

## 성토 재하속도를 고려한 측방토압의 간이에측법 A Simple Method for Predicting Lateral Earth Pressure in Consideration of Construction Speed of Embankment

임은상<sup>1)</sup>, Eun-Sang Im, 김형수<sup>2)</sup>, Hyoung-Soo Kim, 김태훈<sup>3)</sup>, Tea-Hoon Kim

- 1) 수자원연구원, 지하수지반연구소 박사후연구원, Post doctoral Researcher, Groundwater and Geotechnics Research Center, Korea Institute of Water and Environment, KOWACO.
- 2) 수자원연구원 지하수지반연구소 소장, Director, Groundwater and Geotechnics Research Center, Korea Institute of Water and Environment, KOWACO
- 3) 대우건설기술연구소 연구원, Researcher, DAEWOO Eng. & Cons. CO. LTD

**SYNOPSIS** : In evaluating the stability of underground structures and designing prevention methods against the lateral flow, it is necessary to predict the amount and the distribution of the lateral earth pressure acting on these retaining structures. However, because the lateral deformation of real ground is a very complex phenomenon influenced by interaction between volumetric deformation bringing an increase of stability of ground and shear deformation causing failure of ground, any appropriate methods for estimating the lateral earth pressure in consideration of the geotechnical properties of ground and the construction conditions in embankment have not been developed as yet. Therefore, a prediction method, which considers effects of a construction speed of embankment, using the Boussinesq's solution based on the elasticity theory without using complex numerical analyses such as finite element analyses is proposed in this research.

**Key words** : 측방토압, 연약지반, 부분배수조건, 재하속도

### 1. 서 론

도로의 성토부나 건물 등이 건설되면 구조물의 하중에 의하여 기초지반 내부에 응력의 변화가 발생하게 된다. 특히 이 기초지반이 연약지반인 경우에는 상재하중을 지탱하지 못하고 파괴를 일으키거나 파괴까지는 아니더라도 측방유동이라고 하는 큰 변위를 발생시키게 된다. 이러한 변위는 지중구조물 중 횡하중에 취약한 말뚝기초나 매설관 심지어는 지하댐으로 활용되어지는 지중의 차수벽에 큰 피해를 줄 수 있다. 이러한 측방유동에 의한 피해를 방지·경감시키기 위해서는 기존의 구조물에 외력으로서 작용하는 측방토압을 예측하고 기존 구조물의 피해정도를 판단함과 동시에 필요한 경우에는 효과적인 대책 공법을 수립하기 위해서도 역시 측방토압의 예측이 필요하다고 할 수 있다.

그러나 측방유동은 압밀에 의한 체적변형과 파괴를 일으키는 전단변형이 동시에 일어날 뿐만 아니라 재하속도, 성토의 기하학적 특성 및 기초지반의 특성 등의 여러 가지 인자에 의하여 좌우되기 때문에 측방유동으로 인해 발생하는 측방토압을 정확히 예측하기란 쉬운 일은 아니므로 실제 설계과정에서는 비교적 간단하게 측방토압을 산정할 수 있는 Boussinesq의 이론해와 같은 탄성이론이 주로 사용되고 있는 것이 현실이다. 그러나 이러한 탄성이론에는 간단하게 구할 수 있다는 장점과 함께 위에서 언급한 영향인자들을 고려할 수 없다는 단점을 가지고 있다.

이러한 단점을 보완하기 위하여 본 연구에서는 측방토압이 발생하는 메커니즘을 고려하여 여러 인자

중의 하나인 재하속도에 의한 영향을 고려한 간이에측법을 제안하고자 한다.

## 2. 탄성이론해에 의한 접근

기존의 구조물에 대한 피해정도를 판단하거나 차수벽과 같은 지하벽체를 설계 위해서는 지하벽체에 작용하는 측방토압의 크기와 분포를 예측해야할 필요가 있으며 이를 위하여 Jarquio(1981)는 띠하중으로 인해 이미 항복한 옹벽과 항복하지 않은 옹벽에 발생하는 측방토압을 탄성해석에 근거하여 산정하였다. 또한 Steenfelt and Hansen(1984)은 띠하중의 위치와 재하률에 대한 영향을 언급하였고, Georgiadis and Anagnostopoulos(1998)은 sheet pile에 대한 FEM의 결과와 탄성이론에 의한 해석결과를 비교하여 탄성해석에 의해 산정된 측방토압과 모멘트가 더 큰 값을 가지는 것을 보였으며, Zhang et al.(1998)은 Rankine과 Coulomb의 이론을 확장하여 지반의 변위형태에 의한 측방토압 산정식을 제안하였다. 이러한 제안들에도 불구하고 재하조건이나 지반특성을 고려한 측방토압의 설계법이 아직 확립되어지지 않고 있다. 이러한 문제점을 해결하고자 본 연구에서는 실제 지중응력을 산정하는데 널리 사용되고 있을 뿐만 아니라 성토의 형상에 영향을 고려한 Boussinesq의 탄성이론해를 보정한 간이에측법을 고려함으로써 FEM과 같은 복잡한 수치해석을 수행하지 않고도 측방토압을 간편히 산정하는 방법에 초점을 두었다. 또한, 이러한 접근은 Im et al.(2001, 2003)에 의하여 측방토압의 발생 메커니즘을 단순화 할 수 있다는 가정을 근거로 확립되었다.

### 2.1 Boussinesq의 탄성이론해

재하된 점하중에 의해 발생하는 반무한 탄성체의 내부응력을 산정하는 Boussinesq의 이론은 공학적인 관점에서 재하하중에 대한 지중응력을 산정하는데 큰 오류가 없는 것으로 인정 되어지고 있으며, 실제로 점성토 지반의 성토에 의한 침하량을 산정하는데 많이 사용되어지고 있다. 그러므로 이 이론을 확장하여 점성토의 측방토압을 산정하기 위하여 그림 1과 같은 조건하에서의 A점에 대한 수평응력을 아래의 식 (1)과 같이 구하였다.

$$\sigma_{x,emb} = \frac{p}{\pi} \left[ \frac{A}{a} \tan^{-1} Z_A + \left(1 - \frac{A}{a}\right) \tan^{-1} Z_B - \frac{C}{c} \tan^{-1} Z_C - \left(1 - \frac{C}{c}\right) \tan^{-1} Z_X \right] + \frac{z}{a} \log \left| \frac{1 + Z_B^2}{1 + Z_A^2} \right| - \frac{z}{c} \log \left| \frac{1 + Z_X^2}{1 + Z_C^2} \right| \quad (1)$$

여기서,  $A = a + b + c + x$ ,  $B = b + c + x$ ,  $C = c + x$ ,  $X = x$ 이고,  $Z_A = A/z$ ,  $Z_B = B/z$ ,  $Z_C = C/z$ ,  $Z_X = X/z$ 이다. 또한 이를 Osterberg의 수직응력 도표와 같은 방법으로 표현하면 위하여 대칭인 성토 ( $a = c$ ) 선단( $x = 0$ )에서의 수평응력을 구하여 식 (2)에 나타냈으며 이를 각 성토 형상에 따라서 그래프화한 도표가 그림 2의 수평응력 도표이다.

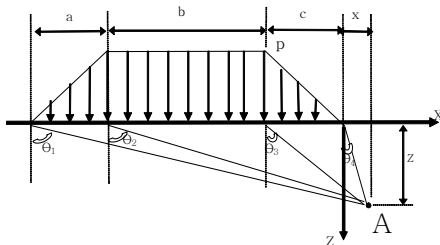


그림 1. 성토하중에 의한 지반내 수평응력

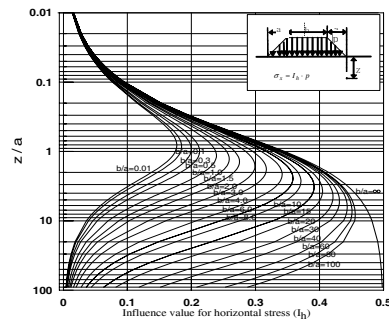


그림 2. 성토하중에 의한 지반내 수평응력의 영향치

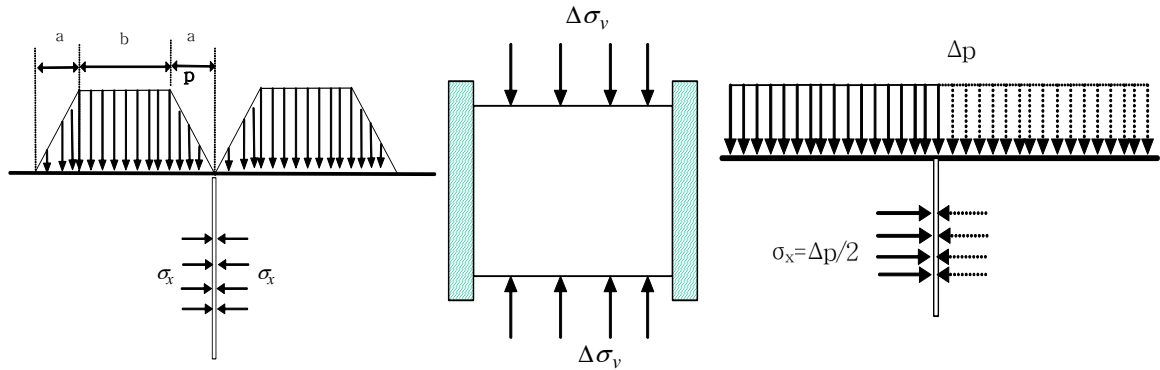


그림 3. 성토선단에서의 정지토압조건    그림 4. 일차원 압밀    그림 5. 탄성이론에서의 일차원 압밀조건

$$\sigma_x = \frac{p}{\pi} \left[ \left( 2 + \frac{b}{a} \right) \cos^{-1} \left( \frac{z/a}{\sqrt{(z/a)^2 + (2+b/a)^2}} \right) - \left( 1 + \frac{b}{a} \right) \cos^{-1} \left( \frac{z/a}{\sqrt{(z/a)^2 + (2+b/a)^2}} \right) \right. \\ \left. - \cos^{-1} \left( \frac{z/a}{\sqrt{(z/a)^2 + 1}} \right) + \frac{z}{a} \log \left| \frac{((z/a)^2 + (1+b/a)^2) \cdot ((z/a)^2 + 1)}{(z/a)^2 \cdot ((z/a)^2 + (2+b/a)^2)} \right| \right] \\ = p \cdot I_h \quad (2)$$

여기서  $I_h$ 는 수평응력의 영향치이다.

이와 같이 구한 수평응력에 실내모형시험의 결과 중 재하속도에 의한 영향을 고려하여 재하속도를 고려한 측방토압을 간이에측법을 제안하였다. 그런데 이 Boussinesq의 이론에 의하여 계산된 수평응력은 측방변위에 대하여 구속이 없는 조건이지만, 일반적으로 지하벽체의 설계나 위험도판별을 위해 사용되어지는 토압은 벽체의 변형에 따라서 주동토압에서부터 정지토압까지 다양한 값을 가지고 있으므로 구조물의 안전측면을 고려하여 이 중의 최대치인 정지토압을 설계하중으로 사용하는 것이 타당하다고 사료되어 성토의 선단이 정지토압인 조건에서 측방토압을 산정하였다. 즉, 성토선단의 정지토압 조건을 만들기 위하여 그림 3과 같이 선단의 반대편에 재하 되어진 성토와 같은 형상과 같은 크기의 가상성토가 존재한다고 가정하여 측방토압의 산정대상인 성토선단을 정지토압 조건으로 구현하였다.

## 2.2 성토과정에 대한 탄성이론해의 보정

성토가 진행됨에 따라 발생하는 수평응력을 산정하기 위하여 우선 그림 4와 같은 일차원 압밀의 각 배수조건하에서 수평응력을 계산하여 각각 식 (3)~(5)에 나타냈다.

$$\text{비배수 조건 } t=0 ; \Delta\sigma_{h,0} = \Delta\sigma'_{h,0} + \Delta u_0 \\ = 0 + \Delta u_0 = \Delta\sigma_v \quad (3)$$

$$\text{부분배수 조건 } t=t ; \Delta\sigma_{h,t} = \Delta\sigma'_{h,t} + \Delta u_t \\ = K_0 \Delta\sigma'_{v,t} + \Delta u_t = K_0 (\Delta u_0 - \Delta u_t) + \Delta u_t \quad (4)$$

$$\text{완전배수 조건 } t=\infty ; \Delta\sigma_{h,\infty} = \Delta\sigma'_{h,\infty} + \Delta u_\infty \\ = K_0 \cdot \Delta\sigma'_{v,\infty} + 0 = K_0 \cdot \Delta u_0 \quad (5)$$

여기서  $\Delta\sigma_v$ ,  $\Delta\sigma_h$ ,  $\Delta\sigma'_h$ ,  $K_0$ 는 각각 수직응력의 증분, 전수평응력의 증분, 유효수평응력의 증분 및 정지토압계수이며, 비배수 조건에서는 상재하중이 전부 간극수압으로 작용하게 되고( $\Delta u_0 = \Delta\sigma_v$ ), 시간이 지나 부분배수 조건이 되면 간극수압이 소산된 만큼( $\Delta u_0 - \Delta u_t$ ) 유효수직응력이 증가하며 이 증가한 유효수직응력이 유효정지수평토압으로 작용하므로 전정지수평토압은 유효정지수평토압( $K_0 (\Delta u_0 - \Delta u_t)$ )

과 간극수압( $\Delta u_t$ )의 합으로 나타나게 된다. 또한 완전 배수조건에서는 상재하중이 전부 유효수직응력으로 작용함으로 전정지수평토압은 상재하중에 정지토압계수를 곱한 값( $K_0 \cdot \Delta u_0$ )으로 나타낼 수 있다. 다시 말해서, 그림 5와 같이 일차원 압밀조건하에서 식 (2)의 탄성이론으로부터 계산된 수평응력은  $\sigma_x = \Delta p/2$ 이고 이는 변형이 발생한 후의 응력이기 때문에 식 (5)의 완전 배수조건과 일치한다고 할 수 있고 이로부터 비배수 조건시의 수평응력인  $\Delta p$ 로부터 부분 배수조건을 거쳐 완전 배수조건시의 수평응력인  $\Delta p/2$ 로 감소한다는 것을 알 수 있다.

### 3. 탄성이론해에 대한 보정

측방토압에 재하속도라는 영향인자를 고려하기 위하여 측방토압을 탄성증분과 비탄성증분으로 나누어 고려하였다. 이는 Im and Lee(2004)이 제안한 것처럼 측방토압은 각 영향인자 자체의 영향보다는 인자에 의하여 발생하는 Dilatancy의 영향에 의하여 지배어진다는 사실을 토대로 하여 그림 6과 같이 Dilatancy의 영향이 고려되지 않아도 되는 부분 즉 탄성증분의 부분과 Dilatancy의 영향이 지배적인 부분인 비탄성증분의 부분으로 나누어 측방토압을 식 (6)과 나타냈다.

$$\Delta \sigma_L = \Delta \sigma_{L,ela} + \Delta \sigma_{L,nonela} \quad (6)$$

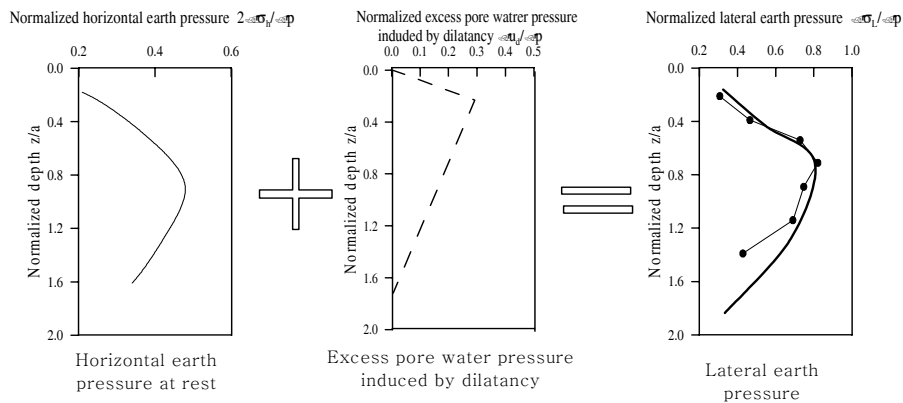


그림 6. 측방토압의 구성성분

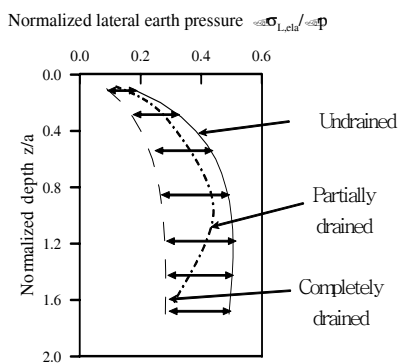


그림 7. 각 배수조건에서의 탄성증분

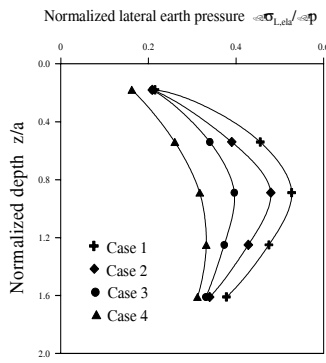


그림 8. 각 Case의 최대 측방토압에서의 탄성증분

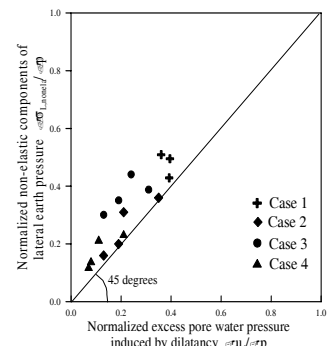


그림 9. 비탄성증분과 Dilatancy에 의한 과잉간극수압의 관계

또한, 각 배수조건 즉 성토과정에서의 깊이에 대한 탄성증분  $\Delta\sigma_{L,ela}$  은 그림 7과 같고, 이때의 탄성증분과 비탄성증분의 관계는 다음과 같이 정의할 수 있다.

성토직후 (비배수 조건) ;

$$\begin{aligned} \Delta\sigma_{L,ela} &= \Delta u_0 = \Delta\sigma_{rest,ela} = 2\sigma_x \\ \Delta\sigma_{L,nonela} &= 0 \end{aligned} \quad (7)$$

성토 후 방치기간 (부분배수 조건) :

$$\begin{aligned} \Delta\sigma_{L,ela} &= \alpha \cdot (\Delta u_0 - \Delta u) + \Delta u = \alpha \cdot (\Delta\sigma_{rest,ela} - \Delta u) + \Delta u \\ \Delta\sigma_{L,nonela} &= \Delta u_d \end{aligned} \quad (8)$$

성토 후 지반이 안정된 기간 (완전배수 조건) ;

$$\begin{aligned} \Delta\sigma_{L,ela} &= \alpha \cdot \Delta\sigma_{rest,ela} \\ \Delta\sigma_{L,nonela} &= 0 \end{aligned} \quad (9)$$

여기서,  $\Delta\sigma_{rest,ela}$  은 정지수평토압으로서 그림 2나 식 (2)로부터 구한 수평응력  $\sigma_x$  의 2배에 해당되며, 성토하중이 재하된 직후에는 비배수 조건이 되므로 탄성증분은 정지수평토압  $\Delta\sigma_{rest,ela}$  과 같고 아직 비탄성증분은 전단변형이 발생하지 않기 때문에 0이 된다. 또한, 성토가 완료한 후의 상당기간 동안은 성토하중에 의하여 압밀이 진행되므로 탄성증분은 일차원 압밀의 부분 배수조건과 같은 증분치를 보이고 비탄성증분은 어떠한 값을 가지게 될 것이다. 시간이 더 경과하여 압밀이 종료하게 되면 완전 배수조건과 같은 탄성증분을 가지며 지반이 안정화 되어 비탄성증분은 존재하지 않게 된다.

그림 8은 필자의 연구결과(Im and Lee(2004))의 중, 각 재하속도에 대하여 최대 측방토압 발생한 시간에서의 측방토압의 탄성증분은 나타난 그림이다. 이로부터 재하속도가 느릴수록 더 작은 측방토압 탄성증분을 보이는 것을 알 수 있다. 또한 측방토압의 비탄성증분을 정의하기 위하여 모형시험에서 직접 측정된 비탄성증분과 Dilatancy에 의하여 발생한 과잉간극수압(Im et al.(2003)참조)과의 관계를 그림 9에 나타냈다. 이 그림에서도 알 수 있는 것처럼 측방토압 비탄성증분의 대부분은 Dilatancy에 의하여 발생한 과잉간극수압이 의하여 발생한다는 것을 알 수 있고, 이를 근거로 측방토압의 비탄성증분은 Dilatancy에 의하여 발생한 과잉간극수압과 같다고 가정하였다. 또한, 이 Dilatancy에 의하여 발생한 과잉간극수압의 최대치와 재하속도와와의 관계는 이미 Im and Moriwaki(2001)에 의하여 밝혀졌으며 그 관계는 그림 10과 같으며 이러한 관계와 Im and Lee(2003)의 연구결과를 토대로 그림 11과 같이  $z/a=0.4$ 에서 최대치를 갖는 삼각형 분포의 측방토압의 비탄성증분을 추정하였다.

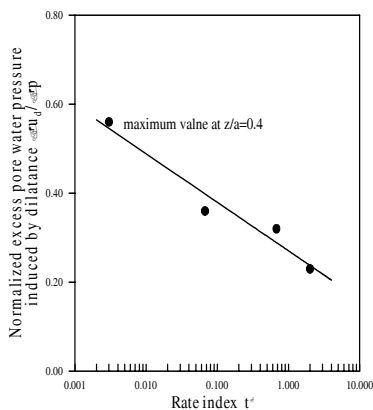


그림 10. 재하속도와 Dilatancy에 의한 과잉간극수압의 관계

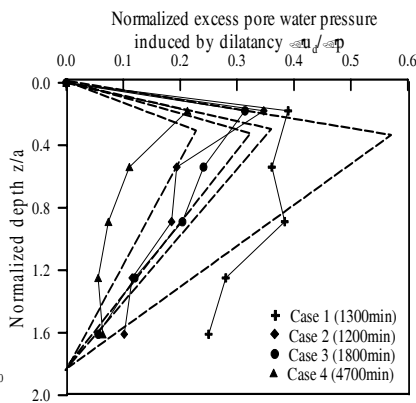


그림 11. Dilatancy에 의한 과잉간극수압의 단순화

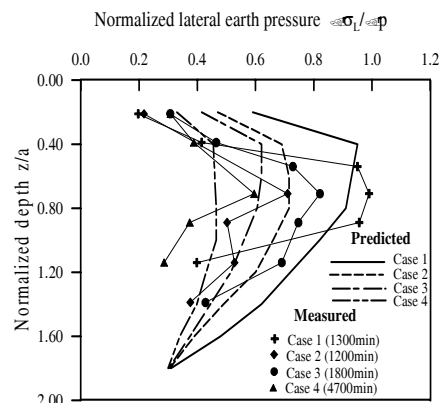


그림 12. 예측치와 실측치의 비교

이와 같은 가정을 통하여 얻어진 측방토압의 탄성증분(그림 8)과 비탄성증분(그림 11)의 합(그림 6)에 의하여 산정된 측방토압과 측정된 측방토압(Im and Moriwaki(2001)참조)을 그림 12에 나타냈으며, 성토 재하속도의 영향을 고려한 간이에측법에 의한 예측치가 실제의 측방토압과 비교적 잘 일치한다는 것을 알 수 있었다.

#### 4. 결론

재하속도에 의한 영향을 Dilatancy에 의하여 발생한 과잉간극수압으로 가정하여 측방토압을 예측하는 간이에측법은 비교적 실제의 측방토압과 잘 일치한다는 것을 알 수 있었다. 또한 이러한 접근은 재하속도 뿐만 아니라 다른 영향인자에 대해서도 적용이 가능할 것으로 사료되며 설계하중으로서의 측압토압을 보다 정확히 예측하기 위해서는 보다 많은 연구가 수반에 할 것으로 생각된다.

#### 감사의 글

본 연구는 부분적으로 21세기 프론티어 연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호 3-4-2)에 의해 수행된 것으로 이에 감사를 드립니다.

#### 참고문헌

1. Georgiadis, M. and Anagnostopoulos, C. (1998): "Lateral pressure on sheet pile walls due to strip load" Journal of the Geotechnical and Geoenvironmental Engineering Division, ASCE, Vol.124, No.1, pp.95~98
2. Im, E. S. and Moriwaki, T. (2001): "Effect of the construction speed of embankment on settlement and lateral flow pressure in soft clay ground" Symposium of JSSMFE, pp. 109~114.
3. Im, E. S., Yang, J.H. and Kang, K.S. (2003), "Dissipation of Excess Pore Water Pressure in Soft Clay Foundation under Embankment", KSCE Journal of Civil Engineering, Vol.7, No.2, pp.131~139
4. Im, E. S. and Lee, K.I. (2004), "Lateral earth pressure caused by actin on earth retaining wall in Clay Ground", Journal of The Korean Geotechnical Society, Vol.20, No.7, pp.57~68
5. Jarquio, R. (1981): "Total lateral surcharge pressure due to strip load" Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 107, No. GT10, pp. 1424~1428.
6. Steenfelt, J. S. and Hansen, B. (1984): "Sheet pile design earth pressure for strip load," Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol.110, No.7, pp.976~986
7. Zhang, L.M., Shamoto, Y and Tokimatsu, K. (1998): "Evaluation of earth pressure under any lateral deformation" Soils and Foundations, Japanese Geotechnical Society, Vol.28, No.4, pp.15~33.