

시화지역 실트질 지반에서 강제치환심도 예측식 산정

Prediction Equation of Compulsory Replacement Depth of Silty Layer in Sihwa Region

박 영¹ Park, Young

임 회 대² Lim, Heui-Dae

Abstract

The compulsory replacement method for soft ground treatment is simple but excellent in economic feasibility. However, the accurate replacement depth is not easy to properly predicted since an theoretical algorithm has not presently been established so far. In this research a prediction equation is proposed in a new form based on the liquid limit and natural moisture content rather than on the bearing capacity of the soft soil layer. The equation is based on the monitoring as well as the confirmatory boring at the site. In addition, the equation has been derived from the data obtained from the analysis of the characteristics of silt/clay of Sihwa region. The final prediction equation has been drawn by applying the regression analysis method.

요 지

강제치환공법은 다른 연약지반 처리공법에 비하여 시공이 단순하고 경제성이 우수하나 현재까지 정확한 이론적 산정기법이 정립되어 있지 않기 때문에 치환심도의 예측이 제대로 이루어지지 않고 있는 실정이다. 본 연구에서는 대다수의 예측식이 지지력을 기반으로 한 내용에서 관점을 바꾸어 액성한계 및 자연함수비에 근거한 새로운 형태의 예측식을 제안하였다. 예측식은 현장에서 관측된 계측결과와 확인보링에 근거하고, 지역성을 대변하기 위해 시화지역의 실트/점토의 특성을 분석한 자료로부터 관계식을 도출하였으며, 이를 회귀분석기법을 적용하여 최종 예측식을 도출하였다.

Keywords : Compulsory replacement, Compulsory replacement depth, Natural moisture content, Regression analysis

1. 서 론

준설 및 매립공사로 확보된 부지는 대부분 고함수비를 갖는 연약지반으로 이루어져 산업부지로 활용하기 위해서는 연약지반을 개량할 필요가 있다. 특히 방조제나 호안과 같이 점진적으로 구조물을 축조하는 경우에는 치환공법이 널리 사용되고 있으며, 대표적인 치환공

법으로는 강제치환공법이 있다. 강제치환공법은 양질의 재료를 연약지반상에 투하하여 그 자중으로 지반의 파괴를 일으켜 연약토를 배제하여 치환하는 공법으로 다른 연약지반 처리공법에 비하여 시공이 단순하고 경제성이 우수하기 때문에 광범위한 영역에 걸쳐 진행되는 해안매립공사에 널리 사용되고 있다. 그러나, 개량심도 예측과 치환시 발생하는 융기와 측방유동, 그리고

1 정희원, 한국수자원공사 부장 (Department Manager, Korea Water Resources Corporation)

2 정희원, 충남대학교 토목공학과 정교수 (Professor, Chung-nam National University, hdlim@cnu.ac.kr, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2012년 3월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

치환 중 주변지반의 토질특성 변화 등이 원지반 토질조건, 투하조건 등에 따라 달라지므로 파악이 곤란하다는 문제점을 내포하고 있다. 특히, 정확한 개량심도를 예측하는 것은 설계시 가장 중요한 요소임에도 불구하고 현재까지 정확한 이론적 산정기법이 정립되어 있지 않으며, 몇몇 이론식 및 경험식들 사이에도 편차가 크기 때문에 치환심도 예측이 제대로 이루어지지 않고 있는 실정이다.

본 연구에서는 폴콘시험 관입부피와 여러 가지 매개변수의 상관관계를 분석하여 관입깊이와 매개변수 관계식을 도출하고 현장 확인시추와 수치해석결과를 이용하여 강제치환심도 추정식을 제안하였다.

대상 지역은 서해안 시화 MTV 건설현장으로 실트질 연약지반에 강제치환 공법이 적용되어 체체 성토후 압밀침하가 완료된 시점에서 체체사석의 위치 확인을 위한 확인시추를 수행하고, 확인시추 결과에서 압밀침하 계층 깊이를 제하여 강제치환심도를 확인하였다. 또한, 확인된 강제치환 심도를 수치해석 결과와 비교·검토하였다.

2. 강제치환 심도 추정식 및 현장조건

2.1 강제치환 심도 산정

극한지지력을 이용한 강제치환심도는 일반적으로 성토하중 p 와 지반의 극한지지력 q_u 가 일치하는 위치(D_z)로 산정한다.(식 (1))

$$p = q_u \quad (1)$$

여기서, p : 깊이 D_z 에서의 작용하중(성토하중)

q_u : 깊이 D_z 에서의 극한지지력

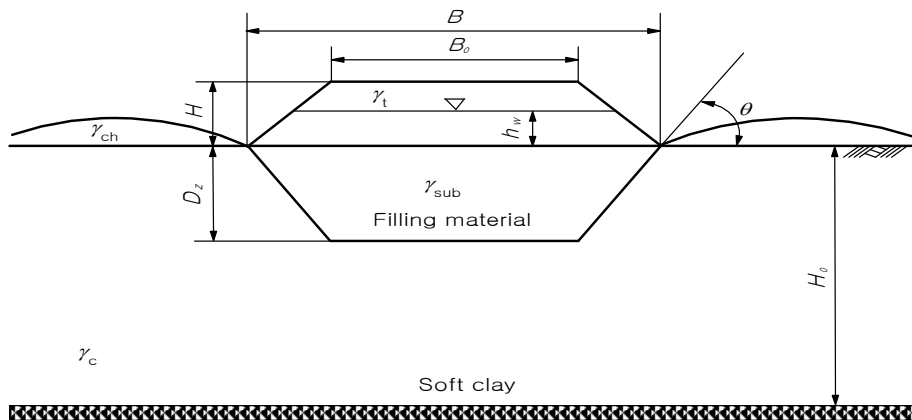


그림 1. 점성토 지반 하부 축제에 의한 변형단면

치환 깊이 산정에 사용되는 성토에 따른 하부지반의 변형단면도는 그림 1과 같다.

연약점성토 지반에 대한 비배수 조건하에서의 Terzaghi의 극한지지력식은 지지력 계수 $N_f=0$ 이 되므로 다음과 같이 나타낼수 있다(식 (2)).

$$q_u = c N_c + \gamma'_c D_z N_q \quad (N_f = 0) \quad (2)$$

여기서, N_c 는 지지력계수로 Terzaghi는 점성토지반에 대한 N_c 를 5.7로 제시하였으며, Prandtl은 5.14, Fellenius는 5.52, Meyerhof와 Hansen은 5.14로 제시하였고, 이때 $p = q_u$ 로 놓고 점착력 증가율을 고려하여 D_z 에 대하여 유도하면 다음과 같이 나타낼 수 있다(식 (3)).

$$D_z = \frac{(H - h_w) \gamma_t + h_w \gamma_{sub} - N_c c_0}{\alpha N_c + \gamma'_c - \gamma_{sub}} \quad (3)$$

여기서, α : 깊이에 따른 원지반 전단강도증가율

c_0 : 깊이 0일 때의 원지반 전단강도

Yasuhara와 Tsukamoto(1982)는 Terzaghi가 제안한 점성토지반의 지지력계수 N_c 를 5.7대신 기초지반의 전반전단 및 국부전단파괴가 고려된 수정지지력 계수인 5.3을 사용하여 추정식을 제시하였고, 이승호(1992)는 지지력계수 N_c 를 기초면으로부터 원지반까지의 전단저항을 파괴메카니즘에 고려한 Meyerhof 지지력 계수, 5.14를 사용하여 추정식을 제시하였다.

Mandel-Salencon은 연약층 두께에 따른 영향 및 소성파괴에 의한 강도저하를 고려하여 지지력계수 N_c 를 아래식과 같이 제안하였다(식 (4)).

$$N_c = \pi + 2 + 0.47(B/h_c - 1.48) \quad (4)$$

여기서, B = 기초저폭, hc = 기초하부 연약층 심도

장병욱(2005)은 남해안 8개 지구의 연약지반 사석제 시공자료(강제치환심도)를 분석, 검토하여 성토고에 의한 강제치환심도와 원지반 비배수 전단강도 등의 역학적 특성에 의한 상관관계를 분석함으로써 경험적인 치환심도 추정식을 이차다항 회귀모형을 이용, 도출하였다(식 (5)).

$$D_z = -5.469 + 6.122 h - 0.270 h^2 - 137.448 c_u + 326.407 c_u^2 \quad (5)$$

여기서, D_z =치환심도(m), h =성토고(m) ≤ 10m,
 c_u =비배수 전단강도(kgf/cm²) ≤ 0.2 kgf/cm²

2.2 강제치환공법 적용구간의 지층분포 현황

시화 MTV 1공구 현장의 지층분포는 GL.-0.0m~35.0m

까지 퇴적층이 분포하며, 퇴적층 하부에 풍화토층과 풍화암층이 분포한다. 퇴적층의 경우 N값이 2/30~6/30(회/cm)인 매우연약~보통의 연경도를 나타내며, 젖음 상태이며 색조는 암회색을 띤 연약층이 GL.-12.0m까지 분포하였다.

시화 MTV 3공구 현장의 지층분포는 GL.-0.0m~31.0m의 두께로 분포하고, 점토질실트, 실트질점토로 구성되어 있으며, 표준관입시험 결과 N치는 0/30~5/30(회/cm)인 매우연약~보통의 연경도를 나타내며, 젖음 상태이며 색조는 암회색을 띤 연약층이 GL.-10.0m까지 분포하였다.

시화 MTV 4공구 현장의 지층분포는 GL.-0.0m~29.0m의 두께로 분포하고, 점토질실트, 실트질점토로 구성되어 있으며, 표준관입시험 결과 N치는 0/30~5/30(회/cm)인 매우연약~보통의 연경도를 나타내며, 젖음 상태이며 색조는 암회색을 띤 연약층이 GL.-15.0m까지 분포하였다.

그림 2에서 보인 주상도는 본 연구에서 강제치환심도 확인보링을 한 지점의 원지반 주상도로서 해당지반의 구성조건을 보여주고 있다.

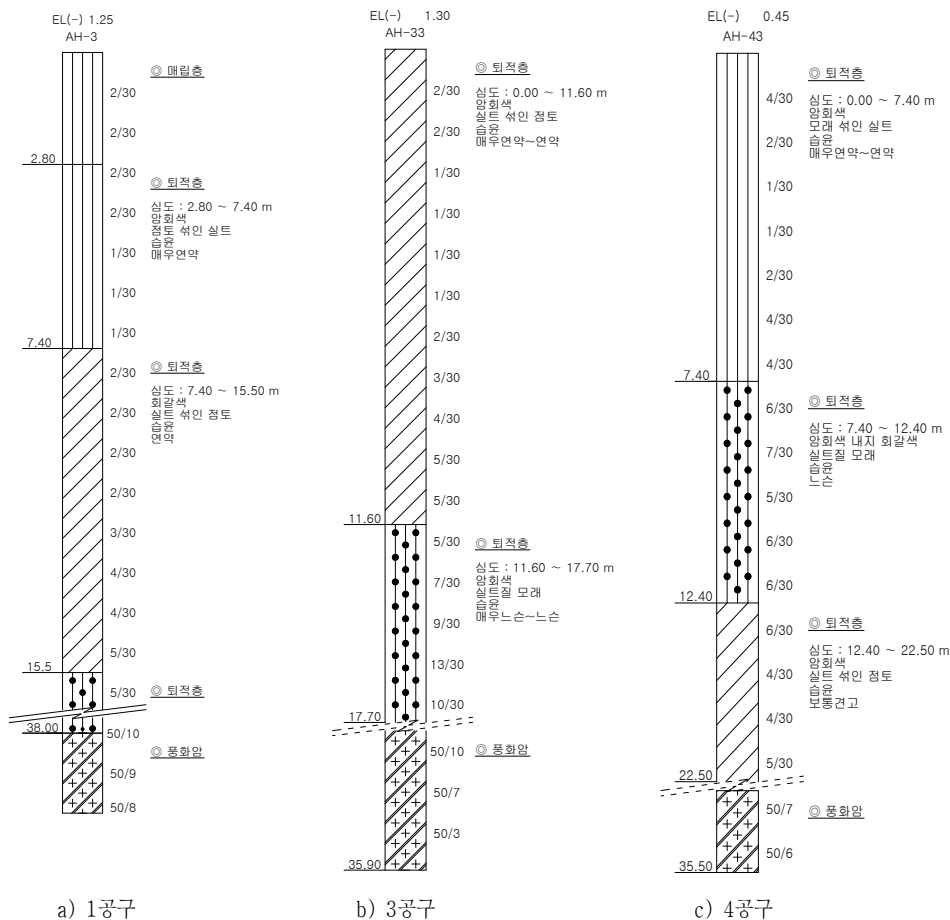


그림 2. 공구별 대표 시추주상도

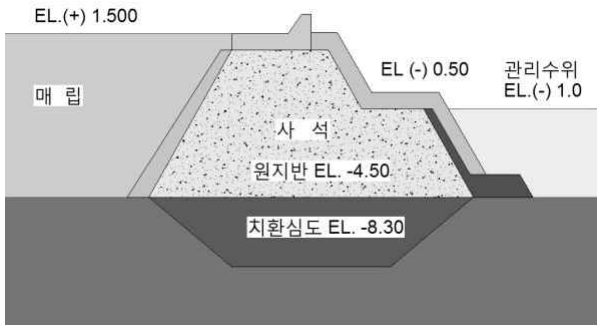


그림 3. 강제치환공법 적용 대표 횡단면도

연약층이 지표에서 10~15m 심도까지 분포하고 있는 시화 MTV 1, 3, 4공구 호안 기초지반의 안정성 및 경제성 확보를 위하여 그림 3과 같이 강제치환공법이 적용되어 시공 완료된바, 기존 지지력 예측식에 의한 치환심도(2.5m~4.9m)가 실측 강제치환심도(0.6m~1.5m)와 상당부분 차이가 발생하게 되어 액성한계 및 자연함수비에 근거한 새로운 형태의 예측식 산정에 대한 연구를 수행하였다.

3. 치환심도 예측

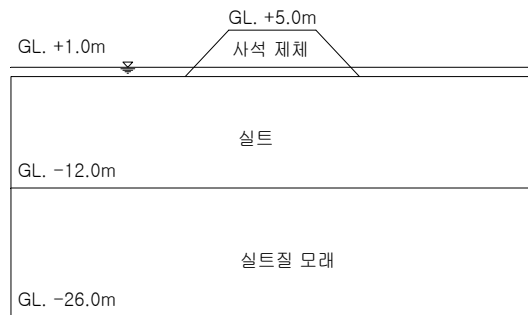
3.1 수치해석

관측지점의 개수가 적은 것을 보완하기 위해 연약지

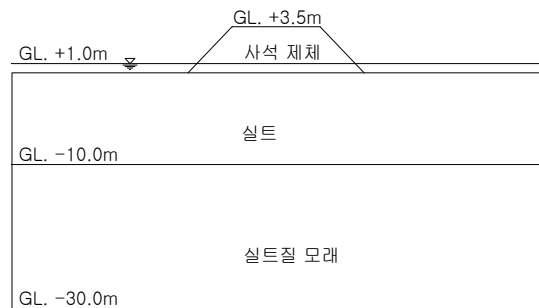
반 해석 범용프로그램인 PLAXIS를 이용한 수치해석을 실시하여 관측점의 강제치환 심도를 다양한 연약지반 두께에 대해 일반화하였다. 강제치환 추정식은 파괴시에 대한 힘의 평형만을 고려하여 산정하므로 파괴에 이를 때까지의 변형해석은 불가하나 유한요소에 의한 해석은 실제지반을 비교적 정확히 모델링하여 지반의 파괴에 이르기까지의 지반내 응력상태를 재현하여 보다 현실성 있는 파괴형태 및 전단 파괴영역을 확인할 수 있다. 수치해석을 위하여 그림 3의 단면을 단순화하여 현장물성치를 적용하였으며, 적은 개소의 현장계측결과를 보완하기 위해 다양한 지반조건의 변화를 시도하였다. 개량심도 예측을 위한 대표횡단면도 및 모델링 결과를 그림 4에 나타내었다.

표 1은 수치해석시 적용된 지반정수를 수치해석 결과와 함께 정리하였다. 하중으로 작용하는 제체사석과 치환대상층 아래 실트질 모래층의 지반특성치는 전체침하량에서 압밀침하량을 제외한 치환량에 미치는 영향이 적을 것으로 판단하여 지반정수값으로 고정하였고, 연약층(실트층)의 파괴기준과 관계되는 점착력을 변화시켜 수치해석을 실시하였다.

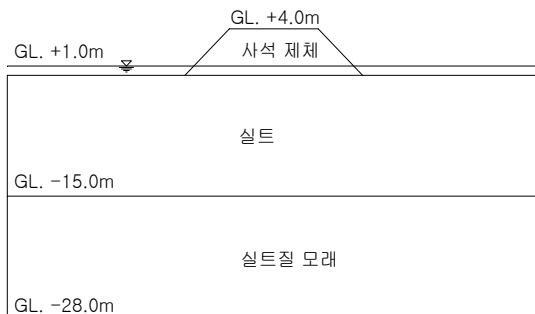
각 공구의 연약층 점착력의 분포를 확인하고 도로설계요령에 언급된 연약층의 비배수 점착력 기준인 15kPa 이하의



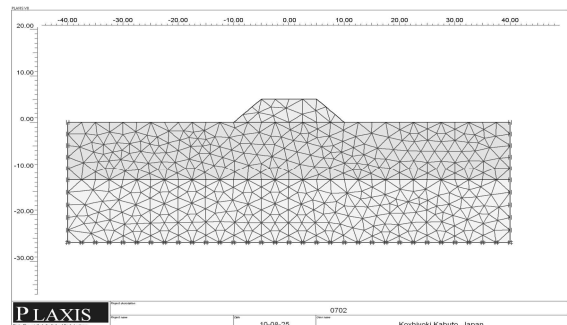
a) 1공구(H=5.0m)



b) 3공구(H=3.5m)



c) 4공구(H=4.0m)



d) 해석단면

그림 4. 공구별 대표횡단면도 및 해석단면

표 1. 수치해석 결과(강제치환심도, 단위:m)

점착력 kPa	1공구 성토고 5.0m	3공구		4공구	
		성토고 3.5m	성토고 5.0m	성토고 3.5m	성토고 4.0m
2	-	-	-	1.94	-
3	-	1.45	2.52	1.56	1.94
4	-	1.08	2.18	1.18	1.56
5	2.23	0.75	1.86	0.85	1.20
6	1.94	0.46	1.57	0.53	0.87
7	1.64	0.20	1.24	0.25	0.57
8	1.30	0.07	0.92	0.10	0.31
9	0.98	0.05	0.65	0.07	0.13
10	0.69	0.04	0.40	-	0.09
12	0.22	-	-	-	-
15	0.10	-	-	-	-

값인 것을 고려하여 1공구의 경우 5kPa~15kPa의 점착력을 적용하여 해석을 실시하였고, 3공구와 4공구의 경우에는 2kPa~10kPa의 점착력을 적용하여 해석을 실시하였다.

3.2 압밀침하량 계측결과

시화 MTV 1공구의 설계 성토고는 5.0m이고, 계측결과 평균침하량은 0.22m로 나타났다. 시화 MTV 3공구의 설계 성토고는 3.5m와 5.0m로 각각의 대표단면의 침하량 계측 결과 3.5m에서는 0.65m, 5.0m에서는 0.65m로 나타났다. 시화 MTV 4공구의 설계 성토고는 3.5m와 4.0m로 각각의 대표단면의 계측 결과 3.5m에서는 0.5m, 4.0m에서는 0.8m로 나타났다.(그림 5)

현장계측의 결과값은 압밀침하량에 대한 관측이므로 본 논문에서 다루고자하는 사석제체의 치환심도를 구하기 위해서는 확인보링을 통해 얻은 총 침하량 확인이 필수적이다. 따라서 다음 절에 기술한 확인보링을 실시하여 그 결과와 침하량 계측결과를 표 2에 정리하였다.

3.3 치환심도 확인

시화 MTV 1공구 제체의 치환심도를 확인하기 위하여 호안 제체 중심과 중심에서 약 5m 이격거리에 2공씩, 총 12공을 시추하였다. 시화 MTV 3공구 제체의 치환심도를 확인하기 위하여 석호갯벌구간에 2공과 탐조구간에 2공 총 4공을 시추하였다. 시화 MTV 4공구 제체의 치환심도를 확인하기 위하여 호안 제체 중심과 중심에서 약 2.5m 이격거리에 3공씩, 총 6공을 시추하였다.

시화 MTV 1공구 제체의 확인시추결과 사석층은 GL.

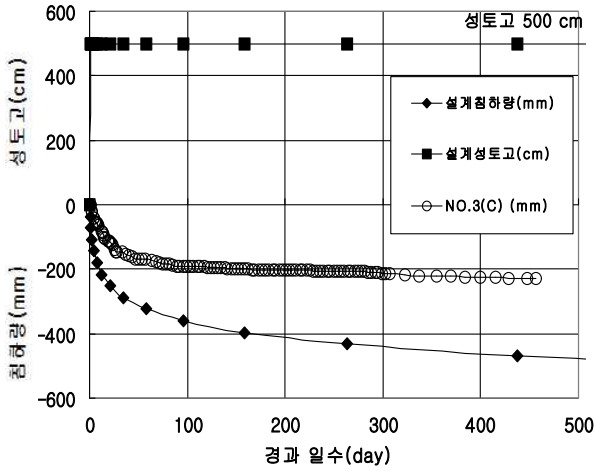
-6.8m까지 존재하는 것으로 나타나 원지반 이하의 사석층 깊이는 약 1.70m로 나타났고, 현장계측에 의한 발생침하량(0.22m)을 고려하면 강제 치환 심도는 1.50m로 계산되었다.

시화 MTV 3공구 제체의 치환심도를 확인하기 위한 확인시추결과 사석층은 석호 갯벌구간(BH-1 성토고 5.0m)에서는 GL. -6.5m~6.7m까지 존재하는 것으로 나타났고, 탐조구간(BH-4 성토고 5.0m)에서는 GL. -4.1m~4.4m까지 존재하는 것으로 나타나 원지반 이하의 사석층 깊이는 1.70m로 나타났고, 현장계측에 의한 발생침하량(0.65m)을 고려하면 강제 치환심도는 1.05m로 계산되었다.

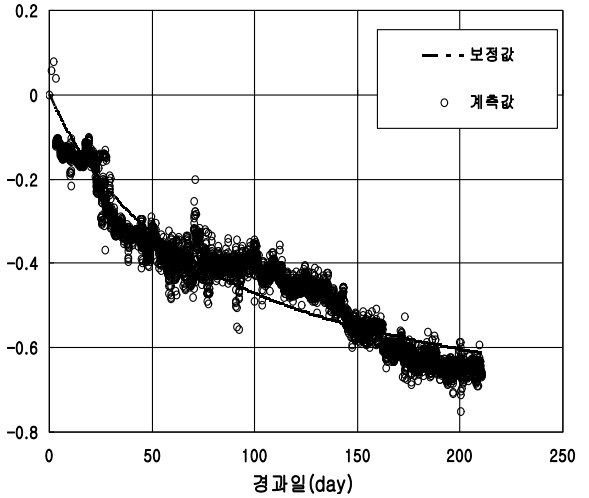
시화 MTV 4공구 제체의 치환심도를 확인하기 위한 확인시추결과 사석층은 중앙의 보링공인 NH-2(성토고 5.0m)에서는 GL. -5.4m, NH-5(성토고 3.5m)에서는 GL. -4.7m까지 존재하는 것으로 나타나 원지반 이하의 사석층 깊이는 각각 1.4m와 1.2m로 나타났고, 현장계측에 의한 발생침하량(0.55~0.80m)을 고려하면 강제 치환심도는 0.60m와 0.65m로 계산되었다. 표 2는 강제치환 심도의 계산 결과이다.

표 2의 결과로 이론상 추정된 추정식은 시화지역의 점토특성을 반영한 결과가 아니므로 상당한 값의 차이를 보이는 것이 확인되었다. 이러한 값의 차이는 성토제체의 강제침하량과 이후 서서히 진행되는 압밀침하량을 분리하지 않고 추정식을 도출한 것이 하나의 원인으로 파악된다. 해당지반의 물성치를 입력하여 얻은 수치해석의 결과상 확인한 수치와 실측한 결과가 상당히 일치하므로 시화지역의 특성을 반영한 새로운 추정식을 도출하는 것이 필요하다는 판단을 하게 되었다.

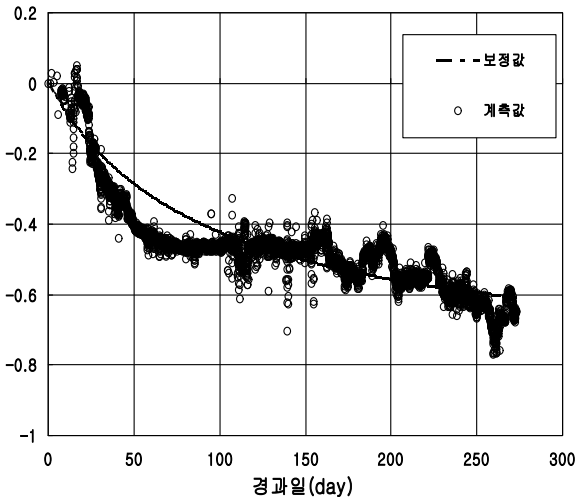
따라서, 실제 현장에서 발생한 것과 유사한 강제치환



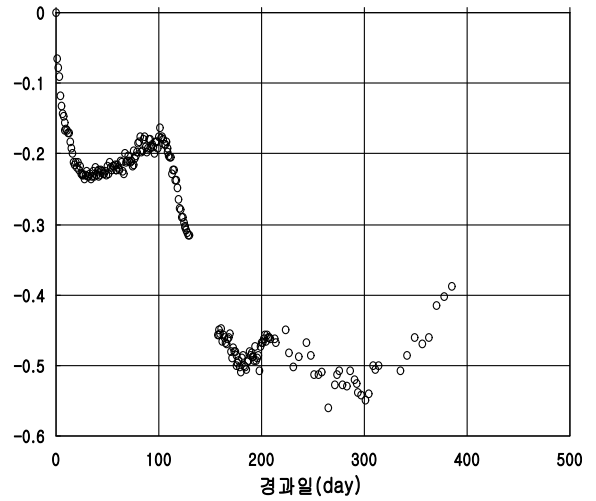
a) 1공구(H=5.0m)



b) 3공구(H=3.5m)



c) 3공구(H=5.0m)



d) 4공구(H=3.5m)

그림 5. 현장침하량 계측결과

표 2. 예측치와 확인보링, 수치해석의 비교

구분	확인보링결과(m)		계측값 (m)	강제치환심도(m)		수치해석	
	성토고	사석층두께		실측값	추정식	점착력(kPa)	강제치환심도(m)
1공구	5.0	6.7(1.7)	-0.20	1.50	4.90	8.0	1.30
3공구	5.0	6.7(1.7)	-0.65	1.05	4.90	8.0	1.04
4공구	3.5	4.7(1.2)	-0.55	0.65	2.50	6.0	0.63
	5.0	5.4(1.4)	-0.80	0.60	2.70	7.0	0.65

심도를 예측하기 위한 방법을 폴콘관입시험의 관입량과 영향인자와의 상관관계로부터 도출하고자 다음과 같은 시험을 실시하였다.

4. 폴콘식 액성한계 시험방법을 이용한 강제치환심도 영향인자 고찰

치환심도의 추정은 지지력공식을 이용한 방법(장병

욱, 2005; Braja M. Das, 토질역학)과 현장조사를 근간으로 하는 경험식으로 나눌 수 있다. 하지만 사석 제체를 형성하는 방법이 장기간의 압밀침하량을 제외하고는 실질적으로 덤프차량으로부터 투하될때의 누적된 동적 거동에 의한 치환심도 예측방법이 필요하다고 판단하여, 본 논문에서는 폴콘식 액성한계시험방법(김상철, 2000; 최용규, 2000)에 착안한 액성한계에 따른 동적하중 작용 시 관입량을 근거로 새로운 경험식을 도출하고자 한다.

4.1 폴콘식 액성한계 시험

액성한계를 시험하는 방법은 크게 두 가지로 사용되고 있는데, 동적타격방식과 폴콘식 액성한계시험방법으로 규정되어있다. 우리나라에서는 동적타격방식만 KS F 2303에 규격화하고 있지만 DD CEN ISO/TS 17892-6 : 2004 (2010 재개정) 등 유럽/구미 각국에서는 폴콘방식도 규격화하여 사용하고 있는 실정이다.(김상철, 2000) 폴콘 시험방법은 규격화된 콘을 점성토위에 올려놓으면 흙의 컨시스턴스에 따라 콘 자중에 의한 관입량이 달라지는 원리를 이용한 정적시험법으로 액성한계는 표준 콘이 5초동안 20mm 관입시의 해당 함수비로서 구할 수 있다. 이 두 시험법 간에는 타격메커니즘에 따라 동일한 흙에 대해 약간의 상이한 결과를 도출하게 되는데(이제수, 2003) 본 논문에서 제시하는 수식은 덤프트럭에서 떨구는 사석제체의 강제치환량을 다루므로 폴콘식의 액성한계 방법에 의한 시험방법을 응용하여 강제치환 영향인자인 콘의 낙하고와 중량, 자연함수비를 다양화하여 현장에서의 강제치환심도와의 상관성에 대해 접근하고자 시도하였다.

표 3. 액성한계와 Fall Cone Test 비교

구분	액성한계(%)	Fall Cone(%)	비고
NO 1	30.8	32.2	ML
NO 2	32.5	37.9	CL
NO 3	34.2	38.4	CL
NO 4	38.1	41.7	CL
NO 5	44.4	49.2	CL
NO 6	46.2	58.2	CL
NO 7	46.6	51.2	CL
NO 8	54.1	58.2	CH
NO 9	58.3	64.7	CH

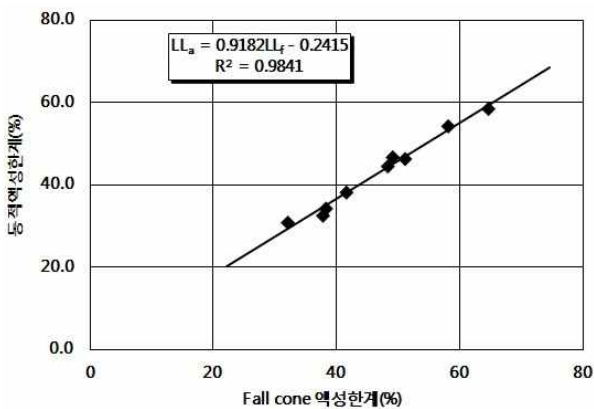


그림 6. 액성한계와 Fall Cone 함수비 비교

표 3에는 동일한 토질에 대한 두 시험방법에 따른 결과값의 차이를 예시로 보여주고 있으며, 시험에 사용된 시료는 시화 MTV 현장에서 채취한 시료로 시험하였다. 실험결과 그림 6과 같이 선형회귀분석에 의한 관계식은 $LL_a=0.9182LL_f-0.2415$ 로 나타났고, R^2 은 0.984로 높은 상관관계를 보였다. 선형, 지수 및 로그의 상관식 중 선형상관식의 $R^2=0.984$ 로 가장 크게 나타났다.

4.2 각 인자별 영향관계 확인

치환심도와 관련성이 큰 영향인자를 규명하기 위하여 폴콘식 액성한계 시험방법을 응용하여 치환재(콘)의 낙하고와 중량별 관입량과 원지반 자연함수비 변화에 따른 관입량을 확인하였다.

낙하고에 대한 관입량 실험결과는 표 4와 같으며 선형회귀분석에 의한 관계식은 그림 7과 같이 $y=0.1508x+12.343$ 으로 나타났고, R^2 은 0.787로 나타났다. 시험결과에 의하면 낙하높이별 관입량은 증가하는 경향을 보이거나 증가량은 미소한 것으로 나타났으며 이는 낙하고에 의한

표 4. 낙하높이별 관입량

높이 (mm)	관입량 (mm)	관입부피 (mm ³)	비 고
1.5	11.42	3061.5	M.C : 39.7%
3.0	13.55	3632.5	M.C : 39.8%
4.5	12.68	3399.3	M.C : 40.7%
6.0	13.52	3624.5	M.C : 40.6%
7.5	14.33	3841.6	M.C : 40.7%
9.0	12.59	3375.2	M.C : 40.7%
10.5	14.21	3809.5	M.C : 41.4%
12.0	14.59	3911.3	M.C : 40.6%
13.5	14.77	3959.6	M.C : 40.6%

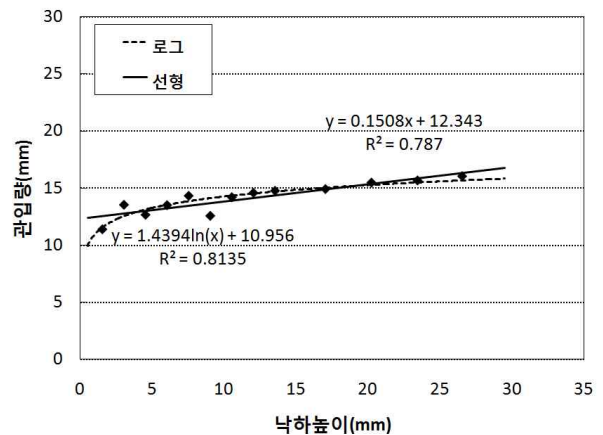


그림 7. 낙하높이별 콘 관입량

표 5. 콘중량별 관입량

중량 (g)	관입량 (mm)	관입부피 (mm ³)	비 고
140.16	12.54	3361.8	M.C : 39.6%
143.18	12.81	3434.1	M.C : 40.7%
149.27	13.43	3600.3	M.C : 40.6%
159.45	13.55	3632.5	M.C : 41.3%
173.74	14.71	3943.5	M.C : 40.7%
192.11	15.03	4029.3	M.C : 41.0%
239.86	14.97	4013.2	M.C : 41.5%
335.01	15.87	4254.5	M.C : 41.5%
514.20	16.51	4426.0	M.C : 40.7%

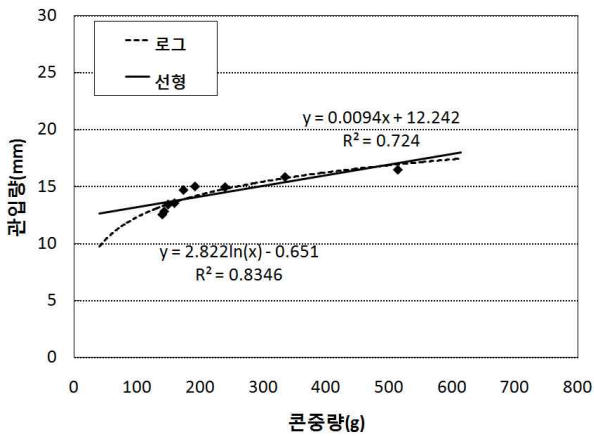


그림 8. 중량별 콘관입량

표 6. 함수비별 관입량

함수비 (%)	관입량 (mm)	관입부피 (mm ³)	비 고
41.6	14.49	3884.5	LL= 44.1 %
42.9	14.88	3989.1	LL= 44.1 %
44.3	17.41	4667.3	LL= 44.1 %
45.5	19.94	5345.6	LL= 44.1 %
45.7	19.87	5326.8	LL= 44.1 %
46.8	20.00	5361.7	LL= 44.1 %
48.3	22.42	6010.4	LL= 44.1 %
48.8	22.27	5970.2	LL= 44.1 %
50.7	23.11	6195.4	LL= 44.1 %

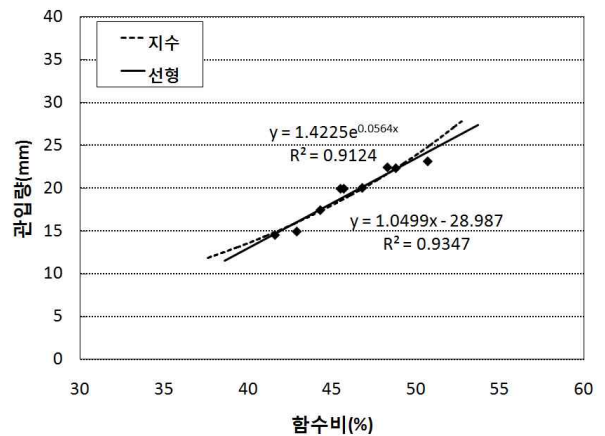


그림 9. 함수비별 콘 관입량

표 7. 영향인자별 관계식

구 분	선형	지수	로그
동적액성 -Fall Cone	$LL_a = 0.9182LL_f - 0.2415$ $R^2 = 0.984$	-	-
함수비 (Wn)	$y = 1.0499Wn - 28.987$ $R^2 = 0.935$	$y = 1.4225e^{0.0564Wn}$ $R^2 = 0.914$	-
단위중량 (W)	$y = 0.0094W + 12.242$ $R^2 = 0.724$	-	$y = 2.822\ln(W) - 0.651$ $R^2 = 0.835$
낙하높이 (H)	$y = 0.1508H + 12.343$ $R^2 = 0.787$	-	$y = 1.4394\ln(H) + 0.956$ $R^2 = 0.814$

충격에너지가 원지반 연약지반 표층부에서 발생하는 간극수압에 의해 분산 흡수되어 관입량 변화량이 미소한 것으로 판단된다. 이상의 결과에서 낙하높이가 강제치환심도에 미치는 영향은 제한적임을 알 수 있다.

콘중량에 대한 관입량 실험결과는 표 5와 같으며 로그회귀분석에 의한 관계식은 그림 8과 같이 $y = 2.822\ln(x) - 0.651$ 로 R^2 은 0.8346으로 낙하높이 결과에 비해 비교적 높은 상관관계를 보였다. 시험결과에 의하면 콘중량이 증가할수록 관입량은 비교적 큰 폭의 증가경향을 보이나 일정 중량이상(192.11g)에서의 관입량 증가량은 미소한 것으로 나타났다.

자연함수비별 콘 관입량 시험결과는 표 6과 같으며 상관성이 큰 선형회귀분석에 의한 관계식은 그림 9와 같이 $y = 1.0499x - 28.987$ 로 R^2 값이 0.9347로 관입량은 자연함수비에 비례적으로 증가하므로 이상의 시험결과에서 현장 강제치환 심도 산정시 영향이 큰 인자는 자연함수비를 알 수 있다.

4.3 영향인자간 상호 연관성 검토

본 논문에서는 강제치환심도결정을 위해 풀콘 시험기

표 8. 국내의 압축지수 제안식

상관 관계식	적용 대상 토질	제안자	비고
$C_c = 0.7(e_0 - 0.34)$	김해지역	장정욱 외 2인(2001)	$C_c = f(e_0)$
$C_c = 0.45(e_0 - 0.4)$	거제지역	"	
$C_c = 0.61(e_0 - 0.62)$	서, 남해안 점토	송만순(1988)	
$C_c = 0.5362(e_0 - 0.41)$	호남해안	김종렬 외 4인(2004)	
$C_c^{0.75} = 0.22105 + 0.37608e_0$	광양	배우석 외 1인(2009)	
$C_c = 0.4279(e_0 - 0.29)$	시화 점토	박도선(2010)	
$C_c = 0.0086W_n - 0.118$	인천남향	이송 외 2인(2001)	$C_c = f(W_n)$
$C_c = 0.115W_n - 0.04$	송도매립지	"	
$C_c = 0.0083W_n - 0.0845$	군장 신항만	"	
$C_c = 0.022W_n - 0.693$	새만금	"	
$C_c = 0.097W_n + 0.3$	마산 신항지역	김승렬 외 1인(2001)	
$C_c = 0.015(W_n - 2)$	김해지역	장정욱 외 2인(2001)	
$C_c = 0.013(W_n - 10)$	거제지역	"	
$C_c = 0.016(W_n - 22)$	서, 남해안 점토	송만순(1988)	
$C_c = 0.0114(W_n - 5.35)$	호남해안	김종렬 외 4인(2004)	
$C_c^{0.75} = 0.25733 + 0.00996W_n$	광양	배우석 외 1인(2009)	
$C_c = 0.0112(W_n - 9.32)$	시화 점토	박도선(2010)	
$C_c = 0.0066(LL + 17)$	군장 신항만	이송 외 2인(2001)	
$C_c = 0.0087(LL - 4)$	새만금	"	
$C_c = 0.0059LL + 0.74$	마산 신항지역	김승렬 외 1인(2001)	
$C_c = 0.008LL + 0.173$	부산 점토	정성교 외 3인(2001)	
$C_c = 0.016(LL - 15)$	서, 남해안 점토	송만순(1988)	
$C_c = 0.0096(LL + 9.4)$	호남해안	김종렬 외 4인(2004)	
$C_c^{0.75} = 0.09754 + 0.01210LL$	광양	배우석 외 1인(2009)	
$C_c = 0.0083(LL + 16)$	시화 점토	박도선(2010)	
$C_c = 0.148 + 0.0074W_n + 0.0008LL$	경남해안	윤길림 외 1인(2003)	$C_c = f(W_n, LL)$
$C_c = -0.202 + 0.0126W_n + 0.0012LL$	경기해안	"	
$C_c = -0.202 + 0.0126W_n + 0.0012LL$	전남해안	"	

를 이용한 콘의 낙하높이 변화, 콘중량 변화 및 지반의 자연함수비 변화에 대해 고찰했다. 각각의 실험결과, 콘의 낙하높이나 중량은 강제치환심도에 미치는 영향이 미소하였으나(4.2절) 자연함수비 조건의 경우 강제치환심도 증감에 가장 큰 영향을 미치고 있음이 확인되었다.

따라서 본 논문에서는 강제치환심도의 예측을 위한 중요인자로 액성한계 값과 관련한 자연함수비로서 간편 예측식을 도출하고자 한다. 표 8에서와 같이 지금까지의 연구성과로 인해 확인되거나 학계에 발표(박도선, 2010)된 국내의 액성한계와 압축지수와의 관계식으로부터 서남해안 점토의 수식을 활용하고자 할 때는 $LL = C_c / 0.016 + 15$ 의 값을 활용하여 제안식을 변환하여 적용하면 액성한계 결과가 설령 폴콘방식의 시험값이 아니더라도 압축지수 상관식으로부터 활용 근거를 마련할 수 있다. 본 연구에서는 상기의 수식 중 시화지역의 수식을 활용하

여 액성한계 및 자연함수비를 역산하여 치환심도를 예측하는 수식을 도출하였다

5. 예측식 제안

5.1 현장함수비와 액성한계

4절의 표 8로부터 시화지역의 점토특성(압축지수)을 이용해 다음과 같이 현장함수비와 액성한계간의 상관관계로 정리될 수 있다. 압축지수와 현장함수비의 관계(식 (6))와 압축지수와 액성한계의 관계(식 (7))로부터 시화 지역의 자연함수비(W_n)와 액성한계(LL)의 관계식을 정리하면 식 (8)과 같다.

$$C_c = 0.0112(W_n - 9.32) \tag{6}$$

표 9. 현장함수비에 따른 콘관입량과 공구별 실측 강제치환 심도

현장함수비(%)	관입량(mm)	1공구 5.0m	3공구 5.0m	4공구 5.0m	4공구 3.5m
30	2.51	- 현장함수비 : 44.8% - 강제치환심도 : 1.10m	- 현장함수비 : 44.5% - 강제치환심도 : 1.05m	- 현장함수비 : 40.0% - 강제치환심도 : 0.65m	- 현장함수비 : 36.8% - 강제치환심도 : 0.60m
35	7.76				
40	13.01				
45	18.26				
50	23.51				
55	28.76				
60	34.01				

$$Cc = 0.0083(LL+16) \quad (7)$$

$$Wn = 0.741(LL)+21.176 \quad (8)$$

5.2 액성한계와 치환심도

4.2절의 실험결과 선형회귀분석에 의한 자연함수비와 관입량의 관계식은 값의 차이가 크게 나지 않는 점과 현장활용을 감안하여 1차선형함수에 의한 치환심도 $Dz = 1.0499W_n - 28.987$ 로 결정하였고, 식 8을 이 수식에 대입하여 치환심도(Dz , 단위 mm)로 정리하면 다음과 같다(식 (9)).

$$Dz = 0.7779(LL)-6.754 \quad (9)$$

5.3 현장함수비와 치환심도

연약지반상의 재하하중이 일정하다면 점토지반의 현장함수비의 크고 작음에 따라 치환심도가 달라진다는 점에 착안하여 현장함수비의 함수를 그대로 사용하면 치환심도는 아래의 수식과 같이 정리된다.

$$Dz = 1.0499(Wn)-28.987 \quad (10)$$

시화현장의 액성한계와 현장함수비를 분석한 결과 액성한계는 $35 \pm 2\%$ 정도로 나타났으며, 현장함수비는 30%~50% 사이 값으로 분포된 것으로 파악되었다. 본 논문에서는 해당 현장의 액성한계가 일정한 범위(34~37%)의 작은 변화에도 강제치환심도가 60~110cm로 2배 정도 변화하는 점에 착안하여 현장함수비를 30%~60%까지 식 (10)에 대입하여 계산한 값을 표 9에 정리하였다.

현장확인보링 자료 및 계측성과를 비교 검토한 결과 강제치환 심도는 액성한계의 변화보다 현장함수비의 변화량에 더욱 민감하게 변화한다는 점을 확인하여 강제치환심도에 관해 같은 의미를 가지는 식 (9)와 식 (10)

중에 식 (10)을 활용하게 되었다. 하지만 식 10은 매커니즘상 낮은수준의 중량(콘중량)에 대한 자연함수비별 관입량을 산정한 것이므로 현장조건과 같이 사석재와 같은 높은수준의 하중에 대한 본 연구 목적에 부합하는 제안식을 도출하기 위해서는 별도의 보정이 필요하다.

5.4 시화지역 실트지반의 치환심도 제안식

상기의 식 전개를 통해 얻은 제안식은 단일 구체의 낙하에 대한 점토지반의 에너지소산을 표현한 식으로서 사석의 투하와는 물리적으로 상당한 매커니즘의 차이를 인정할 수밖에 없다. 따라서 현장조건에 맞는 수식을 제안하기 위해서는 그림 11과 같이 콘 시험결과로부터 현장조건에 부합하는 치환심도와외의 상관관계(식 (12))를 통해 식 (13)과 같은 형태로 변형시켜야 한다. 5.1절~5.4 절의 과정을 통해 도출된 식 (13)이 시화지역의 실트질 지반 특성을 반영한 강제침하심도 예측식이다.

$$Dz_{fall} = 1.0499(Wn) - 28.987$$

(Dz_{fall} : 콘시험에 의한 관입량) (11)

$$Dz_{field}/Dz_{fall} = 0.2239(Wn) - 48.073$$

(Dz_{field} : 현장실측치에 의한 치환심도) (12)

$$Dz_{field} = 0.235(Wn^2)+43.93(Wn)-1393.5 \quad (13)$$

5.5 제안식의 검증

표 10에서 정리된 바와 같이 확인보링의 결과와 제안식을 비교하면 아래와 같은 그림 12를 그릴 수 있다. 시화지역의 점토특성을 반영한 각종의 물성수식(박도선, 2010)을 응용하여 만든 제안식은 현장관측결과와도 오차범위 15%(현장함수비 30%이상일 때)에서 잘 부합함을 확인할 수 있다. 현장계측결과와 제안식간의 오차는

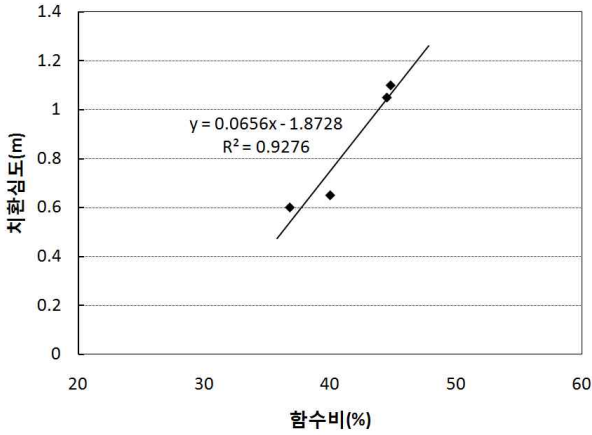


그림 10. 현장 실측함수비와 치환심도

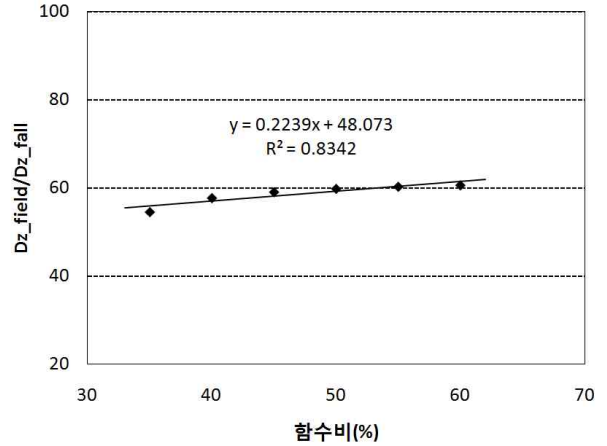


그림 11. 함수비별 강제치환 심도 보정

표 10. 현장함수비에 따른 치환침도(적용범위 현장함수비 30% 이상)

현장함수비(%)	확인보링결과 (실측치, cm)	확인시추결과추정 (회귀분석결과, cm)	제안식(단위:cm) $0.235(Wn^2) + 43.93(Wn) - 1393.5$
35	36.8 : 60	42.3	43.2
40	65	75.1	74.0
45	44.5 : 105	107.9	105.9
50	44.8 : 110	140.7	139.1
55	-	173.5	173.4
60	-	206.3	208.8

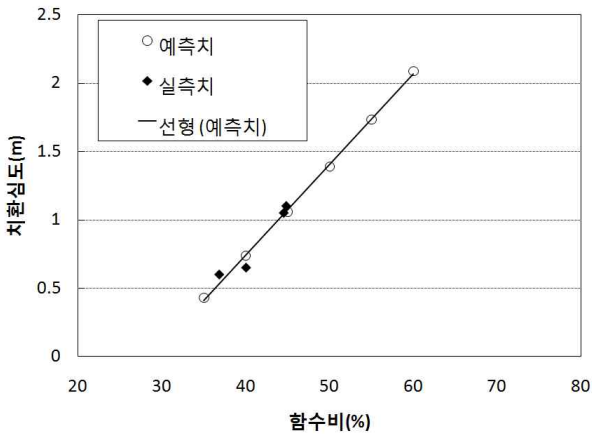


그림 12. 제안된 치환심도 예측식과 확인시추결과 비교

선형회귀식의 도출시 발생한 오차가 보정수식을 도출하며 중첩되어 발생한 오차로서 보다 많은 수량의 현장 결과를 적용하면 보다 오차가 작은 예측식을 기대할 수 있을 것으로 사료된다.

또한 본 연구에서 제안한 수식은 현장조건에서 도출한 결론인바, 현장조건에 해당하는 현장 함수비 30%~50%의 범위에서 활용하면 간편하게 강제침하량을 산출할 수 있고 이에 압밀침하량을 별도로 산출하면 최종침하량을 해당 오차범위에서 유효한 총침하량을 예측할 수

있을 것으로 사료된다.

6. 결 론

강제사석치환공법을 적용하여 시공하고 있는 시화 MTV 3개 공구를 대상으로 수치해석과 기존의 추정식을 이용하여 치환심도를 예측하고 이를 계측 및 확인 시추에 의한 실측치와 비교·분석한 결과 기존 시화지역 점토특성을 반영한 침투깊이 예측식을 제안하였다.

- (1) 점착력을 변화시키면서 수치해석을 수행한 결과 점착력 8.0kPa에서 1공구 및 3공구의 치환심도가 1.30m 및 1.04m로 예측되어 실측치 1.10m와 1.05m와 비슷한 값을 보였으며 4공구 또한 점착력 7kPa에서 0.65m를 보여 실측치 0.60m에 근접한 결과를 나타내었다.
- (2) 영향인자를 도출하기 위해 사석제의 단위중량, 낙하高的 변화에 따른 강제침하량의 변화를 확인한 결과 해당지반의 현장함수비 변화가 가장 크게 영향을 미치는 것으로 확인하였다.
- (3) 현장 확인시추를 통하여 얻은 결과와 현장계측결과를 확인한 결과를 활용하여 사석제체에 의한 순수

압밀침하량과 치환심도를 각각 구할 수 있었고, 압밀량을 배제한 강제치환심도를 구하기 위한 제안식의 도출이 필요함을 확인하였다.

- (4) 기존의 치환심도 추정식에 의해 3개 공구의 치환심도를 산정하고 이를 확인시추결과에 따른 실제 치환심도와 비교한 결과 기존추정식에 의한 경우 확인시추에 의한 치환심도에 비하여 3~5배 정도로 과다 산정되었으며, 자연함수비에 의한 예측 치환심도의 경우 0.9~1.13배로 현장 확인시추 결과에 의한 강제치환심도와 유사함을 확인하였다.
- (5) 본 연구에서는 본론부에서 서술한 바와 같이 상기의 물성을 각각의 요소인자로서 분석하여 회귀분석을 통해 시험결과를 분석하였다. 그 결과 현장함수비와 액성한계로 예측식을 전개하던 중 인위적인 요소가 비교적 덜 반영된 현장함수비 위주의 예측식이 좀 더 현장확인시추 결과와 잘 부합됨을 확인하였다.

참고문헌

1. 김상철 (2000), “동적 액성한계 시험과 정적 콘 관입시험 결과의 상관관계”, *대한토목학회 학술발표회 논문집*, 제2권, pp.223-226.
2. 이계수 (2003), “동적액성한계시험과 정적액성한계시험 결과의 상관성 연구”, *한국농공학회 학술발표회 논문집*, 2003년 11월, pp.207-210.
3. 장정욱 (2005), “시험방법에 따른 액성한계치의 비교 연구”, *한국해양해양공학학회 논문집*, 제17권 제2호, pp.80-85.
4. 윤길립 (2003), “국내 해양지반에 적합한 압축지수 예측식 제안”, *대한토목학회 논문집*, 제23권 제3호, pp.169-176.
5. 김종렬 (2004), “호남해안지역 연약점토의 토질특성과 제 토질정수와의 상관성에 관한 연구”, *대한지질공학학회 논문집*, 제14권 제4호, pp.371-379.
6. 최용규 (2000), “낙하 콘 시험을 이용한 점성토의 토질정수 추정에 대한 연구”, *대한토목학회 학술발표회 논문집*, 제2권 제4호, pp.427-430.
7. 배우석 (2009), “광양점토의 물리적 특성과 압축지수의 상관성”, *한국지반환경공학학회논문집*, 제10권 제7호, pp.7-14.
8. 시화멀티테크노 벨리 제 1, 3, 4공구 지반조사보고서, 한국수자원공사 2010년 7월.
9. 이종영 (2004), “경험적인 방법에 의한 강제치환 심도산정”, *한국지반공학학회 논문집*, 제20권 제9호, 145-153.
10. 장병욱 (2005), “방조제 시공을 위한 강제치환심도의 추정”, *한국농공학회 논문집*, 제47권 제1호, 35-42.
11. 이춘석 (2008), “토질 및 기초공학 이론과 실무”, 예문사, pp.756-757.
12. 박도선 (2010), “시화지역 연약점토의 압축지수 산정 및 기존경험식과의 비교분석”, 충남대학교.
13. Braja M. Das, 토질역학 Sixth edition, 도서출판 동화기술, pp.72-79, pp.352-356.
14. Herrero, O. R. (1983), “Universal compression index equation; Closure”, *J. Geotech Eng.*, ASEC, 109(5), pp.755-761.
15. Nishida, Y. (1965), “A breif note on compression index of soi”, *J. soil Mech Found Eng.*, ASCE 82(3), pp.1-14.
16. Terzaghi K. and Peck R. (1948), “Soil Mechanics in Engineering Practice, John wiley and Sons”, Inc., New York, pp.68-75.

(접수일자 2011. 6. 17, 심사완료일 2011. 9. 18)