

p-y 특성곡선의 Coupling을 고려한 토류벽의 거동해석

The Behavior of Earth Retaining Structures
Using p-y Curve with Coupling

김수일* · 정상섭** · 장범수***

Kim, Soo Il · Jeong, Sang Seom · Chang, Buhm Soo

Abstract

The behavior of earth retaining structure was investigated by considering coupling between soil springs in elasto-plastic soil. For the computation of soil reaction, soil on both sides of walls was simplified as elasto-plastic springs, and the required horizontal displacement to mobilize Terzaghi's active and passive state was applied to construct the p-y curve. Reliability on computer program developed is verified through the comparison between prediction and in-situ measurements. Based on the results obtained, it is found that the prediction by using coupling between soil springs simulates well the general trend observed by the in-situ measurements. It is also found that the horizontal displacement required for the active state gives a very small effect to the displacement of walls in the sandy soil.

요 지

본 연구에서는 탄소성 지반에서 지반스프링의 Coupling을 고려하여 토류벽의 거동을 해석하였다. 수치해석을 위해 벽체 양측의 지반을 탄소성 스프링으로 단순화하였고, 지반반력계수의 산정을 위해서 Terzaghi가 제안한 주동 및 수동상태에 필요한 수평변위를 p-y 특성곡선에 적용하였다. 본 연구에서 개발된 전산프로그램의 신뢰성은 기존 컴퓨터 프로그램 및 현장 실측치와의 비교를 통해 검증하였다. 검증결과 지반스프링의 Coupling을 고려한 경우가 현장 실측치의 변위 및 토압에 접근함을 알 수 있었고, 모래질 흙에서 주동상태에 필요한 수평변위의 변화가 벽체의 변위에 아주 작은 영향만을 준다는 것을 알 수 있었다.

1. 서 론

토류 구조물의 설계시 토압의 크기 및 벽체의

변위는 안전 시공관리 차원에서 신속 정확하게 예측 및 계측하여야 할 필요가 있다. 그러나 이와같은 토류 구조물은 그 종류와 현장조건, 그리고 지반조건 등에 따라서 그 변위 형태가 서로 달라지며, 이에 따른 토압분포 역시 달라진다는 사실은 잘 알려져 있다.^(3,7)

* 정희원 · 연세대학교 공과대학 토목공학과 교수

** 정희원 · 연세대학교 산업기술연구소 선임연구원

*** 정희원 · 연세대학교 공과대학 토목공학과 박사과정

토류벽에 작용하는 측방토압은 Rankine, Coulomb 등의 이론을 기본으로 하는 기존의 해석방법들이 있으나 흙막이 벽에 있어서의 측방토압은 벽체의 변위에 따라 결정되기 때문에 정확히 산정하기가 대단히 어렵다. 이와같은 어려움을 해소하기 위하여 경험적으로 지반 종류에 따른 토압분포를 구하여 사용하기를 제안한 Terzaghi, Peck, Tschebotarioff 등의 방법과 Winkler의 이론을 적용한 해석방법들이 있다. 이와 같은 여러 방법들 중에서 토류벽의 굴착단계별 수평변위나 토압산정을 위해서는 현재까지 보-기둥의 이론이 적용된 Winkler의 모델이 많이 사용되고 있는 추세이다. 이 모델은 토류벽이 보-기둥 부재로 거동한다고 보고 이와 같은 거동을 나타내는 수학적 미분 방정식을 유한차분으로 근사화하고 연속된 보-기둥 요소를 분리하여 벽체 상하단에서의 경계 조건을 적용, 부재에 작용하는 축력, 모멘트, 전단력, 반력, 수평처짐 등을 구할 수 있다.

기존 토류벽거동 해석에 있어서 구조물-지반 조건하에서 지반반력은 선형 및 비선형 지반지지 조건으로 대체한 지반반력계수를 구하고자 하는 절점에서의 반력으로 사용하였다. 그러나 이와같은 해석은 인접한 절점들에서의 스프링 계수가 서로 영향을 미치지 않는다는 가정이 전제되나 실제 거동 파악에 있어서는 인접된 지반 스프링간의 상호작용(Coupling)의 영향이 있는 것으로 보아야 한다.

이와같은 배경에서 본 연구에서는 지반의 선형 및 비선형 지지 조건을 고려할 수 있는 지반의 $p-y$ 특성곡선을 산출하여 이를 토대로 각 지반 스프링간의 상호작용을 고려할 수 있는 토류벽 해석 기법의 개발 및 현장계측치와 비교 분석을 통하여 실제 지반상태를 잘 반영할 수 있는 토류벽의 거동을 정확히 분석, 평가하는데 그 목적이 있다.

2. 토류벽의 해석 방법과 $p-y$ 특성곡선

임의의 토류벽을 해석하는데는 여러가지 방법이 있다. 첫번째 방법은 한계소성평형이론에 의한 해석방법으로, 토압의 분포를 간단히 벽체 후면에 가해지는 주동토압과 벽체 전면에 가해지는 수동토압의 분포로 생각하여 예상되는 토류벽의 전체적인 한계평형을 고려하는 방법이다. 그러나 이 방법으로는 벽체의 변위를 예측할 수 없다. 두번째 방법은

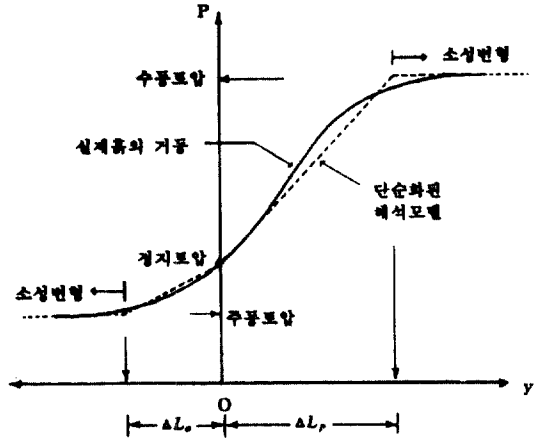


그림 1. 흙의 $p-y$ 특성곡선.

벽체와 벽체 주위의 흙을 연속된 요소에 의해 모델링하는 유한요소법이다. 이러한 방법으로는 벽체와 주변 토체의 변형을 예측할 수 있으나 굴착 단계별 해석시 각 단계별 반복작업이 요구되므로 비효율적이고 많은 수치 작업이 필요하다. 세번째 방법은 벽체와, 선형 또는 비선형 스프링으로 대체한 주변지반을 일련의 분리된 요소로 모델링하는 유한차분법이다. 이 방법은 상기 한계소성평형이론에 의한 해석방법의 단점인 벽체의 변위를 고려할 수 있고, 유한요소법에 의한 해석보다 복잡하지 않다는 장점이 있다. 토체의 거동을 비선형 스프링으로 모델링 하는 것은 벽체의 단위 폭과 길이당 임의 깊이 z 에서 벽체에 가해지는 수평하중에 의해서 토체가 받는 지지력 p 와 동일한 깊이에서 벽체의 변위 y 로 표현되어지는 그림 1과 같은 $p-y$ 특성곡선으로 표현할 수 있다.

그림 1은 벽체의 변형에 따른 토압의 변화모형을 나타낸 것이다. 일반적인 탄소성 모델에서는 그림 1에서 보는 바와 같이 실선으로 표시된 실제 흙의 거동을 점선과 같이 단순화된 모델로 가정하여 벽체의 변형량에 따라 토압을 산정하게 된다. 이와 같은 해석방법은 토압이 일차적으로 벽체의 변위에 비례하고 최소주동토압 및 최대수동토압을 초과하지 않는다는 가정에 그 기본을 두고 있다. 본 연구에서는 그림 1의 점선과 같은 비선형 탄소성 모델을 가정하여 프로그램에 사용하였다.

$p-y$ 특성곡선에 대한 개념은 지반-구조물 상호작용을 해석하는데 있어 주로 외적하중에 대한 지반의

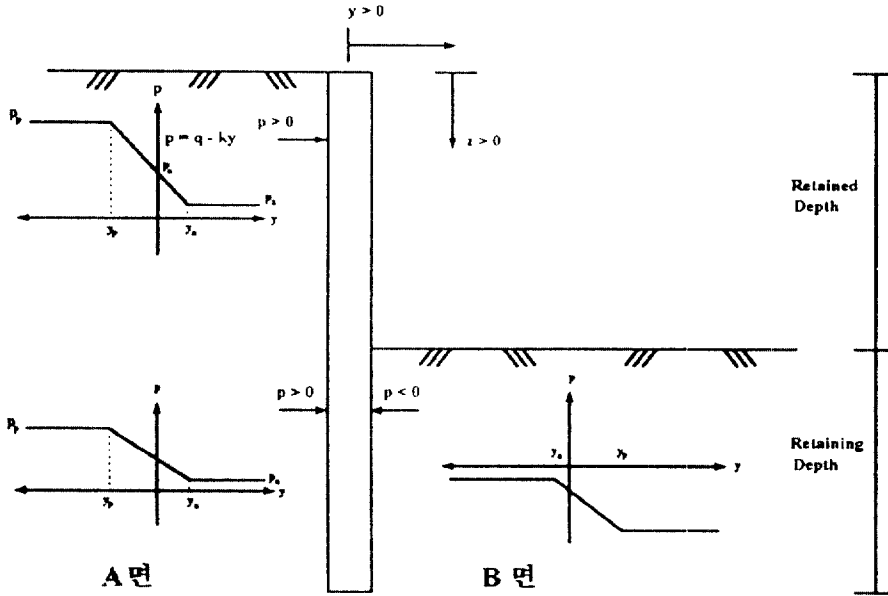


그림 2. 토류벽의 p-y 특성곡선.

지지력과 그때 구조물의 변위를 나타내기 위해 사용되어 왔는데 기존에 수평재하된 말뚝해석시 지지지의 거동해석에 많이 사용되어 왔다. 따라서 말뚝의 p-y 특성곡선은 많은 연구가 되어, 지반의 종류나 단기 또는 장기, 정적 혹은 동적 하중에 대해 여러 경험 공식들이 제안되고 있다. 그러나 벽체에 대한 거동해석에 기존 말뚝의 p-y 특성곡선을 그대로 사용하는 것은 무리이기 때문에 토류벽에 맞는 p-y 특성곡선의 산정을 위한 많은 현장시험 등이 행해지고 있다.^(6,16)

기존에 연구되어지고 있는 벽체의 p-y 특성곡선 이론은 다음과 같다. 그림 2와 같은 토류벽에서 정지토압이 벽체에 가해지고 있을 때, 벽체가 양의 y 방향으로 움직인다면 토압은 주동토압 p_a 에 도달할 때까지 감소할 것이고, 주동토압 p_a 에 도달하기 위한 벽체의 변위는 y_a 가 된다. 만약 벽체가 음의 y 방향으로 이동한다면 토압은 수동토압 p_b 에 도달할 때까지 증가하고, 이때의 벽체의 변위는 y_b 가 된다. 그림 2에서 벽체의 A면의 흙은 주동상태이고 B면의 흙은 수동상태이다. A면 흙의 p-y 특성곡선은 그림 2의 좌측 상단과 하단에 표시되어 있다. B면 흙의 p-y 특성곡선은 y 방향이 반대이기 때문에 p값이 음의 방향인 것을 제외하고는 동일한 방법으로 산정

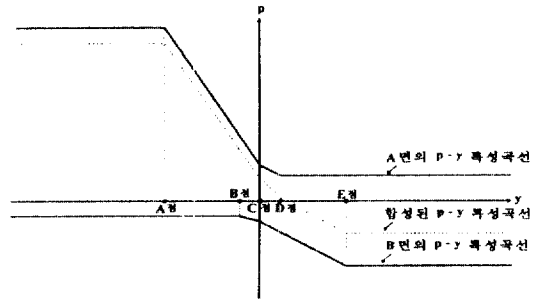


그림 3. p-y 특성곡선의 합성.

되어 그림 2의 B면 하단과 같이 표시할 수 있다. 임의의 깊이에 있어서의 흙의 p-y 특성곡선은 A면 흙의 p-y 특성곡선과 B면 우측 부분 흙의 p-y 특성곡선을 다음과 같은 방법으로 합성함으로써 그림 3과 같이 구할 수 있다.⁽⁶⁾

- (1) 임의의 깊이에서 A면의 p-y 특성곡선과 B면의 p-y 특성곡선을 구한다.
- (2) A면의 p-y 특성곡선에서, 수동상태에 도달하기 위한 벽체의 변위를 A점, 정지상태를 C점, 주동상태에 도달하기 위한 벽체의 변위를 D점으로 정한다.
- (3) B면의 p-y 특성곡선에서, 수동상태에 도달하기 위한 벽체의 변위를 E 점, 정지상태를 C점, 주동상

태에 도달하기 위한 벽체의 변위를 B점으로 정한다.

(4) A, B, C, D 그리고 E점에서의 토압을 각각 서로 더한다.

(5) 각 점에서 합산된 토압을 근거로 합성된 p-y 특성곡선을 구한다.

이때 p_a 와 p_p 의 값은 토질 역학이론에 의해 식 (1) 및 식 (2)와 같이 산정 할 수 있다.

$$P_a = K_a \cdot \sigma'_v + u \quad (1)$$

$$P_p = K_p \cdot \sigma'_v + u \quad (2)$$

여기서 σ'_v 는 깊이 z에서의 유효수직응력이고, K_a 는 주동토압계수, K_p 는 수동토압계수, u는 깊이 z에 있어서의 수압이다. 또한 y_a 및 y_p 값에 대한 많은 연구가 있었으나 본 연구에서는 표 1과 같이 Terzaghi가 제안한 값을 사용하였다.⁽⁴⁾

3. 기본 해석

본 연구에서의 수치해석 모델 설정시 토류벽의 형태는 캔틸레버형 널말뚝으로, 토류벽의 근입은 유한장이고 근입선단은 자유단으로 가정하였다. 또한, 수압은 정수압이 작용한다고 가정하였고 벽체의 좌굴은 고려하지 않았다.

3.1 기본 미분방정식

토류벽을 보요소로 지반을 탄소성 스프링으로 모델화하고 지반 강성이 깊이 방향으로 변화할 때의 해법은 그림 4와 같은 탄소성지반상의 보를 90° 회전한 것과 같다. 이러한 탄소성지반상의 보 이론은 기초지반을 일련의 스프링으로 간주한 고전적인 Winkler 해법이며 이 해법의 기본 미분 방정식은 식 (3)와 같다.

$$EI \frac{\partial^4 w(x)}{\partial x^4} + p(x) = q(x) \quad (3)$$

여기서 $p(x) = K_1 \cdot w(x)$ 이고, K_1 는 지반의 스프링 계수이다.

그러나 고전적인 Winkler 해법은 K_1 값이 일정하고, 다른 지반 스프링과는 서로 영향이 없다는 가설로 많은 오차를 포함하고 있다. 실제로 임의의 깊이에서의 지반 거동은 그 외 다른 깊이에서의

표 1. 주동상태 및 수동상태에 필요한 수평변위

흙의 종류	y_a	y_p
느슨한 모래	0.001H-0.002H	0.01H
밀한 모래	0.0005H-0.001H	0.005H
연약한 점토	0.02H	0.04H
견고한 점토	0.01H	0.02H

여기서 H : 벽체의 높이

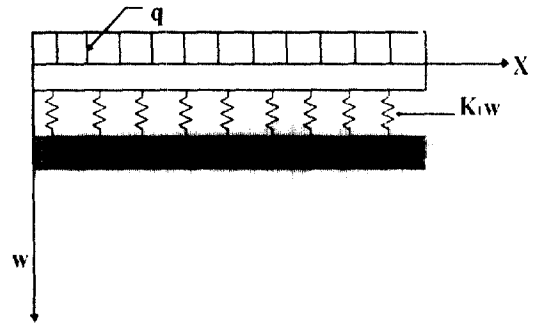


그림 4. 탄성지반상의 보.

지반거동과 무관하지는 않은 것이 사실이다. 따라서 Horvath⁽¹¹⁾는 실지반의 상호작용을 고려한 거동 해석을 위해서 Winkler의 모델을 변형한 식 (4)와 같은 미분방정식을 이용하여 지반 spring의 상호 영향을 고려하고 있다. 식 (4)에서 계수 K_1 은 지반의 반력계수이고 K_2 는 지반스프링 사이에서 상호작용을 일으키는 전단변형에 관련된 상수로, Pasternak^(12,13)는 지반을 탄성재질로 가정, 탄성론에 근거하여 등방균질한 매질로 근사화시켜 식 (6)과 식 (7)을 제시하였다.

$$EI \frac{\partial^4 w(x)}{\partial x^4} + p(x) = q(x) \quad (4)$$

$$\text{여기서, } p(x) = K_1 \cdot w(x) - K_2 \frac{\partial^2 w(x)}{\partial x^2} \quad (5)$$

$$K_1 : \text{지반반력계수} \quad (6)$$

$$K_2 = \frac{G_s \cdot H}{2} \quad (7)$$

$$G_s : \frac{K_1}{2(1+\nu)} \quad (8)$$

H : 벽체에서 수평방향으로 침하가 없는 곳까지의 거리

본 연구에서는 Rankine의 최소주동토압과 최대 수동토압이론 및 토류벽에 있어서의 토압 및 변위에 대한 Terzaghi의 이론으로부터 지반의 선형 또는 비선형 p-y 특성곡선을 합성하고 이를 기초로 지반 스프링간의 상호작용(Coupling)을 고려한 토류벽의 탄소성해석 방법을 사용하였다.

3.2 해석모델 선정 및 계산과정

본 연구에서 개발된 전산프로그램은 흙과 구조물의 상호작용을 고려하여, 굴착측 이하에서 작용하는 저항토압과 배면토압이 토류벽의 변위에 비례한다는 가정하에 최소주동토압과 최대 수동토압의 범위에서 토압이 결정되는 탄소성법이 사용되었다.

본 프로그램의 수치해석을 위해 그림 5과 같이 벽체는 보요소로 연결하고 벽체 양측의 흙은 그림 3에서와 같이 합성된 p-y 특성곡선의 탄소성 스프링으로 단순화하였다. 본 연구에서 사용된 수치해석법에는 Winkler 이론에 근거한 탄소성 해석과 Horvath 이론⁽¹¹⁾에 근거해 지반 스프링의 Coupling을 고려한 탄소성 해석이 사용되었고, p-y 특성곡선으로부터 지반반력계수를 산정하였다. 지반 스프링의 영향을 고려하기 위해 침하가 없는 지점까지의 거리 산정을 위해 Caspe^(7,8)의 방법을 사용하였다. 또한 본 전산프로그램은 수평 지반반력 계수의 산정시 Terzaghi의 주동 및 수동상태에 필요한 수평변위 제안값⁽⁴⁾ 중 주동 상태에 필요한 수평변위를 느슨한 모래의 경우는 0.001H, 밀한 모래의 경우는 0.0005H를 사용하였다. 수치해석을 위한 계산순서는 다음과 같다.

- (1) 입력된 자료를 기초로 제한된 컴퓨터 용량 내에서 적절한 요소간격을 정한다.
- (2) Rankine의 이론에 의해서 벽체의 전면 및 후면의 각 절점별 최대주동토압, 최대수동토압 및 정지토압을 계산한다.
- (3) Terzaghi가 제한한 최대 및 최소수평변위 한계값에 의해 벽체 전면 및 후면의 p-y 특성곡선을 산출한다.
- (4) 벽체 전후면의 p-y 특성곡선을 합성한다.
- (5) 초기 지반탄성계수를 합성된 p-y 특성곡선의

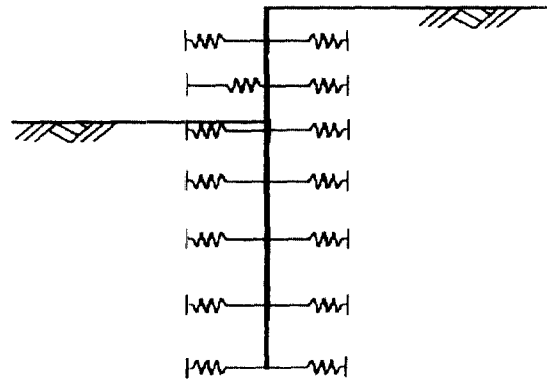


그림 5. 단순화된 해석모델.

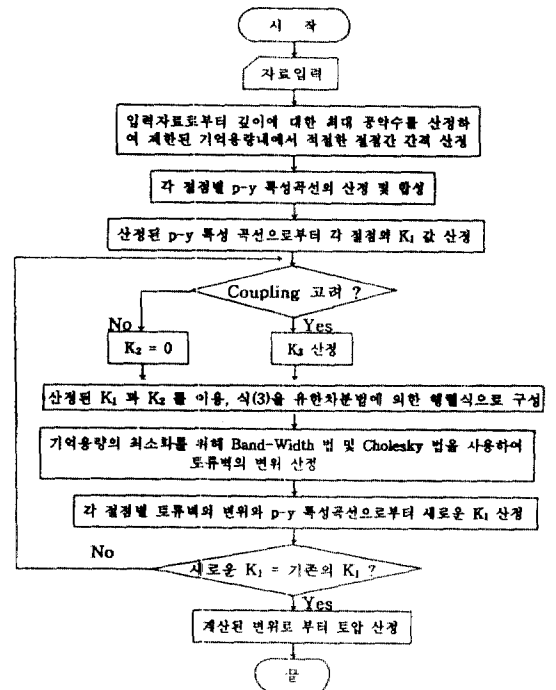


그림 6. 전산해석프로그램의 흐름도.

탄성부분의 평균치로 가정한다.

- (6) 유한차분법에 의해 행렬식을 구하고 band-width법을 이용해 행렬식의 크기를 최소화한다.
- (7) 식 (4)를 이용해 벽체의 변위를 산정한다.
- (8) 벽체의 변위와 각 절점에서의 p-y 특성곡선을 이용하여 지반탄성계수를 새로 산정한다.
- (9) (6), (7), (8)을 반복하여 지반 탄성계수의 변화가 없는 시점에서의 변위를 구한다.

(10) 변위로부터 토압을 계산한다.

3.3 해석프로그램의 흐름도

토류벽의 거동을 해석하기 위해서 Winkler의 해법을 기본으로 한 탄성지반상의 보이론을 확장하여 p-y 특성 곡선을 이용한 지반 스프링계수의 산정 및 각 지반 스프링간의 상호영향을 고려하는 전산 프로그램으로 해석 프로그램의 흐름도는 그림 6과 같다. 본 프로그램은 크게 입력부분, 수치해석부분, 출력부분으로 나눌 수 있고 수치해석 부분은 다시 적절한 절점간 간격산출, p-y 특성곡선의 산정 및 합성, 행렬식 산출, 변위 및 토압 산출 부분으로 나눌 수 있다.

4. 결과 분석

본 연구에서 개발된 전산 프로그램과 실제계측된 자료와의 비교를 통해 프로그램의 신뢰성과 타당성을 검토하였으며 이를 사용하여 벽체로부터 지반침하가 없는 곳까지의 거리를 변화시켜 지반스프링 상호간의 영향이 토류벽의 거동에 미치는 영향을 분석하였다.

4.1 사질토에 있어서 주동상태에 필요한 수평변위 변화의 영향

4.1 사질토에 있어서 주동상태에 필요한 수평변위 변화의 영향

Terzaghi가 제안한 주동 및 수동 상태에 필요한 수평변위에 의하면 사질토의 경우 주동상태에 필요한 수평변위값이 특정한 범위로 제안되어 있다.

본 절에서는 사질토의 경우 주동 상태에 필요한 수평변위값이 토류벽의 횡방향 변위에 미치는 영향을 분석하기 위해 주동상태에 필요한 수평변위를 느슨한 모래의 경우 0.001H와 0.005H, 밀한 모래의 경우 0.001H와 0.002H로 나누어 각각 해석하였다. 표 2는 이때의 지반 물성치를 나타낸 것이다.

그림 7에서 주동 상태에 필요한 수평변위의 영향을 비교해 보면 수평 변위의 변화가 2배 이상

표 2. 수평토압을 받는 토류벽의 지반 물성치

	단위 중량(t/m^3)	내부마찰각($^\circ$)	점착력(t/m^2)	K_a	K_o	K_p
느슨한 모래	1.84	30°	0.0	0.3333	0.5	3.0
밀한 모래	2.24	35°	0.0	0.2799	0.4264	3.6902

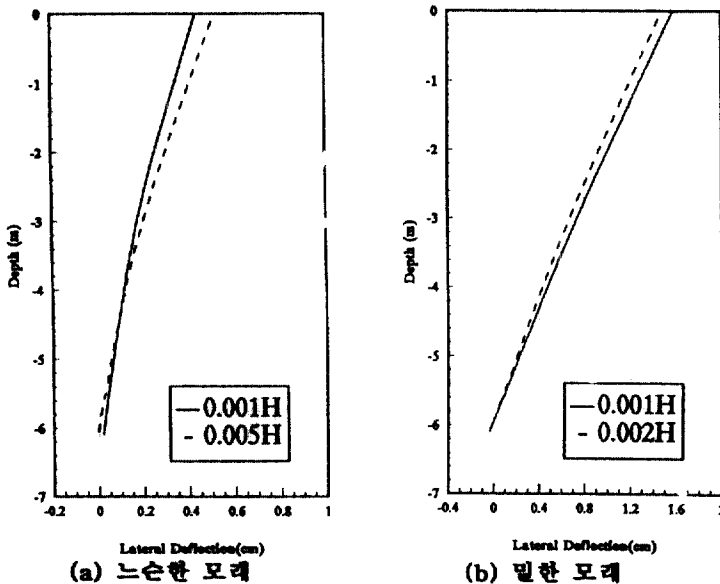


그림 7. 주동상태에 필요한 수평변위의 영향.

됨에도 불구하고 벽체의 변형에는 아주 작은 영향만을 준다는 것을 알 수 있다.

이는 주동 상태에 필요한 수평변위가 감소하면 p-y 특성 곡선의 기울기가 증가하며, 이에 따른 지반 반력 계수의 증가로 벽체의 변형 또한 감소하기 때문인 것으로 사료된다. 또한 주동상태에 필요한 수평변위가 느슨한 모래에 비하여 조밀한 모래의 경우가 크게 산정된것은 벽체상단부터 하단까지 가한 수평하중(분포하중으로 작용시켰음)이, 조밀한 경우(5.0 ton/m²)가 느슨한 경우(2.5 ton/m²)보다 큰 외력을 작용시켰기 때문이다.

4.2 기존 연구결과와의 비교분석

본 프로그램의 신뢰성과 타당성을 검토하기 위하여 기존에 개발, 사용중인 전산해석 프로그램과의 비교 분석 및 기존 계측된 실측자료와의 비교분석을 수행하였다.

그림 8은 기존의 전산해석프로그램과의 비교분석을 위한 지층 자료로 축방유동압을 받는 토류벽이 연약층에 설치되어 있는 경우로 이때 벽체의 강성은 2793 t·m²이다. 표 3은 그림 8의 지층자료로부터 본 연구에서 개발한 프로그램을 이용해 산출한 p-y 특성곡선 및 축방 유동압을 나타낸 것이다. 표 3에서 C지점(벽체 위치)의 p와 y값이 모두 0이 되는 것은 벽체 전후면의 지반 물성과 지표면 위치가 서로 같기

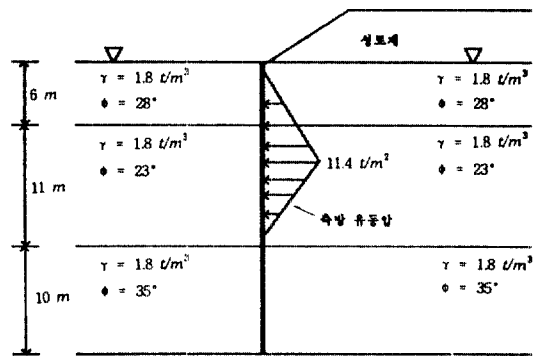


그림 8. 축방토압을 받는 토류벽의 지층단면도.

때문이다.

그림 9는 본 연구에 사용한 실측자료⁽¹⁶⁾의 지층 단면도를 나타낸 것이고 표 4는 토류벽의 제원 및 굴착 깊이를 나타낸 것이다. 실험을 위한 토류벽의 폭은 176 ft이고, soldier beam이 매 2.4384 m마다 설치되었으며 각 beam 사이는 띠장이 설치되었다. 토압과 수압을 측정하기 위해 압력계가 설치되었고, 응력과 변형률을 측정하기 위해 변형률 측정기와 경사계가 설치되었다. 표 5는 그림 9의 지층자료로부터 본 연구에서 개발한 프로그램을 이용해 산출한 p-y 특성곡선을 나타낸 것이다. 표 5에서 산출한 p-y 곡선은 벽체전면은 2.438 m까지 굴착하였으므로 이 깊이까지의 벽체후면의 p-y 곡선만이 산정(벽체

2.438 m		$\gamma = 1.84$ $c = 5.08 \text{ t/m}^2$ $\phi = 33.02^\circ$
0.610 m	$\gamma = 1.84 \text{ t/m}^2$ $c = 5.08 \text{ t/m}^2$ $\phi = 33.02^\circ$	$\gamma = 1.84 \text{ t/m}^2$ $c = 5.08 \text{ t/m}^2$ $\phi = 33.02^\circ$
1.524 m	$\gamma = 1.84 \text{ t/m}^2$ $c = 0.439 \text{ t/m}^2$ $\phi = 31.74^\circ$	$\gamma = 1.84 \text{ t/m}^2$ $c = 0.439 \text{ t/m}^2$ $\phi = 31.74^\circ$
9.144 m	1.524 m	$\gamma = 1.84 \text{ t/m}^2$ $c = 2.10 \text{ t/m}^2$ $\phi = 29.90^\circ$
1.524 m		$\gamma = 1.84 \text{ t/m}^2$ $c = 2.24 \text{ t/m}^2$ $\nabla \phi = 31.95^\circ$
1.524 m		$\gamma = 1.84 \text{ t/m}^2$ $c = 2.24 \text{ t/m}^2$ $\phi = 31.95^\circ$

그림 9. 실측 자료의 지층단면도.

표 3. 연약층에 근입된 벽체에 축방토압이 가해질 때의 해석 자료

		EI=2793 kg·m ²					Wall Ht.=27 m					
깊이 (m)	A지점		B지점		C지점		D지점		E지점		축방토압 (t/m ²)	
	P	Y(cm)	P	Y(cm)	P	Y(cm)	P	Y(cm)	P	Y(cm)		
0.0	0.0	-10.8	0.0	-5.4	0.0	0.0	0.0	5.4	0.0	10.8	0.0	
1.0	-28.4	-10.8	-15.0	-5.4	0.0	0.0	15.0	5.4	28.4	10.8	0.0	
2.0	-28.4	-10.8	-15.0	-5.4	0.0	0.0	15.0	5.4	28.4	10.8	1.425	
3.0	-28.4	-10.8	-15.0	-5.4	0.0	0.0	15.0	5.4	28.4	10.8	2.850	
4.0	-43.4	-10.8	-23.3	-5.4	0.0	0.0	23.3	5.4	43.4	10.8	4.275	
5.0	-43.4	-10.8	-23.3	-5.4	0.0	0.0	23.3	5.4	43.4	10.8	5.700	
6.0	-43.4	-10.8	-23.3	-5.4	0.0	0.0	23.3	5.4	43.4	10.8	7.125	
7.0	-42.1	-10.8	-23.4	-5.4	0.0	0.0	23.4	5.4	42.1	10.8	8.550	
8.0	-42.1	-10.8	-23.4	-5.4	0.0	0.0	23.4	5.4	42.1	10.8	9.975	
9.0	-42.1	-10.8	-23.4	-5.4	0.0	0.0	23.4	5.4	42.1	10.8	11.400	
10.0	-42.2	-10.8	-24.3	-5.4	0.0	0.0	24.3	5.4	42.2	10.8	9.975	
11.0	-42.2	-10.8	-24.3	-5.4	0.0	0.0	24.3	5.4	42.2	10.8	7.125	
12.0	-42.2	-10.8	-24.3	-5.4	0.0	0.0	24.3	5.4	42.2	10.8	5.700	
13.0	-43.0	-10.8	-25.5	-5.4	0.0	0.0	25.5	5.4	43.0	10.8	4.275	
14.0	-43.0	-10.8	-25.5	-5.4	0.0	0.0	25.5	5.4	43.0	10.8	2.850	
15.0	-43.0	-10.8	-25.5	-5.4	0.0	0.0	25.5	5.4	43.0	10.8	1.425	
16.0	-87.0	-10.8	-43.8	-5.4	0.0	0.0	43.8	5.4	87.0	10.8	0.00	
17.0	-87.0	-10.8	-43.8	-5.4	0.0	0.0	43.8	5.4	87.0	10.8	0.00	
18.0	-87.0	-10.8	-43.8	-5.4	0.0	0.0	43.8	5.4	87.0	10.8	0.00	
19.0	-109.9	-10.8	-60.5	-5.4	0.0	0.0	60.5	5.4	109.9	10.8	0.00	
20.0	-109.9	-10.8	-60.5	-5.4	0.0	0.0	60.5	5.4	109.9	10.8	0.00	
21.0	-109.9	-10.8	-60.5	-5.4	0.0	0.0	60.5	5.4	109.9	10.8	0.00	
22.0	-122.1	-10.8	-67.4	-5.4	0.0	0.0	67.4	5.4	122.1	10.8	0.00	
23.0	-122.1	-10.8	-67.4	-5.4	0.0	0.0	67.4	5.4	122.1	10.8	0.00	
24.0	-122.1	-10.8	-67.4	-5.4	0.0	0.0	67.4	5.4	122.1	10.8	0.00	
25.0	-129.0	-10.8	-71.7	-5.4	0.0	0.0	71.7	5.4	129.1	10.8	0.00	
26.0	-129.0	-10.8	-71.7	-5.4	0.0	0.0	71.7	5.4	129.1	10.8	0.00	
27.0	-129.0	-10.8	-71.7	-5.4	0.0	0.0	71.7	5.4	129.1	10.8	0.00	

전면의 p는 모두 0)됨에 따라 C지점(벽체 위치)에서의 p값은 깊이에 따라 증가하지만 2.438 m부터는 벽체 전면과 후면의 지반물성이 서로 같으므로 p값의 증가율은 서로 같게 되어 C지점(벽체 위치)에서 벽체 전후면의 p-y 곡선을 합성하면 깊이에 상관없이 일정하게 된다.

4.2.1 횡방향 변위

그림 10은 그림 8의 지층자료와 표 3을 이용하여 변위를 기존 Matlock에 의해 개발된 BM76 전산해석 프로그램⁽¹⁷⁾과 본 프로그램의 수치 해석법에 의해 해석된 횡방향 변위와 토압분포를 도시한 것이다. 그림 10에서 BM76 전산해석프로그램과 본 프로그램의 Winkler 이론 및 Horvath 이론에 의한 해석이 전반적으로 일치함을 알 수 있다.

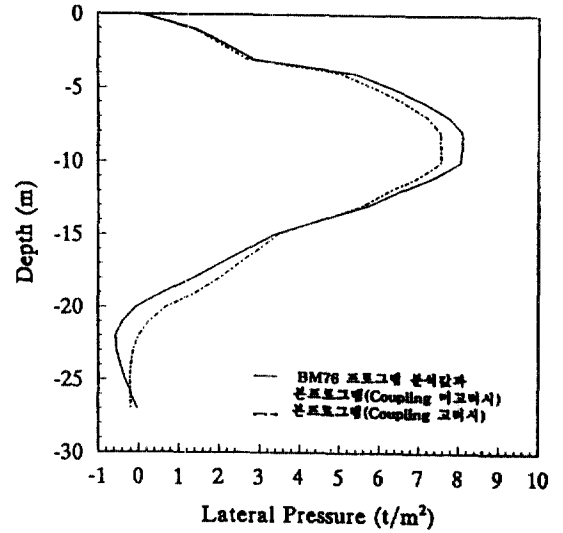
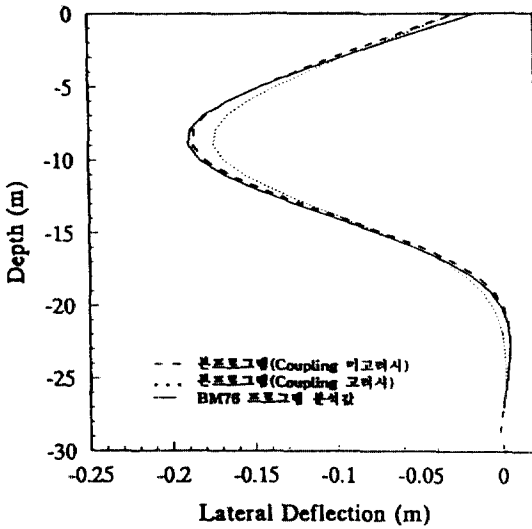


그림 10. 연약층에 축방유동압 작용시 발생하는 수평변위 및 토압분포.

표 4. 벽체의 제원 및 굴착 깊이

벽체의 제원		굴착 깊이
길이(m)	ET(t/m ²)	(m)
9.144	424929	2.438

그림 11은 그림 9의 실측자료와 표 4의 자료를 이용하여 본 프로그램의 Winkler 이론 및 Horvath 이론에 의한 해석과 실측치를 도시해 놓은 것으로 실측치는 토류벽을 구성하는 2개의 soldier beam에

설치된 경사계로부터 얻어진 것이다. 수평변위 측정을 위하여 경사계 측정기를 사용하였는데 토류벽을 지지하는 soldier beam 안벽에 직경 10 cm인 PVC 파이프(길이 13.72 m)를 부착하고 PVC 파이프 안쪽으로 직경 4.83 cm인 경사계 케이싱을 PVC 파이프에 그라우팅하였다. 변위측정은 경사계 측정기(직경 2.54 cm ; 길이 61 cm)를 케이싱 저부로부터 60 cm 간격을 두고 상향으로 끌어 올리면서 경사의 변화를 voltage로 경사계 기록기에 저장시킨후 scale factor를 곱하여 수직에 대한 casing의 경사로 토류

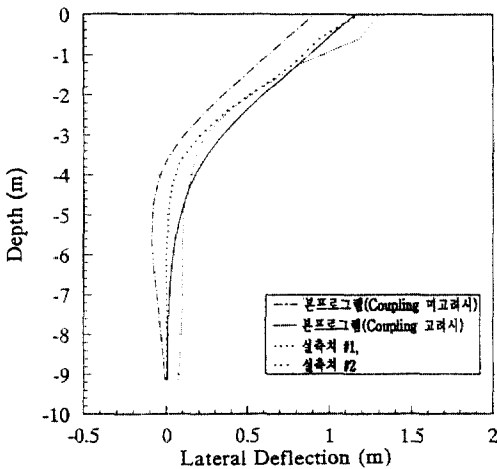


그림 11. 수치해석법에 의해 해석된 횡방향 변위와 실측치와의 비교.

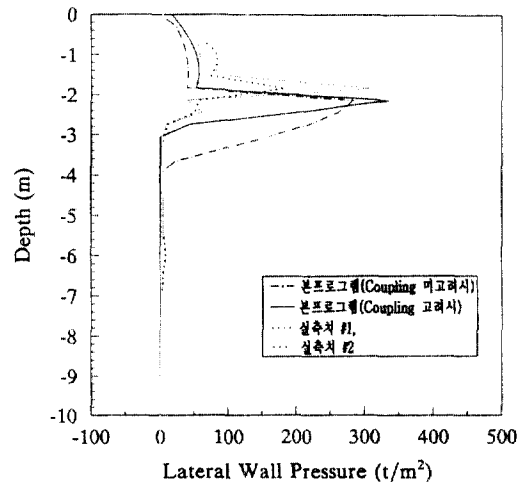


그림 12. 수치해석법에 의해서 해석된 토압과 실측치와의 비교.

표 5. 전산해석프로그램에 의해 산정된 p-y 특성곡선

깊이 (cm)	A		B		C		D		E	
	P(t/m ²)	Y(cm)	P(t/m ²)	Y(cm)	P(t/m ²)	Y(cm)	P(t/m ²)	Y(cm)	P(t/m ²)	Y(cm)
0.0	0.000	-4.572	0.000	-0.914	0.000	0.00	0.000	0.914	0.000	4.572
30.48	0.165	-4.572	0.165	-0.914	0.255	0.00	0.581	0.914	1.905	4.572
60.96	0.331	-4.572	0.331	-0.914	0.511	0.00	1.137	0.914	3.812	4.572
91.44	0.496	-4.572	0.496	-0.914	0.766	0.00	1.756	0.914	5.718	4.572
191.92	0.661	-4.572	0.661	-0.914	1.022	0.00	2.342	0.914	7.624	4.572
152.40	0.827	-4.572	0.827	-0.914	1.277	0.00	2.928	0.914	9.530	4.572
182.88	0.992	-4.572	0.992	-0.914	1.533	0.00	3.514	0.914	11.436	4.572
213.36	1.158	-4.572	1.158	-0.914	1.788	0.00	4.099	0.914	13.342	4.572
243.84	1.323	-4.572	1.323	-0.914	2.044	0.00	4.685	0.914	15.248	4.572
274.32	-1.158	-4.572	0.755	-0.914	2.044	0.00	5.151	0.914	17.035	4.572
304.80	-3.638	-4.572	-0.187	-0.914	2.044	0.00	5.618	0.914	18.822	4.572
335.28	-5.846	-4.572	-0.328	-0.914	2.044	0.00	6.059	0.914	20.497	4.572
365.76	-8.572	-4.572	-0.843	-0.914	2.044	0.00	6.502	0.914	21.173	4.572
396.24	-10.262	-4.572	-1.358	-0.914	2.044	0.00	6.944	0.914	23.848	4.572
426.72	-12.470	-4.572	-1.873	-0.914	2.044	0.00	7.388	0.914	25.524	4.572
457.20	-14.678	-4.572	-2.388	-0.914	2.044	0.00	7.828	0.914	27.199	4.572
487.68	-16.571	-4.572	-2.842	-0.914	2.044	0.00	8.238	0.914	28.725	4.572
518.16	-18.464	-4.572	-3.295	-0.914	2.044	0.00	8.647	0.914	30.252	4.572
548.64	-20.357	-4.572	-3.749	-0.914	2.044	0.00	9.056	0.914	31.778	4.572
579.12	-22.250	-4.572	-4.202	-0.914	2.044	0.00	9.465	0.914	33.304	4.572
609.60	-24.143	-4.572	-4.656	-0.914	2.044	0.00	9.875	0.914	34.830	4.572
640.08	-26.392	-4.572	-5.179	-0.914	2.044	0.00	0.326	0.914	36.523	4.572
670.56	-28.641	-4.572	-5.702	-0.914	2.044	0.00	0.767	0.914	38.216	4.572
701.04	-30.891	-4.572	-6.225	-0.914	2.044	0.00	1.213	0.914	39.910	4.572
731.52	-33.140	-4.572	-6.748	-0.914	2.044	0.00	1.659	0.914	41.603	4.572
762.00	-35.389	-4.572	-7.271	-0.914	2.044	0.00	2.105	0.914	43.297	4.572
792.48	-37.276	-4.572	-7.682	-0.914	2.044	0.00	2.335	0.914	44.097	4.572
822.96	-39.103	-4.572	-8.093	-0.914	2.044	0.00	2.565	0.914	44.897	4.572
853.44	-41.051	-4.572	-8.504	-0.914	2.044	0.00	2.795	0.914	45.698	4.572
883.92	-42.938	-4.572	-8.915	-0.914	2.044	0.00	3.021	0.914	46.498	4.572
914.40	-44.825	-4.572	-9.326	-0.914	2.044	0.00	3.255	0.914	47.299	4.572

벽의 수평변위가 측정되었다. 그림 11에서 Horvath 이론에 근거하여 지반 스프링간의 상호작용을 고려한 해석법이 일반적인 Winkler 이론에 의한 해석보다 실측치에 유사한 개형을 나타내었다.

4.2.2 토압분포

그림 12는 현장에서 토류벽을 구성하는 2개의 soldier beam에서 계측된 토압과 본 전산 프로그램에서 해석된 토압을 도시한 것이다. 토압계는 soldier beam 측면에 깊이방향으로 1 m 간격으로 부착하여 토압이 측정되었으며 그림 12에서 본 전산프로그램

을 사용한 해석토압과 계측된 토압을 비교하면 토압이 최대로 발생하는 지점에 있어서는 약간의 차이가 있으나 전체적으로 비슷한 분포를 나타내며 일반적인 Winkler 이론에 의한 토압보다 Horvath 이론에 의해 Coupling을 고려한 토압이 전반적으로 작게 산출되는 것을 알 수 있으나 흙과 구조물의 상호작용을 고려하여 변위에 따라 토압을 산정하는 방법은 타당성이 있다고 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 p-y 특성곡선의 합성을 통한 지반 스프링의 지반반력계수를 구하여 이를 탄소성이론에 적용하고, 지반 스프링 상호간의 영향을 고려하여 토류벽의 거동을 현장계측치와 비교 분석하였다. 본 연구 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 주동 및 수동토압이론에 근거한 p-y 특성곡선 개념을 이용한 토압 및 수평변위 해석은 강성이 큰 말뚝뿐만이 아니라 강성이 작은 벽체에는 적용할 수 있음을 알았다.
- 2) p-y 특성곡선을 사용할 때 지반 스프링 개념의 요소에 대한 영향을 해석하는 것보다는 지반 스프링간의 상호작용을 고려하여 변위에 따른 토압을 결정하는 방법이 실측된 변위 및 토압 분포에 접근함이 밝혀졌다.
- 3) 사질토에 있어서 주동 상태에 도달하기 위한 수평변위의 영향은 수평변위의 변화가 크에도 불구하고 벽체의 변형에는 아주 작은 영향만을 준다는 것을 알 수 있다.

참고문헌

1. Sowers, G.F., *Shallow Foundations*, McGraw-Hill, New York, 1962.
2. Wong, G.C.Y., "Stability Analysis of Slurry Trenches", *JGED*, ASCE Vol. 110, No. 11, Nov., 1984, pp. 1577-1590.
3. Peck, R.B., "Deep Excavations and Tunneling in Soft Ground", *Proceedings of 7th International*

- Conference Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico City, 1969, pp. 225-290.
4. Das, B.M., *Principles of Geotechnical Engineering*, 1991, pp. 348-362.
5. Bowles, J.E., *Foundation Analysis Design*, McGraw-Hill, 1988., pp. 410-413, pp. 648-650.
6. Braud, J.L., *The Pressuremeter*, A.A.Balkema, 1992. p. 165.
7. 한국지반공학회, 굴착 및 흙막이 공법, **한국지반공학회지**, 1992. pp. 358-365.
8. Caspe, M. S., "Surface Settlement Adjacent to Braced Open Cut", *JGED*, ASCE, Vol. 92, SM4, 1966.
9. 한국지반공학회, 서울지하철 7-11공구 지하굴착 가설토류벽 배면차수공법에 대한 안정성 검토 연구, **한국지반공학회지**, 1992.
10. Clough, G.W., and O'Rourke, T.D., "Construction Induced Movements of Insitu Walls", *Geotechnical Special Publication*, ASCE, No. 25, pp. 439-470.
11. Horvath, J.S., "Beam-Column Analogy Model for Soil Structure Interaction Analysis", *JGED*, ASCE, Vol. 119, No. 2, pp. 358-363.
12. Vallabhan. C.V.G., and Das, Y.C., "Discussion of Modified Vlasov Model for Beams on Elastic Foundations", *JGED*, ASCE, Vol. 118, No. 9, pp. 1482-1484.
13. Vallabhan. C.V.G., and Das, Y.C., "Modified Vlasov Model for Beams on Elastic Foundations", *JGED*, ASCE, Vol. 117, No. 6, pp. 956-966.
14. Press, W.H., Flannery, B.P., Teukolsky, S., A. and Vetterling, W. T., *Numerical Recipes in Pascal*, Cambridge University Press, 1989, pp. 39-46, pp. 74-84.
15. Istok, J., *Groundwater Modeling by the Finite Element Method*, American Geophysical Union, 1989, pp. 176-190.
16. Chung, M.K., Behavior of a full scale tieback wall in sand, *Master Dissertation*, Texas A & M University, 1991.
17. Matlock, H., Borgard, D., and Lam, I.P., *BMCOL 76: A computer program for the analysis of beam-columns under static axial and lateral loading*, The Earth Technology Corporation, 1981.

(接受: 1993. 12. 28)