한국지반신소재학회논문집 제20권 1호 2021년 3월 pp. 21 ~ 34
J. Korean Geosynthetics Society Vol.20 No.1 March 2021 pp. 21 ~ 34

DOI: https://doi.org/10.12814/jkgss.2021.20.1.021
ISSN: 2508-2876(Print) ISSN: 2287-9528(Online)

점토와 모래가 포함된 다층지반의 경험토압 산정방법에 관한 연구

The Calculation Method of Apparent Earth Pressure in Multi-Layered Ground with Clay and Sand

김병일[1]*, 홍강한[2], 김진해[3], 한상재[4]
Byung-Il Kim[1]*, Kang-Han Hong[2], Jin-Hae Kim[3], Sang-Jae Han[4]

[1]*Member, Research Director, Expert Group for Earth & Environment, #1020, 53 Seonggogae-ro, Uiwang-si, Gyeonggi-do 16006, Republic of Korea*
[2]*Nonmember, Chief, Expert Group for Earth & Environment, #1020, 53 Seonggogae-ro, Uiwang-si, Gyeonggi-do 16006, Republic of Korea*
[3]*Member, Section Chief, Expert Group for Earth & Environment, #1020, 53 Seonggogae-ro, Uiwang-si, Gyeonggi-do 16006, Republic of Korea*
[4]*Member, President, Expert Group for Earth & Environment, #1020, 53 Seonggogae-ro, Uiwang-si, Gyeonggi-do 16006, Republic of Korea*

ABSTRACT

In this study, to solve a problem that cannot consider the contribution effect of each layers when the apparent earth pressure in homogeneous ground is applied to multi-layered ground, the measured earth pressures at World were investigated and analyzed. It has been confirmed that the apparent earth pressure in mulit-layered ground is different from single ground and that the extra layer's contribution to the earth pressure cannot be considered. The conventional method of calculating the apparent earth pressure for single ground was extended to mulit-layered ground, and proposed and verified the applicable method for both single and mulit-layered ground. The proposed methods predicted the earth pressure closer to the measurements at the excavation depth of 0.1Z/H or below, and the prediction reliability was evaluated to be better than the conventional method. Among the proposed methods, the method of considering the area ratio of the active failure has a geotechnical validity and predicts the most similar results to the actual earth pressure. To confirm the applicability of the proposed methods, it was presented by comparing and analyzing the results of the proposed methods with the conventional method for the actual case.

요 지

단일지반에서의 경험토압을 다층지반에 적용할 때 각 지층이 토압에 기여하는 효과를 고려할 수 없는 문제 등을 해결하고자 국내외에서 지반굴착시 측정된 토압을 조사하고 분석하였다. 다층지반의 토압은 단일지반의 경험토압과 상이하고, 대표 토질이 아닌 지층의 토압 기여 효과를 고려할 수 없음을 확인하였다. 본 연구에서는 기존의 단일지반에 대한 경험토압 산정방법을 다층지반까지 확장하여 단일지반과 다층지반 모두 적용 가능한 방법을 제안하고 검증하였다. 제안방법은 굴착심도 0.1Z/H 이하에서 실측값에 더 근접한 토압을 예측하는 등 기존 단일지반의 토압보다 예측 신뢰도가 우수한 것으로 평가되었다. 제안방법 중 주동상태에서의 파괴면적비를 고려하는 방법이 지반공학적 타당성을 갖추고도 실측토압과 가장 유사한 결과를 도출하였다. 또한, 제안방법의 적용성을 확인하고자 실제 설계사례에 대해 제안방법과 기존 방법의 설계 결과를 비교 분석하여 제시하였다.

Keywords **:** Apparent earth pressure, Multi-layered ground, Active failure, Thickness

1. 서 론

일반적인 흙막이 공법은 H-Pile+토류판, Sheet Pile, S.C.W, C.I.P 및 D-Wall 공법 등이 있다. 이때, 지하수위의 영향이 없는 곳에서는 경제성이 우수한 H-Pile+토류판

Received *21 Dec. 2020,* ***Revised*** *24 Feb. 2021,* ***Accepted*** *8 Mar. 2021*
****Corresponding author***
Tel: +82-31-5177-5117; Fax: +82-31-5177-5115
E-mail address: geokbi@ege.co.kr (Byung-Il Kim)

공법, 해안 인접 매립지나 지하수위의 영향이 있는 경우 Sheet Pile 공법을 보편적으로 적용하고 있다. Sheet Pile 공법은 배면의 토압 및 수압에 저항하는 흙막이 벽체로 타 공법에 비해 차수성이 양호하기 때문에 하천과 해안에 인접한 굴착 공사에 많이 적용되고 있다. 그러나, 흙막이 벽체로써의 두 공법은 지반 굴착시 변형되기 쉽다. 이와 같은 변형되기 쉬운 연성구조물에 작용하는 횡방향 토압(단면 결정용)은 벽체의 변형을 고려한 토압을 적용해야 하며, 토압분포가 복잡하여 이론적인 토압보다는 경험적인 토압을 적용한다(Hong, 2018).

일반적인 경험토압은 균질한 단일지반에 대한 실측값을 이용하여 제안된 경우로 다층지반에 적용할 경우 주의가 필요하다. 다층지반에 대하여 실측된 계측결과와 Peck (1969) 토압을 비교하면 다층 토사지반의 경우 실측토압이 Peck(1969)토압 대비 약 60%~75%, 암반층을 포함한 경우 약 25~55%로 나타나 작게 작용함을 알 수 있다. 이와 같은 이유로 가설흙막이 설계기준(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2020)에서는 암반층을 포함하는 대심도 다층지반 굴착 시 토사지반에서의 경험토압을 적용하면 실제보다 과대한 토압이 산정될 수 있으므로 토압산정에 신중을 기해야 한다고 제시하고 있다.

다층지반에서의 경험토압은 설계자의 공학적 판단 또는 층두께 비율에 따른 등가의 단일지반으로 간주하여 단일지반 토압을 적용한다. 그러나, 대표 토압분포를 적용할 때 모래 지반, 점토 지반 등을 구분하는 방법을 명확하게 제시한 기준은 없다. 또한, 모래와 점토의 비율이 1:1인 경우 실제 토압분포는 하나이나 2개의 경험토압 분포가 산정되고, 둘 중 어떤 토압분포를 적용해야 하는지 등의 문제가 있다. 모래가 51%인 경우 또는 점토가 51%인 경우 잔여 49%의 토질에서도 주동파괴면이 형성됨에도 불구하고 이에 따른 토압 기여효과를 고려하지 못하는 문제도 발생한다.

이상과 같은 문제를 해결하고자 본 연구에서는 기존의 단일지반에 대한 각각의 경험토압 산정방법을 다층지반의 경험토압 산정방법으로 확장하여 잔여 지층의 토압기여효과를 고려할 수 있고, 단일지반과 다층지반 모두 적용가능한 방법을 제안하고 검증하였다. 또한, 적용성을 평가하고자 실제 설계사례에 대한 수치해석 등을 수행하여 기존 방법과 비교 분석하였다.

2. 사례 연구

2.1 단일지반

단일지반(점토, 모래)에 대한 경험토압은 수많은 사례를 통해 다양한 방법이 제안되어 있지만, 주로 Peck(1969)의 경험토압을 적용하고 있다. Peck(1969)의 경험토압은 그 동안의 적용 실적과 검증이 전 세계적으로 이루어졌기 때문이다. Fig. 1은 기존 Peck(1969)의 경험토압 적용 사례와 실측 결과를 제시한 것이다. 모래 지반에 대한 Fig. 1(a)의 경우 최소 0.02에서 최대 0.33, 평균 0.16의 토압비율을 나타내어 Peck(1969)의 토압에 비해 작고 최대값이 Rankine의 주동토압(K_a=0.333)과 유사하게 측정된 사례가 있었다. 연약점토에 대한 Fig. 1(b)의 경우 최소 0.05에서 최대 0.98, 평균 0.39의 토압비율을 나타내어 최대 연직응력과 유사 즉, $\phi = 0$일 때의 토압계수가 "1.0"에 근접한 경우도 있었지만, 대부분의 토압은 토압비율 0.90보다는 작은 것으로 나타났다. 중간점토에 대한 Fig. 1(c)의 경우 최소 0.02에서 최대 0.36, 평균 0.20의 토압비율을 나타내어 기존 Peck(1969) 토압보다 작게 나타났고, 견고점토에 대한 경험토압과 더 유사한 것으로 확인되었다. 견고점토에 대한 Fig. 1(d)의 경우 최소 0.03에서 최대 0.63, 평균 0.27의 토압비율을 나타내어 기존 Peck(1969)의 제안 값과 유사함을 확인할 수 있었다.

2.2 다층지반

다층지반에서의 토압 측정사례를 조사하였고, 그 결과는 다음과 같다. Ng(1998)의 경우 견고한 점토가 우세한 지반의 굴착에서 실측값이 Peck(1969)의 최소값과 유사하고, Lee and Jeon(1993)은 계측된 토압 분포중 최대값이 Peck(1969)의 경험토압(모래)과 유사하고, 전체적으로는 Peck(1969) 토압의 70%~80%에 해당함을 제시하였다. Shim(2000)은 Peck(1969) 토압(점토)의 최대값보다 약간 크지만 유사함을 제시하였다. 그 외 Chae and Moon(1994), Jeong and Kim(1997), Yoo and Kim(2000) 등의 연구 결과 다층 토사지반의 경우 실측토압은 Peck(1969) 토압 대비 60%~75%, 암반층을 포함한 경우 26~54%로 나타나 Peck(1969) 토압적용시 실제 보다 과대한 토압을 적용할 수 있음을 알 수 있었다. 이와 다르게 Hong(2018)의 경우 국내 서해안내 연약점성토가 우세한 다층지반에서는 기존

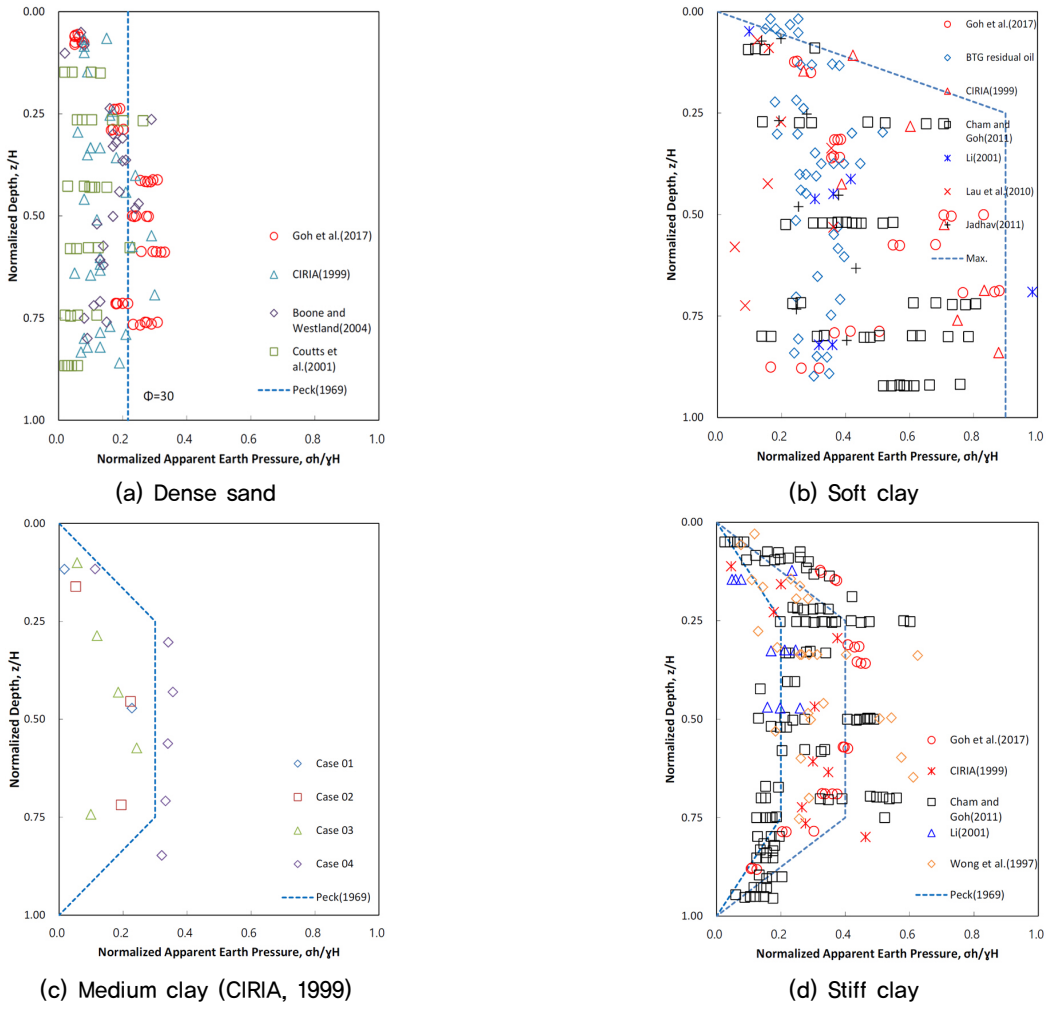


Fig. 1. Apparent earth pressure in homogeneous soils

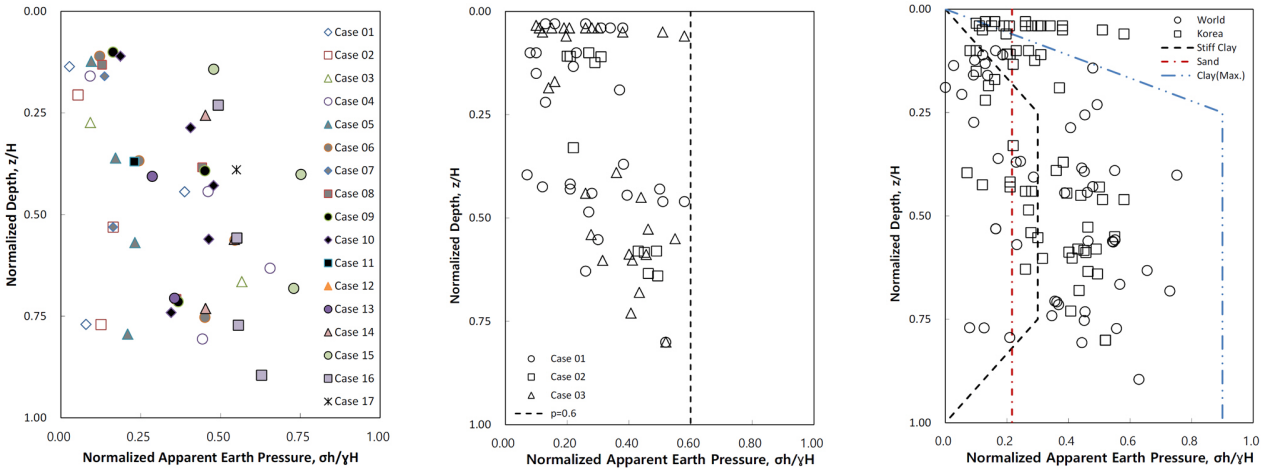


Fig. 2. Apparent earth pressures in multi-layered ground with cohesive-sandy soils

의 경험토압보다 큰 토압(연직압력의 45~60%)이 실측되었으므로 연약점성토 지반에서는 토압 적용에 주의가 요구됨을 제시한 바 있다.

Fig. 2에는 점성토와 사질토가 혼재되어 있는 국내외 다층지반에서의 토압 실측 사례를 제시한 것으로 Fig. 2(a)는 국외, Fig. 2(b)는 국내 사례를 나타냈다. 다층지반의 토압분포는 단일지반의 토압분포와 상이함을 국내외 전체를 도시한 Fig. 2(c)로부터 확인할 수 있었다. Fig. 2(c)에

는 모래, 연약점토 및 견고점토에 대한 Peck(1969) 토압을 함께 도시하였다. 상부 0.1Z/H 이하에서는 실측토압이 Peck(1969)의 단일지반 토압보다 큰 경우가 있었고, 중앙 0.5Z/H 부근에서는 모래와 견고점토보다 크고 연약점토보다는 작은 경우가 많았다.

3. 다층지반에서의 경험토압 산정

3.1 기존 경험토압 산정방법

국내외 흙막이 가시설 설계시 다층지반에서의 경험토압은 등가의 단일지반으로 변환된 지반에 대한 토압을 적용한다. 그러나, 대표 토압분포를 적용할 때 대표지반으로 모래, 점토, 암반 등을 구분할 수 있는 방법을 명확하게 제시한 기준은 없다. 기존 사례 등을 참고하면 굴착 구간 내 점성토와 사질토가 층을 이루고 있는 경우 점성토의 층 두께 합계가 지표면에서 가상 지지점까지의 두께에 대하여 50% 이상인 경우는 점토, 50% 미만인 경우는 모래로 고려할 수 있고, 지반이 점토로 판정된 경우는 N값이 5이하(S_u 25kPa 이하)인 층 두께 합계가 50% 이상인 경우를 연약한 점토, 50% 미만을 단단한 점토로 간주한다(Hwang, 2010). 만약, 풍화암층을 포함한 하부 암반층의 두께가 전체 굴착깊이의 50% 이상이거나 풍화암층을 제외시키고 연암층 이하의 암반층이 전체 굴착깊이의 30% 이상이 되는 지반을 암반지반으로 구분하기도 한다(Hong, 2018).

이상과 같이 층두께에 따른 대표 토질을 결정한 후, 등가의 지반정수를 산정하게 되는데 먼저 등가의 점토 지반으로의 환산은 다음과 같다.

이질의 점토층으로 이루어진 경우와 점토층 위에 모래층이 있는 경우는 ϕ=0 개념을 적용하는데, 흙의 점착력과 단위중량은 평균점착력, C_{av}와 평균단위중량, γ_{av}를 적용한다. 이질의 점토층이 다층으로 있는 경우는 다음과 같다(층두께 가중평균법; Peck, 1943).

$$C_{av} = \frac{1}{H}(H_1C_1 + H_2C_2 + \cdot\cdot\cdot + H_nC_n),$$
$$\gamma_{av} = \frac{1}{H}(\gamma_1H_1 + \gamma_2H_2 + \cdot\cdot\cdot + \gamma_nH_n) \quad (1)$$

여기서, H : 굴착깊이
C_n : n층의 점착력
γ_n : n층의 단위중량
H_n : n층의 두께

점토층 위에 모래층이 있는 경우 또는 모래층의 총 두께가 25% 이내인 경우는 다음과 같다(등가 비배수전단강도법; Peck, 1943).

$$C_{av} = \frac{1}{2H}[\gamma_sK_sH_s^2 \tan\phi_s + (H-H_s)nq_u],$$
$$\gamma_{av} = \frac{1}{H}[\gamma_sH_s + (H-H_s)\gamma_c] \quad (2)$$

여기서, γ_s : 모래의 단위중량, K_s : 모래층의 수평토압계수(≒1.0)
ϕ_s : 모래의 내부마찰각, H : 굴착깊이, H_s : 모래층의 두께, H_c : 점토층의 두께
q_u : 점토의 1축압축강도, γ_c : 점토의 단위중량
n : 점진파괴계수(0.50~1.00), 평균=0.75(점토의 크리프 특성, 굴착후 방치시간과 굴착에 있어서의 주의 정도에 따라 차등 적용)

두 번째로 등가의 모래 지반으로의 환산 방법은 다음과 같이 개별지반법과 평균지반법이 있다.

개별지반법은 지반정수가 다른 모래층이 다층으로 있는 경우에 각 층별 토압계수(마찰각) 및 단위중량을 고려하여 토압을 계산한다.

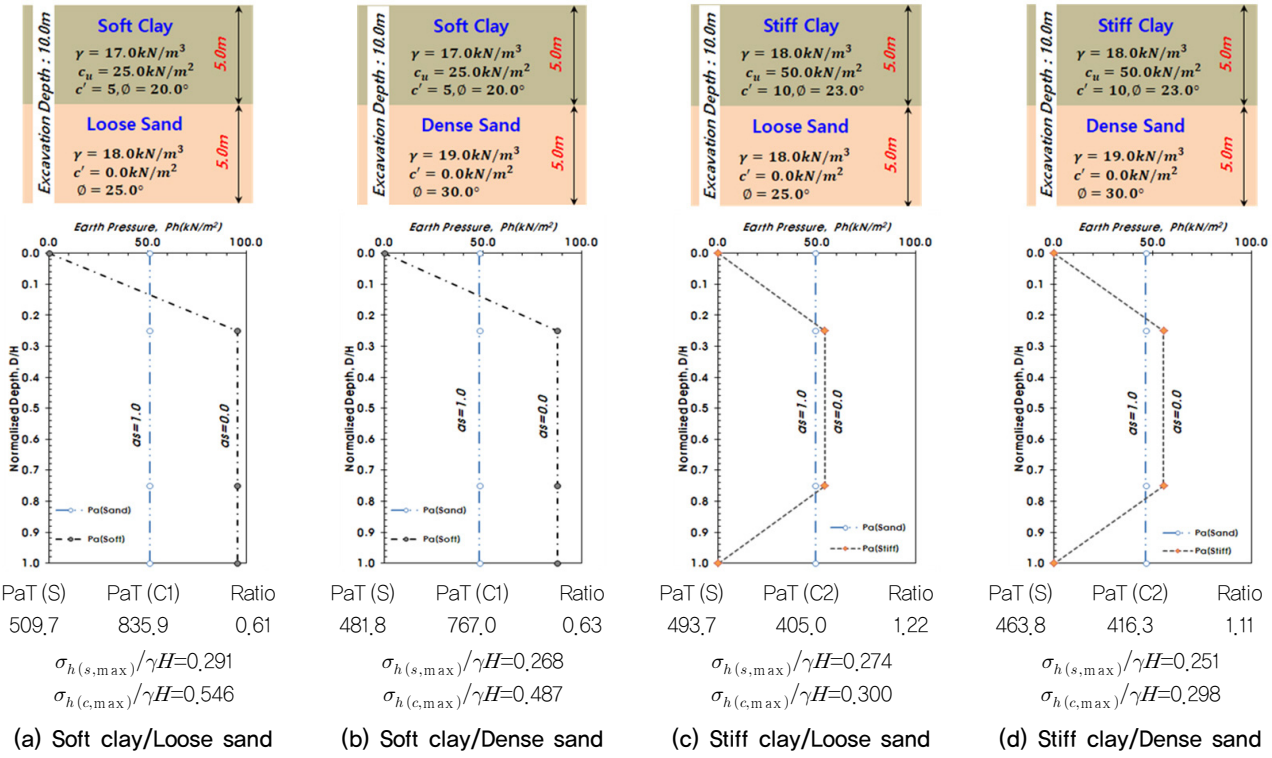
$$P_{a1} = a(K_{a1} \times \gamma_1 \times H_1),\ P_{a2} = a(K_{a2} \times \gamma_2 \times H_2),.....,$$
$$P_{an} = a(K_{an} \times \gamma_n \times H_n) \quad (3)$$

여기서, K_{an} : n층의 주동토압계수

평균지반법(등가지반법)은 구조물기초설계기준 해설(2018)에 따라 토압작용 깊이까지의 평균 토압계수와 평균 단위중량을 적용한다. 이때, 층두께 가중 평균법이 적용된다.

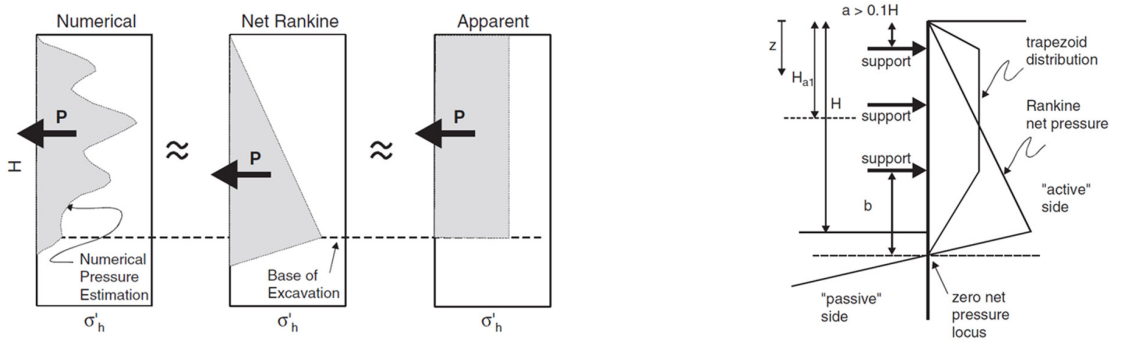
$$K_{a(av)} = \frac{K_{a1}H_1 + K_{a2}H_2 + \cdot\cdot + K_{an}H_n}{H_1 + H_2 + \cdot\cdot H_n},$$
$$\gamma_{av} = \frac{\gamma_1H_1 + \gamma_2H_2 + \cdot\cdot + \gamma_nH_n}{H_1 + H_2 + \cdot\cdot H_n} \quad (4)$$

이상에서 제시한 다양한 방법을 적용할 때 발생할 수 있는 문제점 등을 이하에 설명하였다. 먼저 Fig. 3은 모래와 점토의 비율이 1:1인 경우를 위의 방법으로 Peck(1969)



(a) Soft clay/Loose sand (b) Soft clay/Dense sand (c) Stiff clay/Loose sand (d) Stiff clay/Dense sand

Fig. 3. Apparent earth pressure in two-layered soils (Sand : Clay = 1 : 1)



(a) Total load Concept (b) Simplified Rankine "net" pressure

Fig. 4. Boone and Wetland method (2006)

의 경험토압을 계산한 것이다. 이때, 점토로의 변환은 식 (2), 모래로의 변환은 식 (4)를 적용하였다. 단, 식 (4)를 적용할 때, 점토의 층두께가 두터운 경우 비배수 토압계수(ϕ=0, K_a=1.0)를 적용하면 전체토압의 크기가 정지토압보다 크게 산정되는 오류가 발생됨을 본 연구에서 확인하고 이를 수정하고자 점토의 토압계수는 배수마찰각을 이용하여 산정하였다. Fig. 3에 제시된 바와 같이 모래와 점토가 동일할 경우 대표 토압분포는 모래(a_s =1.0) 또는 점토(a_s=0.0)에 대한 분포를 모두 적용할 수 있지만 전혀 다른 값을 산정하게 된다. 이는 그림 하단의 전체토압을 보면 모래와 점토의 토압비로부터 상이함을 정량적으로 확인할 수 있다. 추가적으로 하단에 제시된 $\sigma_h/\gamma H$ 값은 최대토압을 연직응력으로 나눈 하나의 측압계수를 의미하는데 각각 상이함을 재차 확인할 수 있다. 또 모래가 51%인 경우 또는 점토가 51%인 경우 49%의 토질에 대한 토압 기여효과를 고려하지 못하는 문제 역시 발생한다. 분명한 것은 49%의 토질에서 주동파괴면이 형성되고 쐐기 등 변화가 발생되기 때문에 이를 고려해야 한다는 것이다.

Boone and Wetland(2006)은 설계 시 경험토압에 따라 가시설 공사비가 크게 변화한다는 사실을 확인하고, 이를 해결하고자 Rankine의 주동토압(이론토압)과 경험토압을 일치시키는 방법을 Fig. 4와 같이 제안하였다. 본 방법은 초기 주동토압의 굴착단계별 하중전이를 고려한 것으로 전체 주동토압은 굴착에 의해서 변화되지 않는다는 개념

이다. 그러나 본 방법 역시 단일 모래 지반에서의 수치해석 결과와는 잘 일치하지만 점토와 다층지반에 대해서는 검증되거나 비교된 적은 없다.

3.2 경험토압 산정방법 제안

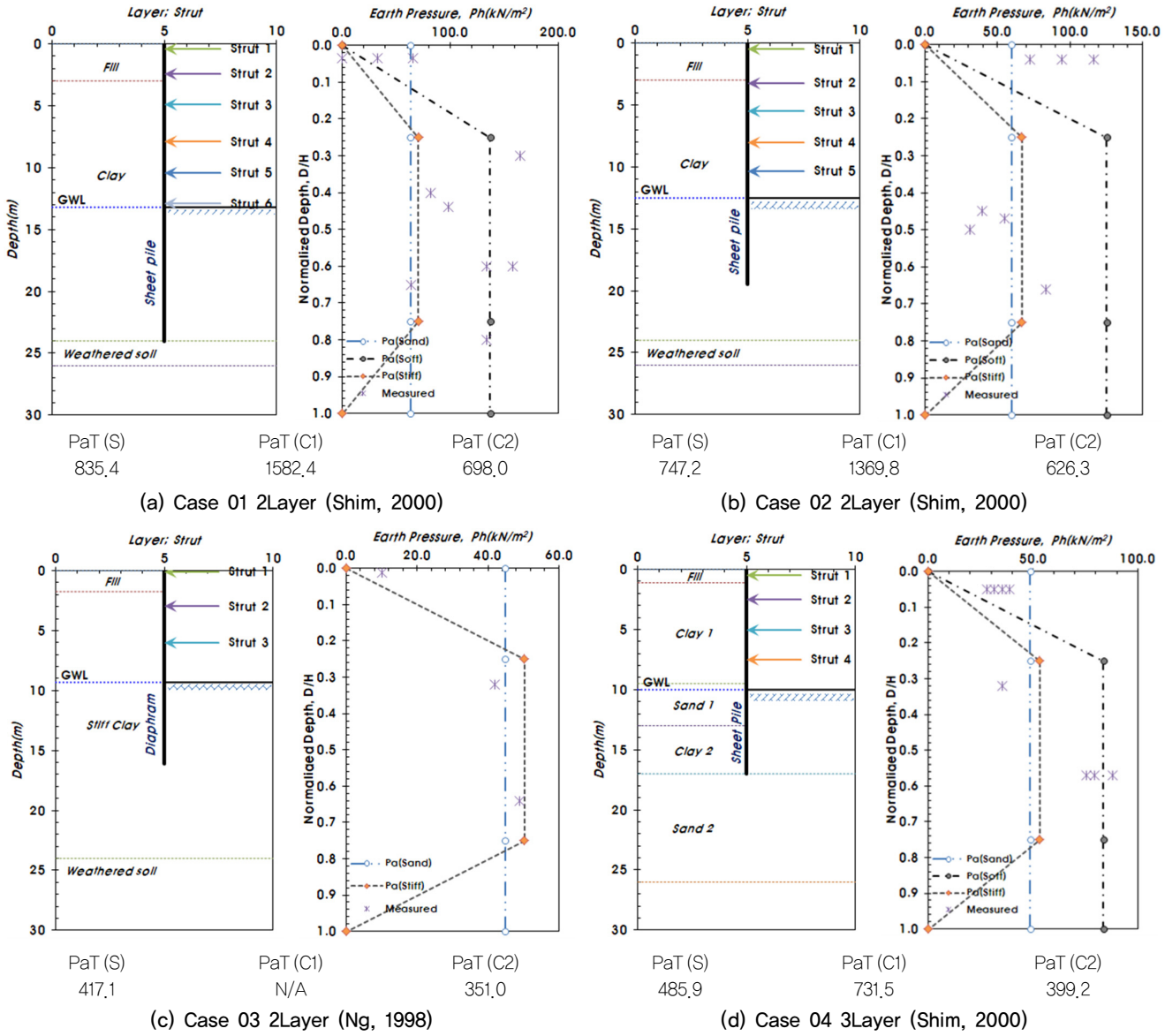
3.2.1 실측토압을 이용한 개념 수립

본 연구에서는 국내외 다층지반에서의 굴착 공사 시 실측된 토압을 조사하여 지반조건, 벽체종류, 굴착조건 및 측정토압과 경험토압(균질지반)을 체계적으로 정리하여 Fig. 5에 제시하였다.

Fig. 5에 제시된 바와 같이 계측된 대부분의 토압은 단일지반에 대하여 제시한 경험토압(점선)보다 크거나 작다. 이로부터 다층지반의 토압은 단일지반의 경험토압과 상이함을 알 수 있었다. 각 그림의 하단에는 단일지반(모래 S, 연약점토 C1, 견고점토 C2)에 대한 전체토압도 제시하였다. 정량적으로도 전체토압의 크기가 지반에 따라 크게 상이함을 재차 확인할 수 있었다.

차수공 유무에 따라 분석한 결과, 차수공이 있는 경우(Case 01~05, 08, 09)와 없는 경우(Case 06, 07) 수압을 고려한 "유효토압+수압"과는 다른 분포가 된다는 것을 확인하였다. 따라서, 다층지반에서의 경험토압 산정시 수압 적용에 유의해야 할 것이다.

Fig. 6에는 사례(Fig. 5(a)~(i))로부터 단일 점토 지반에서부터 단일 모래 지반으로 변화될 때의 전체토압을 산정하여 사질토 비율에 대하여 점토 토압 대비 모래 토압의



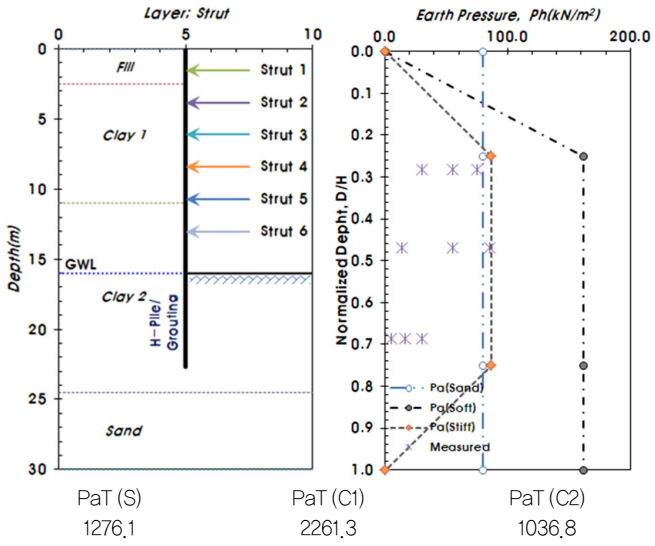
(a) Case 01 2Layer (Shim, 2000)

(b) Case 02 2Layer (Shim, 2000)

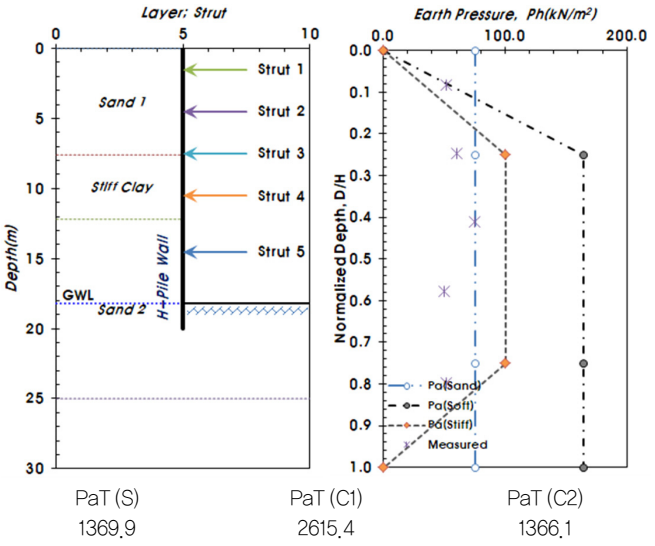
(c) Case 03 2Layer (Ng, 1998)

(d) Case 04 3Layer (Shim, 2000)

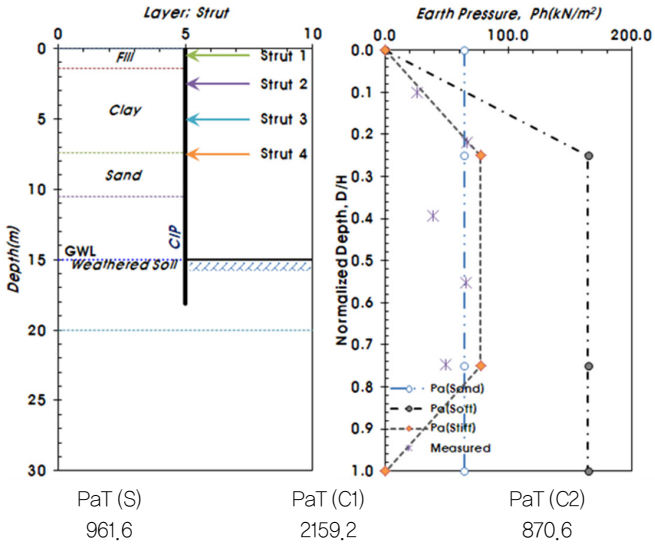
Fig. 5. Case study



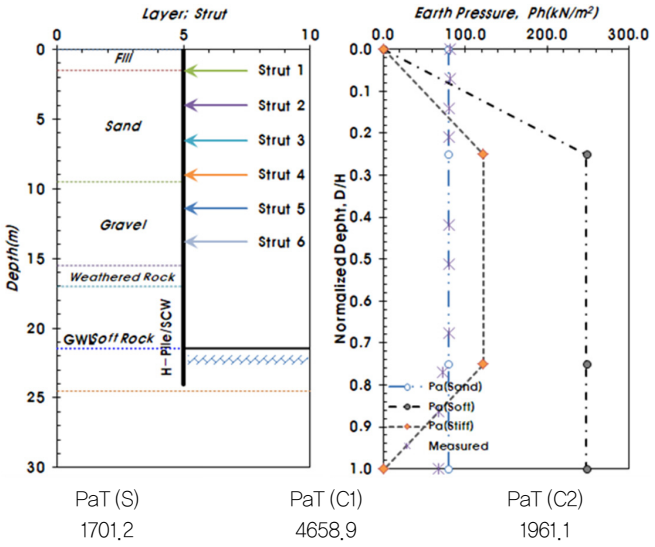
(e) Case 05 3Layer (Park and Chung, 2003)



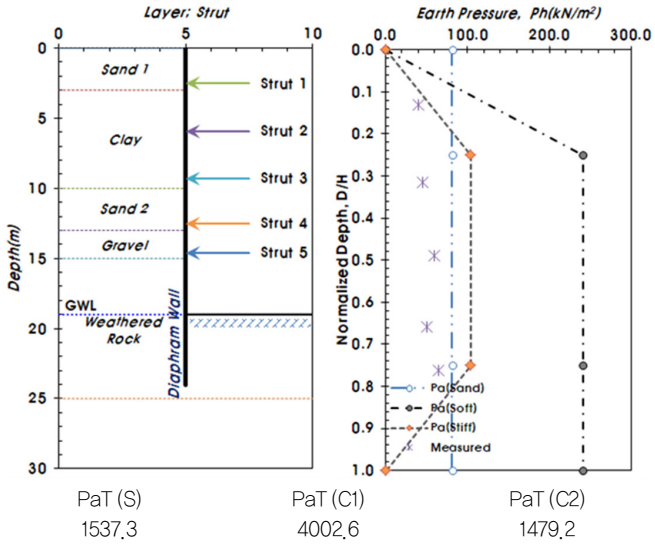
(f) Case 06 3Layer (Stern and Dunnicliff, 1975)



(g) Case 07 4Layer (Yeon, 2007)



(h) Case 08 5Layer (Shin, 2000)



(i) Case 09 5Layer (Hong and Lee, 1992)

Fig. 5. Case study (continue)

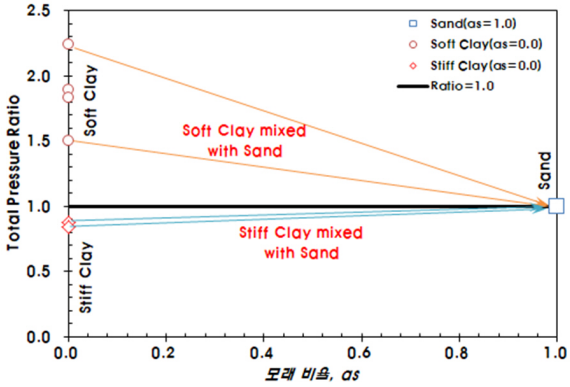


Fig. 6. The total pressure ratio with sand contents

비율을 도식화한 것이다. 단일 연약 점토(a_s=0.0)의 경우 단일 모래(a_s=1.0)보다 큰 토압에서 사질토 비율이 증가할수록 감소하여 1.0에 가까워지고, 단일 견고 점토의 경우 단일 모래 지반보다 작은 토압에서 사질토 비율이 증가할수록 증가하여 1.0에 근접함을 알 수 있다. 그림으로부터 명확한 것은 단일 점토 지반에서 단일 모래 지반 사이에 점토와 모래가 포함되는 다층지반이 존재하는데 두 단일 지반의 전체토압 이내에 있다는 것이다. 이상과 같은 사실로부터 제안토압의 주요 개념으로 다층지반의 경험토압은 단일지반의 최소값과 최대값 사이에 산정되도록 하였다.

3.2.2 경험토압 산정방법 제안

본 연구에서는 기존의 단일지반에 대한 경험토압 산정방법(분포도)을 모든 지층의 토압기여 효과를 고려하면서 다층지반으로 확장하여 적용할 수 있는 두 가지 방법을 제안하였다. 첫 번째 방법은 주동파괴선의 면적비를 고려한 방법이다. 본 방법의 경우 지층의 형성 순서, 주동파괴 면적, 수압 등를 고려하지만 다소 복잡한 계산이 요구된다. 두 번째 방법은 층두께비를 고려한 방법이다. 본 방법의 경우 단순 층두께 비율에 따른 토압의 기여 효과를 고려한다. 다만, 지층의 순서를 반영하지는 않았지만 계산이 편리하고, 수압을 고려하는 경우는 파괴면적비가 층두께비와 유사해지므로 이때 적용성이 증가한다. 두 방법중 파괴면적비를 이용하는 경우가 지반공학적 타당성이 확보되는 방법이라 할 수 있다.

이하에서는 본 연구에서 제안한 방법을 단계별로 설명하였다.

1) 1단계 : 등가 단일지반의 토압 산정

① 등가 모래 지반의 토압($p_{a(sand)}$) 계산: 점토의 경우 배수 파라미터를 이용하여 토압 산정(식 4)

② 등가 점토지반의 토압($p_{a(day)}$) 계산:

- 모래의 경우 등가 비배수 전단강도를 이용하여 토압 산정(Peck, 1943)(식 2)
- 풍화토 등 C-ϕ Soil의 경우 등가 비배수 전단강도를 이용하여 토압 산정(단, Peck 방법에 C 항목추가)
- "연약"은 $s_u \leq 25$kPa, "견고"는 $s_u > 25$kPa로 구분함(CIRIA, 1999; Hwang, 2010)
- 본 단계에서 적용하는 등가 단일지반의 경험토압 분포도는 Table 1과 같음

2) 2단계 : 파괴면적비, a_{sF}와 층두께비, a_{sH} 산정

① 파괴면적비 계산: 주동파괴각($\theta_i = 45 + \phi_i/2$)에 따른 파괴면적의 비=$\frac{A_i}{\sum A_n}$, a_{sF}=모래층의 전체 파괴면적비(Fig. 7 참조)

② 층두께비 계산: 모래, 점토의 층두께 비율=$\frac{H_i}{\sum H_n}$, a_{sH}=모래층의 전체 층두께비(Fig. 7 참조)

3) 3단계: 다층지반의 토압 산정

$$p_{a(multi)} = p_{a(sand)} + (1 - a_{sF})(p_{a(day)} - p_{a(sand)}),$$

$$p_{a(multi)} = p_{a(sand)} + (1 - a_{sH})(p_{a(day)} - p_{a(sand)})$$

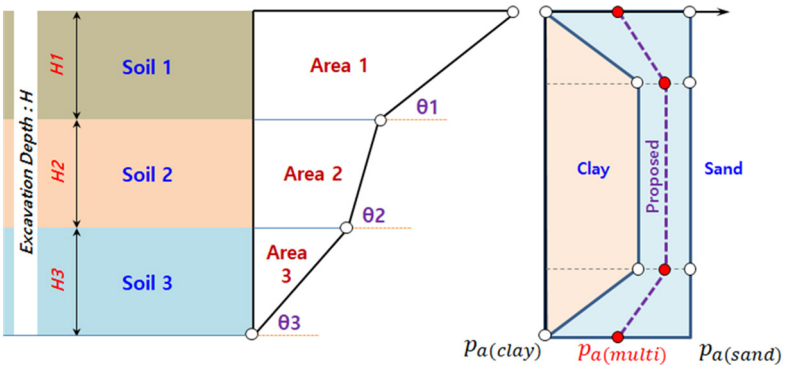
3.2.3 제안방법의 검증

본 연구에서는 국내외 다양한 지층조건의 다층지반에서 실측된 토압을 이용하여 두 가지 제안방법을 적용하여 검증하였다. Fig. 8에는 그 결과를 제시한 것으로, 그림에서 토압비(측압계수)는 연직응력으로 정규화한 값을 나타낸 것이다. 또한, 그림에서 실선은 등가의 대표 토질(단일지반)에 대한 경험토압(Peck, 1969)의 비율을 나타낸다. 그림에 제시된 바와 같이 Case 07을 제외하고는 제안방법이 기존방법보다 실측과 유사한 것으로 확인되어 적용성이 우수한 것을 알 수 있었다. 특히, 다층지반의 실측사례(Fig. 2)에서도 제시한 심도 0.1Z/H 이하에서도 기존 방법보다 실측에 더욱 근접한 결과를 도출하였다.

Table 2에는 모래 또는 점토로 변환된 등가 단일지반의 경험토압(Peck, 1969), 제안된 방법으로 산정된 계산토압과 측정토압의 비를 정량적으로 제시하였다. Table 2에서 토압의 비는 측정값이 있는 심도에서 측정토압과 비교토

Table 1. Apparent earth pressure distribution on equivalent ground

Earth pressure	Sand	Clay	
		Soft ($C_{av} \leq 25$kPa)	Stiff ($C_{av} > 25$kPa)
Pressure distribution	Peck (1969)		



(a) Without water pressure

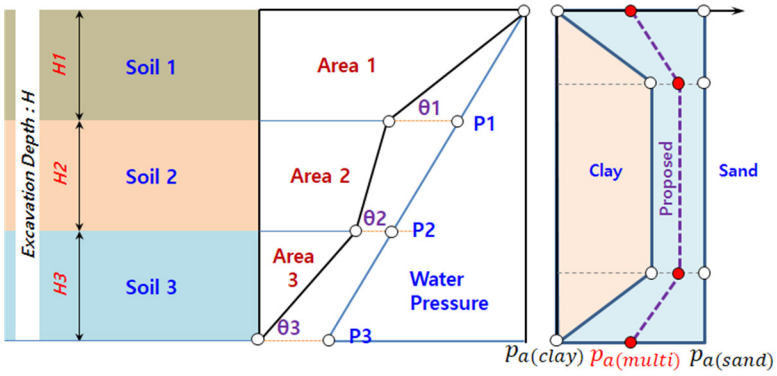
$$a_{sF} = \frac{A_{si}}{\sum A_n}$$

$$a_{sH} = \frac{H_{si}}{\sum H_n} \quad \text{for Sand}$$

$$a_{sF} \neq a_{sH}$$

Where, A_{si} = Area of Sand,

H_{si} = Thickness of Sand



(b) With water pressure

$$a_{sF} = \frac{A_{si} + A_{Pi}}{\sum (A_n + A_{Pn})}$$

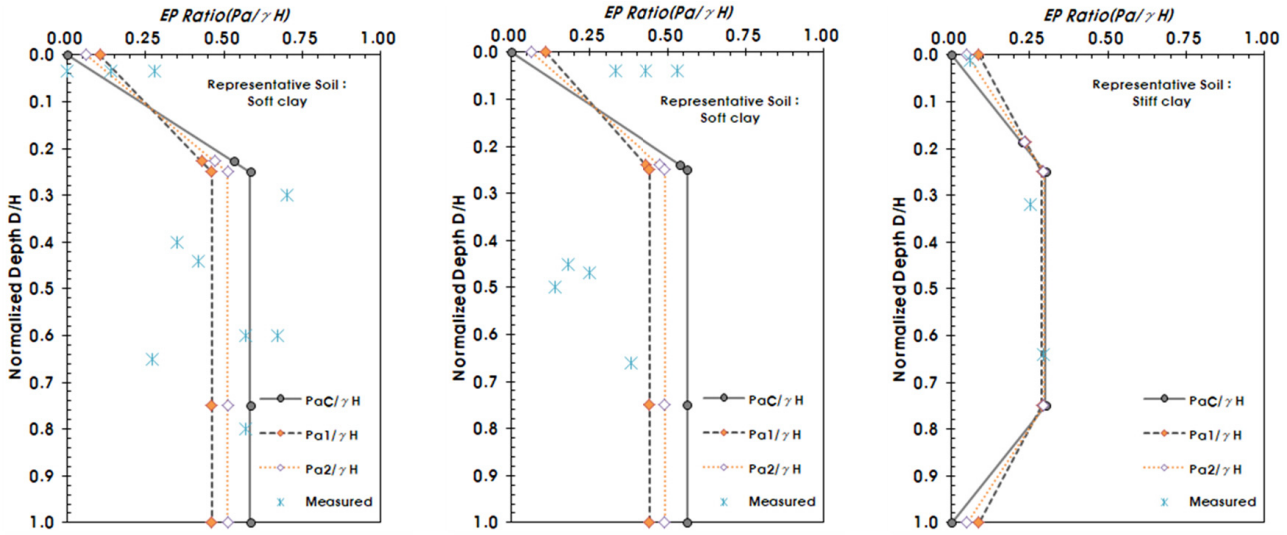
for Sand

$$a_{sH} = \frac{H_{si}}{\sum H_n}$$

$$a_{sF} \approx a_{sH}$$

Where, A_{si}=Area of Sand, H_{si}=Thickness of Sand, A_{Pi}=Area of PWP for Sand

Fig. 7. Proposed methods for calculating apparent earth pressure in multi-layered grounds

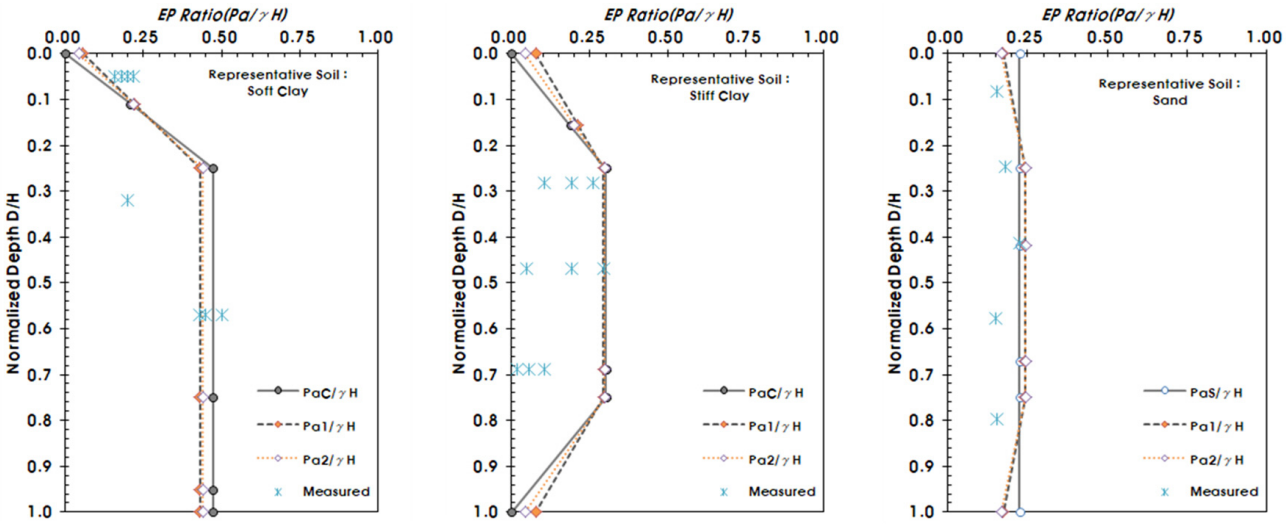


(a) Case 01 2Layer (b) Case 02 2Layer (c) Case 03 2Layer

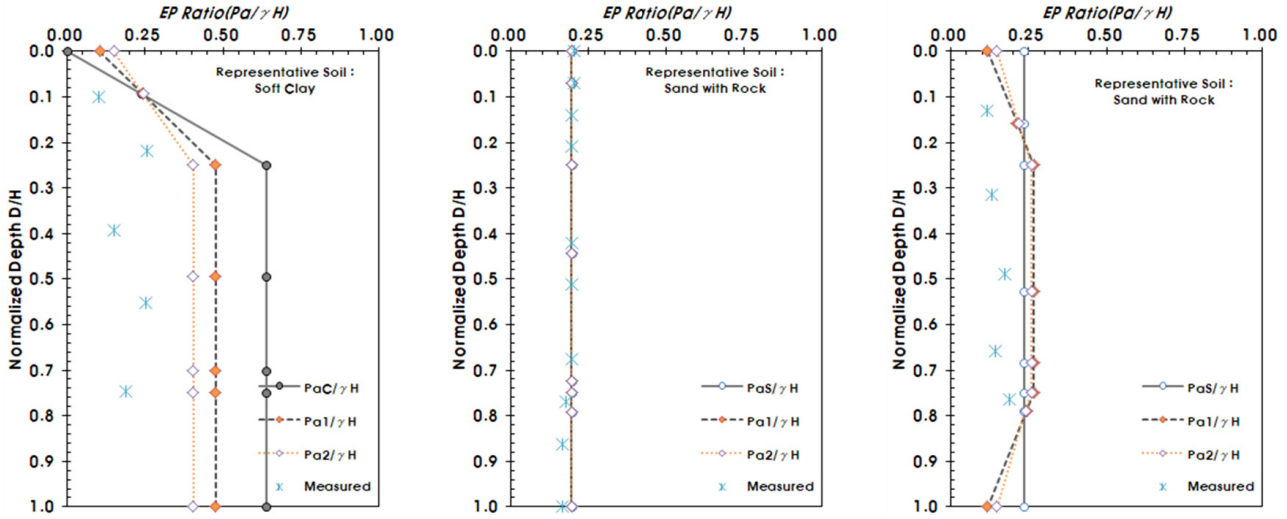
Fig. 8. Verification results of proposed methods (Pressure distribution)

압의 비를 평균한 값이다. 값이 "1.0"에 근접할수록 실측값에 근접한다는 것을 의미한다. 또한, 등가 점토 지반의 연경도, 주동토압 파괴면적비(모래), 층두께비(모래), 굴착심도내 암반의 출현 여부 등도 함께 제시하였다. 특히, Case 05와 Case 06의 경우 점토의 연경도에 따른 적용 토압을 기존에는 중간점토를 연약점토와 동일하게 간주하였던 것을 본 연구에서 실측 사례를 고려하여 견고점토로 적용한 것으로 본 연구에서의 분류 방법이 기존 대비 실측값에 훨씬 더 근접함을 보였다.

Table 2에 제시된 바와 같이 기존의 방법인 Peck(1969)의 방법보다는 본 연구에서 제안한 두 방법이 실측토압에 정량적으로도 근접하였다. 전체적으로는 주동토압의 파괴



(d) Case 04 3Layer (e) Case 05 3Layer (f) Case 06 3Layer



(g) Case 07 4Layer (h) Case 08 5Layer (i) Case 09 5Layer

Fig. 8. Verification results of proposed methods (Pressure distribution) (continue)

면적비를 고려하는 방법이 총 5개 사례, 층두께비를 고려하는 방법이 총 3개 사례, 기존방법이 총 1개 사례에서 실측토압과 가장 유사한 결과를 도출하였다. 이상의 결과로부터 본 연구에서 제안한 두 방법의 신뢰도는 검증된 것으로 판단된다.

4. 제안방법의 적용

본 연구에서는 기존 경험토압(Peck, 1969)과 제안 경험토압을 실제 흙막이 가시설 설계에 적용하여 적용성을 평가하고자 하였다. 이를 위해 국내 흙막이 가시설 설계시 주로 이용되고 있는 GeoX를 활용하여 탄소성 해석을 수행하였다. Table 3에는 탄소성 해석시 적용된 지반정수를 제시하였고, 해석은 좌우 대칭조건으로 간주하여 반단면 해석을 진행하였다.

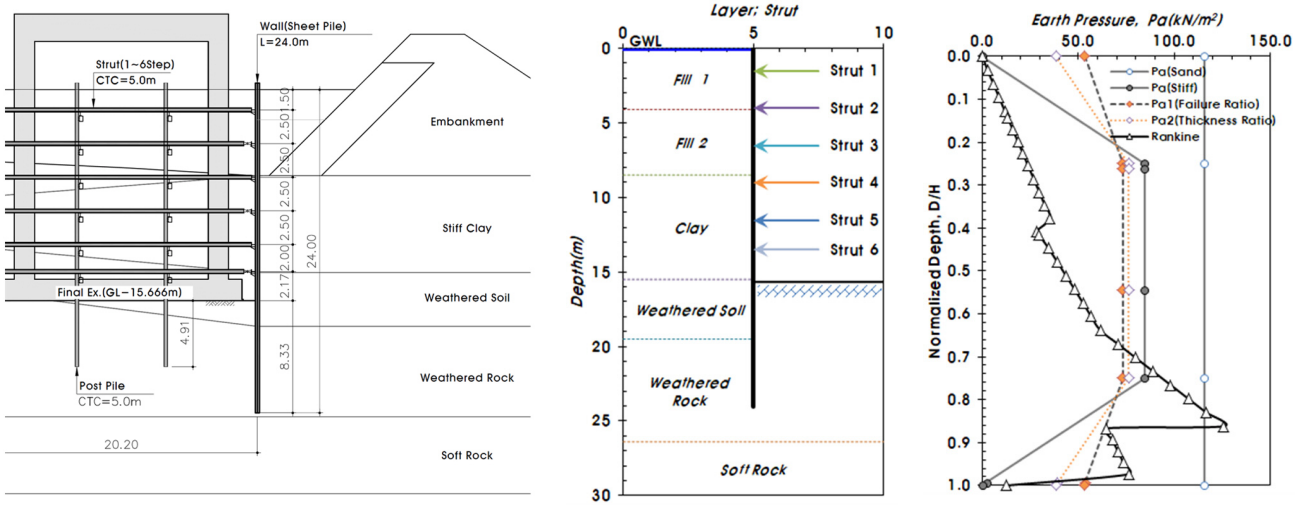
Fig. 9에는 해석 단면, 굴착 조건, 지층조건, 이론토압 및 기존 경험토압과 본 연구에서의 제안토압 분포도를 함께 제시하였다. 본 사례의 경우 사질토와 견고한 점성토가 층을 이루고 있고, 굴착심도 내 사질토의 두께가 약 55.1%, 점성토의 두께가 44.9%로 유사한 것으로 평가되었다. 이에 설계자가 임의 판단이 어려워 모래 지반에 대한 경험토압과 점토 지반에 대한 경험토압을 모두 산정하였고, 각각의 토압에 대한 부재력으로 설계를 수행한 후, 보수적인 결과를 활용하였다. 특히, 평균지반법을 적용한 모래의 경

Table 2. Verification results of proposed methods

Case	No. of Layer	Clay consistency	Sand ratio		Rock	Earth pressure (Measured/Calculated)		
			Failure area (Ast)	Thickness (Asf)		Peck method	Failure area method	Thickness ratio method
1	2	Soft	39.0%	22.7%	×	1.124 (Clay)	1.042	1.032
2	2	Soft	40.8%	24.0%	×	2.262 (Clay)	1.421	1.643
3	2	Stiff	32.8%	18.7%	×	2.147 (Clay)	0.832	0.945
4	3	Soft	20.9%	16.0%	×	1.416 (Clay)	1.171	1.212
5	3	Soft (Peck) Stiff (Proposed)	28.1%	15.6%	×	0.251 (Clay, Peck) 0.469 (Clay, Proposed)	0.480	0.475
6	3	Soft (Peck) Stiff (Proposed)	77.1%	74.7%	×	0.482 (Sand, Peck) 0.768 (Sand, Proposed)	0.752	0.751
7	4	Soft	41.7%	60.0%	×	0.357 (Clay) 0.766 (Sand)	0.449	0.512
8	5	Soft	100%	100%	Soft Rock	0.971	0.971	0.971
9	5	Stiff	50.5%	63.2%	Weathered Rock	0.643 (Sand)	0.599	0.608

Table 3. Design parameters for Elasto-Plastic analysis (Halla, 2020)

Soil layer		Wet weight (kN/m^3)	Sat. weight (kN/m^3)	Cohesion (kN/m^2)	Int. F. Angle (°)	Elastic modulus (kPa)	Hori. ground reaction coef. (kN/m^3)
Fill	Upper	18.00	19.00	–	30.00	10,000	7,000
	Lower	18.00	19.00	–	30.00	10,000	4,800
Stiff clay		18.40	19.40	60.00	–	42,000	17,000
Weathered soil		19.00	20.00	20.00	28.00	72,800	32,000
Weathered rock		20.00	21.00	30.00	32.00	140,000	40,000
Soft rock		23.00	24.00	130.00	35.00	140,000	147,000
Backfill		18.00	19.00	–	30.00	10,000	7,000



(a) Section (b) Excavation Conditions (c) Apparent Earth Pressure

Fig. 9. Case study of proposed method

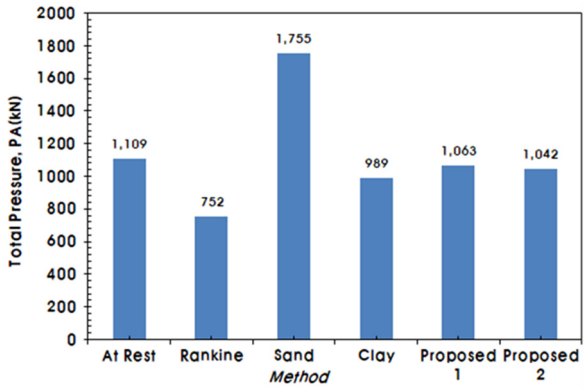


Fig. 10. Total earth pressure with method

우 너무 과대하다고 판단하여 평균지반법이 아닌 개별지반법을 적용하였다. 본 연구에서는 이를 정량적으로 확인하고자 각 방법별로 전체토압을 산정하였다(Fig. 10). Fig. 10에 제시된 바와 같이 평균지반법으로 산정된 모래에 대한 기존 경험토압의 크기(1,755kN)는 Rankine 주동토압(752kN)의 2배 이상 그리고 정지토압보다 크게 예측되는 오류가 발생할 수 있음을 확인하였다. 이는 점토의 ϕ=0 즉, K_a=1.0을 적용하기 때문이다. 이로부터 점토를 포함한 지반에서 평균지반법은 신뢰성이 떨어진다는 것을 알 수 있었다.

또한, Fig. 9(c)의 토압 분포도에서 Rankine의 주동토압과 Peck(1969)의 점토 토압은 지표에서 "0"의 토압을 예측하지만, 제안방법은 모래와 점토의 비율(파괴면적 또는 층두께)을 고려한 만큼 작용하는 것으로 산정되고, 상부지반에서는 Rankine의 주동토압보다 크게 예측하고, 하부에서는 작게 예측하여 기존 경향과도 잘 일치하는 것으로 판단된다.

마지막으로 Boone and Wetland(2006)은 Rankine의 주동토압(이론토압)이 굴착단계별 하중전이를 통해 재분포된다고 하였다. 그러나, 일반적인 설계시 부재력 결정을 위해서 이론토압보다 큰 부재력을 예측하여 보수적인 결과를 제공하는 경험토압을 적용한다는 것(즉, Rankine의 주동토압<경험토압)과 Jianqin and Bo(2007)의 연구결과, 심도가 증가할수록 실측토압 또는 경험토압이 Rankine 토압보다 크고 정지토압에 근접하였다고 제시한 것(즉, Rankine

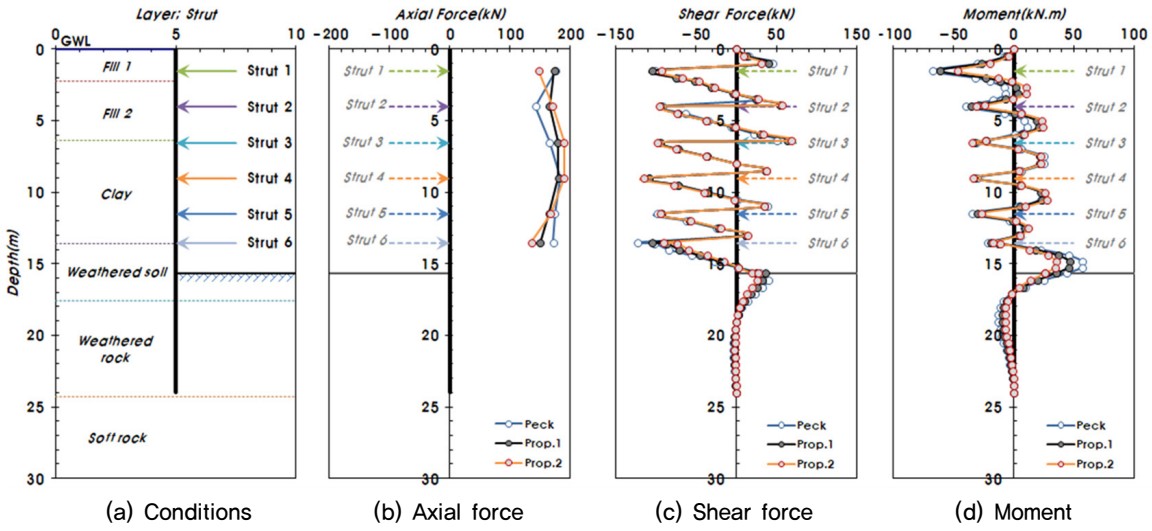


Fig. 11. Results of Elastio-Plastic analysis with methods

Table 4. Member forces with the apparent earth pressure methods

Method	Axial force (kN)						Shear force (kN)	Moment (kN.m)
	Strut-1	Strut-2	Strut-3	Strut-4	Strut-5	Strut-6		
Peck (Sand)	176.3	142.5	165.8	182.9	174.7	172.2	123.5	67.5
Failure area method (Prop.1)	174.1	166.4	179.5	180.8	165.0	150.2	109.4	61.2
Thickness ratio method (Prop.2)	147.9	171.5	190.0	190.4	167.3	136.0	115.6	46.9

의 주동토압<실측토압≈정지토압)을 고려할 때 정지토압과 유사하게 산정된 제안방법은 타당한 것으로 판단된다.

Fig. 11에는 기존 경험토압과 제안토압을 적용한 탄소성 해석 결과를 도시하였고, 최대 부재력은 Table 4에 제시하였다. 흙막이벽의 최대 전단력과 모멘트는 Peck(1969)의 방법(모래, 개별지반법)에서 나타났고, 버팀보의 축력은 각 단별로 Peck(1969)방법 또는 층두께비 방법(Prop. 2)에서 나타났다. 전체적으로 파괴면적비를 고려한 경우 중간정도의 값을 예측하는 것으로 평가되었다. 본 연구의 실측사례에서 제시한 바와 같이 제안토압은 기존 경험토압보다 실측에 더 근접한 값을 제공하면서도 부재력은 작게 예측되므로 경제적인 설계가 가능한 것으로 평가되었다. 이상과 같은 결과로부터 점토를 포함하는 다층지반에서의 경험토압으로 파괴면적비를 이용한 평균지반법, 층두께비를 이용한 평균지반법을 적용할 수 있음을 알 수 있었다.

5. 결 론

본 연구에서는 국내외 실측토압을 바탕으로 단일지반에 대한 각각의 경험토압 산정방법을 다층지반의 경험토압 산정방법으로 확장하여 모든 지층의 토압 기여 효과를 고려할 수 있고, 단일지반과 다층지반 모두 적용 가능한 방법을 제안하고 검증하였다. 또한, 실제 설계사례에 대한 수치해석 등을 수행하여 기존 방법과 비교 분석하였다. 본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 국내외 단일지반에서의 지반 굴착 시 측정된 토압을 분석한 결과, 모래 지반은 평균 0.16, 연약점토의 경우 평균 0.39, 중간점토의 경우 평균 0.20, 견고점토의 경우 평균 0.27의 토압비율(측압계수)을 나타내었다.

(2) 국내외 다층지반의 토압에 대한 실측 사례를 분석한 결과, 토압분포는 단일지반의 토압분포와 상이하고, 대체로 상부 0.1Z/H 이하에서는 실측토압이 Peck(1969)의 단일지반 토압보다 큰 경우가 있었고, 중앙 0.5Z/H 부근에서는 모래와 견고점토보다 크고 연약점토보다는 작은 경우가 많았다.

(3) 실측 사례로부터 단일 점토 지반에서부터 단일 모래 지반으로 변화될 때, 단일 연약 점토의 경우 단일 모래 지반보다 큰 토압에서 사질토 비율이 증가할수록 토압비율이 감소하여 1.0에 가까워지고, 단일 견고 점토의 경우 단일 모래 지반보다 작은 토압에서 사질토 비율이 증가할수록 증가하여 1.0에 근접함을 알 수 있다.

(4) 단일지반에 대한 경험토압 산정방법(분포도)을 다층지반으로 확장할 수 있도록 파괴면적비를 고려한 방법과 층두께비를 고려한 방법을 제안하고, 검증하였다. 본 연구에서 제안한 방법이 기존 단일지반의 토압보다 실측과 유사한 것으로 평가되었다. 전체적으로는 주동토압의 파괴면적비를 고려하는 방법이 실측토압과 가장 유사한 결과를 도출하였고, 층두께비를 이용한 방법도 적용하기 편리하면서 신뢰도에 큰 문제가 없는 것으로 나타났다.

(5) 점토가 포함된 다층지반에서 경험토압 산정시 평균지반법을 적용하는 경우 점토의 층두께가 두터울 때, 비배수 토압계수(ϕ=0, K_a=1.0)를 적용하면 정지토압보다 큰 토압이 산정될 수 있음을 알 수 있었다.

(6) 실제 설계사례에 대한 탄소성 해석으로부터 흙막이벽의 최대 전단력과 모멘트는 Peck(1969)의 방법에서 나타났고, 버팀보의 축력은 각 단별로 Peck(1969)방법 또는 층두께비 방법(Prop. 2)에서 나타났다. 전체적으로 파괴면적비를 고려한 경우 중간정도의 값을 예측하였다. 특히, 제안토압은 기존 경험토압(Peck, 1969)보다 실측에 더 근접한 값을 제공하면서도 경제적인 설계가 가능한 것으로 평가되었다.

References

1. Boone, S. J. and Westland, J. (2006), “Design of Excavation Support using Apparent Earth Pressure Diagrams: Consistent Design or Consistent Problem”, *International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*, pp.809-816.
2. Chae, Y. S. and Moon, I. (1994), “The Lateral Earth Pressure on Braced Cut Walls Considering Subsoil Condition in Korea”, *KGS Fall Conference*, pp.129-139.
3. Cham, W. M. and Goh, K. H. (2011), “Prediction of Ground Settlement due to Adjacent Deep Excavation Works”, *Proceedings of the Underground Singapore*, pp.94-104.
4. CIRIA (1999), “Temporary Propping of Deep Excavations-Guidance on Design”, *CIRIA* C517.
5. Coutts, D. R, Wang, J. and Cai, J. G. (2001), “Monitoring and Analysis of Results for Two Strutted Deep Excavations using Vibrating Wire Strain Gauges”, *Tunnelling and Underground Space Technology* 16(2), pp.87-92.
6. Goh, A. T. C., Zhang, F., Zhang, W. and Chew, O. Y. S.

(2017), “Assessment of Strut Forces for Braced Excavation in Clays from Numerical Analysis and Field Measurements”, *Computers and Geotechnics*, 86, pp.141-149.
7. Halla (2020), *A Report on Excavation Stability of the Water Pump Facility at Hyundai Oilbank's Seawater Coolant Drainage Facility*.
8. Hong, W. P. (2018), Earth Retaining Pile, CIR.
9. Hong, W. P. and Lee, K. J. (1992), “Lateral Pressure on Anchored Excavation Retention Wall”, *Journal of The Korean Geotechnical Society*, Vol.8, No.4, pp.81-95.
10. Hwang, S. H. (2010), *Design of Retaining Walls for Practitioners*, CIR.
11. Jeong, E. T. and Kim, S. K. (1997), “A Case Study on Distribution Earth Pressures on Braced Cut Walls in Multi-Layered Ground”, *KGS Fall Conference*, pp.73-81.
12. Jianqin M. and Bo S. B. (2007), “Apparent Earth Pressure of Soft Soils Overlying Hard Bedrock at South Link in Stockholm”, *Soft Soil Engineering*, pp.299-307.
13. Korean Geotechnical Society (2018), *Explanation of Standard for Design of Structure Foundation.*
14. Lee, C. K. and Jeon, S. K. (1993), “Earth Pressure Distribution on Retention Walls in the Excavation of Multi-Layered Ground”, *Journal of The Korean Geotechnical Society*, Vol.9, No.1, pp.59-68.
15. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2020), *Standard for Design of Temporary Earth Retaining Walls*.
16. Ng, C. W. W. (1998), “Observed Performance of Multi-propped Excavation in Stiff Clay”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.124, Issue 9, pp. 889-905.
17. Park, Y. M. and Chung, Y. I. (2003), “A Study of Earth Pressure and Deformation acting on the Flexible Wall in Soft Soil”, *KSMI*, Vol.7, No.3, pp.215-222.
18. Peck, R. B. (1943), “Earth-Pressure Measurements in Open Cuts, Chicago(ILL.) Subway, Transactions”, *American Society of Civil Engineers*, Vol.108, pp.1008-1058.
19. Peck, R. B. (1969), “Deep Excavation and Tunneling in Soft Ground. State-of-the-Art Report”, *Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Mexico, 1969, pp.225-290.
20. Shim, S. M. (2000), “The Behavior of Sheet Pile Walls Beyond the Excavation in Soft Clay”, Chungang University, Master Science.
21. Shin, J. S. (2000), “A Study on the Behavior of Earth Retaining Wall by In-Situ Measurement”, Hanyang University, Master Science.
22. Stern, L. and Dunnicliff, C. (1975), “Performance Monitoring for Geotechnical Construction”, *ASTM International* STP 584.
23. Wong, I. H., Poh, T. Y., and Chuah, H. L. (1997), “Performance of Excavations for Depressed Expressway in Singapore”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.123, No.7, pp.617-625.
24. Yeon, Chun Heum (2007), “Lateral Pressure Distribution on Earthwall in Multi Layered Soils using Back Analysis”, Yunsei University, Master Science.
25. Yoo, C. S. and Kim. Y. J. (2000), “Behavior of Propped Walls during Deep Excavation”, *The Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol.20, No.3C, pp.195-204.