

연직보강재의 토압경감 효과

An Experimental Study on the Earth Pressure Decrease Effect of Vertical Reinforcements.

문경선¹⁾, Kyoung Sun Mun, 이상덕²⁾, Sang Duk Lee

¹⁾아주대학교 공과대학 건설교통공학과 대학원, Graduate student, Dept. of Construction and Transportation Eng., Ajou Univ.

²⁾아주대학교 공과대학 건설교통공학과 교수, Professor, Dept. of Construction and Transportation Eng., Ajou Univ.

SYNOPSIS : The active earth pressure on the retaining wall is reduced by 3-Dimensional effects of the ground. Therefore, the test was focused on reducing the earth pressure on the retaining wall by inserting the vertical reinforcement in the backfill ground to develop the 3-Dimensional effects.

Model tests in sand were performed to measure the 3-Dimensional effects of the vertical reinforcement on the active earth pressure and its distribution and results were compared with the theories. The size of the vertical reinforcement, the geometry of the backfill space, and the wall friction of vertical reinforcement were varied.

It was observed that the active earth pressure and its distribution on the underground structure were affected by the size of the vertical reinforcements and wall friction.

Key words : vertical earth reinforcement, active earth pressure, 3-Dimensional active earth pressure, wall friction

1 서론

우리나라는 지형적으로 산지가 많아 주거지, 도로 등을 조성하기 위하여 산지를 굴착하고 굴착면 또는 기존 암반 및 풍화대의 급사면에 인접하여 옹벽, 토류벽, 교대 등을 설치하는 경우가 많다. 작용외력에 대하여 저판의 마찰력만으로 지지하는 옹벽의 경우는 저판의 마찰력 증대를 위하여 옹벽구조물의 자중과 저판의 면적을 증대시켜 설계하는 것이 일반화 되어있다. 또한, 옹벽 및 토류구조물에 작용하는 외력의 계산에 있어서 고전적인 Coulomb(1773) 및 Rankine(1856)토압이론이 통상적으로 적용되어지고 있다. 그러나 일반화 되어진 마찰력 증가를 위한 방법은 옹벽의 자중 및 저판면적을 증가시켜, 과도한 재료와 설치면적의 확대를 필요로 하게 되었으며, 옹벽의 형식에 따라 발생하는 변위특성에 의한 서로 다른 토압분포의 적용이 미비하다는 것이 현존 옹벽 설계의 문제점이다. 따라서 쉐넬레버 옹벽과 같은 수평주동변위를 일으키는 조건하에서 연직보강재를 지반에 삽입시켜 연직보강재의 간격 및 다양한 마찰조건하에서 작용토압의 분포형상 및 경감효과가 파악된다면, 수평주동변위를 일으키는 토류구조물의 자중 및 형상이 보다 간결해질 것이다. 또한, 성토지반에서 기존의 성토구배보다 큰 경사각으로 사면을 안전하게 조성할 수 있게 되어 경제적인 효과가 클 것으로 사료된다.

따라서 본 연구에서는 수평변위가 허용되는 전면판과 연직보강재의 여러 가지 경계조건에 의한 3차원

토압의 특성 및 분포형상등을 확인하였다.

2. 3차원 토압이론

연직보강재의 간격에 따른 3차원 주동토압에는 활동파괴면의 형상을 가정함에 따라 크게 정역학적인 모델과 동역학적인 모델이 있고, 지반을 연속체라고 가정한 연속체 모델로 나눈다.

정역학적인 모델은 Janssen(1895)의 Silo토압이론을 인용한 Schneebeil(1964)와 Hunder(1972)의 모델과 Cox(1961)의 축대칭모델이 있다.

실제와 유사한 활동파괴면에서 지반이 극한평형상태에 있다고 가정한 동역학적 모델은 활동파괴면의 형상을 가정함에 따라 Coulomb(1773)의 썩기형 파괴체를 확장하여 측면에 전단력이 작용한다고 가정한 Prater(1973), Gussmann & Lutz(1981), Walz & Prager(1987), Walz & Prater(1983)의 썩기형 모델과 실제파괴체를 고려한 Piaskowski & Kowalewski(1965), Washbourne(1984), Karstedt(1982)의 조개형 모델이 있다.

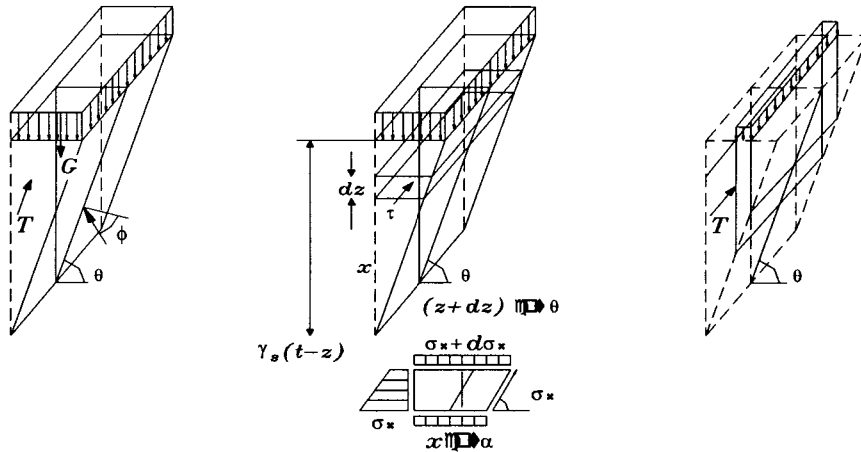


그림 1. 썩기형 토압 모델

조개형 모델은 자중에 의한 지반내 응력이 깊이에 비례하여 증가한다는 가정에서 생기는 토압의 차이와 실제 측면에서 생기지 않는 전단력을 고려한 썩기형 모델이론의 문제점을 썩기보다 작은 실제와 유사한 파괴체로 가정하여 3차원 효과를 나타내었다. 파괴체의 형상을 가정함에 있어 타원형 단면을 가지는 기둥의 형상에 의한 Piaskowski & Kowalewski(1965), 이론이 있고 파괴체를 단순화한 Washbourne(1984) 이론 그리고 실제파괴형상을 실험적으로 정확히 밝혀내어 이론적으로 접근한 Karstedt(1982)이론이다.

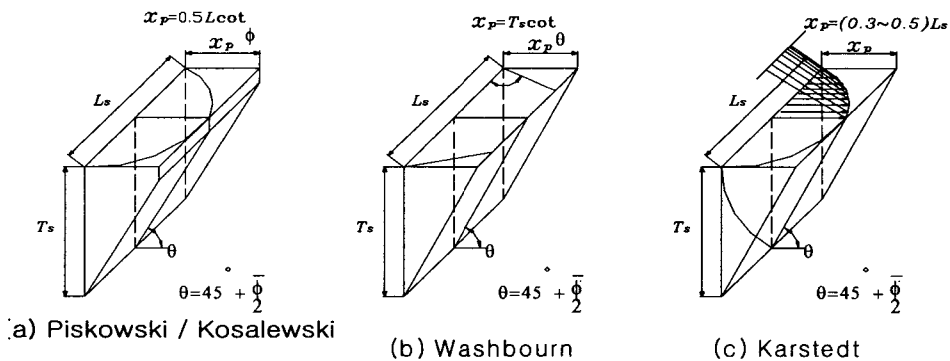


그림 2. 조개형 토압모델

3. 모형실험

3.1 모형지반의 기본물성

본 연구의 모형지반조성에 사용된 주문진 자연사의 기본물성은 통일분류법에 의한 분류결과 SP로 나타났으며, 최대건조단위중량(γ_{dmax}) = 1.83t/m³, 최소건조단위중량(γ_{dmin}) = 1.56t/m³로 조사되었고 비중(G_s)=2.65로 나타났다. 모형지반은 상대밀도(D_r) = 84%로 균질하게 조성하였으며, 이에 대한 직접전단 실험 결과 내부마찰각은 43°로 나타났다.

3.2 실험장치 및 측정장치

본 연구에 사용된 모형토조는 폭×길이×높이=121cm×102cm×116cm으로 강사장치, 연직보강재, 전면판, 실린더, 기어박스를 설치하여 실험을 실시하였다. 샌드 커튼(Sand Curtain)방법에 의해 균질한 지반을 조성하기 위하여 일정한 강사높이가 유지되도록 강사기를 제작하였으며, 연직보강재는 베이클라이트 판을 폭×길이×높이=7cm×100cm×70cm로 가공하여 제작하였다. 전·후 거동이 가능하도록 보강재의 상·하부에 베어링 로울러를 장착하였고 지반거동에 따라 작용되어지는 마찰인장력을 측정하기 위하여 전면판에 Load Cell을 장치하였으며, 상·하 로울러부에 레일을 설치하여 연직보강재의 간격을 조절할 수 있게 하였다. 전면판은 높이 70cm의 베이클라이트 판을 5등분하여 토압의 분포를 확인할 수 있는 하중판을 부착하였으며, 지속적인 수평주동변위를 유지하기 위하여 전후 이동공간이 80cm인 실린더를 강재로 제작하여 전면판과 체결하여 토조에 설치하였다. 지반의 주동변위의 허용은 실린더 뒤에 기어박스를 설치하여 변형률제어방식으로 실험을 수행할 수 있게 하였다.

본 실험에서는 전면판에 작용하는 주동토압과 연직보강재에 작용하는 마찰인장력을 측정하기 위하여 스트레인 게이지식 Load cell을 각 전면하중판 마다 2개씩 10개와 연직보강재에 4개를 장착하여 측정하였다. 또한, 전면판의 주동변위 및 지표변위는 전기저항방식의 LVDT를 사용하여 측정하였다. 측정된 데이터는 Easy Sense Software로 제어되는 UPC-601-U Card에 의하여 실험 수행시 계측값이 화면에 출력되는 동시에 일정한 시간간격으로 컴퓨터에 저장되도록 하였다.

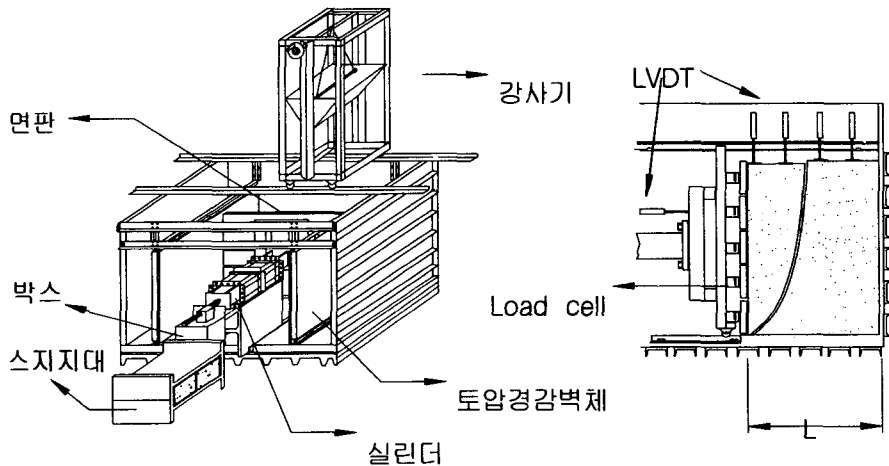


그림3. 실내모형토조 및 전면판의 개요도

3.3 실험방법

전면판과 연직보강재를 전·후 수평변위만 발생할 수 있게 토조에 레일로 고정후 실린더 및 기어박스를 설치하고 지반조성시 전면판의 변위를 막기위하여 실린더를 고정한다. 강사장치를 이용하여 조성지반의 지표에서 일정한 높이로 강사한다. 강사중 모형지반의 단위중량 측정을 위하여 can을 넣는다. 지반조성을 완료한후 지표면의 파괴형상을 관찰하기위하여 적색 물감으로 얇게 도포하고 수평주동변위와 지표변위를 측정하기위하여 LVDT를 거치한다. 기어박스의 구속을 풀어 주동변위를 발생시켜 계측값과 모형지반의 파괴형상을 관찰한다. 실험 완료후, 지반조성중 매립된 can을 회수하여 조성지반의 단위중량을 확인한다.

3.4 실험종류

본 실험에서는 연직보강재의 마찰조건 및 뒷채움폭 그리고 연직보강재의 삽입 크기 및 위치의 영향을 주된 실험변수로 표1과 같이 실험하였다.

표1. 변수에 따른 실험명

주요 변수		실험명
벽마찰각(degree)	뒷채움 폭(cm)	
0 (2차원)	22	P0B22L20, P0B22L30, P0B22L40, P0B22L50
	35	P0B35L20, P0B35L30, P0B35L40, P0B35L50
	50	P0B50L20, P0B50L30, P0B50L40, P0B50L50
	70	P0B70L20, P0B70L30, P0B70L40, P0B70L50
$\frac{1}{3} \phi$	22	P1/3 ϕ B22L20, P1/3 ϕ B22L30, P1/3 ϕ B22L40
	35	P1/3 ϕ B35L20, P1/3 ϕ B35L30, P1/3 ϕ B35L40
	50	P1/3 ϕ B50L20, P1/3 ϕ B50L30, P1/3 ϕ B50L40
	70	P1/3 ϕ B70L20, P1/3 ϕ B70L30, P1/3 ϕ B70L40
$\frac{2}{3} \phi$	22	P2/3 ϕ B22L20, P2/3 ϕ B22L30, P2/3 ϕ B22L40
	35	P2/3 ϕ B35L20, P2/3 ϕ B35L30, P2/3 ϕ B35L40
	50	P2/3 ϕ B50L20, P2/3 ϕ B50L30, P2/3 ϕ B50L40
	70	P2/3 ϕ B70L20, P2/3 ϕ B70L30, P2/3 ϕ B70L40
ϕ	22	P ϕ B22L20, P ϕ B22L30, P ϕ B22L40, P ϕ B22L50
	35	P ϕ B35L20, P ϕ B35L30, P ϕ B35L40, P ϕ B35L50
	50	P ϕ B50L20, P ϕ B50L30, P ϕ B50L40, P ϕ B50L50
	70	P ϕ B70L20, P ϕ B70L30, P ϕ B70L40, P ϕ B70L50
삽입방법	뒷채움 폭(cm)	실험명
TOP	35	P ϕ TH1B35, P ϕ TH2B35, P ϕ TH3B35, P ϕ TH4B35
UNDER		P ϕ UH1B35, P ϕ UH2B35, P ϕ UH3B35, P ϕ UH4B35

4. 실험결과 및 비교분석

4.1 실험결과

연직보강재의 삽입으로 인한 토압의 경감효과 및 분포형상을 알아보기 위하여 보강재의 삽입간격, 마찰조건, 크기 그리고 삽입위치를 변화시켜 실내모형실험을 수행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

4.1.1 연직보강재의 간격에 의한 토압분포 및 작용점의 위치

연직보강재의 간격에 의한 토압의 분포형상은 보강재의 간격이 커짐에 따라 분포곡선의 곡률은 보다 커져서 2차원 토압분포와 유사해진다. 그림 4는 토압의 2차원 주동토압에 대한 3차원 주동토압의 크기 비를 나타낸 것으로 보강재의 간격이 작아질수록 토압의 크기가 작아짐을 나타내고다. 특히 H/B=2 이후의 토압비는 완만한 감소를 보여주고 있는데 이 시점부터 연직보강재에 의한 주동토압 경감효과가 최대로 발휘되어 진다.

작용점의 위치는 고전적인 Coulomb(1773), Rankine(1856)이론의 1/3H와는 상이한 차이를 보이는데 이것은 주동변위의 형태가 하부고정 상단변위가 아닌 수평변위때문이며, 토압작용점의 위치는 보강재의 마찰조건보다 삽입간격에 의한 영향이 더 크다는 것을 표 3에 의하여 알 수 있다 .

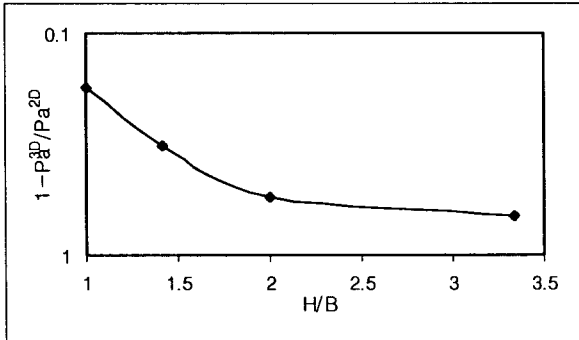


그림4. H/B에 따른 2D토압과 3D토압의 비

H/B	2-Dimension	3-Dimension		
		ϕ	2/3 ϕ	1/3 ϕ
1	0.45H	0.45H	0.45H	0.45H
1.4	0.45H	0.45H	0.45H	0.45H
2	0.45H	0.42H	0.42H	0.43H
3.33	0.45H	0.42H	0.42H	0.43H

표3. 토압작용점의 위치

4.1.2 연직보강재의 마찰인장력

활동파괴에 의한 보강재의 마찰인장력은 그림 5와 같이 보강재의 간격이 좁아질수록 증가하여 H/B=2에서 정량적인 크기가 가장 크게 예측되었다. 보강재의 마찰인장력의 크기는 H/B=2일 때 가장 크지만 보강재의 토압경감 효율은 H/B=3.33일 때 가장 크게 나타났다. 따라서 보강재의 간격이 좁아질수록 전면판에 작용하는 주동토압은 줄지만 보강재에 작용하는 마찰인장력의 크기는 늘어남을 알 수 있다.

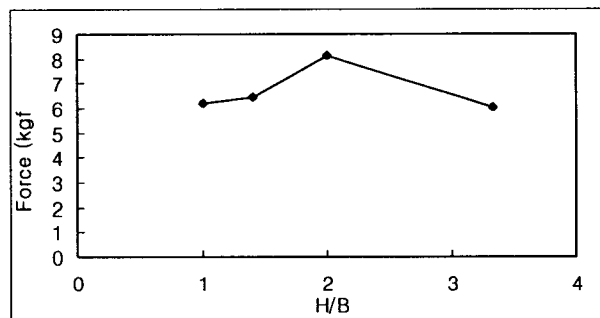


그림5. H/B에 따른 연직보강재의 인장력 변화

4.1.3 주동변위 및 지표변위

이론적인 주동토압의 계산에서는 파괴토체를 강체로 가정하고 파괴체의 활동력에 대한 힘의 평형을 고려하지만, 흙은 소성재료이므로 실제로는 파괴시에 흘러 내려가게 되어 전면판 상부부터 차례로 극한 평형상태에 도달하며 일정한 변위가 지나면 다시 흙입자의 재배열이 이루어지는 것을 알 수 있다. 주동 변위에 따른 토압의 분포가 2차원토압분포에 비하여 3차원 토압분포가 변위초기에 급변하는 것은 연직 보강재의 벽마찰의 영향 때문이다.

극한평형상태에 이르는 주동변위는 벽체변위(H)에 대하여 $0.0025H \sim 0.0033H$ 일 때 나타났으며, 이는 벽체 수평이동할 때 발생하는 일반적인 주동변위 $0.005H$ 와 좋은 대조를 이룬다.

지표변위의 파괴모양은 연직보강재의 삽입간격에 따라 그림 6과 같다. 연직보강재의 간격을 크게하면 2차원적인 지반거동에 의하여 전면판과 평행하게 파괴선을 나타내며, 3차원적인 지반거동에서는 뚜렷한 아치모양의 파괴선이 만들어진다.

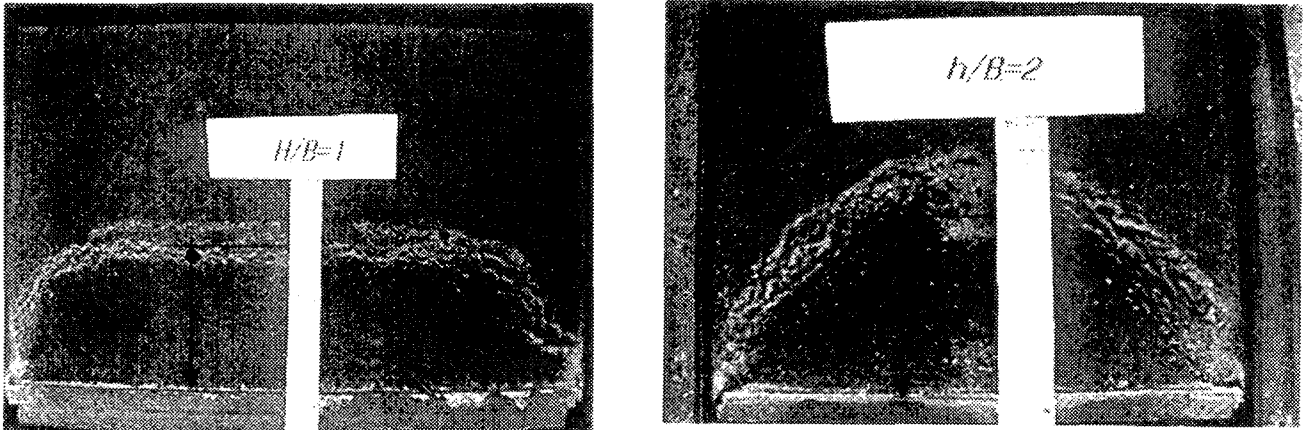


그림6. 연직보강재의 삽입간격에 따른 지표파괴형상

4.1.4 보강재의 삽입 깊이

보강의 삽입 위치와 길이에 대한 영향을 알아보기 위하여 상부 및 하부로부터 14cm씩 증가시켜 보강재를 연직으로 삽입시켜 보강재의 토압경감 효과를 알아본 결과, 보강재의 높이가 전면판의 높이(H)의 80%이상 지반에 삽입되어진다면 토압경감효과가 발휘되는 것으로 나타났다.

4.2 실험결과 비교 분석

실험에 의한 주동토압을 이론식과 비교한 결과 2차원 모델인 Rankine 이론값과 2배이상의 차이를 나타냈으며, 정역학적 3차원 모델인 Huder와 Schneebeli 이론값은 보강재의 간격에 따라 토압의 경감효과가 실험값과 유사한 분포를 나타내었으나 토압의 크기는 큰 차이를 보였다. 동역학적 3차원 모델인 Walz & Prater와 Piaskowski & Kowalewski 이론값은 실험값과 유사한 분포를 나타냈다. 췌기형 모델인 Walz & Prater이론은 $H/B=3.33$ 에서 측정값보다 작게 나타났으며, 조개형 모델인 Piaskowski & Kowalewski이론은 $H/B=2$ 보다 작아졌을 때 실험값보다 이론값이 작게 나타났다.

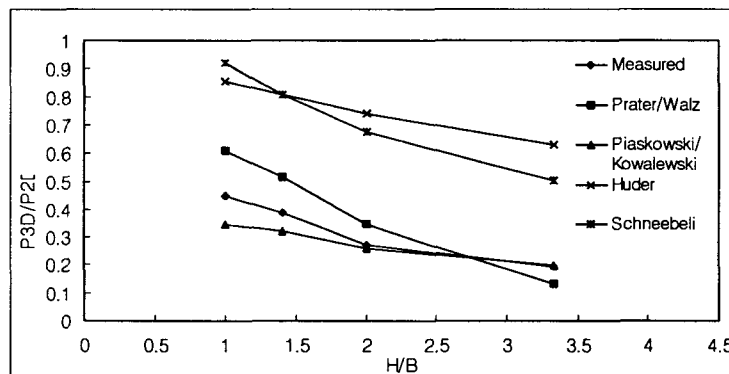


그림7. H/B에 따른 측정값과 이론값의 비교

5. 결론

본 논문은 옹벽 및 성토지반등과 같이 길이가 긴 구조물에 보강재를 연속으로 삽입시켜 인위적으로 지반의 역학적인 거동을 3차원상태로 만들어 작용토압을 경감시키는데 고려되어지는 연속보강재의 간격, 크기 그리고 벽마찰조건을 규명하기 위하여 실내모형실험을 수행하였다. 그 결과값을 기존의 3차원 주동토압 이론과 비교분석하여 다음과 같은 결론을 내렸다.

- ① 주동변위에 의한 토압의 전이형태는 2D상태에서 보다 3D상태에서 토압의 전이가 급속히 발생되었다. 이때 토압 작용점의 위치는 토압의 전이로 인하여 상부로 이동하는데 그 위치는 2D, 3D상태 공히 $0.42H \sim 0.45H$ 에 위치하는 것으로 나타났다.
- ② 모형지반의 주동변위에 의한 지표부의 변위는 2D상태일 경우 전면판과 평행한 직선파괴를 나타냈고, 3D상태에서는 보강재의 간격이 좁아짐에 따라 아치 모양의 곡선파괴를 나타내었으며 $H/B=2$ 일때 아치모양의 파괴선이 명확히 나타났다. 따라서 주동파괴가 진행되기전 보강재의 벽마찰 영향범위가 겹쳐지는 보강재의 간격에서 완전한 아치모양 파괴선이 만드러진다고 사료된다. 이때 보강재의 마찰력이 정량적으로 최대로 나타나 주동토압 경감효과가 상당히 커지는 것으로 나타났다.
- ③ 3차원 효과가 발휘되어지는 $H/B=2, 3.33$ 비에서 벽마찰조건을 $\phi, 1/3\phi, 2/3\phi$ 로 변화시켜 실험을 수행한 결과 마찰계수가 커짐에 따라 보강재에 작용하는 마찰력도 거의 선형적인 형태로 증가하였다.
- ④ 연속보강재의 삽입깊이에 대한 영향은 일정한 활동파괴체의 형성으로 인하여 보강재의 삽입깊이가 활동파괴체의 길이이상으로만 삽입된다면 그에 따른 영향은 거의 없는 것으로 나타났고 삽입깊이(h)는 전면판의 높이(H)의 80%이상 삽입되어져야 경감효과가 있는 것으로 나타났다.
- ⑤ 실험에 의한 주동토압을 이론식과 비교한 결과 Rankine의 2차원토압 및 Huder와 Schneebeli의 정역학적 3차원 토압이론과는 상당한 차이를 보였으며, Walz & Prater와 Piskowski & Kowalewski의 동역학적 3차원 토압이론값은 측정값과 유사한 분포를 나타냈다. 췌기형 모델인 Walz & Prater이론값은 측면의 전단저항력이 보강재의 간격이 작아짐에 따라 지배적인 인자로 작용하기 때문에 $H/B=3.33$ 에서 측정값보다 작게 나타났으며, 조개형 모델인 Piskowski & Kowalewski이론은 $H/B=2$ 보다 작을때 측정값이 이론값보다 크게 나타나는데, 이것은 보강재의 간격이 $H/B=2$ 이하로 보강재의 간격이 커지면 벽마찰의 효과가 작아져 지표부의 곡선파괴부의 중앙부가 2차원적인 형태인 직선분포를 보임에 따라 조개형 활동파괴체보다 큰 파괴체로 활동하기 때문이라 사료된다.

6. 참고문헌

1. 김상규(1998), 토질역학, 청문각, pp223~273
2. 건설교통부, 구조물 기초 설계기준(1997), pp262~408
3. 이상덕(1996), 전문가를 위한 기초 공학, 엔지니어즈, pp457~480
4. 이상덕(1997), 토질시험 원리와 방법, 새론, pp7~87, 205~300
5. 이상덕(1998), 토질역학, 새론, pp342~400
6. 이송, 이장덕, 이규환, 이상덕, 백세환(1998), 디자인 매뉴얼, 새론, PARTⅡ 60~129
7. 이상덕, 문창열, 김은섭, 이종규(1997), “퇴매음 지반에 의한 수평토압에 관한 연구”, 대한토목학회 논문집, 대한토목학회, 제17권, 제Ⅲ-3호, pp285~292
8. 이승래, 백규호, 박현일(1993), “아칭효과를 고려한 강성체 옹벽의 주동토압 산정”, 대한토목학회 학술발표회집, 대한토목학회, pp.457~460

9. 정성교, 김문규, 정진교, 이만렬, 남선우(1999), “뒤채움 과정이 고려된 모형벽체에 벽체에 작용하는 수평토압”, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, pp.807~819
10. Peck, R. B., Hanson, W. E. and Thornburn, T. H.(1974). Foundation Engineering, 2nd ed., John Wiley & Sons, New York.
11. Spangler, M. G.& Handy, R. L.(1982), Soil Engineering, fourth edition, Harper & Row, Publishers, pp.727~790
12. David F. Mc carthy(1997), Essentials of Soil Mechanics and Foundations, fifth edition, PRENTICE HALL, pp613~682.
13. Sherif M. A., Ishibashi I., and Lee C. D.(1982), Earth Pressure Against Rigid Retaining Walls, Journal of the GT., ASCE, Vol. 108, No. GT5, Paper 17057, pp.679~696
14. Richard L.Handy(1985), The Arching in Soil Arching, Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol.111, No.GT3, pp.302~318
15. Bernhard Walz and Jörg Prager(1978), Der Nachweis Der Äusseren Standsicherheit Suspensionsgestützter Erdwände Nach Der Elementscheiben-Theorie