

### 3차원 수동토압에 관한 실험적 연구

## An Experimental Study on Passive Earth Pressure of 3-Dimension

김기동<sup>1)</sup>, Gi-Dong Kim, 이상덕<sup>2)</sup>, Sang-Duk Lee

<sup>1)</sup>아주대학교 공과대학 건설교통공학과 대학원, Graduate student, Dept. of Construction and Transportation Eng., A-jou Univ.

<sup>2)</sup>아주대학교 공과대학 건설교통공학과 교수, Professor, Dept. of Construction and Transportation Eng., A-jou Univ.

**SYNOPSIS** : The safety of a structure can be improved by applying the three dimensional passive earth pressure. Because the three dimensional passive earth pressure is much larger than the two dimensional passive earth pressure and it is determined by the size(width B and height H) and the wall frictional angle of the resistant wall. Therefore, the three dimensional passive resistance behavior was studied through the model tests in sandy ground, where the size of the resistant wall and the wall frictional angle were varied. The results show that three dimensional passive earth pressure is 1.1~3.4 times larger than that of the two dimensional value depending on the wall size and the wall friction.

**Key words** : two dimensional passive earth pressure, three dimensional passive earth pressure, wall frictional angle, coefficient of three dimensional passive earth pressure

## 1. 서론

최근들어 산업의 발달과 교통량 증가에 따라 사회간접자본 시설의 확충이 필요하게 되었다. 이에 맞추어 지상 및 지하공간 개발사업이 매우 활발히 진행되고 있으며 앞으로 더 많은 수요의 공간개발이 이루어질 것으로 예상된다. 특히 구조물 기초, 교대, 옹벽, 박스등의 구조물 설계 및 시공에 있어서 흙의 움직임을 지반공학적인 관점에서 규명하려는 노력이 많이 진행되고 있다.

일반적으로 구조물설계 및 시공시에 토압산정은 2차원으로 계산하고 그 결과를 안전측으로 적용하여 실무에 이용하고 있다. 수동토압은 대부분 구조물의 안정에 유리하게 작용하는데, 수동토압의 2차원적인 산정은 실제로 작용되는 수동토압의 크기에 비하여 과소평가하게 되어 과도한 구조물의 설계 및 시공의 문제를 야기한다.

그러므로, 이러한 문제를 해결하기 위하여 실제로 작용하는 토압에 가장 근접한 결과를 계산해내기 위하여 본 연구에서는 모래지반에서 3차원 수동토압의 분포와 크기를 벽체의 단면비와 벽마찰을 고려한 모형실험을 통하여 구하고, 그 결과 얻어진 3차원 수동토압을 2차원 수동토압과 비교, 분석하였다.

## 2. 기존의 수동토압 이론

## 2.1 2차원 수동토압 이론

2차원적인 수동토압은 활동파괴면을 가정한 후 파괴체계의 힘의 평형으로부터 토압을 산정한 Coulomb 이론을 적용한다. 도로교 시방서에 제시된 평상시에 가동벽에 작용하는 수동토압은 다음과 같다.

### ● 사질토

$$P_p = K_p \cdot \gamma \cdot z + K_p \cdot q \quad (1)$$

### ● 점성토

$$P_p = K_p \cdot \gamma \cdot z + 2c\sqrt{K_p} + K_p \cdot q \quad (2)$$

## 2.2 3차원 수동토압 이론

3차원 수동토압은 단면의 형상에 따라 여러 가지 산정법이 있다. 즉, 얇은 구조물의 경우( $H/B \leq 3.33$ )에는 Horn과 Weissenbach의 방법, 좁은 구조물의 경우에는 ( $H/B > 3.33$ )에는 Krey와 Streck의 방법 및 Weissenbach의 방법 등이 있으며 방법별 산정방식은 다음과 같다.

### 2.2.1 얇은 구조물의 수동토압 ( $H/B \leq 3.33$ )

#### 1) Horn의 방법

$$E_{p_{act}} = w_e \cdot E_{p_{Br}} \quad (3)$$

$$E_{p_{Br}} = \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot H^2 \cdot B \cdot K_p \cdot (1 + C \cdot \frac{H}{B}) \quad (4)$$

$$w_e = \frac{\Delta l / \Delta l_{Br}}{c + b \cdot \Delta l / \Delta l_{Br}} \quad (5)$$

여기서,

$$\begin{aligned} a &= 0.12, & b &= 0.88 \\ \Delta l &= \text{허용변위} \\ \Delta l_{Br} &= \text{파괴시변위} \\ \Delta l_{Br} &= 10.4 \cdot H^{1.5} \cdot (1 - 0.625 \cdot D_r) \\ C &= \text{방법계수} (\approx 0.3) \end{aligned}$$

#### 2) Weissenbach의 방법

$$E_{ph}^{3D} = (B + 0.6H \tan \phi) E_{ph}^{2D} \quad (6)$$

### 2.2.2 좁은 구조물의 수동토압 ( $H/B > 3.33$ )

#### 1) Krey와 Streck의 방법

Krey는 그림 1와 같이 파괴모델을 가정하였고 구조물과 폭이 같은 썰기형 파괴체의 양측면에 전단력을 가정하여 3차원 효과를 고려하였다. 이때에 측면의 저항력을 나타내기 위한 측면토압계수에 따라서 Streck과 구분된다.

### ● Krey의 방법

좁은 구조물에 작용하는 수동토압은 전면의  $E_p$ 와 측면의 수동토압  $E_s$ 의 합이 된다.

$$E_p = \frac{1}{2} \gamma h^2 b K_p + \frac{h^3}{3} \gamma \sqrt{K_p} \tan \phi K_s \quad (\text{단 } K_s = K_a) \quad (7)$$

● Streck의 방법

Streck은 Krey와 같은 형태이지만 측면토압계수  $K_s=1$  로 정하여 계산한다.

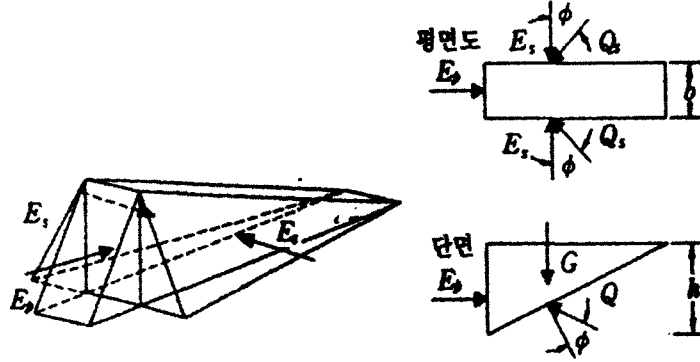


그림 1. 좁은 단면에 대한 수동토압(Krey방법)

2) Weissenbach의 방법

$$E_{ph}^{3D} = \sqrt{\frac{B}{0.3H}} \times (0.3H + 0.6H \tan \phi) E_{ph}^{2D} \quad (9)$$

3. 실내모형실험

3.1 모형실험 지반의 기본 물성

본 연구에 사용된 모형지반에 대한 입도분포시험 및 기본물성시험을 실시한 결과 입도분포 곡선은 그림 2과 같으며, 기본물성은 표 1과 같다. 입도분포시험결과 모형지반은 통일분류법(Unified Soil Classification System)에 의한 분류결과 공학적인 특성은 입도분포가 양호한 모래, SW이다.

조성된 모형지반의 단위중량은 모형토조내에 모래를 강사하기 전 캔을 설치하고 시험 후 꺼내어 무게를 측정하여 구하였다. 평균단위중량은  $18.0 \text{ kN/m}^3$  로 나타났으며, 이로부터 계산된 모형지반의 상대밀도는  $D_r = 77.5\%$  이다.

표 1. 모형지반의 기본 물성

입도분포	$D_{10} = 0.24$ $C_u = 6.25$ $C_c = 1.56$
최대 건조단위중량	$\gamma_{dmax} = 18.6 \text{ kN/m}^3$
최소 건조단위중량	$\gamma_{dmin} = 16.2 \text{ kN/m}^3$
상대밀도	$D_r = 77.5\%$
비중	$G_s = 2.63$
내부마찰각 $\phi$	$40^\circ$
점착력 $c$	$0 \text{ kN/m}^2$

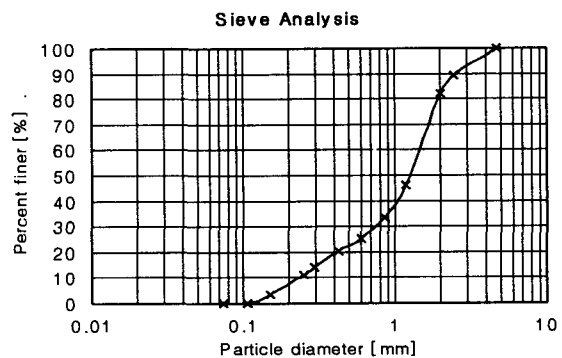


그림 2. 모형지반의 입경가적곡선

### 3.2 실험장치 및 계측장치

본 실내모형실험에서는 100cm×150cm×100cm(폭×길이×높이)인 철제 모형토조를 사용하였다. 토조의 측면, 배면 및 바닥면은 날개판을 부착하여 변형을 방지하였다. 또한 모형지반은 100cm×40cm×120cm(폭×길이×높이)인 강사기를 사용하여 조성하였다. 강사기는 강사높이를 일정하게 유지할 수 있으며 이동이 자유롭도록 바닥면에 롤러를 부착하여 강사시 균질하게 지반이 조성될 수 있도록 하였다.

수동저항벽체는 강성이 크고 성형이 쉬운 두께 25mm의 베이크라이트 판을 각 실험변수에 맞도록 가공한 후 볼트로 연결하여 제작하였다. 벽체의 전면에 샌드페이퍼를 부착하여 벽마찰 조건을  $\delta=0, 1/3\phi, 2/3\phi, \phi$ 로 변화시켰다. 롤러가 부착된 거치대를 토조의부에 부착하여 고정시키고 수동저항벽체가 이 거치대 안에서 전후로만 이동하도록 설치하여 수평이동만으로 수동과피가 일어나도록 하였다. 실험변수에 따라 벽체의 폭을 변화시킬 경우에는 휨이 발생하지 않도록 베이크라이트판을 L형강으로 보강하였다. 유압실린더는 직경 25mm인 락볼트와 반력보를 사용하여 수동저항벽체 후미에 설치하였다.

경계조건은 토조의 벽면에 에폭시를 바른 후 모래를 뿌려서 모형지반과 동일한 마찰각을 갖도록 하였다. 수동변위가 진행되는 동안 파괴면이 토조의 경계면에 닿지 않도록 기초지반을 20cm 조성한 후 수동저항벽체의 관입을 시행하였다. 벽체가 지반에 관입될 때 발생하는 3차원 수동토압의 크기를 알아내기 위하여 수동저항벽체에 걸리는 관입하중과 관입변위를 측정하였다.

하중측정장치는 허용오차가 0.03%인, (주)봉신사의 500kg, 200kg 용량의 스트레인게이지식(Strainage type) 로드셀(Load Cell)을 사용하였고, 변위측정장치는 일본 Midori사 제품으로 최대 50mm까지 측정할 수 있는 LVDT(Linear Variable Displacement Transducer)를 사용하여 수동저항벽체의 관입량을 측정하였다. 모형실험에서 측정된 데이터는 미국 Validyne Engineering Corp.사 제품인 UPC-601-U Card와 컴퓨터 프로그램인 Easy Sense Software를 사용하여, 일정한 시간간격으로 자동측정하여 모니터에 출력하고 동시에 컴퓨터에 저장되도록 하였다.

표 2. 실험종류

주요 변수			높이/폭	실험명
벽마찰각 (degree)	벽체높이 (cm)	벽체폭 (cm)		
0	36	20	1.8	W0B20H36
		30	1.2	W0B30H36
		40	0.9	W0B40H36
		50	0.72	W0B50H36
$\frac{1}{3}\phi$		20	1.8	W1B20H36
		30	1.2	W1B30H36
		40	0.9	W1B40H36
		50	0.72	W1B50H36
$\frac{2}{3}\phi$		20	1.8	W2B20H36
		30	1.2	W2B30H36
		40	0.9	W2B40H36
		50	0.72	W2B50H36
$\phi$		20	1.8	W3B20H36
		30	1.2	W3B30H36
		40	0.9	W3B40H36
		50	0.72	W3B50H36

※ W: 벽마찰각, B: 수동저항벽체 폭, H: 수동저항벽체의 높이

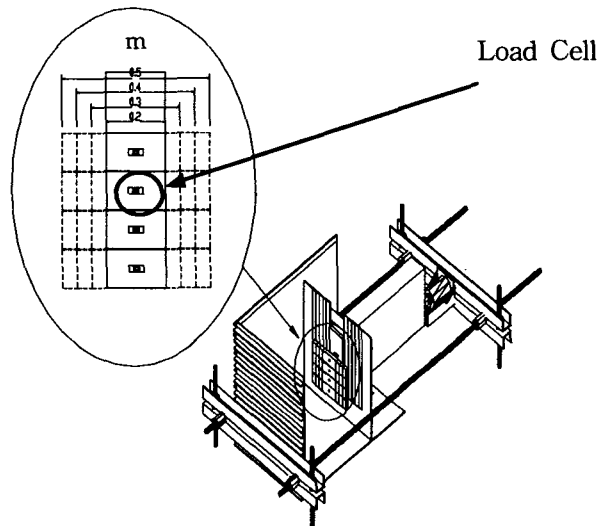


그림 3. 모형토조 구조도

### 3.3 실험방법 및 실험종류

본 실험에서는 수동저항벽체의 높이를 0.36m로 고정하고, 벽마찰에 따라 수동저항벽체의 폭을 20, 30, 40, 50cm로 변화시켜 수동토압의 크기를 측정하였다. 수동저항벽체에 임의로 수동변위를 발생시키기 위하여 벽체의 후방에 유압실린더를 위치시키고 유압잭으로 가압하여 수동저항벽체에 하중을 가하고 벽체 높이별 수동토압을 측정하였다. 모형지반은 강사장치를 사용하여 샌드커튼(Sand Curtain)방법으로 균질하게 조성하였다. 수행한 실험의 종류는 표 2에 나와 있다.

### 3.4 실험결과

본 실험에서는 수동저항벽체의 크기에 따른 수동토압의 크기를 측정하기 위하여 수동저항벽체의 폭을 변화시키고 모형지반에 관입하여 수평 수동변위를 유발시키면서 수동토압의 크기와 분포를 측정하였다.

#### 3.4.1 실험결과와 이론토압의 비교

표 3은 마찰계수 및 수동저항벽체의 폭에 따른 수동토압의 실험값과 이론값을 나타낸다.

표 3. 이론토압과 실험값의 비교

(단위 kN)

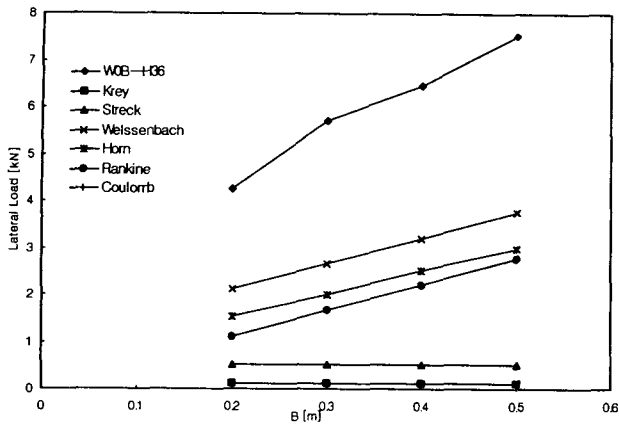
실험명	실험값	Krey		Streck		Weissenbach		Horn		Rankine		Coulomb	
		값	%	값	%	값	%	값	%	값	%	값	%
W0B20H36	4.25	0.11	3767.5	0.52	816.4	2.11	201.5	1.52	279.4	1.11	384.2	1.11	384.2
W0B30H36	5.71	0.11	5039.0	0.52	1096.1	2.66	214.6	2.01	283.5	1.66	344.2	1.66	344.2
W0B40H36	6.46	0.11	5669.7	0.52	1237.9	3.21	200.9	2.51	257.4	2.21	291.9	2.21	291.9
W0B50H36	7.52	0.11	6573.0	0.52	1440.5	3.77	199.6	3.00	250.5	2.77	272.0	2.77	272.0
W1B20H36	4.98	0.14	3555.7	0.69	718.2	3.73	133.3	2.69	184.8	1.11	450.1	1.96	254.2
W1B30H36	6.60	0.14	4683.6	0.69	951.3	4.71	140.1	3.57	185.1	1.66	398.0	2.94	224.7
W1B40H36	7.61	0.14	5362.0	0.70	1095.0	5.69	133.7	4.44	171.3	2.21	344.1	3.92	194.3
W1B50H36	8.41	0.14	5882.8	0.70	1207.9	6.67	126.0	5.32	158.1	2.77	304.1	4.90	171.7
W2B20H36	5.85	0.18	3197.0	0.91	641.3	6.46	90.6	4.66	125.6	1.11	529.2	3.39	172.7
W2B30H36	7.99	0.18	4324.6	0.92	873.8	8.16	97.9	6.17	129.4	1.66	481.6	5.08	157.1
W2B40H36	9.05	0.19	4852.5	0.92	987.5	9.85	91.8	7.69	117.7	2.21	408.9	6.78	133.4
W2B50H36	9.38	0.19	4987.9	1.02	1022.3	11.55	81.3	9.20	102.0	2.77	339.3	8.47	110.7
W3B20H36	6.75	0.19	3511.2	1.02	662.8	8.05	83.9	5.80	116.3	1.11	610.6	4.22	160.0
W3B30H36	8.75	0.19	4501.2	1.02	857.1	10.16	86.2	7.69	113.8	1.66	527.5	6.33	138.2
W3B40H36	9.57	0.20	4868.1	1.03	935.0	12.27	78.0	9.57	99.9	2.21	432.5	8.44	113.3
W3B50H36	10.15	0.20	5109.3	1.03	989.7	14.38	70.6	11.46	88.6	2.77	367.0	10.55	96.1

\* 여기서 %는 (실험값/이론값)을 나타낸 것이다.

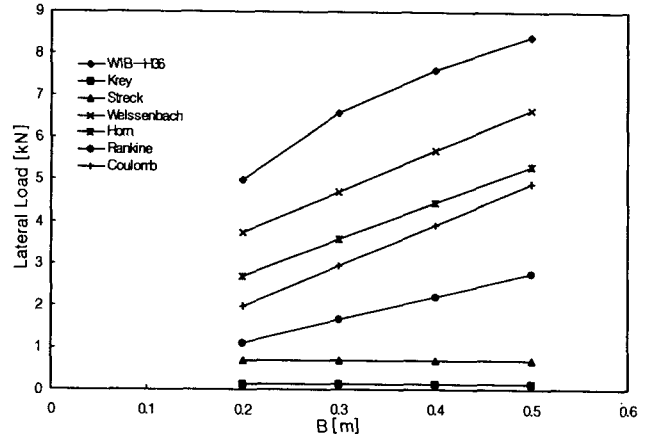
단, 이론적인 3차원 수동토압의 계산시에 쿨롱의 2차원 수동토압계수  $K_p$ 를 그대로 적용하면 토압을 상당한 오차율로 과대평가하게 되므로 「구조물 설계기준」(건설교통부)에 제시되어 있는 Caquot and Kerisel의 도표와  $-\delta/\phi$ 에 따른 감소계수 R을 이용하였다.

#### 3.4.2 수동저항벽체 폭에 따른 수동토압의 변화

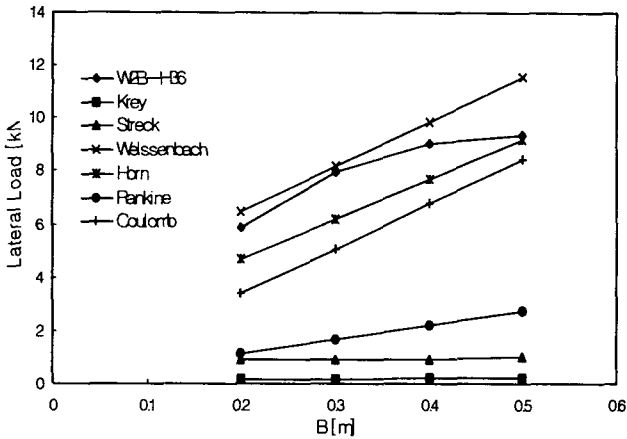
실험에서 구한 토압을 극한평형상태에서 산정한 이론토압과 비교하였다. 그림 4.b을 보면 벽마찰( $\delta$ )이  $\phi/3$ 일 때 수동저항벽체의 폭이 증가함에 따라 수동토압의 증가율이 전체적으로 감소하지만, 그림 4.d의 벽마찰( $\delta$ )이  $\phi$ 일 때에 비해 증가율이 더 큰 것으로 나타난다. 즉, 벽체전면의 벽마찰이 증가함에 따라 수동토압의 증가율은 감소하는 경향이 있는 것으로 나타났다. 즉, 수동저항벽체의 크기가 커지면서 벽체전면의 벽마찰이 수동토압의 크기에 미치는 영향은 작아진다.



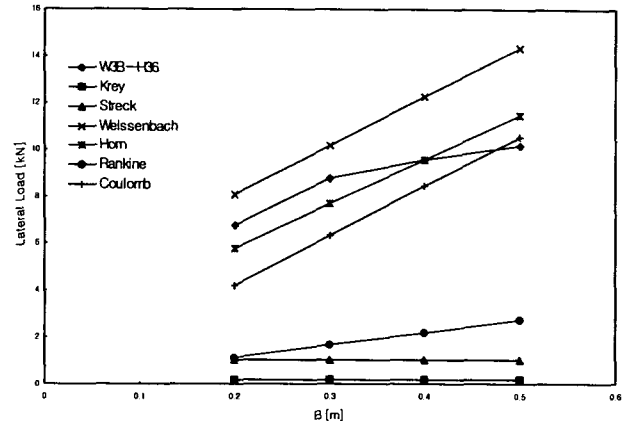
(a) W0B--H36



(b) W1B--H36



(c) W2B--H36

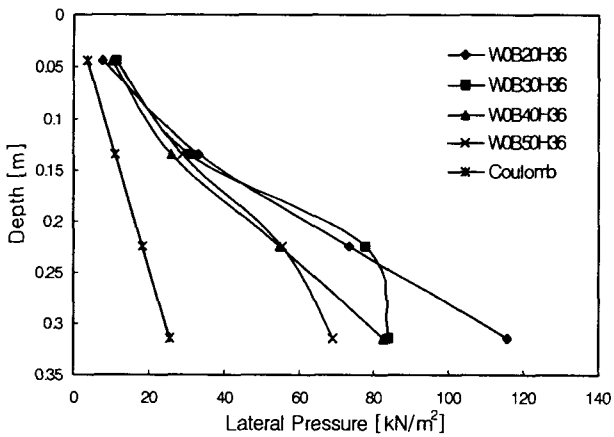


(d) W3B--H36

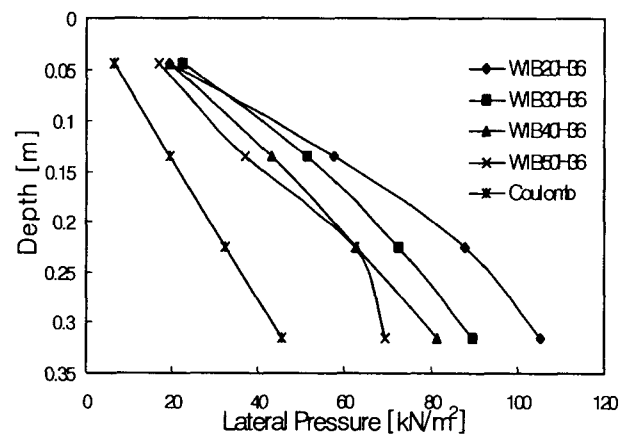
그림 4. 수동저항벽체 폭에 따른 수동토압

### 3.4.3 벽체높이에 따른 수동토압

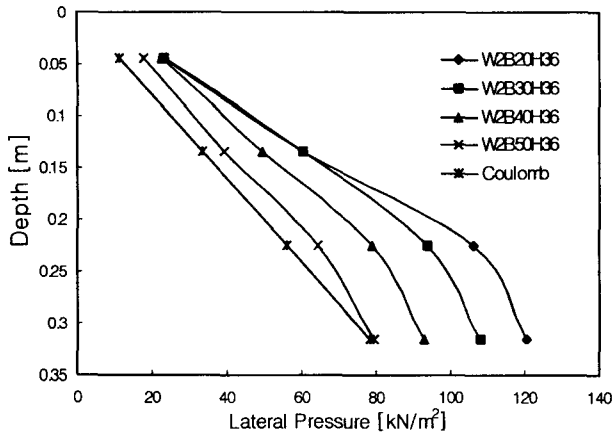
그림 5은 벽체높이에 따른 수동토압을 나타낸 것이다. 벽체높이에 따른 수동토압은 폭에 상관없이 높이에 따라 삼각형분포를 이룬다. 또한 수동저항벽체 폭이 커질수록 수동토압은 점점 이론적인 Coulomb의 2차원 수동토압에 가까워지는 것을 볼 수 있다.



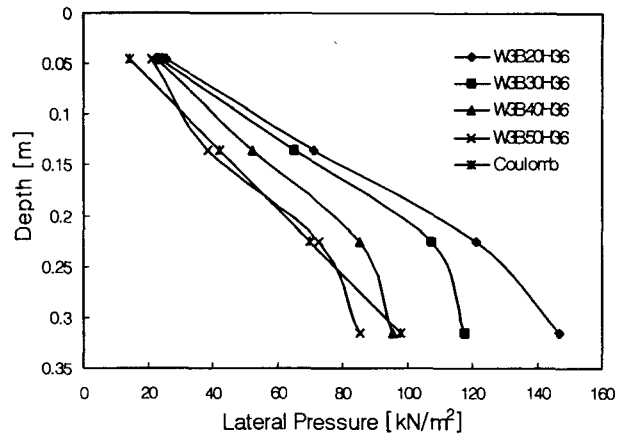
(a) W0B--H36



(b) W1B--H36



(c) W2B--H36



(d) W3B--H36

그림 5. 수동저항벽체 벽체높이에 따른 수동토압

### 3.4.4 수동저항벽체 벽마찰과 단면비에 따른 수동토압계수 $K_p$

벽마찰에 따라 본 연구에서 얻어진 수평응력  $\sigma_h$ 를 이용하여 3차원 수동토압계수  $K_{p3D}$  ( $K_{p3D} = \sigma_h / \sigma_v$ ,  $\sigma_v = \gamma \cdot h$ )를 구하면 그림 6과 같다. 그림 6에서 보듯이 수동저항벽체의 폭이 증가할수록  $K_{p3D}$ 는 감소한다. 실험에서 구한  $K_{p3D}$ 를 Caquot and Kerisel에 의해 보정된 이론적인 Coulomb의 2차원 수동토압계수  $K_{p2D}$ 와의 비로 나타내면 그림 7과 같다. 그림 7은 벽마찰을 고려한 단면비 H/B에 따른  $K_{p3D}$ 와  $K_{p2D}$ 의 비이다. 그림 7을 보면 수동저항벽체의 벽마찰  $\delta$ 가  $\delta = \phi$ 일 때,  $K_{p3D} / K_{p2D}$ 가 1.1~1.7로 가장 작으며,  $\delta = 0^\circ$ 일 때,  $K_{p3D} / K_{p2D}$ 가 2.9~3.4로 가장 크게 나타났다. 이는 수동저항벽체의 벽마찰이 수동토압에 미치는 영향이 이론보다 실제 실험에서 크지 않다는 것을 보여준다.

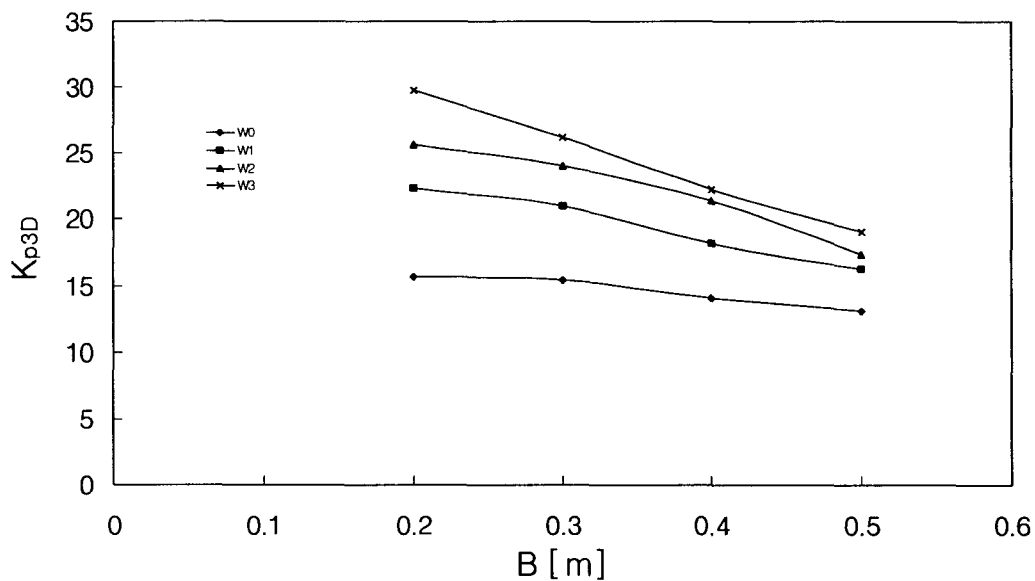


그림 6. 수동저항벽체 벽마찰에 따른 수동토압계수

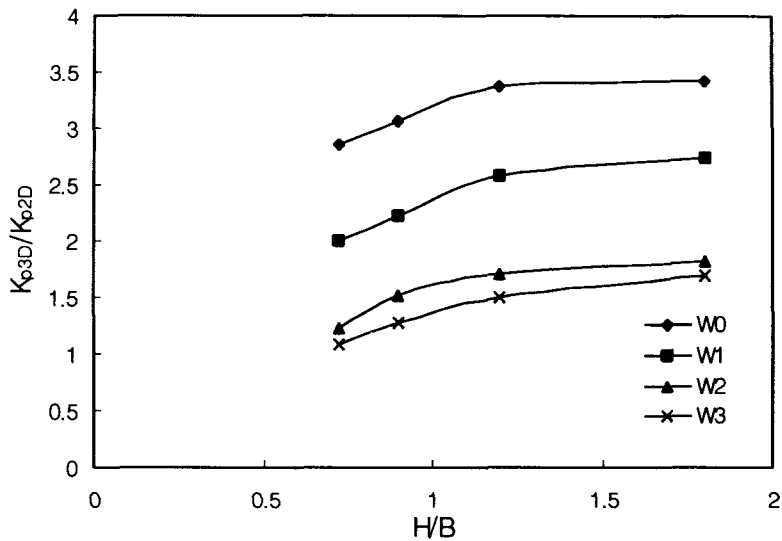


그림 7. 수동저항벽체 단면비에 따른 수동토압계수

#### 4. 결론

본 연구결과 극한 평형상태에 도달하는 3차원 수동벽체변위는  $0.025H \sim 0.041H$ 이며, 이는 이론적인 3차원 수동벽체변위  $0.05H$ 와 비교할 경우 이론값보다 약 20~50% 작다. 이는 조성된 지반의 상대밀도가 상당히 크기 때문인 것으로 보인다. 토압분포는 수동저항벽체 폭에 관계없이 삼각형분포를 보인다.  $K_{p3D} / K_{p2D}$ 는 벽마찰을 고려한 단면비  $H/B$ 에 따라 1.1~3.4정도의 값을 보인다. 이는, 일반적으로 적용하고 있는  $K_{p2D}$ 가 실제로 발휘되고 있는  $K_{p3D}$ 보다 작은 값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 따라서,  $K_{p3D}$ 를 적용하면 경제성, 시공성에서 효과를 기대할 수 있을 것으로 생각된다. 수동토압 및 수동토압계수는 벽마찰에 관계없이 수동저항벽체의 폭이 커질수록 2차원 상태에 근접함을 볼 수 있다. 따라서, 수동저항벽체의 폭을 크게하면 비효율적이므로 효과적인 3차원 수동토압을 발휘하기 위하여 수동저항벽체의 폭을 작게하여야한다.  $K_{p3D}$ 의 적용에 앞서, 정확한 3차원 수동토압의 산정을 위해 보다 많은 연구가 선행되어야 한다.

#### 참고문헌

1. 강세구(1997), "연속기초의 수동토압과 바닥마찰에 관한 연구", 석사학위논문
2. 건설교통부(1997), "구조물 기초설계기준"
3. 이상덕(1996), "전문가를 위한 기초공학", 도서출판 엔지니어즈
4. 이상덕(1997), "토질시험법", 도서출판 새론
5. 이상덕(1998), "토질역학", 도서출판 새론
6. C.R.I Clayton, J.Milititsky and R.I Woods(1993), "Earth Pressure and Earth-retaining Structures"
7. Das, Braja M.(1990), "Principles of Geotechnical Engineering", PWS Publishing Company
8. Robert V. Whitman and T. William Lambe(1979), "Soil Mechanics SI Version", JOHN WILEY & SONS
9. NAVFAC(1982), DM-7.2
10. Horn, A., "Raumlicher aktiver und passiver Erddruck", Technische Akademie Wuppertal-Breichte