로 하였다.

7.4 압밀에 의한 강도발현에 관한 과제

압밀침하의 발현과 강도발현의 시간지연에 대해 고려하면 연약점토의 지반강도증가를 압밀도에 의해 고려하는 경우 침하(변형)에 관한 압밀도와 강도 증가에 관한 압밀도가 반드시 일치하지 않는(변형에 관한 압밀도에 대해 강도증가에 관한 압밀도가 늦는) 점에도 유의할 필요가 있다. 그 이유는 $e \sim \log p$ 곡선의 비선형성에 따르기 때문이다.

7.5 비재하형 드레인(진공압밀)의 과제

비재하형 드레인(진공압밀)은 설계나 시공에 있어

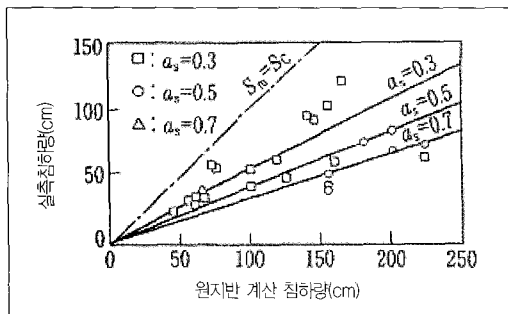


그림 13. 실제침하량과 원지반 침하량

사 다음의 사항에 유의할 필요가 있다. 1) 개량대상의 점토 상부 또는 중간층에 모래층이 존재하면 그 층이 투수층이 되어 그 모래층보다 깊은 심도에서 유효응력의 증가를 기대할 수 없는 가능성이 있다 2) 진공펌프의 운전으로 얻어지는 압밀하중은 실제 95kN/m^2 가 최대이다. 3) 한번의 재하면적, 심아운 전시 전력확보, 펌프운전전력비와 기밀시트의 점검 관리경비 등 경제성을 고려할 필요가 있다.

8. 샌드컴팩션파일(SCP)공법의 효과 예측과 과제

과거의 시공실적을 바탕으로 침하량의 저감효과를 그림 13에 나타내었다. SCP공법의 침하저감효과는 그림 13과 같이 치환율에 따라 변화한다. 또한 침하속도지연을 압밀계수로 정리한 결과를 그림 14에 나타내었다. 여기서 c_v 는 실측 침하시간에서 역산된 압밀계수로 c_{v0} 는 토질시험에 구한 압밀계수이다.

9. 고화공법의 효과예측과 실제

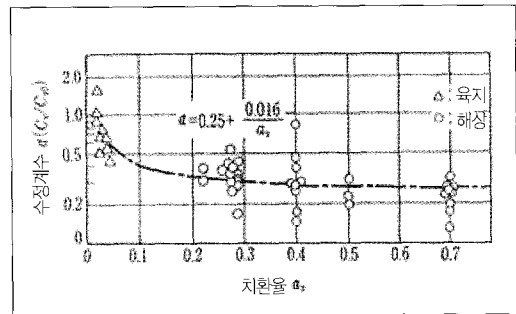


그림 14. 압밀계수의 수정계수(神田·寺師)

(1) 저치환형 심층혼합처리공법에 있어서 예측과 실제

저치환형 심층혼합처리공법은 성토직하부를 심층혼합처리공법 등의 저가 시멘트 혼합고화체로 “전면적 타설없이” 개량(치환율 a_p 는 $10 \leq a_p \leq 30\%$ 의 과거보다 낮은 치환율)함으로써 그림 15에 나타내듯이 성토중양부 직하의 압밀침하를 경감하는 공법이다. 기존에는 가장 저가의 지반개량형식으로 되어온 프리로딩+드레인공법에 대해서도 ① 공기단축이 가능, ② 성토의 안정과 침하관리 등 시공관리가 용이, ③ 침하량억제에 의한 전체 성토재가 절약가능하고 재료운반시 주변영향저감 등의 특성이 있다.

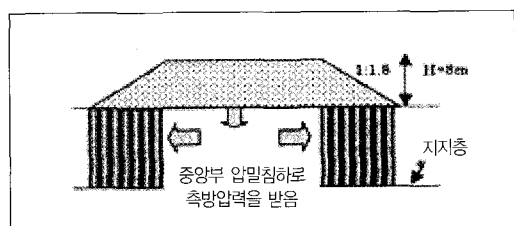
지금까지의 실내실험과 그 결과를 바탕으로 설계 방법도 제안되어 태국이나 일본내 현장에서 많이 적용되고 있다. 또한 경우에 따라서는 표층고화나 지오텍스타일포설과 조합하여 말뚝간의 부등침하도

억제가 가능하다. 또한 그림 16에 나타내듯이 개량체를 지지지반에 착저시키지 않는 부유형(그림 16 (a))을 적용하여 한층더 경제성을 확보하는 것도 가능하다. 부유형의 침하량예측은 다음과 같이 검토한다. 개량부의 침하량 Δh_1 은 복합지반효과를 기대하여 식 9로 산출한다. 또한 하부층의 미개량부의 침하량 Δh_2 은 관용설계계산식 10로 구한다(그림 17참조).

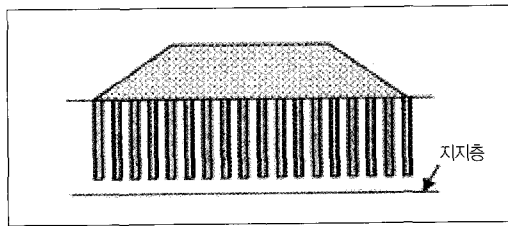
$$\Delta h_1 = q_1 L / \{a_p E_{col} + (1-a_p)E_{soil}\} \quad (9)$$

$$\Delta h_2 = Cc / (1+e_0) \times H_c \times \log \{(\sigma V' + q_2) / \sigma V'\} \quad (10)$$

- a_p : 개량율,
- E_{col} : 개량체의 변형계수,
- E_{soil} : 점토층의 변형계수,
- q_1 : 성토하중, q_2 : 점토하부층에서의 하중

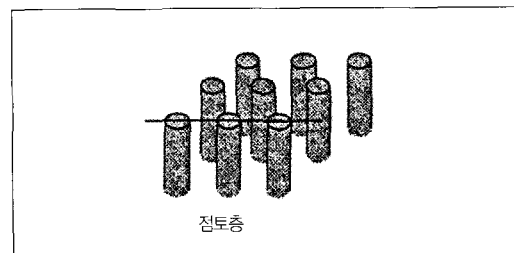


(a) 과거의 개량형식

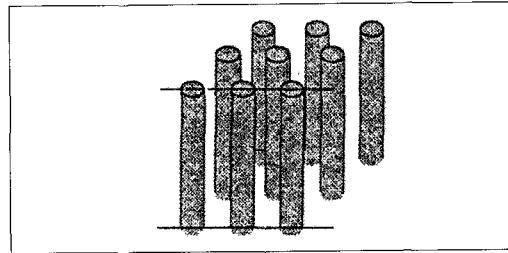


(b) 성토 직하부의 부유말뚝형식

그림 15. 기존의 공법과 비교



(a) 부유형



(b) 착저형

그림 16. 저치환율 시멘트컬럼공법

연약지반에 있어서 침하대책공법의 효과예측과 실제

표 6. 저치환을 시멘트컬럼공법의 적용예와 계산결과

No	위치	성토높이 He(m) 말뚝길이(m)	타설간격 d×d(m)	구경(cm) 치환율 a _b (%)	무처리 침하량 추정(cm)	계측 최대침하량 (cm)	계측된 부등침하량 (cm)	실측 응력 분담비	계산결과			
									계산방법	간격	개량부	부등침하량
①	방곡고속도로	3.0 17.0	1.5×1.5	60.0 12.6	-	19.0	1.0	-	-			
②	신이니카다 서부 바이패스	8.0 13.6	2.3×2.3	100.0 14.8	270.0	23.2	0.8	73	횡간 중간도넛	28.0	24.9	3.1
③	아리아키해 연안도로	8.0 6.0	1.9×1.9	100.0 21.7	120	35.0	-	74	부유말뚝	35.0		

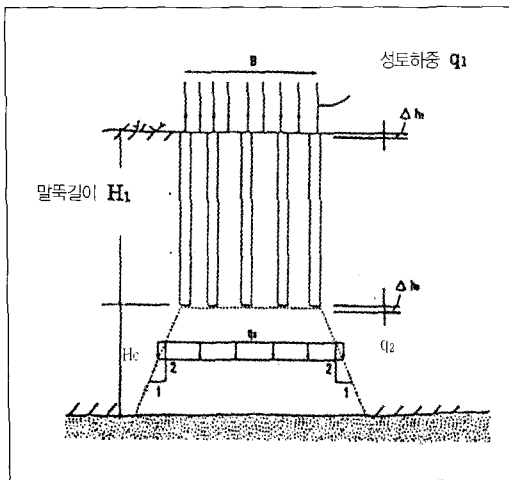


그림 17. 부유형 기초의 침하계산방법

(2) 관측침하량과 계산결과

아리아키(有明) 연안도로 시험시공에 있어서 성토 중앙직하부의 표층침하계의 계측결과에 따르면 전체 침하량 35 cm 중 하부 미개량층에서 20 cm, 그 하부의 홍적층에서 10 cm 정도의 침하로 저치환을 시멘트컬럼에 의해 개량역역 GL-6m까지의 사이에서는 거의 침하가 발생하지 않은 보고가 있다. 지금까지의 태국이나 일본내 현장에서 관측된 침하량과 계산결과를 표 7에 정리하였다.

10. 맺음말

「침하대책공법의 효과예측과 실제」에 대해 정리하면 다음과 같다.

1) 침하대책의 예측에 대해

침하대책으로는 과거부터 다양한 지반개량공법이 수행되어오고 있지만 그 효과를 예측하는 경우는 개량원리와 실제 개량과정을 잘 이해해 둘 필요가 있다.

2) 1차원상태와 2차원 상태에 대해

도로성토등과 같이 좁은 면적(2차원 상태)에서는 측방으로의 전단변형량에 의한 침하성분을 무시할 수 없을 것으로 판단되며, 이와 같은 측면으로도 설계량의 타당성과 개량효과를 평가할 필요가 있다.

3) 압밀시간에 관해서는 특히 웰레지스턴스, 매트 레지스턴스 등의 유의사항에 대해 설명하였다.

4) 압밀변형에 관한 과제, 강도발현에 관한 과제에 대해 설명하였다.

5) Sand Compaction Pile공법에 있어서는 침하 저감효과를 적절히 설정할 필요가 있다. 또한 압밀 지연에 대해 유의할 필요가 있다.

6) 고화공법에 대해서도 침하저감효과를 적절히 설정할 필요가 있다. 최근에는 저지환율의 침하저감형식도 개발되고 있다.

참고 문헌

1. 稲田倍穂 : 軟弱地盤の調査から設計・施工まで, 鹿島出版会, 1970.
2. 実用軟弱地盤対策技術総覧編集委員会編: 土木・建築技術者のための実用軟弱地盤対策技術総覧, 産業技術サービスセンター, 第4編第7章, 1997
3. 地盤工学会 : 地盤改良効果の予測と実際, pp.4, pp.19~20, 2000.
4. 坪井英夫: 平成18年度土質・基礎に関する技術-技術士受験のポイント-講習会資料, pp.111, 2006.
5. 建設産業調査会編: 土木・建築技術者のための最新軟弱地盤ハンドブック, 第1編 第9章, 1981.
6. 稲田倍穂 : 最近の軟弱地盤工法, 道路, No.2, 1976.
7. 末松・栃木・坪井: 軟弱地盤上の載荷盛土による沈下の予測と実際について, 第31回土質工学シンポジウム, pp.107~110, 1986.
8. 地盤工学会 : 地盤工学ハンドブック, pp.1214, 1999.
9. 木山・徳平・大島・東・原田: 処分場におけるパーチカルドレーンによる浚渫粘土の減容化技術, 粘土地盤における最新の研究と実際-微細的構造の観察から超軟弱埋立て地盤対策技術まで-に関するシンポジウム, pp.275~282, 2002.5.
10. 嘉門雅史・諏訪靖二: 日本におけるプラスチックボードドレーンの発達の歴史と課題, PD研究会, 資料, No.45-4, 2006.
11. 中ノ堂裕文・末松直幹: 地盤改良(7)改良原理に基づく調査・設計・施工方法(圧密), トンネルと地下, 土木工学社, pp.72, 1997.
12. 吉国 洋: パーチカルドレーン工法の設計と施工管理, 技報堂出版, pp.49~58, 1979.
13. 地盤工学会 : 地盤改良効果の予測と実際, pp.62~63, 2000
14. Hansbo, S. : Consolidation of fine-grained soils by prefabricated drains, Proc. of 10th ICSMFE, Vol.3, pp.677~682, 1981.
15. 網干壽夫: 軟弱地盤の圧密沈下と地盤改良, 土と基礎, Vol.38, No.10, 1990.
16. 尾上篤生: パーチカルドレーン周辺の 霍乱帯の透水係数について, 第26回土質工学 研究発表会, pp.2015~2018, 1991.
17. 朴永穆・三浦哲彦・米倉憲三・高木兼士・松長作馬: パーチカルドレーン施工に伴う軟弱地盤の乱れと圧密に及ぼす影響, 第28回土質工学 研究発表会, pp.2435~2436, 1993.
18. 金谷嘉久: 軟弱地盤に立地する発電所燃料貯蔵施設の設計・施工に関する研究, pp.209~210, 1990.
19. 地盤工学会 : 地盤工学ハンドブック, pp.1214, 1999.
20. 神田・寺師: 粘性土地盤を対象とするSCP工法の实用設計法-感度分析と実態調査-, 港湾技研資料, No.669, 1990
21. 井上・三木・落合・増田: 浮き型低改良率セメントコラム(F-LCC)工法の道路盛土での改良効果, 第48回地盤工学シンポジウム, pp.177~184, 2003.