

경험적인 방법에 의한 강제치환 심도 예측

Prediction of Compulsory Replacement Depth by Empirical Method

홍 원 표¹ Hong, Won-Pyo
한 중 근² Han, Jung-Geun
이 중 영³ Lee, Jong-Young

Abstract

Based on the previous studies proposed by many researchers about the evaluation method of replacement depth, a modified formula which incorporates the effect factors such as embanked height and load, replacement depth, cohesive force of original ground and unit weight of embankment etc, was suggested in this study. The new proposed formula was applied in the three construction sites of KwangYang-Bay Area (Yeocheon, Youlchon, and KwangYang) constructed by the compulsion replacement method. The application of the new method was investigated through these case studies in domestics. A modified bearing capacity parameter was estimated form the relationship of modified embankment loading and ultimate bearing capacity resulted from the site investigation, and the replacement depth was predicted by using this parameter. In addition, through the relationship analyses between each effect factors to the replacement depth in two areas, Yeocheon and Youlchon, an empirical prediction method which can evaluate the replacement depth in adjoining area was proposed. The predicted value obtained by new method is approximately similar to the measured replacement depth in KwangYang area.

요 지

본 연구에서는 기존에 제안된 각 연구자들의 치환심도 산정식을 고찰하고, 이를 토대로 영향인자를 고려한 수정식을 제안하였으며, 제안된 수정식을 국내 대표적인 강제치환 시공 사례지역인 남해안 광양만일대(여천, 울춘, 광양)의 시공사례에 적용하여 국내지반에서의 적용성을 조사하여 보았다. 또한 지반조사 결과를 바탕으로 산정된 수정성토하중과 극한지지력의 관계로부터 수정지지력계수를 결정하였으며, 결정된 수정지지력계수를 적용하여 치환심도를 예측하였다. 그리고 울춘, 여천지역의 시공시 각 영향인자별 상관성 분석을 통한 상호관계를 유도함으로써 인접지역 또는 유사지역에서 치환심도를 예측할 수 있는 경험적인 치환심도 예측기법을 제안하였고, 제안된 경험식을 광양지역에 적용한 결과 예측결과는 실제 치환심도와 매우 근사한 결과를 나타내었다.

Keywords : Compulsory replacement, Effect factor, Empirical formula, Modified fomula, Replacement depth

1. 서 론

우리나라는 국토의 효율적 이용을 목표로 서·남해안

을 2000년대 신 산업지대로 개발 육성시켜 경제성장에 따른 공업용지 및 주거용지와 공항, 항만 등 늘어나는 토지의 수요를 충족하고자 해안매립을 통한 부지개발

1 정회원, 중앙대학교 건설환경공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil & Environmental Engrg., Chung-Ang Univ.)

2 정회원, 중앙대학교 건설환경공학과 조교수 (Member, Assitant Prof., Dept. of Civil & Environmental Engrg., Chung-Ang Univ.)

3 정회원, 한국시설안전기술공단 기술개발실 연구원 (Member, Researcher, Technology Development Lab, Korea Infrastructure Safety & Technology Corp., geoljy@hanmail.net)

을 활발히 추진하고 있다.

이러한 해안매립에 앞서 선행되어야 할 공정중의 하나로 매립지 조성에 따른 방조제나 호안 축조를 들 수 있는데 이들 대부분은 연약한 점성토 및 실트층으로 구성된 지반위에 축조되므로 지반개량 공정은 필수적이라 할 수 있다.

연약지반 개량공법에는 물리적, 화학적, 전기적 공법 등 여러 가지 공법이 있으며, 공법 선정시 경제성, 시공성 및 안정성을 고려하여 사용목적에 가장 적절한 공법을 채택해야 한다.

방조제나 호안과 같이 점진적으로 구조물을 축조해 나가는 경우에는 물리적처리 공법중의 하나인 치환공법이 널리 사용되고 있으며, 대표적인 치환공법으로 굴착치환공법, 폭파치환공법, 강제치환공법으로 구분한다. 굴착치환공법은 굴착으로 연약층을 제거해 나가면서 양질의 재료로 치환과 동시에 구조물을 축조해 나가는 방법이며, 폭파치환공법은 화약의 폭발에너지를 이용해 성토하부의 재료를 연약토층으로 이동시키는 방법이다. 강제치환공법은 성토재료의 하중만으로 연약층을 주위로 밀어내는 방법이다.

1952년 Webber에 의해 미국 San Francisco 지역에서 처음 시행된 강제치환공법은 의도적으로 안전률이 1이하가 되는 하중을 성토함으로써 지반의 전단파괴를 유도하여 양질의 재료로 치환하는 공법이다. 즉, 지반의 극한지지력 이상의 성토하중을 가하여 연약층의 파괴와 동시에 양질의 성토재료로 연약층을 치환시키는 공법이다.

강제치환공법이 다른 연약지반 처리공법에 비하여 가장 원시적인 공법임에도 불구하고 현재까지 많이 이용되고 있는 이유로는 시공이 단순하고, 경제성이 우수하기 때문이라 할 수 있다. 그러나 치환심도 예측과 치환시 발생하는 용기와 축방유동, 그리고 치환층 주변지반의 토질특성 변화 등의 파악이 곤란하다는 문제점을 내포하고 있다. 특히, 정확한 치환심도를 예측하는 것은 설계 파라미터 중 가장 중요한 요소임에도 불구하고 현재까지 정확한 이론적 산정기법이 적용되어있지 않은 상태로 많은 문제점이 지적되고 있다. 따라서 본 연구에서는 기존에 적용되고 있는 강제치환 심도산정 기법에 영향인자를 고려한 수정식을 제안하고, 제안식의 적용성을 사례지역을 대상으로 살펴본다. 또한, 시공시 각 영향인자와 치환심도와의 상호관계를 유도하여 인접지역 또는 유사한 토질특성을 가진 지반에서의 치환심도

예측법을 제시하고자 한다.

2. 강제치환공법 메커니즘 및 기존연구

2.1 강제치환 공법

치환공법은 연약층을 양질의 재료로 치환함으로써 그 지반을 사용목적에 맞게 개량하는 공법이다. 예를 들어 유기질토나 Peat 등 연약한 지반위에 도로나 호안과 같은 구조물을 축조하는 동안이나 사용중일 때 안전은 매우 중요한 요소이다.

일반적으로 연약지반상에 축조된 구조물은 어느 정도 침하의 가능성을 내포하고 있으므로, 연약지반상에 축조된 구조물은 침하로부터 오는 안전성과 유지보수 비용에 대한 부담을 항시 내포하고 있다. 이에 적절한 대응으로 고압축성 흙을 자갈이나 기타 암석과 같은 양질의 재료로 치환하여 지반의 안전성과 침하를 허용범위 이내의 조건으로 실현하는 방법인 치환공법이 있다.

치환공법의 효과는 그림 1에서와 같이 안전성의 증가면에서 치환한 부분의 전단저항력이 개선되는데 있다. 연약층은 치환에 의하여 얇아지게 되므로 침하량이 감소하고, 추후 압밀에 소요되는 시간을 단축시킬 수 있다.

강제치환공법은 양질의 재료를 과대하게 지표면에 재하시켜 제방을 축조하는 공법으로 그림 2와 같이 과대한 하중에 의해 전방 또는 측면으로 연속적인 전단파

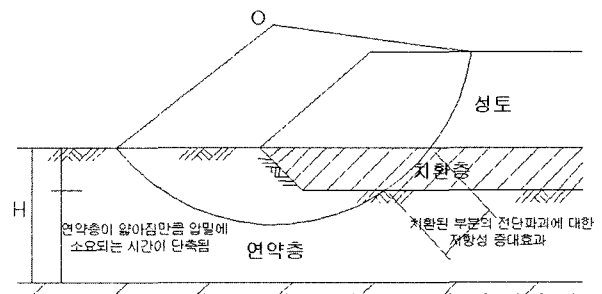
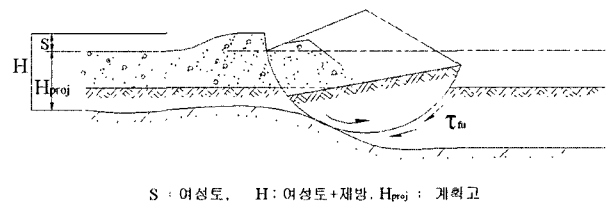


그림 1. 치환공법의 효과



S: 여성토, H: 여성토+재방, H_{proj}: 계획고

그림 2. 강제치환 공법

괴를 유도하여 연약점토를 압축, 치환시킨다.

일반적으로 성토는 지지층이 파괴되지 않는 조건인 안전율이 1이하가 되지 않는 조건으로 시공하며, 성토체의 안정여유를 고려하여 1.25~1.5정도로 한다. 이와 반대로 강제치환공법은 의도적으로 안전율이 1이하가 되도록 성토하여 지반의 파괴를 유도하여 치환한다. 즉, 지반의 극한지지력 이상의 성토하중을 가하여 성토재료를 연약층 하부로 밀어 넣고, 주위지반을 용기시켜 지반의 강도증가를 도모하는 공법이다.

강제치환공법에 의한 성토설계는 다른 연약지반 처리 공법과 달리 이론적, 정량적으로 취급하기 곤란하므로 과거의 시공사례나 경험을 참고로 하여 개략적인 목표를 세워 착공하는 경우가 많다. 따라서 계획내용이 시공 상황에 따라 변화할 경우를 항상 대비해 두어야 한다.

2.2 치환심도 예측기법 고찰

기존에 제안된 치환심도 예측기법은 크게 지지력 공식을 이용한 치환심도 예측법과 경험적인 예측법으로 분류할 수 있다. 지지력 공식을 이용한 예측기법에는 Terzaghi(1943), Timoshenko & Goodier(1951), Yasuhara & Tsukamoto(1982)의 제안식이 있으며, 경험적인 방법으로는 Badiou(1953; After 이양희, 1982), Fellenius(1964; After 신현영, 1999)의 방법과 이양희(1982), 정형식(1986; After 이승호, 1992), 이승호(1992)에 의해 제안된 방법들이 있다.

강제치환공법 적용시의 심도산정은 식 (1)과 같이 성토하중(P)과 지반의 극한지지력(q_u)이 일치하는 위치(D_z)로 산정하며, 이때 사용되는 정수들을 나타내면 그림 3과 같다.

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

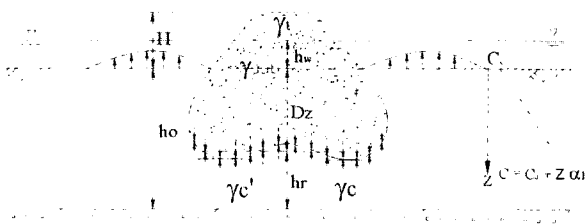


그림 3. 강제치환공법과 치환심도 산정을 위한 정수

여기서, P : 깊이 D_z 에서의 작용하중(성토하중)

q_u : 깊이 D_z 에서의 지반의 극한지지력

1) 지지력공식에 의한 예측

Boussinesq(1866)는 성토하중(P_1)을 식 (2)와 같이 제체의 단위증량에 제체의 높이(H)를 곱한 형태로 나타내었다(신현영, 1999).

$$P_1 = H \cdot \gamma_t \quad (2)$$

여기서, P_1 : 성토하중(t/m^2), H : 축조고(m)

γ_t : 제체의 습윤단위증량(t/m^3)

Terzaghi(1943)는 식 (3)과 같이 $\phi=0$ 인 점성토지반의 지지력계수 N_c 를 이용하여 제안한 점성토지반의 극한지지력(q_u)을 다음과 같이 구하였다.

$$N_c = \frac{3}{2} \pi + 1 = 5.7, N_q = 1, N_r = 0 \quad (3)$$

$$q_u = c \cdot N_c + D_z \cdot \gamma_c' \quad (4)$$

Timoshenko & Goodier(1951)는 연약층의 깊이가 반무한인 경우의 치환심도(D_z)를 식 (5)와 같이 구하였다.

$$D_z = \frac{\gamma_t H - q_a}{\frac{7}{6} \gamma_c - \gamma_{sub}} \quad (5)$$

Yasuhara & Tsukamoto(1982)는 Terzaghi가 제안한 점성토의 지지력계수 $N_c=5.7$ 대신 $N_c=5.3$ 을 적용하였으며, 용기량은 치환심도의 1/6이라 하여, 다음과 같은 성토하중과 극한지지력의 관계를 식 (6)과 같이 제시하였다.

$$\gamma_t H + \gamma_{sub} D_z = \gamma D_z + \gamma_{Heaving} \frac{D_z}{6} + 5.3c \quad (6)$$

2) 경험적 방법에 의한 예측

Badiou(1953)는 Singapore Clay의 대표적 특성인 자연함수비 $w \approx 90\%$ 와 액성한계 $w_L \approx 90\%$ 정도인 지반에 대한 사례연구를 통하여 성토하중과 잔류치환심도 사이의 상관성에 대하여 그림 4와 같이 제시하였다. 이 방법은 연약층 깊이별 제체축조고에 따른 치환 후 잔류량을 개략적으로 판단할 수 있으나, 특정 지역에서만 적용성을 갖는 한계점이 지적되고 있다(이양희, 1981).

Fellenius(1964)는 등분포하중이 작용하는 연약지반

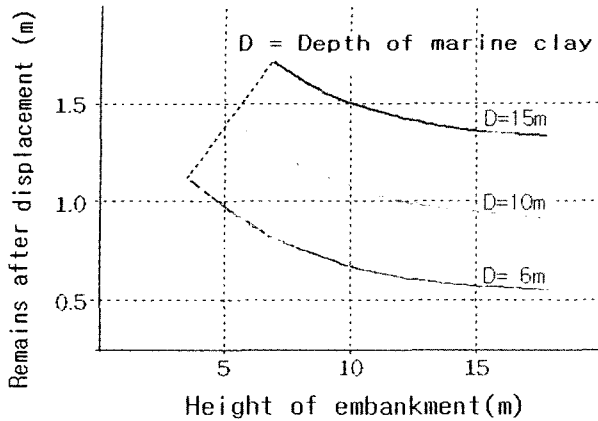


그림 4. 축조고와 치환 후 연약층 잔류심도 관계(Badiou, 1953; After 이양희, 1982)

의 치환심도 산정에 있어서 제체의 상단폭(B_0)보다 치환층의 하부폭(B)이 크게 영향을 미치는 사실을 고려하여, 식 (7)과 식 (8)과 같이 치환층폭과 치환깊이를 각각 제시하였다(신현영, 1999).

$$B = \frac{(\gamma_t H + q_0) B_0}{a_a} \quad (7)$$

$$D_z = \frac{\sqrt{3}}{2} (B - B_0) \quad (8)$$

3. 대상 지역의 지반 및 시공특성

본 연구의 대상지역은 과거에 강제치환 공법을 대규

표 1. 대상지역의 토질특성(동아건설턴트, 1997. 11, 1998. 9, 1999. 11, 1999. 12a, 1999. 12b, 전라남도, 1995. 2, 삼중Eng., 1998. 6)

토질분류	CL	PI(%)	20.63~20.84
200번체 통과량	97~99%	비중(G_s)	2.62~2.68
LL(%)	47.12~47.5	$\gamma_t(t/m^3)$	1.45~1.6
PL(%)	26.49~26.7	점착력증가율(α)	0.09~0.22

표 2. 대상지역의 시공특성(동아건설턴트, 1997. 11, 1998. 9, 1999. 11, 1999. 12a, 1999. 12b, 전라남도, 1995. 2, 삼중Eng., 1998. 6)

	수심(m)	축조고(m)	원지반심도(m)	치환율(%)
여천	1.1~2.9	3.3~5.7	1.1~19.26	42~100
평균	2.5	4.76	10.51	88.95
광양	0~2.9	2.2~7.5	1.69~21.1	77.6~100
평균	2.94	4.97	11.74	93
울촌	0.7~0.8	4.2~7.0	14.2~18.9	74.5~92.3
평균	0.44	6.12	16.34	89.98

모로 시행한 바 있는 국내 남해안 광양만에 위치한 3개 지역으로 하였다. 편의상 인접지역의 지명을 이용해 광양, 여천, 울촌지역으로 분류하였으며, 본 지역의 토질 특성 및 시공특성은 표 1 및 표 2와 같다.

4. 시공조건의 영향인자를 고려한 치환심도에측

기존의 치환심도 예측기법의 문제점을 보완하고자 본 연구에서는 대상지반의 공학적 특성과 시공조건에 대한 영향인자를 고려하기 위해 지반강도정수 및 해수면 존재의 고려여부에 따라 수정식을 제안하였다.

지반의 점착력은 깊이에 따라 α_1 의 비로 증가하므로, 식 (9)와 같이 표현할 수 있다. 따라서 기존의 제안식들에 점착력(c)증가율을 고려한 식 (9)를 이용하여 깊이에 따른 강도기울기로 보정해주는 것이 타당하다.

$$c = c_0 + \alpha_1 D_z \quad (9)$$

강제치환공법은 연약한 지반에 사석과 같은 양질의 성토재료를 연속적으로 투기하여 치환재료의 하중과 타격에너지에 의해서 연약한 지반속으로 재료를 연속적으로 밀어넣는 공법이다. 따라서 해수면의 존재와 위치에 따른 성토체의 단위중량 적용에 따라 치환심도는 크게 달라질 수 있다.

한편, 해수면의 존재여부를 고려한 분석을 병행하기 위하여 식 (10)과 같이 해수면의 영향을 고려한 성토하중을 심도산정에 적용하였으며, 치환층을 성토체의 하중으로 포함시킨 식 (10)과 식 (11)을 수정성토 하중이라 하였다.

$$P_2 = D_z \cdot \gamma_{sub} + H \cdot \gamma_t \quad (10)$$

$$P_3 = (H - h_w) \cdot \gamma_t + h_w \cdot \gamma_{sub} + D_z \gamma_{sub} \quad (11)$$

여기서, P_2 : 해수면을 고려하지 않은 수정성토하중

P_3 : 해수면을 고려한 수정성토하중

4.1 제안요소 평가에 따른 기존제안식의 재평가

본 절에서는 기존의 제안식들에 상기의 영향인자를 고려한 치환심도 계산식을 제안하였다. 먼저, Terzaghi (1943)의 지지력공식 식 (4)에 점착력증가율 식 (9)를 고려하면 극한지지력 산정식은 다음과 같다.

$$q_u = (c_0 + \alpha_1 D_z) N_c + D_z \gamma'_c \quad (12)$$

Terzaghi의 지지력공식을 이용한 강제치환 심도 예측에 해수면의 고려여부에 따른 수정성토하중 식 (10)과 식 (11)을 식 (12)에 대입하여 치환심도(D_z)를 유도하면 식 (13)과 식 (14)와 같이 된다.

$$D_z = \frac{H \cdot \gamma_t - N_c \cdot c_0}{\alpha_1 \cdot N_c + \gamma_c' - \gamma_{sub}} \quad (13)$$

$$D_z = \frac{(H - h_w)\gamma_t + h_w \cdot \gamma_{sub} - c_0 N_c}{\alpha_1 \cdot N_c + \gamma_c' - \gamma_{sub}} \quad (14)$$

식 (5)의 Timoshenko & Goodier(1951)의 공식에 Terzaghi의 극한지지력 공식을 적용하여, 허용지지력을 구하면 다음과 같다.

$$* q_a = \frac{q_u}{F_s} = \frac{(c_0 + \alpha_1 D_z) N_c + \gamma_c' D_z}{F_s} \quad (15)$$

기존제안식 (5)에 식 (15)를 대입하고, 성토하중계산에 있어 해수면의 영향을 고려한 식 (11)을 적용하여 치환심도(D_z)를 구하면 식 (16)과 같다.

$$D_z = \frac{F_s \gamma_t (H - h_w) + h_w \gamma_{sub} - c_0 N_c}{F_s \left(\frac{7}{6} \gamma_c' - \gamma_{sub} \right) N_c \alpha_1 + \gamma_c'} \quad (16)$$

해수면의 영향을 고려하지 않는 경우, 치환심도 추정식은 식 (17)과 같다.

$$D_z = \frac{F_s \gamma_t H - c_0 N_c}{F_s \left(\frac{7}{6} \gamma_c' - \gamma_{sub} \right) + \alpha_1 N_c + \gamma_c'} \quad (17)$$

Yasuhara & Tsukamoto(1982)의 제안식 (6)에 용기부와 원지반의 단위중량은 동일하다고 가정하여 해수면의 영향과 원지반의 강도증가율을 고려한 치환심도(D_z)는 식 (18)과 같다.

$$D_z = \frac{(H - h_w)\gamma_t + h_w \gamma_{sub} - 5.3c_0}{\frac{7}{6} \gamma_c' - \gamma_{sub} + 5.3\alpha_1} \quad (18)$$

또한, 해수면의 영향이 성토하중에 미치지 않는 경우, 수정성토하중(P_2)을 적용하면 치환심도(D_z)는 다음과 같이 정리된다.

$$D_z = \frac{\gamma_t H - 5.3c_0}{\frac{7}{6} \gamma_c' + 5.3\alpha_1 - \gamma_{sub}} \quad (19)$$

Fellenius(1964)의 식 (7)에서 $q_0 = 0$ 이라 가정하고, $q_a = q_{ult} / F_s$ 에 Terzaghi의 극한지지력 공식을 적용하여, 이를 다시 식 (8)에 대입하여 치환심도(D_z)의 항으로 정리하면,

$$AD_z^2 + BD_z + C = 0 \quad (20)$$

이 된다. 여기서,

$$A = \frac{2}{\sqrt{3}} (\alpha_1 N_c + \gamma_c)$$

$$B = B_0 (\alpha_1 N_c + \gamma_c) + \frac{2}{\sqrt{3}} c_0 N_c$$

$$C = B_0 (c_0 N_c - F_s \cdot \gamma_t \cdot H) \text{ 이다.}$$

식 (7)에서 성토하중($\gamma_t \cdot H$)에 해수면을 고려하여 정리하여 분할하고, 점성토지반의 강도증가율 α_1 을 D_z 에 대해 정리하면 식 (20)의 계수들은 식 (21)과 같이 변화된다.

$$A = \frac{2}{\sqrt{3}} (\alpha_1 N_c + \gamma_c)$$

$$B = B_0 (\alpha_1 N_c + \gamma_c) + \frac{2}{\sqrt{3}} c_0 N_c$$

$$C = B_0 [c_0 N_c - F_s \{ (H - h_w)\gamma_t + h_w \gamma_{sub} \}] \quad (21)$$

치환심도 산정에 있어서 해수면을 고려하지 않을 경우에는 식 (21)의 C항을 다음과 같이 정리하여 적용할 수 있다.

$$C = B_0 \{ c_0 N_c - F_s (H \cdot \gamma_t) \} \quad (22)$$

식 (21)의 정의를 식 (20)에 대입하여, 그 해를 구하면 치환심도 예측식은 식 (23)과 같다.

$$D_z = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (23)$$

5. 수정제안식 검토 및 예측심도 산정을 위한 경험식 제안

5.1 기존식과 수정제안식의 비교

그림 5~그림 8은 Terzaghi(1943), Timoshenko & Goodier(1951), Yasuhara & Tsukamoto(1982), Fellenius(1964)의 공식에 지반의 강도증가와 해수면 고려여부에

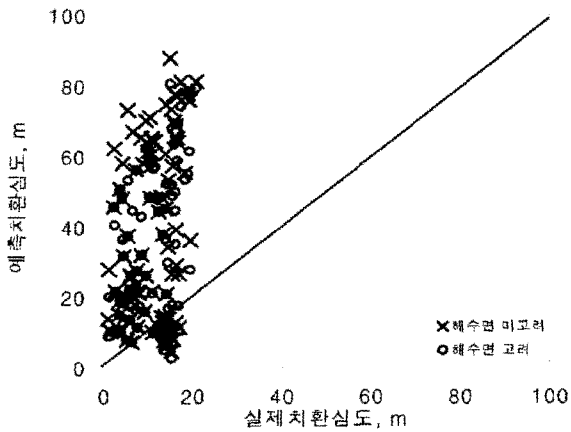


그림 5. Terzaghi & Peck 수정식을 이용한 치환심도 예측

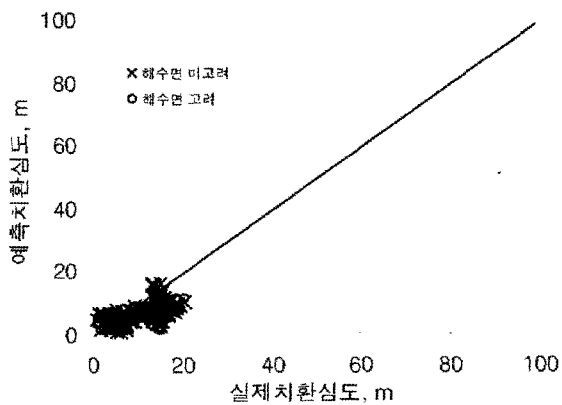


그림 6. Timoshenko & Goodier 수정식을 이용한 치환심도 예측

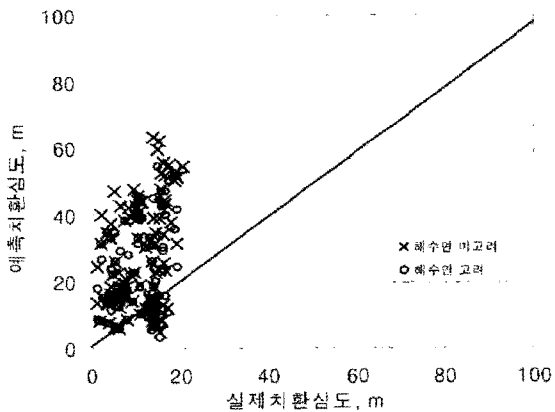


그림 7. Yasuhara & Tsukamoto 수정식을 이용한 치환심도 예측

결과와 지반조사를 통해 확인된 실제치환심도이다.

7은 각각 Terzaghi(1943)와 Yasuhara 공식을 이용한 예측심도로, 기존연구 같이 과대평가하고 있는 것으로 실제치환심도보다 약 5배정도

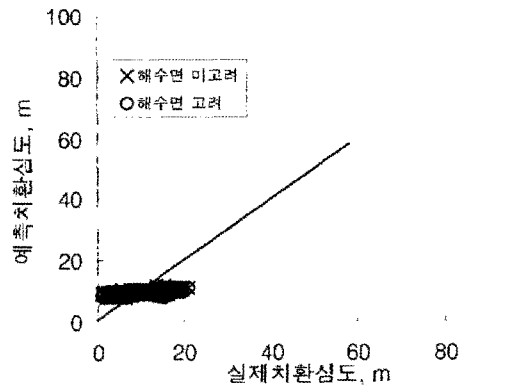


그림 8. Fellenius 수정식을 이용한 치환심도 예측

그림 6은 Timoshenko & Goodier(1951)의 공식을 바탕으로 해수면의 영향과 지반의 강도증가율을 고려하여 제안한 수정식을 이용하여 치환심도를 예측한 결과이다. 성토하중 계산시 해수면 고려여부에 따라 예측결과는 상반된 결과를 나타냈으며, 해수면을 고려하지 않았을 경우 예측값이 실제치환심도와 근접한 경향도 보였으나 전체적으로 결과의 분산이 크며, 과소 평가되는 것으로 나타났다.

Fellenius(1964)의 공식을 수정제안한 식 (23)을 이용한 치환심도 예측결과는 그림 8과 같다. 그림에서 보는 바와 같이 성토하중 적용에 있어 해수면의 고려여부는 크게 나타나지 않았으며, 예측결과는 실측결과에 크게 미치지 못하였고, 예측심도가 일정하게 나오는 경향을 알 수 있다. 이는 성토하중 계산시 원지반 표층에서 제체 상부의 높이까지만을 고려함으로써, 원지반 표고의 기복이 심하지 않고 제체의 계획고가 큰 변화를 나타내지 않을 경우에 이와 같은 결과를 나타내는 것으로 볼 수 있다.

5.2 수정지지력계수(N_c) 산정

Terzaghi(1943)의 극한지지력 공식에 지반조사 결과를 바탕으로 Boussinesq(1866)의 성토하중 계산법을 기본으로 제안한 수정성토하중 계산법 식 (18)을 이용하여, $q_u = P_3$ 관계를 분석하였다.

지반조사 결과를 바탕으로 수정성토하중을 산정하고, Terzaghi & Peck(1943)의 극한지지력 공식에 점착력 증가율을 고려한 식 (12)에 지지력계수를 각각 4.4~6.6까지 적용하여 극한지지력과 수정성토하중 관계의 기울기가 1이 될 경우를 수정지지력계수라 하였다. 광양만 지역의 수정지지력을 정의하기 위해 지지력 계수에 따

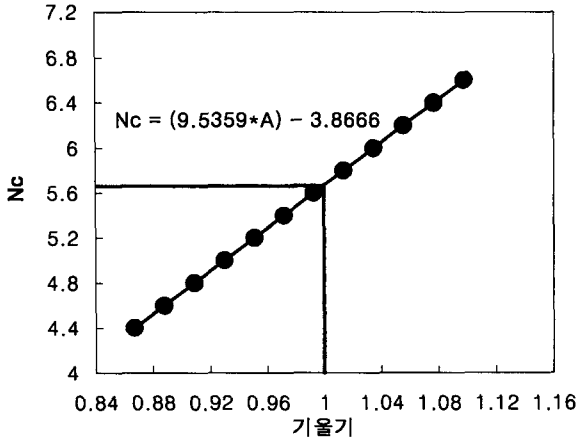


그림 9. 광양만 지역의 지지력계수 산정결과

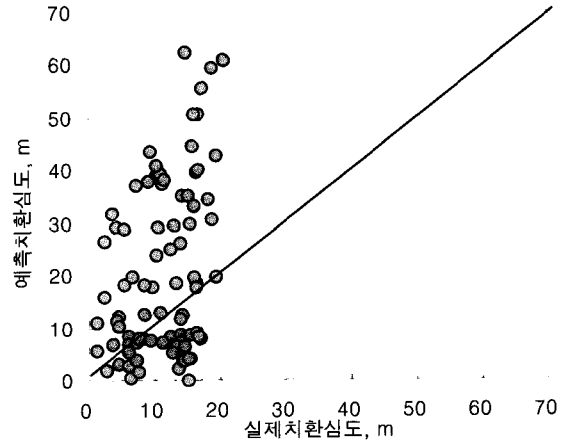


그림 11. 관계식을 이용한 치환심도 예측결과

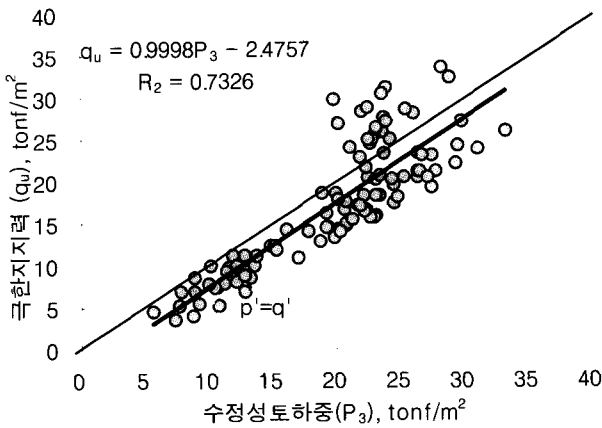


그림 10. 수정성토하중(P₃)과 수정지지력계수를 적용한 극한지지력 관계

른 두 관계로 그림 9와 같이 도시하여 회귀분석 한 결과, 기울기가 1이 될 때의 지지력계수는 계수(Nc)=5.667로 Terzaghi & Peck(1943)이 제안한 점성토 지반의 지지력 계수(Nc)=5.7과 유사한 결과를 나타냈다.

그림 10은 수정지지력계수 Nc를 이용하여 계산한 극한지지력(q_u)과 수정축조하중(P_3)과의 관계이다.

지지력공식을 이용한 치환심도 메커니즘은 성토하중과 극한지지력이 일치할 때를 치환심도로 정의하고 있다. 따라서 수정지지력계수를 적용하여 회귀분석한 결과에 B(2.4757)계수를 보정함으로써 두 관계를 비례관계로 만들 수 있게 된다. 이를 이용하여 극한지지력-수정성토하중과의 관계식을 나타내면 식 (23)~식 (24)와 같고, 이를 다시 치환심도(D_z)의 향으로 정리하면 식 (25)와 같이 유도된다.

식 (25)을 이용하여 치환심도를 예측한 결과를 그림 11에 도시하였다. 대상지반의 지지력계수를 새로 산정하여 $q_u = P_3$ 의 관계로 만들어 적용하였음에도 불구하고

고 실제치환심도와 근접하지 못한 결과를 나타냈다. 이러한 결과로 미루어볼 때 지지력공식을 이용한 치환심도 예측방법은 강제치환의 심도산정에 있어서 그 한계가 있다고 사료되며, 본 연구대상 지반에서의 적용성을 고려해볼 때 상관관계를 이용한 경험적인 예측방법이 보다 효율적인 방법이라 판단된다.

$$q_u = p - B \quad (23)$$

$$c_0 \cdot 5.667 + \alpha_1 D_z \cdot 5.667 + D_z \cdot \gamma'_c = (H - h_w) \gamma_t + h_w \gamma_{sub} + D_z \gamma_{sub} - 2.4757 \quad (24)$$

$$D_z = \frac{(H - h_w) \cdot \gamma_t + h_w \cdot \gamma_{sub} - c_0 \cdot 5.667 - 2.4757}{\alpha_1 \cdot 5.667 + \gamma'_c - \gamma_{sub}} \quad (25)$$

5.3 상관관계 분석 및 경험식 제안

그림 12는 축조고(H)와 치환심도의 관계, 그림 13은 수정축조고($H+D_z$)와 치환심도의 관계를 나타낸 것이다. 그림 13의 수정축조고와 치환심도의 관계는 그림 12

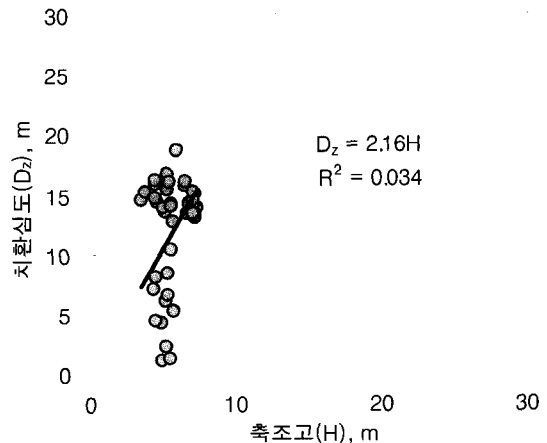


그림 12. 축조고(H)-치환심도(D_z)상관관계

나 축조고(H)와 치환심도(D₂)와의 관계와 대조적으로 분산이 매우 작은 직선적인 관계를 보이고 있다. 즉, 강제치환 시공시 치환심도는 축조고(H)와의 관계는 무관하고 수정축조고(H+D₂)와 밀접한 상호관계를 가지고 있는 것으로 나타났다. 공법의 특성상 성토재료가 연속적으로 투기되어 하부로 밀려들어감에 따라 원지반 표층과 제체 상부까지의 높이인 축조고(H)는 일정한 반면에 치환심도(D₂)는 축조고(H)와 관계없이 증가하므로 축조고는 치환심도와는 무관하다. 따라서 제체상부부터 치환층 하부까지의 높이를 적용하여 치환심도 산정에 적용하는 것이 타당하다는 것을 보여주고 있다.

그림 14는 수정축조하중(P₃)과 치환심도(D₂)와의 상관관계를 나타낸 것이다. 수정축조하중(P₃)은 앞서 설명한 수정축조고(H+D₂)와 같이 제체 하부 치환층까지의 성토하중으로 그림에서 보는바와 같이 치환심도와 수정축조하중(P₃)은 서로 직선적인 상호관계를 가지고 있는 것으로 나타났다.

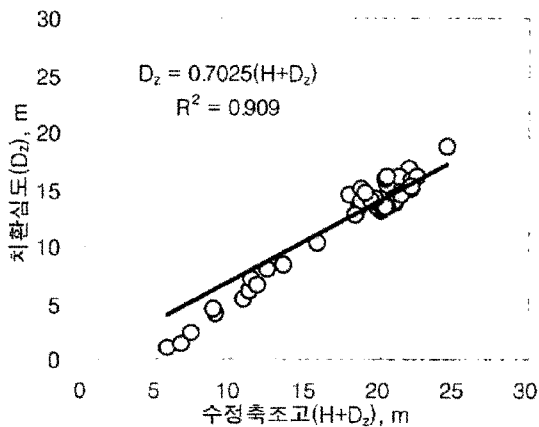
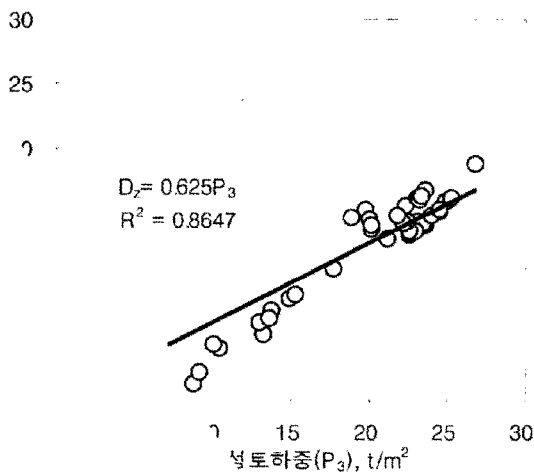


그림 13. 수정축조고(H+D₂)-치환심도(D₂) 상관관계



-치환심도(D₂)의 상관관계

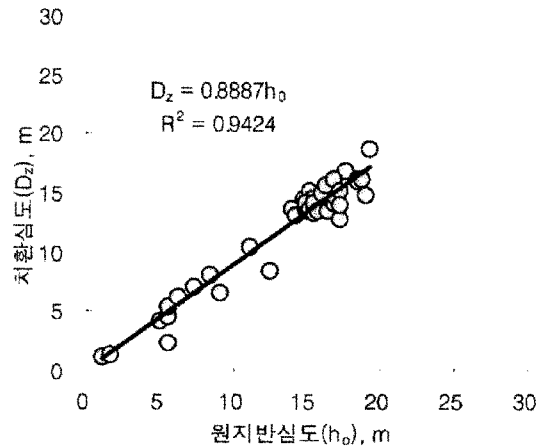


그림 15. 원지반심도(h₀)-치환심도(D₂)상관관계

그림 15는 원지반심도(h₀)와 치환심도(D₂)의 상관관계를 나타낸 그림으로 연약층 심도가 깊을수록 치환심도도 증가하며, 연약층심도에 따른 치환심도는 비례관계에 있음을 보여주고 있다.

수정축조하중, 수정축조고와 치환심도의 상호관계에서는 좋은 결과를 나타냈지만, 두 방법 모두 축조하중과 축조고 산정시 실제치환심도(D₂)가 포함된 결과로 유도된 예측심도이다. 따라서 실제치환심도를 알지 못할 경우에 치환심도 예측이 불가능한 모순을 가지고 있어, 원지반심도와 치환심도의 상관관계를 적용하여 치환심도를 예측하였다.

5.4 경험식을 이용한 치환심도 예측

여천, 울춘 지역의 원지반심도와 치환심도의 관계를 식 (26)과 같이 제안하였으며, 제안식을 이용해 광양지역의 치환심도를 예측한 결과 그림 16과 같이 나타났다. 그림 16에서 보는바와 같이 관계식을 이용한 치환심도

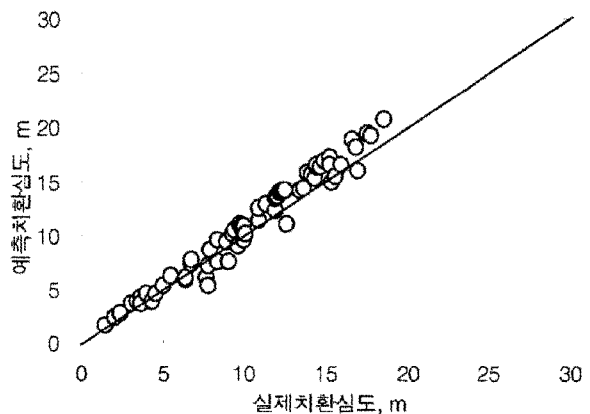


그림 16. 제안식을 이용한 광양지역 치환심도 예측결과

예측은 원지반심도가 깊을 경우 예측치환심도는 다소 과대평가되는 경향을 나타내었지만, 전반적으로 실제치환심도와 잘 일치하고 있는 것으로 나타나 광양지역에서의 적용에 무리가 없다고 판단된다.

$$D_{z(N)} = 0.8887 \times h_0 \quad (26)$$

6. 요약 및 결론

본 연구에서는 광양만지역의 3개 현장의 강제 치환 시공사례를 바탕으로 기존에 치환심도산정을 위해 제안된 기법들을 응용·적용하여 현장조사를 통해 확인된 치환심도와 비교분석을 실시하였으며, 강제치환 시공시 각각의 영향인자에 따른 상관관계를 분석한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 본 연구대상지역의 시공사례를 바탕으로 기존의 각 연구자들이 제안한 경험적인 치환심도 예측기법과 지지력공식을 이용한 예측 기법을 이용하여 치환심도를 예측하여, 현장 조사를 통해 확인된 치환심도와 비교 분석한 결과 기존의 제안된 예측기법은 실제 치환 심도와 큰 차이를 보여 본 연구대상지반에서는 적합한 기법이 되지 못했다.
- (2) 수정성토하중(P_3)-극한지지력 관계를 통해 광양만 지역의 지지력계수는 5.667로 산정되었다. 이는 기존의 Terzaghi & Peck(1943)이 제안한 점성토지반의 지지력계수(N_c) 5.7과 유사한 결과를 보였다.
- (3) Terzaghi & Peck(1943)의 지지력공식을 바탕으로 수정 지지력계수를 이용하여 치환심도를 예측한 결과 실제치환심도와 큰 차이를 보였다. 이는 앞서 실시한 지지력공식을 이용한 예측과 유사한 결과로 강제치환심도 산정에 있어 지지력공식을 이용한 치환심도 예측은 부적절하며, 각 지역의 특성을 고려한 경험적인 예측기법이 타당하다고 판단된다.
- (4) 상관관계 분석을 통해 강제치환 시공시 축조고(H)는 치환심도와 상호관계를 찾아볼 수 없으며, 수정 축조고와 수정성토하중(P_3)은 치환심도와의 관계는 직선적인 상호관계를 보였다.
- (5) 울촌, 여천지역의 상관관계 분석을 통해 연약층심

도-치환심도의 관계에서 원지반심도를 고려한 경험식을 얻을 수 있었다. 제안된 경험식을 이용하여 광양지역에 적용한 결과 예측결과는 실제치환심도와 매우 근접한 결과를 얻었다.

본 연구는 특정지역에 국한되어 실시된 연구로서 토질특성과 지역적 특성이 다른 지역에서 검증되지 않은 기법이다. 따라서 국내 토질조건에 적합한 강제치환심도예측기법을 개발을 위해서는 향후 충분한 자료의 축적과 지속적인 연구가 진행되어야 될 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. 농어촌진흥공사 (1984), 방조제 단면에 관한 연구, pp.195-209.
2. ㈜동아건설티트 (1997. 11), 울촌 제1지방산단 조성공사 지반조사 종합보고서(현대부지).
3. ㈜동아건설티트 (1998. 9), 여천국가 공업단지 확장단지 제3공구 조성공사(치환량 확인조사)지질조사 보고서.
4. ㈜동아건설티트 (1999. 11), 여천국가 산업단지 확장단지 제3공구 조성공사(치환량 확인조사)지질보사 보고서.
5. ㈜동아건설티트 (1999. 12a), 울촌 제1지방산단 조성공사 현대부지 지반조사 종합 보고서.
6. ㈜동아건설티트 (1999. 12b), 중소기업부지 지반조사 종합보고서.
7. 신현영 (1999), 강제치환 심도산정에 영향을 미치는 인자에 관한 연구, 석사학위 논문, 중앙대학교.
8. 이승호 (1992), 토질구조물 축조에 의한 연약 점토지반의 변형에 관한 연구, 박사학위 논문, 한양대학교.
9. 이양희 (1982), 강제치환 공법에 의한 변위 특성, 석사학위 논문, 동국대학교.
10. 이종영 (2002), 연약지반상에 호안 축조시 강제치환 심도산정에 관한 연구, 석사학위 논문, 중앙대학교.
11. 홍원표, 한중근, 이종영 (2002), 지지력 공식을 이용한 강제치환심도산정(사례연구), 대한토목학회 학술발표회 논문집.
12. 전라남도 (1995. 2), 울촌 제1지방 공업단지 조성공사 토질조사 보고서.
13. 삼중엔지니어링 (1998. 6), 여천국가산업단지 확장단지 제2공구 조성공사 중 확인보링 및 토질조사 보고서.
14. Terzaghi, K. (1943), *Theoretical Soil Mechanics*, John Wiley & Sons, New York, pp.265-296.
15. Timoshenko S.P., Goodier J.N. (1951), *Theory of Elasticity*, McGraw-Hill, New York.
16. Weber Jr. E. G. (1952), Construction of a fill by a mud displacement method, Vol.41, *Highway research proceeding*, pp.591-610.
17. Yashuhara. K. and Tsukamoto, Y. (1982), "A rapid banking method using the resinous mesh on soft reclaimed land", *2nd International Conference on Geotextiles*, Las Vegas, U.S.A, pp.635-640.

(접수일자 2004. 9. 22, 심사완료일 2004. 11. 29)