

역 T형 옹벽에 뒤채움다짐으로 유발된 횡토압의 현장계측

Field Measurements of Compaction-Induced Lateral Earth Pressure on a
Reversed-T Type Retaining Wall

정 성 교*¹
Chung, Sung - Gyo
이 만 렬*²
Lee, Man - Yeol
정 진 교*³
Chung, Chin - Gyo

Abstract

A Compaction-induced lateral earth pressure was measured for a reversed-T type retaining wall of 4m high for three months. As a result of in-situ measurements, the lateral earth pressure fluctuated sharply with time after backfill, which was closely dependent upon the displacement of the retaining wall. The measured results showed big discrepancy with theoretical predictions made by existing theories, which are applicable to rigid wall. However, the in-situ data was compared relatively well with those obtained by the finite element method. Analysis showed that the discrepancy may be caused by the displacement of the retaining wall during the compaction of the backfill.

요 지

높이 4m의 역 T형 옹벽에 다짐으로 뒤채움할 경우에 유발되는 토압을 측정하기 위하여 3개월 동안에 현장실험을 실시하였다. 옹벽에 작용하는 토압은 뒤채움이 완료된 후 시일이 경과함에 따라 큰 폭으로 변화하였으며, 옹벽의 변위와도 밀접한 관계가 있음을 알 수 있었다. 토압의 계측결과는 강성옹벽에 적용가능한 이론식에 의한 것보다 훨씬 크게 얻어 졌었다. 유한요소해석에 의하여 얻어진 결과는 계측치와의 사이에 정량적인 차이는 있지만, 비교적 좋은 경향성을 보여 주었다. 그리고 기존의 이론식에서 보인 과소평가는 뒤채움이 진행되는 동안에 유발되는 옹벽의 변위 때문인 것으로 생각되었다.

*1 정희원, 동아대학교 공과대학 토목공학과 교수

*2 정희원, 동아대학교 공과대학 토목공학과 박사후 과정

*3 정희원, 동아대학교 공과대학 토목공학과 박사과정

1. 서론

벽체에 작용하는 토압을 구하는 문제는 토질 역학에서 핵심을 이루고 있다. 이 토압문제는 주로 Rankine 이나 Coulomb 이론들을 다루고 있으며, 이들에 의한 토압이론은 옹벽의 배면에 흙을 균질하게 쏟아붓는 경우에 적용할 수 있는 것으로, 토압은 깊이에 따라 일정하게 증가하는 삼각형 분포로 나타난다. 그러나 옹벽, 지하벽체, 교대, 암거 등을 축조할 때 뒤채움 부분의 지반침하를 방지할 목적으로 뒤채움다짐을 실시하게 된다. 이때의 토압은 다짐장비에 의한 잔류응력 때문에 전자의 고전토압이론에 따를 수 없을 것이다.

다짐으로 뒤채움한 옹벽에 대하여 1934년

Terzaghi⁽²⁹⁾는 토압에 미치는 다짐의 영향을 실험적으로 관찰하여 발표하였다. 그 이후 이 분야에 대한 많은 이론적 및 실험적 연구들^(1, 2, 12, 13, 14, 15, 28, 33, 34)이 수행되었다. 이와같은 많은 연구에도 불구하고 정량적인 분석을 위한 객관성있는 실험결과는 여전히 미흡한 실정이다. 다시 말해서, 대부분의 실험결과들은 실험에 관련된 세부자료의 부족, 즉 토압계의 오차 및 보정방법, 실험방법, 다짐기의 제원, 다짐기와 벽체 간의 최소거리 등에 대한 구체적인 기록이 부족하여 토압의 정량적인 분석을 위해서는 어려움이 많았다.

따라서 본 연구에서는 현장에서 일반적으로 많이 시공되고 있는 역T형 옹벽을 시험옹벽으

Table 1. List of experimental studies on compacted backfill.

reference	type	height (m)	backfilled soil	compactor	compaction method		pressure cell type	measurement period	re- marks
					placement (cm)	passes No.			
Terzaghi ⁽²⁹⁾	○	2.1	sand	concrete tamper	15	-	-	-	
Sims et al ⁽²⁵⁾	⊥	12	fly ash	vibrating roller	-	-	Total pressure	5yrs	
Rehman & Broms ⁽¹⁸⁾	⊥	2.5	gravelly sand, silty sand	plate vibrocompactor	20	-	Glötzl hydraulic	-	
Coyle et al ⁽⁸⁾	⊥	4.8	fine sand	bulldozer	20	3	Terra Tec hydraulic & Genor diaphragm	415days	
Schuppener ⁽²⁰⁾	⊥, Box	9	-	-	-	-	-	-	
Coyle et al ⁽⁹⁾	ㄷ	3	silty sand	vibrating roller	15	-	Terra Tec Hydraulic, Pnuematic & strain gage	443dyas	
Carder et al ^(5, 6)	Box	3	sand, slity clay	vibrating roller	15	6	-	-	
Clayton et al ⁽⁷⁾	Box	3	silty clay	vibrating roller	12.5	6	-	120days	
Spotka ⁽²⁷⁾	⊥	4	sand	plate vibrocompactor	20	2~3	Glötzl E20/30	-	
Fukuoka et al ⁽¹¹⁾	○	6	coarse sand	plate vibrocompactor	25	3	Strain gage	3days	
Bruner ⁽⁴⁾	⊥	4.2	silty clay	-	-	-	Terra Tec pneumatic	2yrs	
Broms & Ingleson ⁽³⁾	Abut.	3	gravelly sand	-	50	10	Rigid steel plate with load cell	-	
Wilson & Pimley ⁽³²⁾	Abut.	11	pulverised fuel ash	vibrating roller	20	6~8	Double-diaphragm vibrating-wire	-	
Jones & Sins ⁽¹⁶⁾	Wing wall	-	silty sand & sandy gravel	vibrating roller, grid etc.	15	-	Total pressure cell	-	

로 선정하여 일정한 다짐방법으로 뒤채움을 수행하였으며, 뒤채움의 진행중 및 완료후에 토압과 변위를 시간별로 관찰하였다. 이 측정결과에 대하여 기존의 이론 및 유한요소해석에 의한 비교·고찰이 이루어 졌다.

2. 문헌 고찰

뒤채움다짐의 영향을 관찰하기 위한 기존의 현장 및 각종 모형실험 결과를 요약하면 Table 1과 같다. 이 표에서는 실험벽체의 형태, 높이, 뒤채움 흙의 종류, 다짐방법, 토압계의 종류 등이 기술되어 있다.

Table 1에서 기술된 현장실험 결과를 종합하여 정리하면 다음과 같은 특성을 도출할 수 있었다. 연직한 고정벽에 뒤채움 다짐할 때, 잔류토압은 지표면 가까이에서는 깊이에 따라 수동토압까지 급격히 증가하며, 그 아래에서도 정지토압보다는 큰 값을 나타내면서 깊이에 따라 완만하게 증가하거나 일정한 값을 보여주었다. 깊은 깊이에서는 토압이 정지토압과 거의 일치하며 다짐의 영향을 보이지 않았다. 그리고 다짐기의 진행방향, 기후변화, 벽체의 형상 및 구속형태, 교통량의 영향 또한 점성토에서 과잉간극수압의 영향 등이 기술되어 있었다.

현장실험과는 별도로 Sowers et al⁽²⁶⁾, Sherif & Mackey⁽²³⁾ 그리고 Moore & Chin⁽¹⁷⁾에 의해 실내실험이 수행되었으나 그 결과들은 축척에 대한 영향 등으로 신뢰받기 어려운 실정이었다.

3. 현장 실험

3.1 시험옹벽

시험옹벽을 위하여 선정한 위치는 부산광역시 부산진구 당감동이며 총 연장이 2km, 옹벽 높이가 2~6m로 변하는 철근 콘크리트 역T형 옹벽이 설치된 현장이었다. 시험옹벽은 높이가 대략 4m이며, 계측과 관리가 편리한 곳을 택하였다. Fig.1은 시험옹벽의 단면도를 나타내며, 측정위치를 중심으로 좌우 15m 구간에 각각 신축이음부가 설치되어 있었으며, 그리고 옹벽

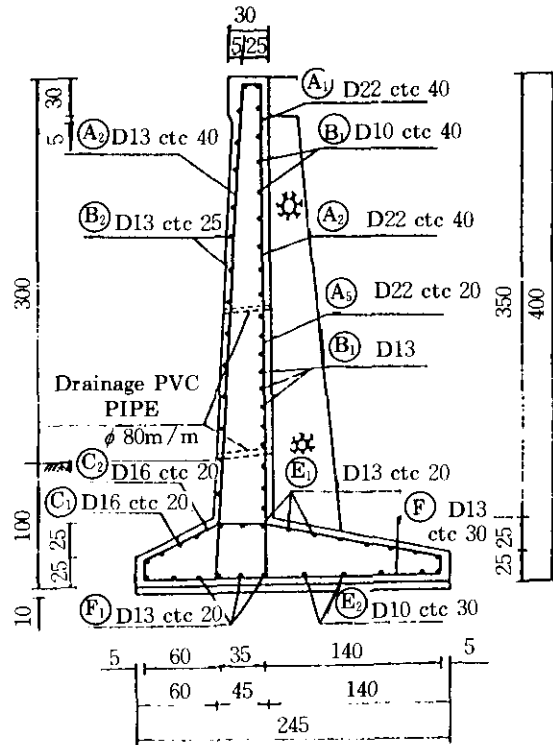


Fig.1 Cross-sectional view of test wall

의 길이 방향으로 1/1000의 경사로 지반고가 변함에 따라 옹벽의 높이가 변하였다.

3.2 토압 및 변위 측정 장치

시험옹벽에 계측기 매설을 위하여 약 15m 구간에 대해 뒤채움 흙을 제거하였다. 토압계는 실내에서 거푸집에 미리 고정시킨 후에 연결부에서의 전기 저항을 줄이기 위하여 납땀처리 한 후 테이프를 감았다. 도선은 물과 이물질이 직접적으로 접촉하지 않도록 플라스틱 파이프 속에 넣어 배면에 고정하고 10cm의 몰탈을 타설했다. 사용된 토압계는 일본 KYOWA 제품으로 외경 100mm, 두께 20mm이었으며, 온도변화에 대한 영향이 제거되었고, 출력 전압의 감도가 0.85mm V/V 이상이었다. 그리고 계측을 위하여 KYOWA SS-R 모델의 스위치 박스, BM-B 모델의 지시계 및 2mm 굵기의 도선을 사용하였다. Fig. 2는 토압계 및 도선의

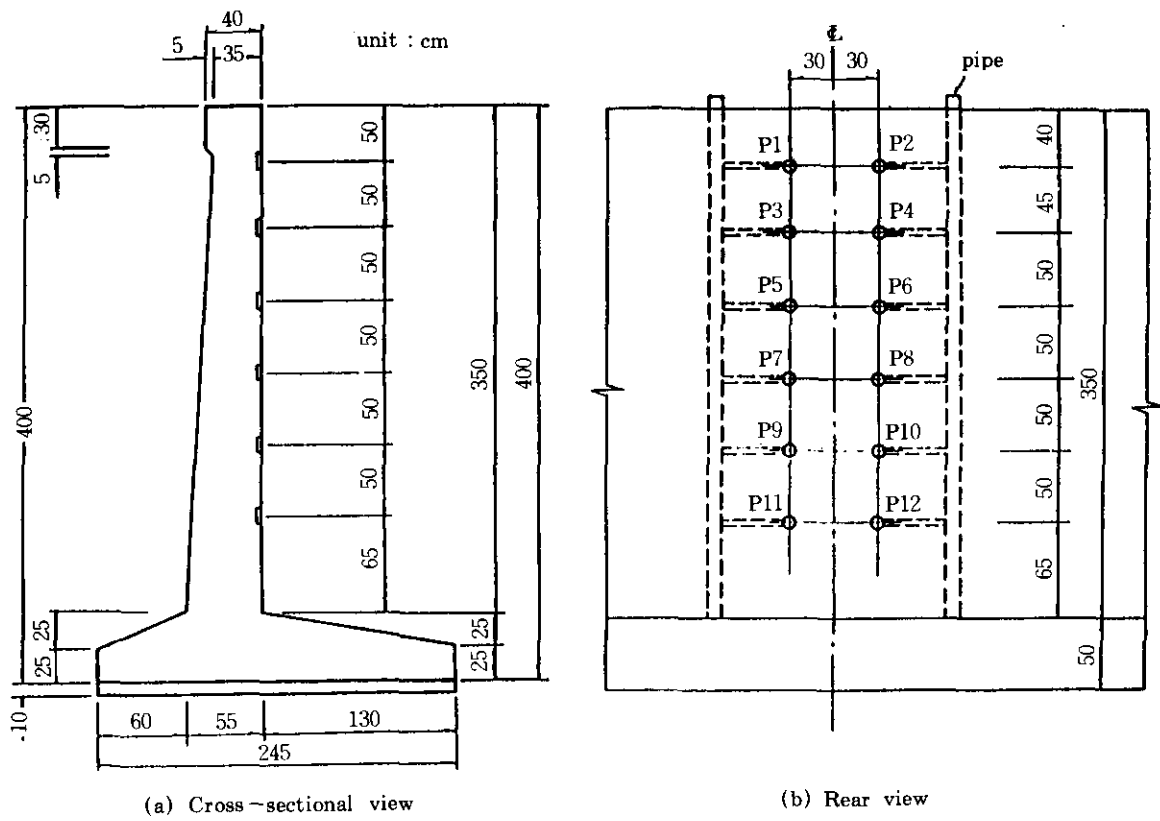


Fig.2 Arrangement of pressure cells.

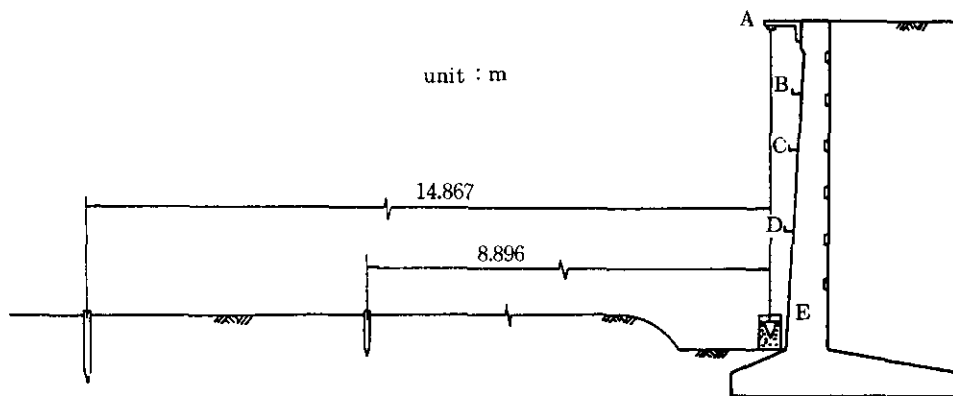


Fig.3 Measurement system of wall movement

배치도이다. 그림에서 토압계 P1-P5의 5개는 1.0kg/cm, P6-P10의 5개는 2.0kg/cm², 그리고 P11-P12의 2개는 5.0kg/cm²의 용량이었다.

벽체의 연직, 수평변위 및 각변위를 측정하기 위하여 Fig. 3과 같은 방법들이 이용되었다. 연직 변위는 Fig.3에서 E점으로부터 20m 떨어진 표준점사이의 표고차를 구하는 것으로 시공 단계마다, 즉 뒤채움을 하기 전, 옹벽의 중간 높이까지 뒤채운 후, 뒤채움이 완료된 직 후, 그리고 뒤채움의 완료후 필요한 시기에 1/200 정도의 레벨을 사용하여 측정되었다. 수평변위는 옹벽의 표면에서 8.896m 떨어진 표준점과 14.867m 떨어진 보조 기준점에서 각각 1/1000 정도의 광파거리 측정기를 사용하여 최소 판독이 0.5mm로 되도록 읽었다. 그리고 옹벽의 각 변위를 측정하기 위하여 Fig.3에서와 같이 옹벽의 정점에서 10cm 떨어진 돌출부에 추를 매달아 사용하였다. 이 추는 피아노선을 연결하여 점성이 높은 기름통에 담겨서 바람의 영향을 감소시켰다. 옹벽의 각변위는 옹벽의 정점으로부터 0.775, 1.365, 2.260m의 높이에 고정핀(B, C, D점)을 박은 후, 피아노선과 고정핀 사이의 거리를 0.1mm 정도의 버어니어 캘리퍼스로 측정하였다.

3.3 토압계측 및 보정

뒤채움 흙은 자갈이 약 10% 정도 포함된 실트질모래(Fig.4)이므로 토압 측정시에 자갈에 의하여 토압계에 집중하중이 가해지는 것을 방지하기 위하여 가는모래를 토압계의 전면 10cm 정도의 두께로 편 후에 뒤채움 흙을 넣었다. 토압계측은 매 측정시마다 예열을 확인

하였고, 오차를 줄이기 위하여 3회씩 측정하여 평균치를 구하였다.

토압계의 보정을 위하여 토압계의 제작회사(KYOWA)에서 제시한 검정서의 적부 및 모래를 통하여 전달되는 실제압력을 관측하고자 대형 압밀링을 제작하여 두가지 방법으로 점검하였다. 첫째방법은 토압계에 재하판을 직접 가압하는 방법이고, 둘째의 방법은 20cm두께의 가는 모래를 넣어 가압하는 방법이었다. 시험결과, 압밀링의 벽면 마찰로 인하여 대개 검정서의 값이 위의 두방법에 의한 것보다 약간 크게 나타났으므로 제작사의 검정서를 신뢰하기로 했다.

3.4 뒤채움 흙의 특성

본 실험에 사용된 뒤채움 흙은 실험현장의 북쪽 산기슭을 절토한 화강풍화토로서, 그 입경분포는 Fig.4와 같다. 이 흙은 통일분류법에 의하면 SM으로 분류되며, G_s=2.76, LL=37%, N.P.(비소성)의 물리적 특성을 지녔다.

뒤채움 흙에 대한 표준실내다짐실험이 결과는 Fig.5와 같이 최적함수비 16%, 최대건조단위중량 1.805t/m³이었고, 최적다짐상태에서 공기함량(A)은 5.7%이었다.

뒤채움 흙의 전단강도는 직접전단시험의 비압밀-급속전단법(quick test)으로 하였다. Table 2는 다짐정도에 따라 직접전단시험한 결과로서 건조단위중량에 대한 전단강도의 관계이고, 여기서 상대다짐도는 최대건조단위중량에 대한 실험된 건조단위중량(γ_d)의 비이다. 이 표는 현장다짐 상태에 해당하는 전단강도상수를 구하는데 직접적으로 이용되었다.

Table 2. Shear strength parameters for different dry unit weights.

test No.		1	2	3	4	5	6
$\gamma_d(t/m^3)$		0.956	1.141	1.259	1.353	1.402	1.494
relative compaction(%)		52.8	63.2	69.6	74.8	77.5	82.5
shear strength	c(t/m ²)	3.9	3.2	4.2	4.2	4.2	5.5
	$\phi(^\circ)$	25.5	31.	33.8	35.0	35.7	36.4

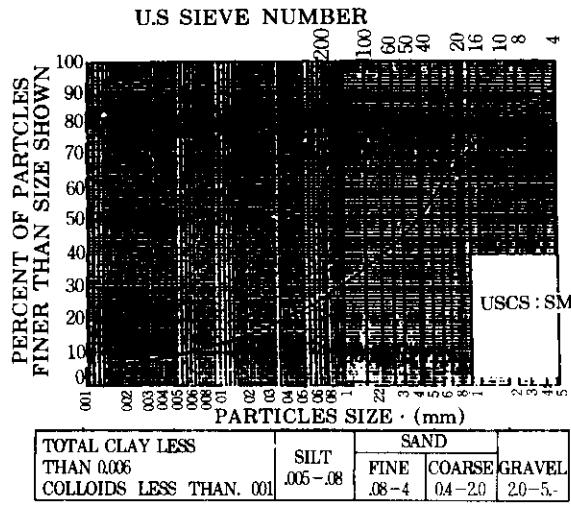


Fig.4 Particle size distribution curve.

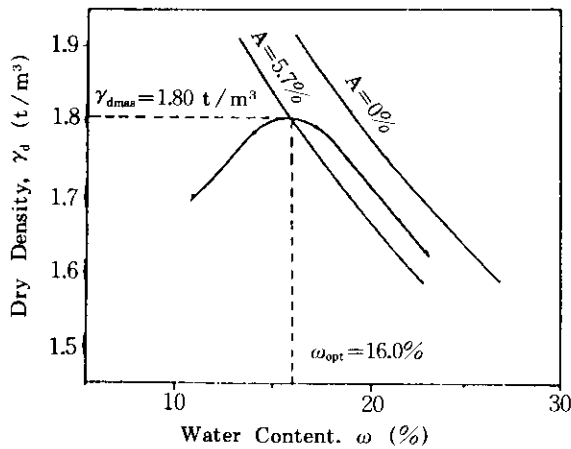


Fig.5 Proctor compaction curve.

3.5 진동다짐기

본 실험에 사용된 다짐기는 진동롤러와 판진동다짐기였다.

진동롤러는 국내에서 (주)광무가 제작한것인데, 한사람이 서서 조정할 수 있는 것으로 자중이 900kg, 진동메카니즘으로 유발되는 원심력이 2,500kg이었다. 이상적인 충격력(진동력)은 3,400kg이지만, (주)광무에 의해 측정된 결과는 감소효과 때문에 약 3,000kg을 얻었다고 한다.

판진동다짐기는 자중이 80kg인 일본 Mikasa 제품으로, 이 다짐기의 충격에너지는 5~8톤롤러에 해당한다고 제품 명세서에 기록되어 있었다.

4. 실험결과 및 분석

4.1 판진동다짐기로 다짐한 경우

판진동다짐기로 뒤채움 다짐한 옹벽에 작용하는 토압을 관찰하기 위하여 시험옹벽에 대해 현장실험을 수행하였다. 성층두께를 20cm씩으로 하고, 다짐기와 벽체사이의 거리를 10cm 정도 되도록 유지하여 벽체와 평행방향으로 6회씩 다짐을 실시하였다. 사용된 진동판의 폭이 50cm였으므로 20~30cm정도로 겹쳐서 다짐을 실시하였다.

현장 단위중량은 60cm높이마다 총 5회 걸쳐 시험한 후 평균치를 구하였다. 뒤채움 흙의 상태는 Table 3에 나타난 바와 같으며, 판진동다짐한 경우에 대해서는 Table 2로부터 $\phi = 35^\circ$, $c = 4.2t/m^2$ 으로 추정할 수 있다.

뒤채움이 완료된 직후에 측정된 토압은 Fig. 6과 같았고, 옹벽의 연직범위(침하)는 4.0mm, 수평범위 1.0mm, 그리고 각변위가 약 1/2000로 측정되었다.

Fig.6은 판진동 다짐기로 뒤채움 다짐한 경

Table 3. Condition of backfilled soil.

	loose backfill	plate compactor	hand roller
water content(%)	20	21	28
field unit wt.(t/m ³)	1.52	1.61	1.96
dry unit wt.(t/m ³)	1.26	1.33	1.54
relative comp.(%)	70	74	85

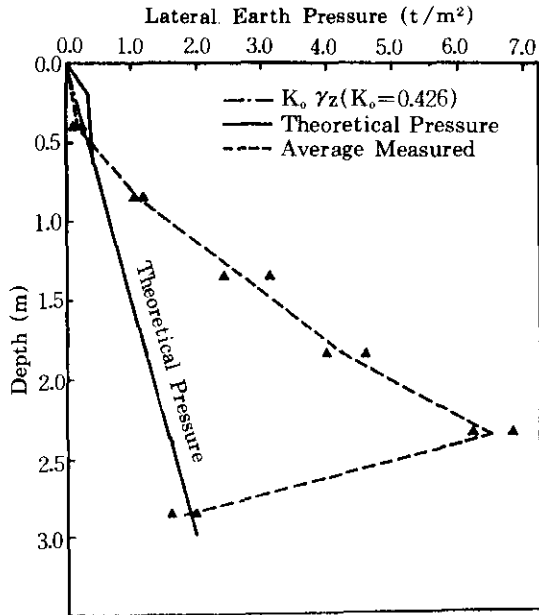


Fig.6 Theoretical and measured earth pressures using vibratory plate compactor.

우에 잔류토압의 실측치와 강성옹벽에 적용가능한 정성교 등⁽³⁶⁾이 제안한 이론식으로 계산한 이론치를 나타내었다. 이론치의 계산에는 판진동다짐기에 의한 최대연직력을 4.8kg/cm의 선하중으로 간주하였는데, 이 값은 Seed & Duncan⁽²¹⁾이 제안한 것으로 다짐기 자중의 3배를 사용하여 계산되었다. 최대연직력을 동일하게 사용하였을 경우는 위의 두 이론에 의한 토압은 거의 같은 값으로 계산된다. 최대연직력의 산정법 중에서 Ingold 방법^(13, 14)에 의하면 다짐기의 자중과 진동자로부터 유발되는 원심력을 합하여 다짐기의 폭으로 나눈값을 최대연직력으로 취하지만, 본 연구에서 사용된 Mikasa 판진동다짐기의 명세서에는 원심력에 대한 내용이 없었던 관계로 부득이 Seed & Duncan이 제안한 값을 사용하게 되었다. 참고로 Spotka방법⁽²⁸⁾에 의하면 56.0kg/cm, Broms 방법⁽²⁾에 의하면 3.2kg/cm의 연직력이 계산되었다.

Fig.6에서 보면, 토압의 측정치는 옹벽의 상부측에서 작게 얻어 졌으나, 하부로 갈수록 깊

이에 따라 급격히 증가하였으며, 저판 가까이에서 역으로 급격히 감소하는 경향을 나타내었다. 이론치와 계산치는 옹벽의 상·하단 부분을 제외하면 큰 차이를 나타내고 있다. 옹벽의 상부에서 잔류응력이 작게 나타난 것은 판진동다짐기에 의한 다짐강도가 작은 관계로 생각된다. 옹벽의 1.0m에서 2.5m사이에서 토압이 급격히 증가한 것은 옹벽의 기하학적인 형상과 다짐성토의 진행과정에서 발생되었던 옹벽의 연직, 수평 및 각변위 등에 의한 것으로 판단되며, 그리고 저판에 인접한 3.0m 깊이에서 정지 토압과 비슷하게 측정된 것은 구속상태에 있는 흙과 구조물의 상호작용에 의한 영향으로 생각된다. 그러나 토압이 1.0~2.5m 사이에서 이론값보다 상당히 크게 측정되어 토압계의 정밀도를 의심할 수도 있으나, 이러한 토압분포의 양상은 역T형옹벽에 가는모래를 20cm씩 성층하고 불도저로 3회씩 다짐하면서 뒤채운한 Coyle et al⁽⁸⁾의 측정결과에서도 볼 수 있었다. 따라서 역T형 옹벽의 뒤채움 다짐시에는 뒤채움의 진행과정에 따라 흙과 전구조물의 거동을 함께 고려한 해석이 바람직하리라 생각한다.

4.2 진동롤러로 뒤채운한 경우

진동롤러를 뒤채운한 옹벽에 작용하는 토압을 관찰하기 위하여 역시 4m 높이의 역T형옹벽에 대해 34일에 걸쳐 토압 및 변위를 측정하였다. 다짐기는 소형진동롤러로서 자중이 900kg, 원심력의 최대치가 2500kg이었다. 다짐시에 성층두께를 20cm로 하여 6회씩 다졌으며, 접침폭을 롤러폭의 1/3인 30cm 이상이 되지 않도록 하였고, 롤러와 벽체 사이의 최소거리를 10cm 이상으로 하였다.

현장밀도시험은 3성층인 60cm마다 총 5회에 걸쳐 실시한 후 평균치를 구하여 Table 3에 나타내었다. 이 경우 뒤채움 흙의 상태는 Table 2로부터 $\phi' = 36.5^\circ$, $c' = 4.2t/m^2$ 로 추정된다. 그리고 Table 4 및 5는 진동롤러로 뒤채움 다짐을 완료한 후 34일 동안 8회에 걸쳐 측정된 토압 및 변위이다. Fig.7은 동일 깊이에 있는 두 토압의 평균치를 경과일수에 따라 나타낸 것이

다.

진동롤러로 다짐하여 뒤채움이 완료된 후 34일에 걸쳐 측정된 토압을 측정일수에 따라 나타낸 Fig.7을 보면, 동일한 높이에 있는 두 토압계들에서 측정된 결과는 시일의 경과에 따라 대체로 비슷한 경향을 나타내지만, 뚜렷한 변화 양상을 보이지 않았으며 전체적인 토압의 변화경향도 일정치 못함을 알 수 있었다. 기존의 측정자료^(8,9)에서 계절에 따라 토압이 큰 폭으로 변화함을 볼 수 있었는데, 단시일 동안에 측정된 본 실험결과에서도 기후변화, 진행성변위 등으로 인하여 역시 이러한 경향이 나타난 것으로 생각된다. Table 4에서 보면, 뒤채움 흙을 완전히 제거한 후에도 토압계에 상당량이

잔존해 있는데, 이것은 Weiler & Kulhawy^(30,31)가 지적한 바와 같이 토압계에 의한 계측은 여전히 많은 문제점이 있음을 암시한다. 따라서, 여기서 얻어진 계측치는 토압계의 용량이 커서 발생할 수 있는 읽음오차와 장기간 사용에 따른 토압계 자체의 문제점이 내포되어 있을 것이다.

Fig.8은 뒤채움이 완료된 직후의 토압, 34일 동안에 측정된 토압의 평균치 및 범위, 그리고 강성용벽에 적용가능한 정성교 등⁽³⁶⁾이 제안한 이론식에 의한 계산치를 비교한 것이다. 그림에서 보여주는 측정결과는 판집동 다짐기(Fig. 6)와 진동롤러에 의한 다짐강도의 차이에도 불구하고 토압의 정성적 및 정량적인 차이는 아

Table 4. Earth pressures with time on using vibro-roller.

elapsed time(day)	pressure(t/m ²)												remarks
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	
0	0.458	0.471	0.847	0.642	2.616	1.667	3.503	4.230	7.441	5.496	6.728	7.316	-rainfall of 15mm after one day
1	1.273	1.161	1.935	1.261	3.452	1.830	3.255	3.003	6.713	4.681	5.625	6.343	
3	1.071	1.185	2.347	1.472	4.018	1.944	3.573	3.625	6.909	4.929	5.321	6.415	
5	0.312	0.203	2.044	0.642	3.920	2.418	4.122	3.772	8.205	5.593	5.892	6.992	
7	1.545	1.956	3.349	2.028	4.280	2.860	3.697	3.516	7.122	5.195	5.207	5.983	
15	2.082	2.694	2.673	1.355	4.108	2.516	4.564	3.625	7.175	4.982	5.055	6.055	-rainfall of 15mm after one day
22	1.025	1.818	1.515	2.381	3.501	1.503	2.653	3.259	6.607	3.989	3.231	4.325	
34	2.166	1.672	1.577	4.378	2.403	5.735	3.078	2.948	8.649	7.066	7.506	8.721	
after excavation	0.544	0.220	-0.874	0.335	0.517	0.291	-1.007	4.302	-0.172	0.485	0.256	0.719	

Table 5. Wall displacement with time on using vibro-roller

elapsed time(days)	vertical displacement(mm)	horizontal displacement(mm)	tilting*	remarks	
0		0.0	1.0	+0.0013	rainfall
1		-	-	-	
3		1.0	2.0	+0.0042	
5		1.0	2.0	+0.0047	
7		1.0	2.0	-0.0006	
15		1.0	2.0	-0.0021	
22		-	-	-	
34		2.0	2.0	+0.0045	rainfall

* (+) : forward movement against test wall
 (-) : backward movement against test wall

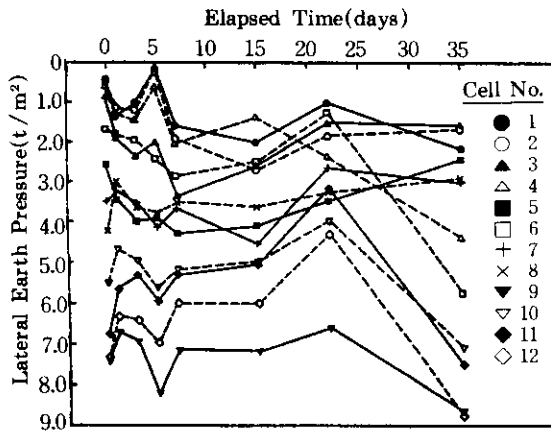


Fig.7 Variation of earth pressures with time.

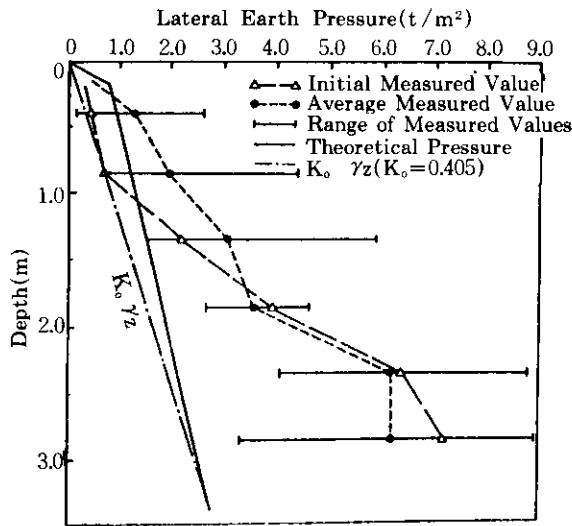


Fig.8 Theoretical and measured lateral earth pressures on using vibro-roller.

주 작았다. 뒤펀 완료 직후에 거의 정지토압 상태로 생각되는 옹벽의 상부에서 0.85m 깊이 까지 측정치는 이론치보다 작았으며, 하부로 갈수록 상반되는 경향을 알 수 있다. 진동 롤러로 다짐한 경우도 판진동다짐기의 경우와 유사하게 18층의 성층 다짐으로 유발되는 옹벽의 진행성 변위로 인하여 이론치는 실측치와의 사이에 큰 차이가 나타났으며, 그리고 34일 동안에 측정된 토압의 범위가 몹시 커서 뚜렷한 기

준을 정하기 힘들었다.

결과적으로 TRRL⁽¹⁸⁾의 예와 같이 옹벽의 변위가 거의 발생하지 않는 조건에서 다짐유발 토압의 이론식에 의한 계산결과가 실측치와 좋은 일치를 보였지만⁽³⁶⁾, 본 현장실험에서와 같이 역T형의 옹벽에서는 뒤펀의 진행 중에 뒤펀의 흙, 기초지반 및 옹벽의 전구조체가 연관된 거동을 일으키며, 또한 장기간에 걸친 기후의 변화 등에 따른 이들의 복합된 거동이 발생하는 옹벽에 대한 토압의 해석은 실로 복잡하여 이론적인 접근이 어려움을 알 수 있었다.

4.3 유한요소해석에 의한 비교

시험옹벽에 대하여 시공과정을 고려한 유한요소해석을 수행하기 위하여 1984년에 Seed & Duncan⁽²²⁾이 개발한 SSCOMP프로그램을 사용하였다.

시험옹벽의 해석을 위한 유한요소망은 절점이 188점, 흙요소 126개, 구조요소 24개, 그리고 상호면(interface)요소 31개로 구성하였다(Fig.9 참조). 저판 아래로 2.0m에 암반이 있는 것으로 가정하였으며, 성층다짐은 20cm씩 18층 다지는 것으로 하고, 그리고 다짐기와 벽체 사이에 10cm씩 떨어져서 작동하도록 하였다. 진동다짐기에 의한 수평응력의 산출은 진동다짐기의 자중과 원심력의 합을 과재하중으로 간주하여 계산하였다. 흙요소는 기초지반과 뒤펀 흙으로 구분하여, 뒤펀부에 대해서는 현장상태와 유사하게 다짐하여 실내시험으로 각종의 매개변수를 구하였으나, 기초지반에 대해서는 시료채취가 어려워서 Duncan et al.⁽¹⁰⁾ Selig⁽²³⁾ 및 정성교 등⁽³⁵⁾의 자료를 참고하여 적절히 가정 하였다. 상호면 요소를 위한 매개변수는 흙의 특성 및 Seed & Duncan⁽²¹⁾의 추천 값을 감안하여 적절히 가정하였다. 그리고 구조체는 보요소로 모형화 하였으며, 시험옹벽의 단면을 적절히 구분하고, 허용응력법으로 계산하여 적용하였다.(Table 6 및 7 참조)

Fig.10은 유한요소해석과 다짐유발 토압의 이

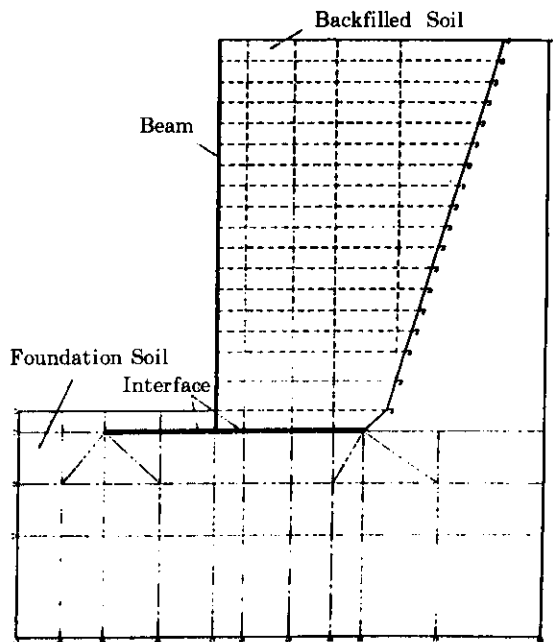


Fig.9 Finite element mesh.

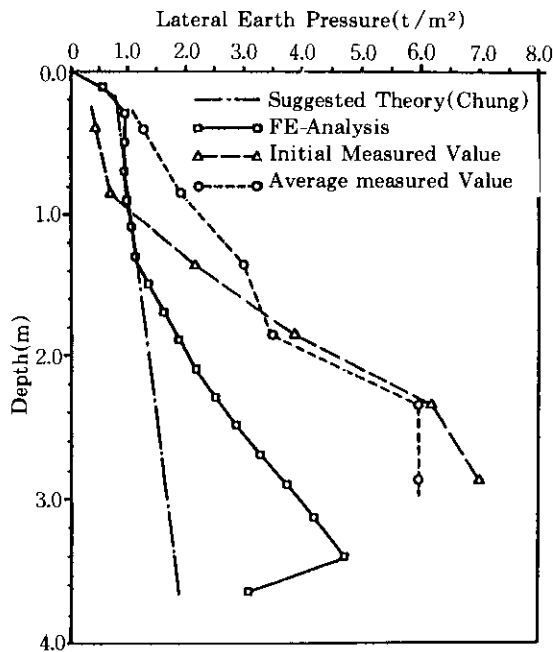


Fig.10 Comparison of calculated and measured lateral pressures for test wall

론식에 의한 계산결과와 현장실험에 의한 측정치를 비교한 것으로, 옹벽의 상부에서 약 1.5m 깊이까지는 다짐유발 토압의 이론식과 유한요소해석에 의한 결과는 아주 좋은 일치를 보여주지만, 그 아래로는 벽체의 변위 때문에 고정벽에 대한 이론토압보다 유한요소해석에 의한 것이 훨씬 큰 값이다. 그러나 진동다짐기에 의한 연직력의 산정, 흙의 매개변수, 토압계의 정도, 해석상의 문제점 등으로 유한요소해석에 의한 해석결과는 정상적인 근접이 가능했지만 여전히 정량적으로 측정치를 만족시켜 주지 못하였다.

성층다짐의 진행과정에 따른 다짐의 영향을 관찰하기 위하여 6층(1.35m), 12층(2.55m) 그리고 18층(3.75m)의 성층다짐 직후에 토압과 변위를 유한요소해석의 결과로부터 Fig.11과 같이 얻을 수 있었다. 이 그림에서 보면, 6층까지 성층다짐에서 연직벽체의 수평변위는 거의 무시할 수 있을 정도이나, 다짐기에 의한 연직력과 뒤채움 흙의 밀도증가로 인하여 옹벽의 후면부에서는 전면부보다 큰 침하가 발생하였음을 볼 수 있다. 이때의 토압은 수동상태로 고정벽의 경우보다 약간 큰 값이다. 12층까지 성층 다짐후에는 수평응력의 증가로 연직벽체가 0.5mm정도 전방으로 이동하면서 침하도 역시 증가하지만, 여전히 배면부의 침하량이 전면부의 것보다 크다. 이러한 복합된 변위 때문에 토압분포가 상부에서는 고정벽의 경우보다 약간 크지만, 아래로 갈수록 갑자기 증가하는 양상을 보여주고, 또한 저판에 인접한 부분에서는 흙-구조 상호작용 때문에 토압이 약간 감소함을 알 수 있다. 최종적으로 뒤채움 다짐이 완료된 후, 매우 큰 수평응력 때문에 옹벽은 전반적으로 수평이동되면서 휘어지고 또한 전면저부에서 상당한 침하가 발생하였다. 이러한 영향으로 옹벽상부에서는 고정벽에 해당하는 토압 분포이지만, 상부로 갈수록 토압이 갑자기 증가하는 양상을 보여 주었다. 따라서 다짐유발 토압은 옹벽의 형상 및 재료특성, 기초지반, 다짐강도, 기후 등에 따라 복합적으로 변화한다

는 것을 알 수 있었다.

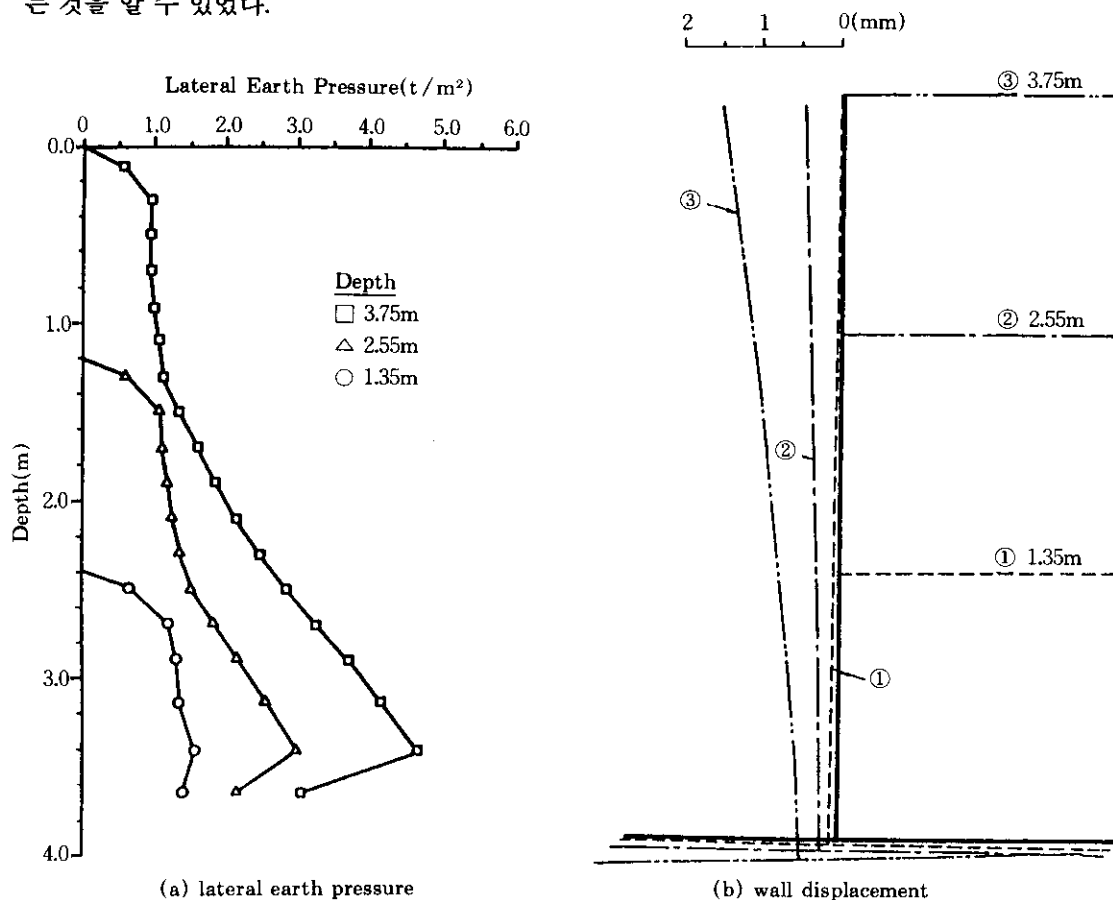


Fig. 11 Calculated earth pressures and wall displacements for different backfill height by the finite element method.

Table 6. Parameters for hysteretic and hyperbolic models.

Matl* No.	Unit Wt. (t/m ³)	Young's modulus			K _{ur}	bulk modulus		strength parameters			K ₀	compaction parameter			
		K	n	R _f		K _B	m	c(t/m ²)	φ	Δφ		K _{1φ}	C _b	K ₂	K ₃
1	2.260	700.0	0.37	0.8	1400.0	280.0	0.19	3.4	33.0	1.0	0.455	3.39	0.17	0.17	0.17
2	1.910	100.0	1.07	0.62	200.0	58.8	0.10	0.0	37.0	0.0	0.400	4.02	0.0	0.16	0.16

* The material no. 1 and 2 indicate the foundation and the backfill soils, respectively.

Table 7. Parameters for interface element.

Matl. No.*	c(t/m ²)	φ	Δφ	k _n	k _s	k _{sk}	n	R _f
1	2.0	20.0	0.0	1×10 ⁴	1.5×10 ⁴	1.5×10 ⁴	1.0	0.7
2	0.0	22.0	0.0	1×10 ⁹	1.5×10 ⁴	1.5×10 ⁴	1.0	0.7

* The material no. 1 and 2 indicate for the foundation and the backfill soils, respectively.

5. 결 론

뒤채움 다짐으로 유발되는 토압을 관찰하기 위하여 4m 높이의 역T형 옹벽에 대해 현장실험을 수행하였으며, 기존의 토압이론 및 유한요소해석의 결과들과 비교를 통하여 다음의 결론을 얻었다.

- (1) 다짐기의 형태 및 다짐강도가 다른 두 종류의 다짐기인 판진동다짐기와 진동롤러를 사용하여 일정한 성층 및 다짐방법으로 뒤채움을 수행하였으나 거의 비슷한 토압분포를 나타내었다. 이 토압은 정지토압 및 강성옹벽에 적용가능한 다짐유발토압 이론식에 의한 계산결과보다 훨씬 큰 값으로 얻어졌다.
- (2) 시험옹벽에 대해 진동롤러로 뒤채움 다짐한 후 34일에 걸쳐 토압과 변위를 측정된 결과는 기후의 변화, 경과시간에 따라 측정치의 변화가 아주 심하였다.
- (3) 진동롤러로 뒤채움 다짐한 경우에 대해 유한요소해석을 수행한 결과, 옹벽의 상부에서 일정깊이까지는 강성옹벽에 적용가능한 이론치와 아주 좋은 일치를 보여 주었으나 아래로 갈수록 훨씬 큰 토압분포를 나타내었다. 그 원인을 규명하기 위한 점증해석으로부터 토압은 옹벽의 형상 및 변위에 따라 밀접한 관련이 있음을 알 수 있었다.

앞으로 정교한 토압계의 개발을 통하여 옹벽의 형상 및 재료특성, 기초지반, 다짐강도, 기후변화에 대한 영향을 고려할 수 있는 보다 많은 실험 및 이론적 연구가 요구된다.

참 고 문 헌

1. Aggour, M.S. & Brown, C.B., "Analytical Determination of Earth Pressure Due to Compaction", 3rd International Conf. on Numerical Methods in Geomechanics, Aachen, 2-6, 1979, pp. 1167~1174
2. Broms, B., "Lateral Earth Pressures Due to Compaction of Cohesionless Soils," Proc. 4th European Conf. on Soil Mech., Budapest, 1971, pp. 373~384.
3. Broms, B. & Ingleson, I., "Earth Pressures against Abutment of Rigid Frame Bridge", Geotechnique, Vol. 21, No. 1, 1971, pp. 15~28.
4. Bruner, R. F., "Cantilever Retaining Wall Design", Ph. D. Thesis, Texas A & M University, 1983, 180 p.
5. Carder, D. R., Murray, R.T. & Krawczyk, J. V., "Earth Pressures against an Experimental Retaining Wall Backfilled with Silty Clay", TRRL Report No. LR 946, 1980.
6. Carder, D. R., Pocock, R. G. & Murray, R. T., "Experimental Retaining Wall Facility - Lateral Stress Measurements with Sand Backfill", TRRL Report No. LR 766, 1977.
7. Clayton, C. R. I. et al., "lateral Pressures induced by Compaction of Clay Backfill", 8th CPMSIF-PCSMFE, 1987, pp. 473~483.
8. Colye, H. M., Bartoskewitz, R. E., Milberger, L. J. & Bulter, H. D., "Field Measurement of Lateral Earth Pressure on a Cantilever Retaining Wall", TRRL Report 517, 1974, pp. 16~29.
9. Colye, H. M. & Bartoskewitz, R. E., "Earth Pressure on Precast Panel Retaining wall", JGED, ASCE, Vol. 102, GT 5, 1976, pp. 441~456.
10. Duncan, J. M. et., "Strength Stress-Strain and Bulk Modulus Parameters For Finite Element Analyses of Stresses and Movements in Soil Masses", Geotechnical Engineering, Report No. UCB/GT/80-01, Univ. of California, Berkeley, 1980, 77 p.
11. Fukuoka, M. et al., "Earth Pressure Measurements on Retaining Walls", 9th ISCMFE, Vol 4, Tokyo, 1977, pp. 613~626
12. Ingold, T. S., "Retaining Wall Performance during Backfilling", JGED, ASCE, 105, GT 5, 1979, pp. 613~626
13. Ingold, T. S., "The Effects of Compaction on Retaining Walls", Geotechnique 29, No.3, 1979, pp. 265~283.
14. Ingold, T. S., "Lateral Earth Pressure", Civil Engineering, London, 1980, pp. 45~58.
15. Jones, C. J. F. P., "Current Practice in De-

- signing Earth Retaining Structures”, Ground Engineering, Vol. 12, No. 6, 1979, pp. 40~50.
16. Jones, C. J. F. P & Sims, F. A., “Earth Pressures against The Abutments and Wing Walls of Standard Motorway Bridges”, Geotechnique 25, No. 4, 1975, pp. 731~742.
 17. Moore, P. J. & Chin, C. H., “Effects of Repeated Loading on the Earth Pressure”, 11th ICSMFE, 8/B/14, 1985, pp. 2117~2120.
 18. Rehnman, S.E & Broms, B. B., “Lateral Pressure on Basement Wall. Results from Full-Scale Tests”, Proc. 5th European Conf. on SMFE, Vol. 1, 1972, pp. 189~197.
 19. Rymysza, B., “Influence of Backfill Height and Compaction on Earth Pressure at Rest”, Studia Geotechnical III, 1, Poland, 1973, pp. 41~56.
 20. Schuppener, B., “Der Erddruck einer Rolligen Hinterfullung auf eine Unverschiebliche Stuwand Infolge der Verdichtung”, Mitt. B. Bundesant. Wasserbau Karlsruhe Nr. 38, 1975, pp. 1~10.
 21. Seed, R. B. & Duncan, J. M., “Soil-Structure Interaction Effects of Compaction-Induced Stresses and Deflections”, Geotechnical Engineering Research Report No. UCB/GT/83-06, Univ. of California, Berkeley, CA, 1983.
 22. Seed, R. B. & Duncan, J. M., “SSCOMP: A Finite Element Analysis Program for Evaluation of Soil-Structure Interaction and Compaction Effects”, Geotechnical Engineering Research Report No. UCB/GT/84-02, Univ. of California, Berkeley, CA, 1984.
 23. Seling, E. T., “Soil Parameters for Design of Buried Pipelines”, Proc. of the Conf. on Pipeline Infrastructure, ASCM, 1988, pp. 99~116.
 24. Sherif, M. A. & Mackey, R. D., “Pressures on Retaining Wall with Repeated Loading, JGED, ASCE, 103(II), 1977, pp. 1341~1345.
 25. Sim, F. A., Forrester, G. R. & Jones, C. J. F. P., “Lateral Pressures on Retaining Wall”, J. of Inst. of Highw. Engrs, 1970, pp. 19~30.
 26. Sowers, G. F. et al., “The Residual Lateral Pressures Produced by Compacting Soils”, Proc. 4th ICSMFE, 1957, pp. 243~247.
 27. Spotka, H., “Einfluss der Bodenverdichtung Mittels OberflächenRüttler auf den Erddruck einer Strutzwand Bei Sand”, Baugrund Institut Struttgart, 1977, 120 p.
 28. Spoka, H., “Einfluss der Bodenverdichtung auf den Erddruck einer Strutzwand”, Geotechnik, Vol. 2, No. 1, 1979, pp. 1~7.
 29. Terzaghi, K., “Large Retaining Wall Test(I) : Pressure of Dry Sand”, Engineering News Record, Vol. 112, 1934, pp.136~140.
 30. Weiler, W. A., Jr. & Kulhawy, F. H., “Behavior of Stress Cells in Soil”, Contract Report B-49(4) to Niagara Mohawk Power Corporation, Geotechnical Engineering Report 78-2, Cornell University, Ithaca, N. Y. 1978.
 31. Weiler, W. A. & Kulhawy, F. H., “Factory Affecting Stress Cell Measurement in Soil”, JGED, ASCE, Vol. 108, No. GT 12, 1982, pp. 1529~1548.
 32. Wilson, D. S. & Pimley, B., “Earth Pressure measurements in Pulverised Fuel Ash behind a Rigid Retaining Wall”, Road Reaserch Laboratory, Dept. of the Environment, RRL Report LR 392, Crowthorne, Bekshire, 1971.
 33. 정성교, 정인준, “뒤채움 다짐에 의한 정지토압”, 대한토목학회 학술발표회 개요집, 대한토목학회, 1986, pp. 611~616.
 34. 정성교 외 2인, “뒤채움 다짐한 옹벽에 작용하는 과재하중의 영향”, 대한토목학회 학술발표회 개요집(I), 대한토목학회, 1987, pp. 421~422.
 35. 정성교 외 2인, “매설함관의 설계하중 결정에 관한 연구”, 대한토질공학회지, 제5권, 제2호, 1989, pp.19~32
 36. 정성교, 정인준, 김명모, “뒷채움 다짐에 의한 횡방향 토압”, 대한토목학회 논문집, 제11권, 제2호, 1991, pp. 51~64.

(접수일자 1994. 8.16)