

연약지반의 입도 혼합비를 고려한 압밀특성평가

Evaluation of Consolidation Characteristics Considering the Mixed Gradation Ratio of Soft Ground

박 영 목¹ Park, Yeong-Mog
윤 상 종² Yun, Sang-Jong
채 중 길³ Chea, Jong-Gil

Abstract

In order to provide the design criteria, the characteristics of consolidation for soft ground improvement have been investigated using the field banking test performed by the vertical drain method at the northern container section in Busan New Port. Field test results indicated that the estimated degree of consolidation in design stage decreased by about 7% compared with the measured one. This difference is attributed to the fact that the conservative geological properties were applied with relatively high amount of maximum clay mixture ratio during the design stage. Based on this findings, another laboratory oedometer test was implemented to consider various combination of mixture ratio. It was found that the consolidation degree increased in accordance with the increase of sand/silt mixture ratio. Also, the proportion of 10%, 50%, and 40% for sand, silt, and clay, respectively, was observed as the best combination of mixture ratio to the actual measurement, which is very similar to the average grain size distribution in the banking test area. Therefore, it is suggested that the overall geological characteristics as well as the grain size distribution should be considered in design stage to improve the soft ground that contains mixture of sand, silt, and clay.

요 지

부산 신항만 북컨테이너 지역에서 연직배수공법에 의한 연약지반개량을 위해 설계된 제반사항을 검토하고, 현장시험시공을 실시하여 현장계측 결과를 이용한 압밀침하 특성을 검토하였다. 설계치와 현장계측치의 비교검토에서, 설계 압밀도에 비해 실측압밀도가 약 7% 높게 나타났다. 그 차이는 설계당시의 지반정수가 전체적인 지반의 입도 혼합비를 고려하지 않고 점토성분이 많은 시료를 이용하여 보수적으로 적용되었기 때문이라고 판단하여 다양한 입도 혼합비별로 실내 압밀시험을 실시하였다. 실험결과, 점토시료의 실트 및 모래혼합비 증가에 따라 압밀진척도가 증가하는 경향이 나타났으며, 실측 압밀도와 가장 잘 맞는 입도 혼합비는 모래 10%, 실트 50%, 점토 40%였고, 이는 시험시공구역의 평균입도분포와 거의 일치하는 것으로 나타났다. 따라서 모래, 실트 및 점토가 혼재된 연약지반을 개량하는 경우 설계단계에서 전체적인 지층의 특성 및 입도의 혼합비를 충분히 고려할 필요가 있다는 것을 제시했다.

Keywords : Consolidation, Grain-size distribution, Ground improvement, Smear effect, Well resistance

1 정회원, 영남대학교 건설시스템공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Yeungnam Univ.)

2 청석엔지니어링 지반공학부 사원 (Staff, Geotechnical Engrg. Div., Chung suk Engrg. Co., LTD.)

3 정회원, 한국품질시험연구소 팀장 (Member, Team Leader, Korea Quality Testing Research Center, chaie76@naver.com, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2010년 4월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

현재 우리나라는 인구증가 및 산업화가 급속하게 진행됨에 따라 국토 활용률이 증가되고 있으며, 그 일환으로 해저준설토를 이용한 해안 연안의 매립공사가 서해안과 남해안을 중심으로 활발하게 진행되고 있다. 준설 매립지반의 개량을 위하여 최근 현장에서는 주로 프리로딩 공법과 연직배수재를 이용한 공법을 병용하는 것이 보편적이다. 이와 같은 압밀축진공법을 적용하는 경우 현장 조사와 실내시험에 의한 설계 당시의 침하량과 압밀기간의 예측결과는 시험시공에 의한 현장계측결과와 비교하면 차이가 크게 나타나는 것이 일반적이다(Chung, 1999). 양자의 차이를 나타내는 가장 큰 이유로는 설계단계에서 보수적인 관점으로 전체의 채취된 시료중 점토의 함유율이 높은 가장 연약한 시료를 대표시료로 선정해 실험하여 그 값이 전체지반을 대표한다고 가정하기 때문이라고 사료된다. 그러나 연약지반에서 점토함유율은 심도별로 큰 변동특성을 가지기 때문에 설계단계에서 지층전체의 총괄적인 지반정수의 적용을 위해서는 채취시료 내에 점토, 실트 및 모래의 함유율에 따른 압밀도 변화를 고려한 시험을 실시할 필요가 있으나, 지금까지 국내 해성점성토에 있어서 현장의 입도 혼합비를 고려한 압밀특성에 관한 연구는 보고된 바가 없다. 또한, 설계시 압밀속도를 정도 높게 예측하기 위해서는 연직배

수공법의 주된 압밀지연 요인인 웰저항(well resistance)과 스미어 효과(smear effect)를 면밀하게 고려한 검토가 필요하다고 판단된다(朴永穆, 1994).

따라서, 본 연구에서는 부산신항만 컨테이너부지 조성 공사 현장의 연약지반에 대해 연직배수공법에 의한 지반개량을 수행한 결과를 대상으로 설계치와 시험시공계측결과치의 압밀침하 특성을 비교 분석하였다. 설계자료는 부산도시공사(2008)와 Chung et al.(2007)에 의한 결과를 활용하였으며 시험시공 계측 결과를 이용한 최종침하량 및 압밀기간 산정자료는 부산도시공사(정충기)(2008)의 연구결과를 참고하였다. 또한, 연직배수공법에 의한 지반개량시 웰저항과 스미어 효과에 의한 압밀지연을 확인하기 위하여 양자의 특성을 고려하지 않은 Barron(1948)식과 고려된 Hansbo(1979)와 Onoue(1988)가 제시한 식을 이용해 역해석을 실시하여 검토하였다. 아울러, 연구대상 지역의 설계치와 현장 계측치의 압밀도에 연직배수공법의 압밀지연 특성을 고려하여도 상당한 차이가 나타남에 근거하여 설계당시 지반정수의 결정에 다소간의 문제가 있을 것으로 판단하여 현장여건과 유사하도록 점토시료에 모래와 실트를 다양한 조건으로 혼합하여 실내압밀시험을 실시하였으며, 각 입도 혼합비별 압밀시험 결과를 활용하여 실측 압밀도와 비교 분석하여 합리성을 평가하였다.

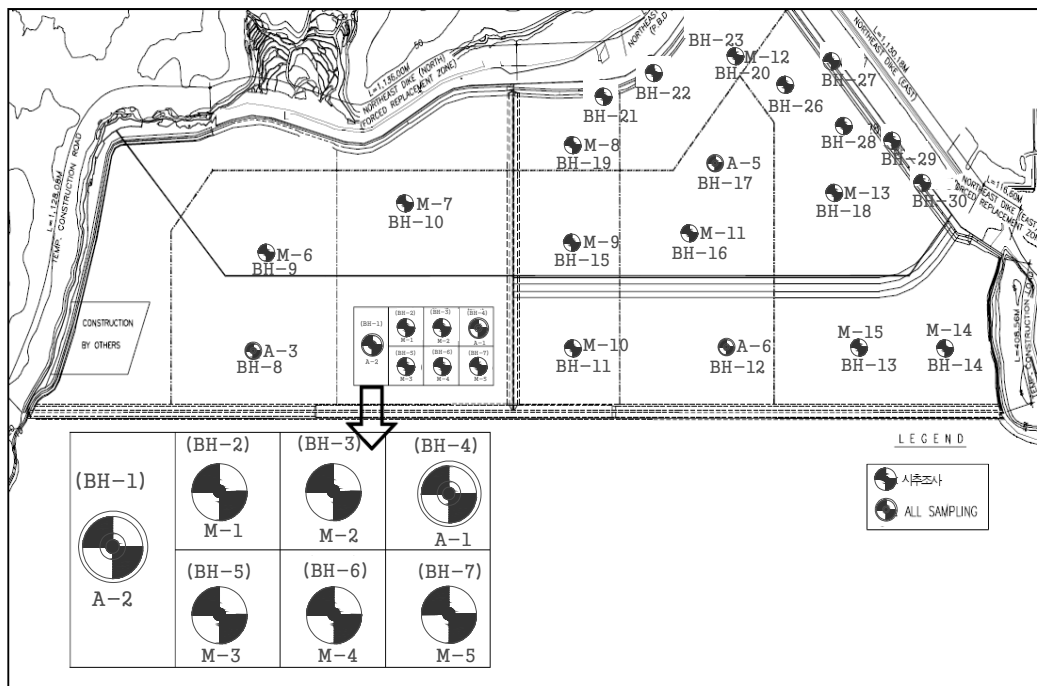


그림 1. 연구대상지역 위치도(부산도시공사, 2008)

2. 연구 대상지역

2.1 대상지역 위치 및 지층구조

본 연구대상지역은 부산신항 북컨테이너 지역이며, 시험시공부지를 중심으로 총 7개의 시추조사와 불교란 시료채취가 수행되었다(그림 1 참조). 조사 당시에는 그

림 2에 나타난 바와 같이 샌드매트 포설 및 연직배수제 타설로 인해 모래가 준설토부에 침투되어 있는 상황이 었다.

그림 3에서는 시험성토부지에 대한 시추주상도를 나타내고 있다. 그림에서와 같이 이 부지 내에서는 전반적으로 점성토층의 두께가 상대적으로 두꺼우며(46m~68m), 중간에 2m~4m의 얇은 모래층(sand seam)이 분

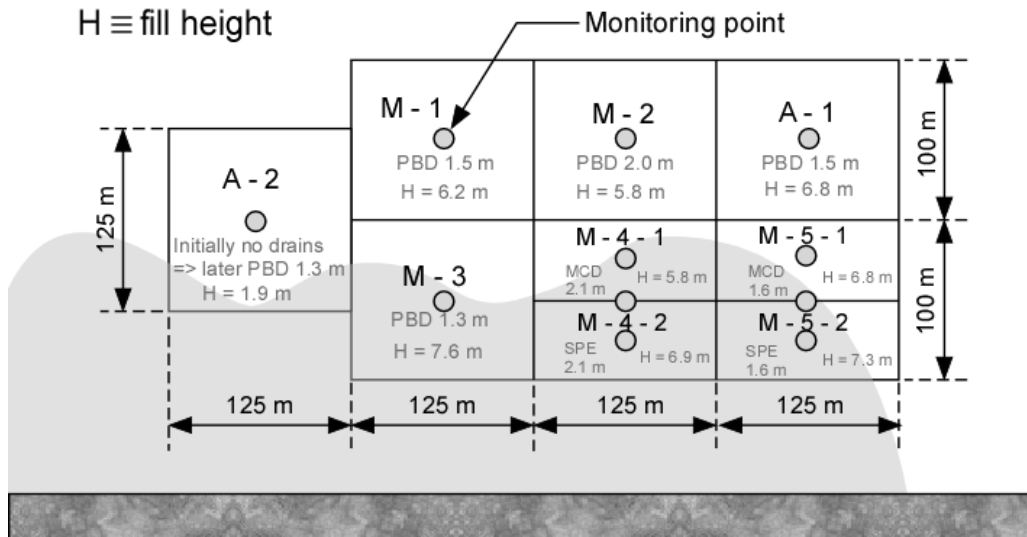


그림 2. 평면도 및 모래침투 현황(음영부분)(부산도시공사, 2008)

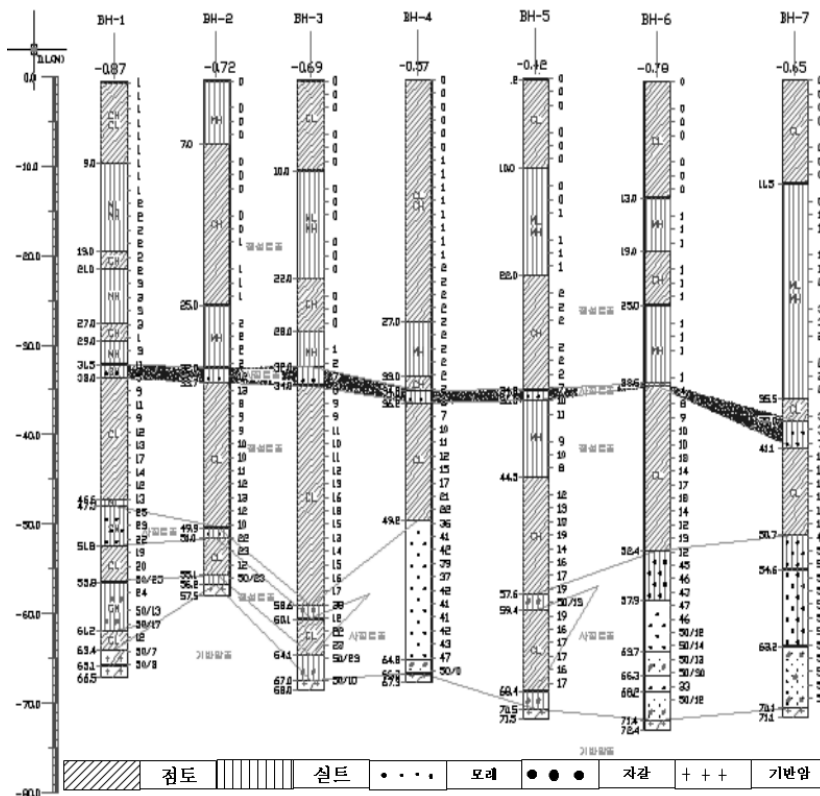


그림 3. 시험성토 부지에서의 지층구조(부산도시공사, 2008)

포하는 다소 복잡한 지층구조로 나타났다.

2.2 토질특성

토질특성의 파악은 시험성토 현장 내에 상세 지반 조사(N-1)를 실시하여, 그 결과를 요약 보고한 Chung et al(2007)의 자료를 활용하였다. Chung et al.(2007)은 지반정수의 결정에 있어서 통상의 설계단계에서는 점토의 퇴적환경에 따른 고결효과를 충분히 반영하지 않고 깊이에 따라 연속적으로 변하는 경험식을 기초로 하고 있음을 지적하고(표 1 참고), 본 현장의 점토층을 퇴적 환경에 따라 상부점토(soft clay)와 하부점토(stiff clay)로 나누어 자료를 분석함이 보다 타당하다고 제안하고

있다. 그림 4는 N-1지점 지반의 역학적 특성을 나타내고 있으며, Chung et al.(2007)의 보고에 상세히 나타나 있다.

한편, 지반 전체구간의 입도분포를 평균해보면 모래는 10.7%(0~38% 범위), 실트는 53.6%(40~63% 범위), 점토는 35.7%(20~45% 범위)로 혼합되어 있는데, 특히 모래의 입도가 가장 변동이 큰 것으로 나타났다. 80cm 길이의 샘플러 내에 모래가 많이 함유되어 있는 시료의 경우, 실험실 내에서 추출시 추출압에 의해 모래 속의 간극수가 갑자기 유출되거나, 시료의 팽창/수축이 발생하기 쉽고, 추출했다하더라도 시료 겉면의 거친 정도에 따라 시료의 성형이 쉽지 않기 때문에 그로부터 얻은 결과는 큰 변동성이 내재되어 있다는 점을 염두에 두고

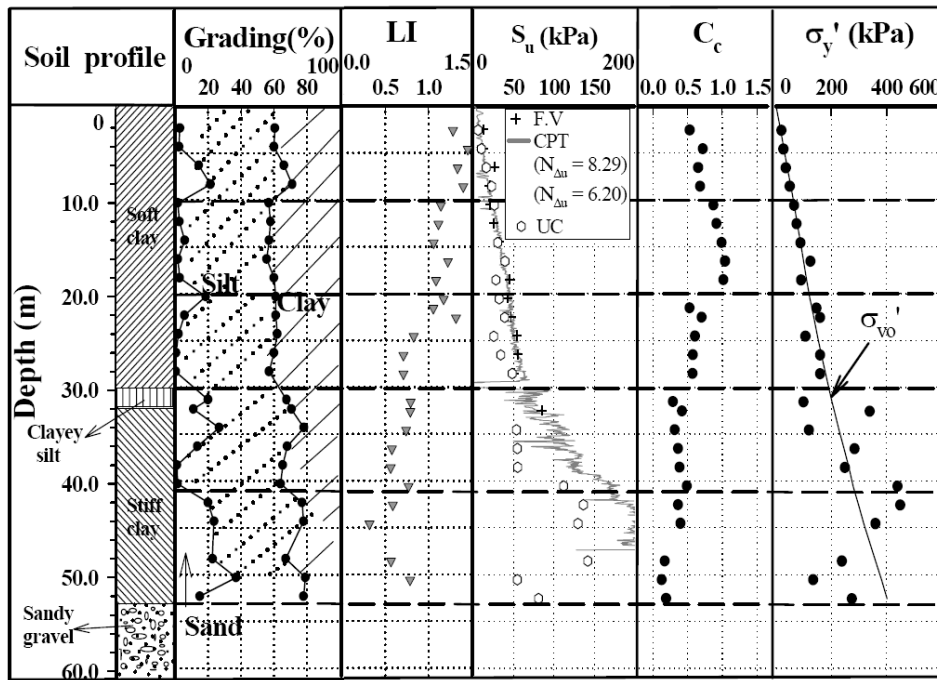


그림 4. N-1지점 지반의 역학적 특성의 요약(Chung et al., 2006)

표 1. 설계시 적용된 지층의 공학적 특성 (부산도시공사, 2008)

구 분	준설토	상부 점토	하부 점토	
비중	2.71	$2.708 + 0.0002 \cdot z$	2.71	
함수비	70.0	$62.4 - 0.0009 \cdot z$	59.4	
간극비	1.90	$1.69 + 0.0001 \cdot z$	1.62	
포화단위중량	1.60	$1.69 - 0.00005 \cdot z$	1.68	
압축지수	1.02	0.72 ~ 1.03	0.75	
압밀계수 $\times 10^{-3} \text{cm}^2/\text{sec}$	수직	0.40	$0.40 - 0.00015 \cdot z$	$0.41 - 0.0006 \cdot z$
	수평	0.40	$0.92 - 0.003 \cdot z$	$0.94 - 0.001 \cdot z$
투수계수 $\times 10^{-3} \text{cm}^2/\text{sec}$	수직	-	$4.66 \times e^{-0.0425z}$	$5.16 \times e^{-0.0441z}$
	수평	-	$2.3 \cdot k_v$	$2.3 \cdot k_v$

그림 3을 이해할 필요가 있다.

2.3 현장의 장래 침하량(부산도시공사(정충기), 2008)

대규모현장에 대해서 합리적인 시공을 위하여 설계 단계에서 예측한 압밀기간 및 침하량을 검증평가하기 위한 현장의 대표적인 위치에서 시험시공을 실시할 필요가 있다. 시험시공위치에서 얻은 각종 실측 데이터를 이용한 장래침하량과 지반개랑기간의 예측이 필요하다고 판단된다. 부산도시공사(정충기)(2008)는 본 연구대상지역에 대해 그림 5에 나타난 현장 실측자료를 이용해 5가지 예측기법(Hyperbolic, \sqrt{S} , Log S, Asaoka(浅岡) 및 Monden(門前)법)으로 침하거동의 예측 및 Root mean square error 법을 이용하여 각 방법에 대한 신뢰도를 평가한 바 있다. 정충기(2008)는 계측자료의 축적에 따라 Hyperbolic방법의 신뢰성이 높아지고, 부산 점성토

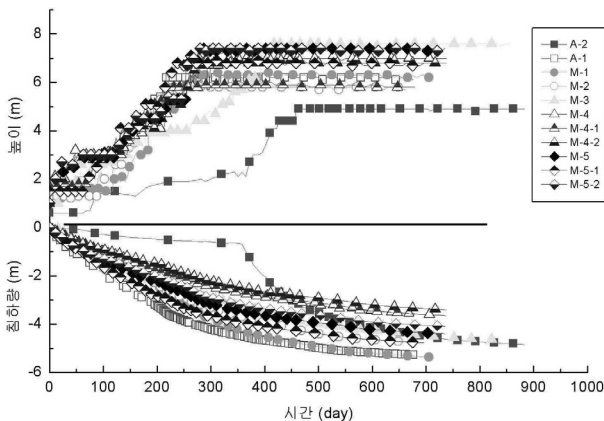


그림 5. 위치별 성토 공정 및 침하량(부산도시공사, 2008)

표 2. 설계시 침하량과 계측자료에 기초한 예상 침하량 해석 결과 요약(부산도시공사(정충기), 2008)

계측구역/연직배수재/배수재간격	2006.12 침하량 (m)	설계시 침하량(S_D) (m)	경과 일수 (day)	최종 침하량(SE) (m)	2006.12 압밀도 (%)	2008.3 압밀도 (%)
A-1/PBD/1.5m	5.463	8.13	813	6.211	87.98	91.93
A-2/PBD/1.3m	5.02	8.13	813	5.757	87.23	91.77
M-1/PBD/1.5m	5.60	8.97	841	6.384	87.08	91.66
M-2/PBD/2.0m	5.07	8.77	798	6.488	78.13	84.84
M-3/PBD/1.3m	4.68	8.26	965	5.517	84.79	89.48
M-4/CD1/2.1m	3.87	8.55	874	5.365	72.17	79.91
M-4-1/CD1/2.1m	3.82	8.55	815	5.26	76.65	80.64
M-4-2/CD2/2.1m	3.62	8.55	874	4.934	73.44	80.82
M-5/CD1/1.6m	4.60	8.85	871	5.489	83.75	88.72
M-5-1/CD1/1.6m	4.98	8.85	832	5.839	85.26	89.82
M-5-2/CD2/1.6m	4.28	8.85	871	5.16	82.84	88.04

※ 음영 처리된 부분은 모래가 관입된 부분을 나타냄

의 소성적 creep특성을 감안할 때 Hyperbolic방법으로 시험시공 부지의 침하 거동을 예측하는 것이 가장 적절하다고 보고한 바 있다. Hyperbolic방법으로 예측한 침하량을 기준으로 둔다면, 표 2에 나타난 바와 같이 설계시 예측 침하량(S_D)이 과도하게 평가된 경향이 있으며, 이는 설계단계에서 반영한 지반정수들이 전반적인 지층의 특성을 대표하지 못하였기 때문이라고 판단되며, 시공 공정상에 발생된 모래침투(그림 2 참조) 등의 문제점이 고려되지 못하였기 때문으로 사료된다.

3. 배수재의 배수성능에 관한 검토

설계압밀도가 현장실측결과와 비교해 다소 상이한 예측결과를 나타내는 원인은 지반정수의 잘못된 적용뿐만 아니라, 배수재 타설 시 필연적으로 발생하는 압밀지연 요인(well resistance, smear effect)을 과학적으로 충분히 고려하지 못한 점을 지적할 수 있다. 따라서 설계단계에서 보편적으로 활용되는 기 제안된 이론식들을 적용하여 압밀지연 요인을 고려하는/하지 않는 경우에 대한 해석을 실시하여 well resistance(WR)와 smear effect(SE)가 압밀도에 미치는 지연영향을 비교, 검토하였다. Barron(1948)의 이론식은 배수재 타설간격의 영향만 고려한 이상적인 배수 조건하에서 압밀도가 계산되는 반면, Onoue(1988)와 Hansbo(1979)의 이론식은 압밀지연 요인을 고려할 수가 있으므로, 양자에 의한 결과를 비교함으로써 well resistance와 smear effect에 의한 압밀지연의 정도를 정량적으로 평가할 수 있다. 각각의 이론식의 상세는 최인결과 박영목(2006)의 보고에 상세히 나타나 있다.

표 3. Barron식과 Onoue식을 이용한 압밀지연 영향 검토 결과(2006년 12월 기준)

구역	배수재 종류	설치 간격(m)	$U_{(Bar.)}$	T_h	n'	$F(n')$	$U_h(SE)$ (%)	$U_h(Ono.)$ (%)	WR	SE	WR+SE
A-1	PBD	1.5	91.0	0.8	48.3	3.1	88.1	81.4	6.7	2.8	9.5
M-1	PBD	1.5	89.8	0.8	48.3	3.1	86.9	80.5	6.4	2.9	9.3
M-2	PBD	2.0	71.8	0.5	64.0	3.4	68.1	61.2	6.9	3.8	10.7
M-3	PBD	1.3	96.4	1.1	41.7	3.0	94.7	89.8	4.9	1.7	6.6
M-4	CD	2.1	66.1	0.4	67.5	3.5	62.2	56.1	6.1	3.9	10
M-4-1	CD1	2.1	63.9	0.4	67.5	3.5	60.0	57.8	2.2	3.9	6.1
M-4-2	CD2	2.1	63.9	0.4	67.5	3.5	60.0	57.8	2.2	3.9	6.1
M-5	CD	1.6	86.0	0.7	51.4	3.2	82.6	78.4	4.2	3.4	7.6
M-5-1	CD1	1.6	86.0	0.7	51.4	3.2	82.6	78.4	4.2	3.4	7.6
M-5-2	CD2	1.6	87.4	0.7	51.4	3.2	84.2	78.2	6.0	3.2	9.2
평균	-	-	80.2	-	-	-	76.9	72.0	4.9	3.3	8.2

$$T_h = \frac{LN(1 - U_{(Bar.)})}{-8} \times F(n), d_e = 1.13 \times S (\text{정사각형 배치}), d_w = 0.05, d_s = 0.21 \sim 0.22, n = d_e/d_w, \\ S = d_s/d_w, \eta = k_h/k_s = 1.25, WR : \text{well resistance}, SE : \text{smear effect}$$

표 3은 Barren(1948)식과 Onoue(1988)식을 이용하여 압밀지연의 영향을 고려한 압밀도 해석결과를 나타낸다. Hansbo(1979)식에 의한 결과는 Onoue(1988)식에 의한 계산 결과와 매우 유사한 결과를 나타냈으므로 생략한다. 현장에서 배수재가 정방형으로 타설되었으므로 등가영향원의 직경 $d_e = 1.13 \times S$ (S : 타설간격)로 하였고, 연약지반 상부의 준설토 지반은 배수재 타설 전에 준설매립과정에서 완전 교란되어 고결이 충분히 진행되지 않은 상태이므로 맨드렐 타설로 인한 교란을 고려하지 않아도 될 것으로 판단하여 스미어 존의 직경 $d_s = 0.24 \times \frac{H_s}{H_t}$ (0.24: 맨드렐 직경(12cm)의 2배, H_s : 원지반의 두께, H_t : 원지반 + 준설토지반의 두께)로 계산하였다. 그리고 $\eta = \frac{k_h}{k_s}$ 값은 유사지역의 실험결과(박영목, 2003)를 이용하여 스미어 영역의 투수계수를 원지반 수평투수계수의 80%를 적용하였다. 표 3에서 $U_h(SE)$ 의 계산은 Onoue식에서 smear effect만을 고려하여 압밀도를 산정한 것이며, WR은 SE와 WR 양자의 영향을 고려하여 계산된 Onoue식의 결과에서 Barron식에 의한 압밀도와와의 차이를 구하고 그 차이 값에서 SE의 값을 빼서 구하였다.

계산결과, well resistance(WR)에 의한 압밀지연은 2.2%~6.9%(평균 4.9%)가 발생하는 것으로 나타났고, smear effect(SE)에 의한 압밀지연은 1.7%~3.9%(평균 3.3%)가 발생하는 것으로 나타났다. WR과 SE 두 요인에 의한 압밀지연은 6.1%~10.7%(평균 8.2%)로 계산되어 연직배수공법적용시 반드시 고려해야할 사항임이 재확인되었다. M-4와 M-5에 있어서 압밀지연은 배수재의 타

설간격이 넓을수록 감소하는 것으로 나타났다. 이는 배수재의 타설간격이 넓을수록 맨드렐의 관입·인발에 기인하는 지반교란 특성에 기인된 smear effect를 적게 받기 때문으로 판단된다. 그러나, 본 연구 대상지역에 있어서 배수재의 종류에 따른 well resistance의 영향은 평가하기 어려웠다.

현장실측결과를 이용하여 Hyperbolic방법에 의해 장래침하량을 예측하고 그 결과에 의해 산출한 압밀도는 간극수의 수평방향 배수에 의한 압밀도 외에 수직방향 배수로 인한 압밀도도 포함되어 있다. 그러나, Barron(1948)식 및 Onoue(1988)식에 의해 계산된 압밀도는 수평방향 배수에 의한 압밀도이므로, $U = 1 - (1 - U_h)(1 - U_v)$ 식을 이용하여 연직방향 배수에 의한 압밀도를 제외하여 계산하면 설계당시 이론식으로 구한 수평압밀도와 직접비교가 가능하다. 표 4는 설계당시 예측 압밀도와 실측치의 압밀도를 비교하여 나타냈다. 표 3과 표 4 내에 $U_{(Bar.)}$, $U_{(Ono.)}$ 는 각각 Barron식, Onoue식을 이용하여 계산한 압밀도를 나타내며, $U_{(Hyp)}$, $U_{h(Hyp)}$ 는 Hyperbolic법 이용하여 계산된 평균압밀도와 수평방향배수에 의한 압밀도를 각각 나타낸다.

표 4에서 알 수 있듯이 본 현장과 같이 10개 구역에 연직배수재에 의한 지반개량을 실시한 결과 경우 Hyperbolic법에 의한 현장실측 전체평균 압밀도가 72.2%~88.8%(평균 81.8%)를 나타내는 것에 대하여 연직방향 배수에 의한 압밀도는 1.4%~8.1%(평균 2.9%)를 나타내어 그 영향을 배제한 수평방향 배수에 의한 압밀도는 68.8%~

표 4. 각 식에 의한 설계치와 실측치의 압밀도

구역	식	설계치		실측치		차이		
		A : $U_{(Bar.)}$	B : $U_{(Ono.)}$	C : $U_{(Hyp)}$	D: $U_{h(Hyp)}$	A-D	B-D	C-D
A-1		91.0	81.4	88.0	86.5	4.1	-5.2	1.4
M-1		89.8	80.5	87.1	85.7	-3.6	-14.2	2.7
M-2		71.8	61.2	78.1	75.4	4.5	-5.1	1.5
M-3		96.4	89.8	84.8	82.8	13.6	7.0	2.0
M-4		66.1	56.1	72.2	68.8	-2.7	-12.7	3.4
M-4-1		63.9	57.8	76.7	73.8	-9.9	-16.0	2.9
M-4-2		63.9	57.8	73.4	70.2	-6.3	-12.4	3.2
M-5		86.0	78.4	83.8	81.7	4.3	-3.3	2.1
M-5-1		86.0	78.4	85.3	83.4	2.6	-5.0	1.9
M-5-2		87.4	78.2	82.8	80.7	6.7	-2.5	8.1
평균		80.2	72.0	81.8	78.9	-1.3	-6.9	2.9

86.5%(평균 78.9%)로 연직배수공법에 의한 압밀도가 전체압밀도의 95%~97.4%(평균 96.5%)를 접하는 것을 알았다. Well resistance와 smear effect에 의한 압밀지연의 발생이 없는 이상적인 조건인 Barron식에 의한 계산과 Hyperbolic법에 의한 장래 침하량 예측방법에 의해 계산된 수평방향 배수에 의한 압밀도의 차이는 -9.9%~13.6%(평균 -1.3%)로 실측치의 압밀도가 크게 나타났다. WR과 SE 양자의 압밀지연 영향을 고려한 Onoue식에 의한 압밀도와 Hyperbolic법에 의한 실측압밀도의 차이는 -16%~7.0%(평균 -6.9%)로 실측압밀도가 크게 나타났다. 여기서 압밀지연영향을 고려하지 않은 Barron식에 의해 계산된 압밀도가 실측된 수평방향압밀도보다 평균 1.3% 낮게 나타났을 뿐만 아니라, well resistance와 smear effect를 고려한 Onoue식에 의해 계산된 이론치와 현장실측 결과를 이용한 수평방향 배수에 의한 압밀도가 이론적으로 유사해야함에도 불구하고, 양자 간에 약 7%의 차이가 나타났다는 것에 주목할 필요가 있다. Pre-loading 재하종료 후 약18개월이 경과한 2006년 12월의 동일시점에 대해 설계당시 압밀도가 현장의 실측압밀도보다 낮게 나타난 주된 원인은 설계단계에서 사용한 지반정수가 전체지반의 평균적인 입도 혼합비를 고려하지 않은 보수적인 조사, 시료선정 및 실험에 의해 도출된 값을 기초로 했기 때문이라고 판단된다.

4. 혼합입도별 압밀도 분석

4.1 시료 성형

전술된바와 같이 지반의 입도 혼합비별로 압밀특성

표 5. 시료혼합비

실트(M):점토(C)	모래(S):실트(M):점토(C)
0.0 : 1.0	0.1 : 0.5 : 0.4
0.3 : 0.7	0.2 : 0.5 : 0.3
0.5 : 0.5	-
0.7 : 0.3	-
0.9 : 0.1	-
1.0 : 0.0	-

의 차이를 확인하기 위하여 실내시험을 실시했다. 본 연구에 사용된 실험 시료 중 실트는 0.075mm~0.005mm의 입경에 맞도록 체분석을 통해 제조하였으며, 점토 시료의 경우 비중계법에 의해 0.005mm이하의 입경을 가지는 시료를 모아 건조 후 사용하였다. 또한 모래시료는 시험시공 현장 주위에서 채취된 시료에서 추출한 모래시료를 현장입도분포에 맞춰 조정하여 사용했다. 표 5에는 본 실험에 적용된 시료혼합비를 나타낸다. 시료성형 시 소요의 깊이에 대한 지반의 모형화와 그에 대한 입자의 재배열을 고려하기 위하여 지름 9.5cm의 PVC파이프관 하단에 배수용 여과지를 설치한 다음, 계산된 함수비로 교반된 시료를 투입한 후 상단에 배수용 여과지를 깔고, 0.01kgf/cm²의 하중을 가하여 소요의 단위중량에 도달할 때까지 압밀을 시킨 후에 7일간 방치한 시료를 이용하였다. 현장의 특성과 유사한 각각의 입경범위를 갖도록 분리된 실트와 모래 및 점토를 표 5에 나타내는 혼합비로 성형된 시료에 대해 표준압밀시험을 실시하였고, 시험 후 하중과 간극비의 관계변화, 그리고 압밀계수나 압축계수 등 각종 압밀정수들의 변화에 대한 정성적인 분석을 실시하였다.

4.2 시료의 물리적 성질

본 연구 대상지역에서 채취한 점토질 실트를 대상으로 수세식 체분석으로 정교하게 분리한 실트와 점토에 대한 기본 물리적 성질은 다음과 같다. 실트의 입경은 0.072~0.005mm이고 비중 G_s 는 2.64, 액성한계, LL은 32%, 소성한계, PL은 17%를 나타냈다. 점토는 #270번 체 통과분에 대한 것으로서 그 입자가 0.005mm이하이며 액성한계와 소성한계가 각각 42%, 22%의 값을 나타내며 비중 2.65에 소성지수, PI는 20%의 값을 나타냈다. 그림 6에는 실트, 점토 및 원시료의 입도 분포시험 결과를 나타냈다.

4.3 혼합비에 따른 압밀 거동 분석

그림 7~9는 실트와 점토 혼합시료에 대한 압밀시험 결과를 나타내고 있다. 그림 중의 C는 점토, M은 실트, S는 모래를 각각 나타낸다. 또한 기호 우측의 숫자는 혼합비를 의미한다. 먼저 e -log p 관계에서 초기간극비의 크기는 점토함유율에 비례하고, 실트와 모래성분이 많이 함유될수록 간극비의 감소폭은 커지는 경향을 나타냈다. 압밀계수와 투수계수는 실트와 모래성분이 많을수록 다소 큰 값을 보였다. 한편, 압밀계수와 투수계수는 응력단계가 커질수록 조금씩 감소했고 동일한 응력 조건에서 실트와 모래함유량이 높을수록 압밀계수와 투수계수가 크게 나타났다.

표 6에는 전술한 압밀 시험 결과로 구해진 지반 정수를 요약하였다. 점토성분이 많을수록 압밀계수, 압축지수, 투수계수가 실트 및 모래성분이 많은 혼합 압밀시료보다 상대적으로 작은 값을 나타내었다. 이는 점토성분의 입자가 작아서 간극수의 배재가 원활하지 않음에 기

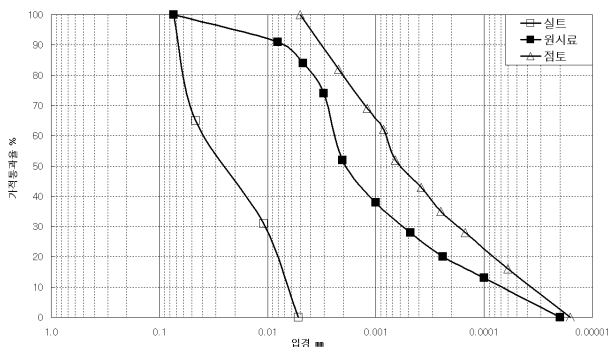


그림 6. 입도분포 시험결과

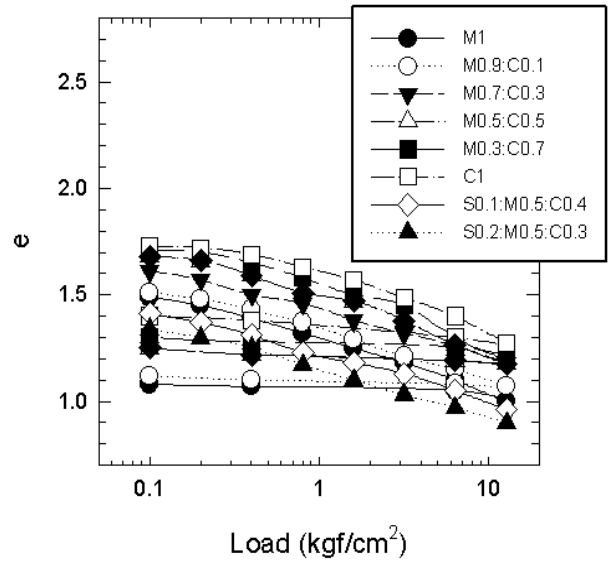


그림 7. 실트, 모래, 점토의 혼합비에 따른 e -log p 그래프

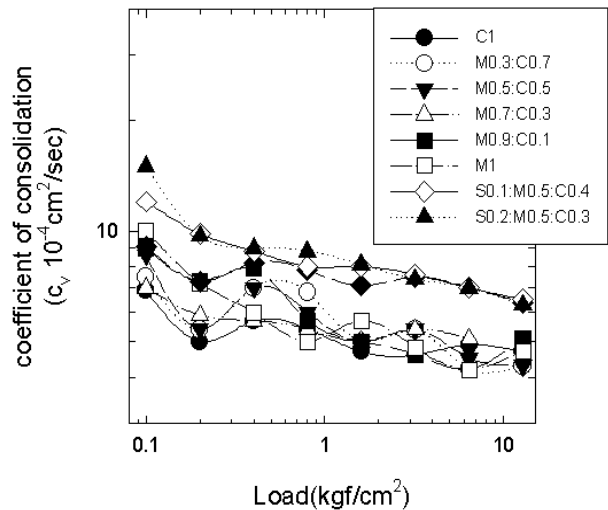


그림 8. 실트, 모래, 점토 혼합비에 따른 압밀계수 변화 그래프

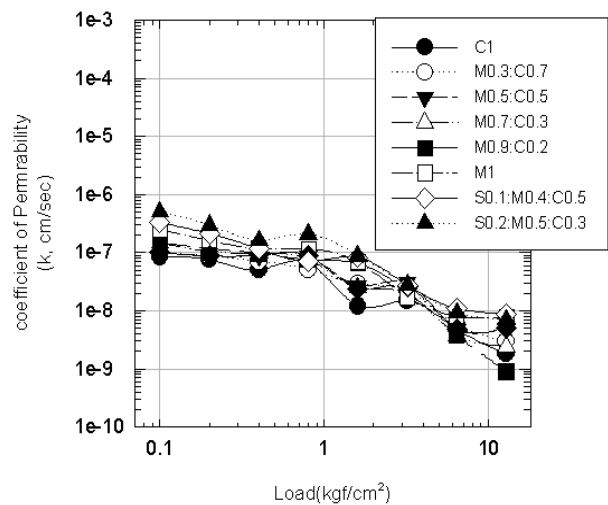


그림 9. 실트, 모래, 점토 혼합비에 따른 투수계수 변화 그래프

표 6. 압밀실험 결과 정리

압밀정수 \ 혼합비	C1.0	M0.3: C0.7	M0.5: C0.5	M0.7: C0.3	M0.9: C0.1	M1.0	S0.1: M0.5: C0.4	S0.2: M0.5: C0.3
$c_v (10^{-4} cm^2/sec)$	5.24	5.60	5.71	5.90	6.06	6.43	6.88	7.02
C_c	0.59	0.68	0.69	0.75	0.79	0.84	0.79	0.90
$k(10^{-8} cm/sec)$	3.08	3.78	4.72	5.48	6.17	8.36	9.25	9.99

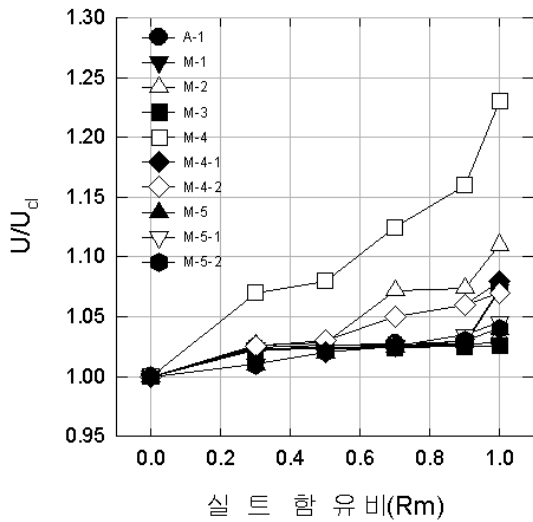


그림 10. 실트함유비별 $U/U_{c1.0}$ 그래프

인된 것이라 판단된다.

그림 10은 각 시험시공구역별 실트함유비(R_M)의 변화에 따른 압밀도를 점토100%(C1.0)일 경우의 압밀도로 정규화한 것을 나타냈다. 그림에서 알 수 있듯이 구역별로 다소간의 차이는 나타나 실트함유비가 증가할수록 $U/U_{c1.0}$ 값이 거의 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 10개 구역 전체를 평균하여 선형회귀하면 $U/U_{c1.0}=0.0651R_M+1.0(R^2=0.945)$ 식으로 나타났다. 이 식이 가지는 의미는 점토시료에 실트성분의 함유비가 증가 될수록, 즉 R_M 이 0에서 1로(실트 0%에서 100%) 변화할수록 압밀도가 점토시료 100%인 경우에 비해 얼마만큼 증가되는가를 나타낸다. 향후 이 식은 현장의 실트혼합비가 파악된 경우에 점토 100%에 가까운 보수적으로 선정된 시료로부터 구한 값을 이용한 예측 압밀도에 비해 현장의 압밀도가 얼마만큼 빨리

진행되는지를 예측하는데 유효할 것으로 판단된다.

4.4 기존설계/실제/입도 혼합비별 시험결과를 이용한 압밀도

전출된 표 1의 설계 지반정수를 이용하여 시험시공 부지의 압밀도를 검토하여 표 7에 나타내었다. 수평배수에 의한 압밀도의 계산은 Onoue식을 이용하였으며, Terzaghi의 일차원 압밀식을 이용하여 연직방향배수에 의한 압밀도를 계산하였다. De-beer의 공식을 이용하여 모래지역의 즉시침하량을 계산하였으나 모래함유량이 적고, N값이 상대적으로 커서 그 값이 미비하므로 검토에서 제외하였다.

표 7의 계산과 동일한 방법으로 각 조건의 입도 혼합비별 압밀도를 검토하여 표 8에 나타냈다. 각 구역별로 상단은 Onoue식에 의해 산정된 압밀도를, 하단은 Barron식에 의한 압밀도를 각각 나타낸다. 표에 나타난 바와 같이 점토시료에 실트와 모래의 혼합비가 증가할수록 압밀도가 증가하며, 모래가 혼입된 경우에 압밀도가 더욱 증가하는 것을 알 수 있다.

현장에서는 일반적으로 지반조사 과정에서 지반특성이 최악의 조건에서 원위치시험을 하고 시료를 채취하여 실내시험을 한다. 이 결과, 채취된 시료는 전체지반을 대표하지 못하고 과소평가되는 시험이 이루어질 수 있다. 압밀특성과 관련된 최악의 조건은 점토100%(C1.0)인 경우가 될 수 있다. 따라서, 혼합비별 압밀도 분석시에 점토100%인 경우의 압밀도와 본 현장의 설계정수로 구한 압밀도가 같다고 가정하고 각 입도 혼합비별로 실내시험결과에 의한 정성적인 비율로 설계정수를 조정

표 7. 설계 지반정수를 이용한 압밀도 검토결과

대표위치	A-1	M-1	M-2	M-3	M-4	M-4-1	M-4-2	M-5	M-5-1	M-5-2
수평압밀도(%)	81.4	80.5	61.2	89.8	56.1	57.8	57.8	78.4	78.	78.2
연직압밀도(%)	10.8	9.87	11.1	11.6	10.7	11.0	11.0	11.2	11.2	11.2
평균압밀도(%)	83.4	82.4	65.5	90.1	60.8	62.4	62.4	80.8	80.8	80.6

표 8. 혼합별 지반정수를 이용한 압밀도(%)

시험시공구역명 \ 입도 혼합비	C1.0	M0.3:C0.7	M0.5:C0.5	M0.7:C0.3	M0.9:C0.1
A-1	81	82.7	83.2	84.0	84.7
	96.8	98.0	98.2	98.4	98.5
M-1	83.2	84.8	85.3	86.1	86.7
	97.9	98.3	98.4	98.6	98.7
M-2	62.8	64.9	65.5	66.5	67.3
	85.5	87.1	87.5	88.3	88.8
M-3	93.1	94.1	94.4	94.9	95.2
	99.8	99.9	99.9	99.9	99.9
M-4	73.7	75.0	75.3	76.0	76.5
	85	86.0	86.3	86.8	87.3
M-4-1	71.3	73.3	73.9	74.9	75.7
	83	84.7	85.2	83.0	86.6
M-4-2	73.7	75.7	76.2	77.2	78.0
	85	86.6	87.0	87.8	88.4
M-5	88.7	90.1	90.5	91.1	91.6
	86.8	97.4	97.5	97.8	98.0
M-5-1	87.6	89.0	89.4	90.1	90.6
	86.2	86.9	97.1	97.4	97.6
M-5-2	88.7	90.1	90.5	91.1	91.6
	96.8	97.4	97.5	97.8	98.0
시험시공구역명 \ 입도 혼합비	M1.0	S0.1:M0.5:C0.4	S0.2:M0.5:C0.3	S0.1:M0.4:C0.5	S0.2:M0.3:C0.5
A-1	86.2	87.7	88.2	86.6	87.9
	98.8	99.1	99.2	98.9	99.2
M-1	88.1	89.6	90.0	88.5	89.7
	99.0	99.3	99.3	99.1	99.3
M-2	69.2	71.3	71.9	69.8	71.6
	90.1	91.4	91.8	90.5	91.6
M-3	96.0	96.7	96.9	96.2	96.8
	99.9	100.0	100.0	100.0	100.0
M-4	77.7	79.0	79.4	78.0	79.2
	88.2	89.2	89.5	88.4	89.3
M-4-1	77.5	79.4	80.0	78.0	79.7
	88.0	89.5	89.9	88.4	89.7
M-4-2	79.7	81.5	82.1	80.2	81.8
	89.6	91.0	91.4	90.0	91.2
M-5	92.6	93.7	94.1	93.0	93.9
	98.4	98.7	98.8	98.5	98.8
M-5-1	91.8	92.9	93.3	92.1	93.1
	98.1	98.5	98.6	98.2	98.5
M-5-2	92.6	93.7	94.1	93.0	93.9
	98.4	98.7	98.8	98.5	98.8

* 각 구역별 상단과 하단은 Onoue식과 Barron식에 의해 산정된 압밀도를 나타냄.

하여 각각의 압밀도를 검토하였다.

그림 11은 시험시공구간의 전체적인 입도혼합분포별 압밀도를 막대그래프로, 실측된 각 구역의 평균압밀도

를 실선으로 같이 나타냈다. 그림에서 알 수 있듯이 각 구역에서 입도혼합분포별 압밀도와 실측압밀도가 일치하지 않는 것은 전술된 것과 같이 입도혼합분포별 압밀

정수 산정시 실내에서 재성형시료를 사용하여 정성적인 비율만 검토했기 때문인 것으로 판단된다. 그림 12에는 시험시공현장의 전체적인 지층구조와 심도별 입도 분포 및 10개 구역의 입도혼합분포별 압밀도와 전체 평균 압밀도를 같이 나타낸다. 그림 12에서 알 수 있듯이

전체구간의 입도분포를 평균해보면 모래는 10.7%, 실트는 53.6%, 점토는 35.7% 혼합되어 있다. 또한, 현장압밀도와 가장 유사한 압밀도를 나타내는 입도 혼합비는 모래 10%, 실트 50%, 점토 40%(S0.1:M0.5:C0.4)이다. 이때 약 0.1%의 오차를 가지고 있으므로 설계시 압밀기간

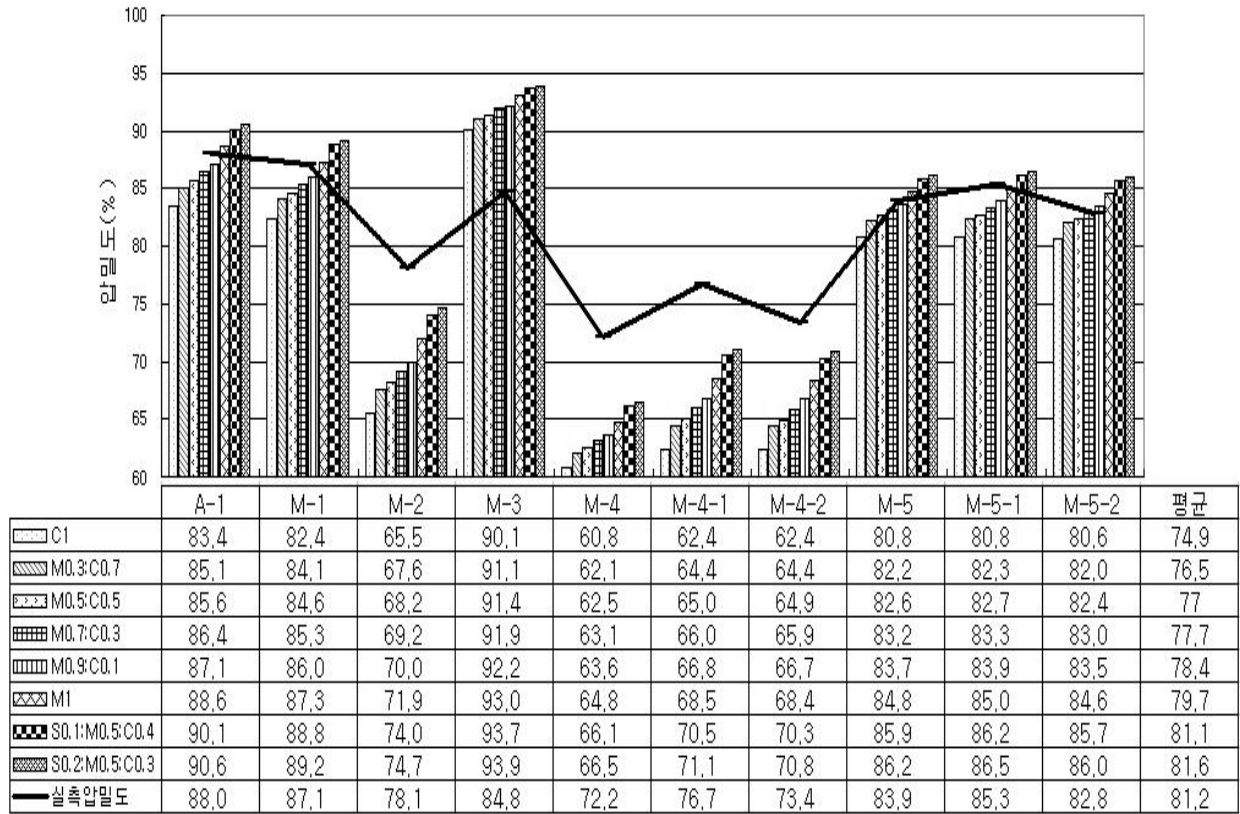


그림 11. 전체 시험성토구간의 입도 혼합비별 압밀도 비교

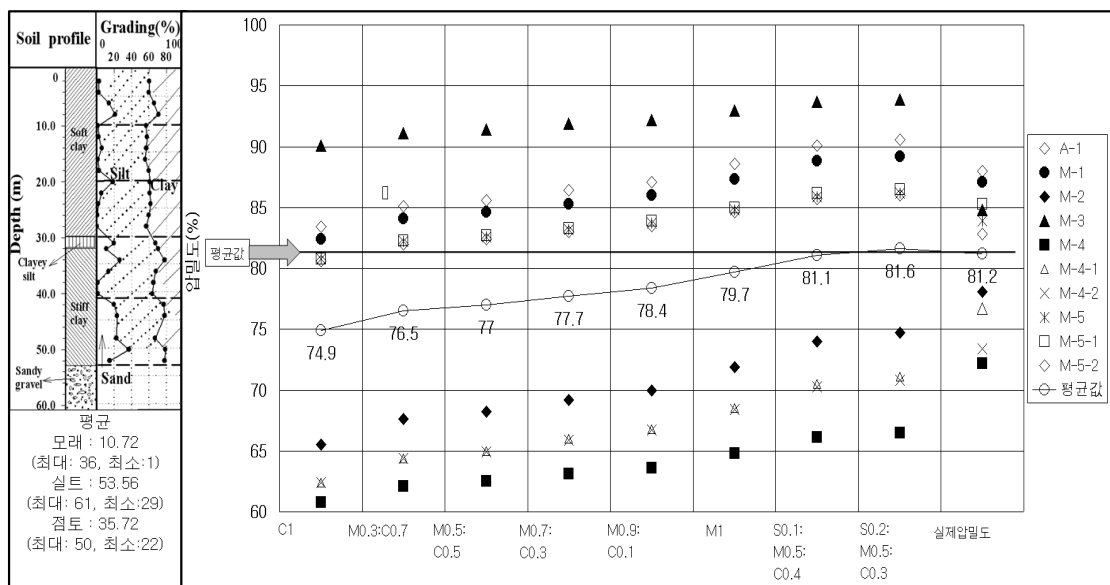


그림 12. 설계지반정수로 표준화된 혼합비별 압밀도

및 침하량을 예측할 경우 현장지반의 전체적인 입도분포 특성을 종합적으로 검토하여 설계하는 것이 합리적이라고 판단할 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 부산 신항만 북컨테이너 지역에서 연직배수공법에 의한 연약지반개량을 위해 설계된 제반사항을 검토하고, 현장시험시공을 실시하여 현장계측결과를 이용한 압밀침하특성을 상호 비교하였다. 또한, 다양한 입도 혼합비를 나타내는 재구성 시료에 대한 실내 압밀시험을 실시하여 압밀특성을 검토하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) Barron식과 Onoue식에 의한 압밀도의 차이로부터 본 연구지역에 있어서 well resistance와 smear effect에 의한 압밀지연이 약 6.1%~10.7%(평균 8.2%)가 발생하는 것으로 나타났다. 또한, Onoue식에 의해 계산된 압밀도는 현장실측치를 이용한 Hyperbolic 방법에 의해 계산된 수평방향 배수에 의한 압밀도보다 약 7% 낮은 값을 나타냈다. 이는 설계단계에서 입도 혼합비를 고려하지 않은 보수적인 현장 조사와 시료선정 및 시험에 의한 값을 기초로 하여 침하량을 예측했기 때문이라고 판단된다.
- (2) 점토시료에 실트혼합비 증가에 따라 압밀도가 증가하였으며, 실트 함유비의 변화에 따른 압밀도를 점토 1.0일 경우의 압밀도로 정규화 한 경우 압밀도의 비는 $U/U_{c1.0} = 0.651R_M + 1.0(R^2=0.945)$ 식으로 나타났다.
- (3) 다양한 혼합비를 가지는 점토, 실트 및 모래 혼합시

료에 대한 실내압밀시험을 실시한 결과를 적용하여 압밀도를 검토한 결과, 실측 압밀도와 가장 잘 맞는 입도 혼합비는 모래 10%, 실트 50%, 점토 40%로, 본 연구지역의 평균 입도분포와 거의 일치하는 것으로 나타났다. 이는 연약지반개량을 위하여 시료채취 및 시험을 수행할 때 전체적인 지층의 특성 및 입도 혼합비를 고려한 압밀해석이 필요한 것을 시사한다.

참고 문헌

1. 朴永穆 (1994), 低平地に堆積する海成粘土の土質特性と鉛直排水工法による地盤改良に関する研究, 博士學位論文, 佐賀大學大學院.
2. 박영목 (2003), 맨드렐 관입에 기인하는 스미어 존의 평가”, *한국지반공학학회논문집*, 제19권 제6호, pp.217-225.
3. 부산도시공사 (2008), 부산신항 북컨테이너터미널 배후부지 조성공사 시험시공 학술연구 보고서 중, (정성교, chapter 2, pp. 2-28~2-30), (정충기, chapter 3, pp. 3-1~3-102), (박영목, chapter 6, pp.6-1~6-74).
4. 최인걸, 박영목 (2006), 현장실무를 위한 지반공학, 구미서관, pp. 177-302.
5. Barron, R.A. (1948), “Consolidation of Fine-Grained Soils by Drain Wells”, *Trans. ASCE*, Vol.113, No.2346, pp.718-742.
6. Chung, S. G. (1999), “Engineering properties and Consolidation Characteristics of Kimhae Estuarine Clayey Soils”, *11th ARC, THICK DELTAIC DEPOSITS*, pp.93-108.
7. Chung, S.G., Kim G.J., Ryu C.K., and Kim M.S. (2007), “Undrained shear strength from field vane test on Pusan clay”, *Marine Georesources and Geotechnology* 25:3, pp.167-179.
8. Hansbo, S. (1979), “Consoildation of clay by band-shaped prefabricated drains”, *Ground Engineering*, Vol.12, No.5, pp.21-25.
9. Onoue, A. (1988), “Consoildation by vertical drains taking well resistance and smear into consideration”, *Soils and Foundations*, Vol.28, No.4, pp.165-174.

(접수일자 2009. 7. 30, 심사완료일 2009. 10. 14)