

# 지오그리드 강성에 따른 성토지지말뚝공법의 동적거동 평가

## Dynamic Load Transfer Characteristics of a Pile-Supported Embankment according to the Strength of Geogrid

이성지\*, 유민택\*\*, 이수형\*\*\*, 이일화†

Sung-Jee Lee\*, Min-Taek Yoo\*\*, Su-Hyung Lee\*\*\*, Il-Wha Lee†

**Abstract** Geosynthetic Reinforcement Pile-supported(GRPS) embankment is a method to restrain the settlement of soft ground and increase pile efficiency as transferring upper load to piles. For the application of method, some countries suggest design methods through many studies but effect of dynamic loading has not established. In this paper, full-scale cyclic loading test is conducted with different strength of geosynthetics(Geogrid) in order to analyze load transfer effect on piles from tensile strength of geogrid and arching by train loads. The result of tests indicated that GRPS case using high strength of geogrid has a greater effect of load transfer on piles from their tensile.

**Keywords** : GRPS, Arching effect, Geogrid, Load transfer, Dynamic load

**초 록** 토목섬유로 보강된 성토지지말뚝공법은 상부로부터 작용하는 하중을 말뚝으로 집중시킴으로서 연약지반의 침하를 억제하고 말뚝의 효율을 증가시키는 공법이다. 이 공법의 적용을 위해 각국에서는 다양한 실험과 연구를 통해 설계방법을 제안해왔지만 동적하중에 대한 영향은 확실하게 규명되지 않았다. 본 논문에서는 열차하중 작용시 섬유보강 성토지지말뚝공법에서 발생하는 아칭효과와 토목섬유 인장력으로 인한 말뚝으로의 하중전달 효과를 분석하기 위하여 토목섬유의 강성(층수)을 다르게 하여 실험을 반복재하시험을 수행하였다. 그 결과, 토목섬유의 강성이 클수록 인장력으로 받아주는 말뚝으로의 하중전달 효과가 큰 것으로 나타났다.

**주요어** : 섬유보강 성토지지말뚝공법, 아칭효과, 토목섬유, 하중전달, 동적하중

## 1. 서 론

성토지지말뚝공법은 과거 과도한 시공비와 안정성 문제 때문에 적용이 제한적이었으나, 최근에는 공기단축, 잔류침하 억제 등을 목적으로 세계적으로 많이 적용되고 있는 추세이다. 이 공법은 말뚝과 연약층 상부 성토지반의 상대적인 침하차이로 인해 아칭이 형성되므로, 지반아칭효과는 말뚝의 설치간격과 성토고에 따라 다르게 발생한다. 아칭의 불확실성에 대비하고 말뚝으로의 하중전달 효과를 증대시키기 위해서 토목섬유와 같은 보강재를 복합시

† 교신저자: 한국철도기술연구원 고속철도연구본부 책임연구원(iwlee@krri.re.kr)

\* 과학기술연합대학원대학교 철도시스템공학과, \*\* 한국철도기술연구원 고속철도연구본부

\*\*\* 한국철도기술연구원 광역도시교통연구본부

공하는 공법이 개발되었다. 하지만 섬유보강 성토지지말뚝공법을 적용하여 설계할 경우, 하중전달은 더욱 복잡한 메커니즘을 갖게 되며 특히 동적하중이 미치는 영향에 대한 분석이 필요하다.

## 2. 이론적배경

### 2.1 섬유보강 성토지지말뚝구조

성토지지말뚝공법은 성토하중을 말뚝을 통해 직접 지지층에 전달시킴으로써 구조물의 안전성을 도모하는 공법이다. 말뚝으로의 성토하중 전이효과를 증대시키고 말뚝의 설치간격을 넓히기 위해서 말뚝과 성토지반 사이에 토목섬유(지오그리드)를 보강한 형태로 시공한다.

다음 Fig. 1은 섬유를 보강한 성토지지말뚝공법의 구조이다. 경우에 따라서 토목섬유의 보강층수를 다르게 할 수 있으며, 토목섬유 위로 일정높이 이상은 양질의 재료로 성토하도록 권장하고 있다.[1]

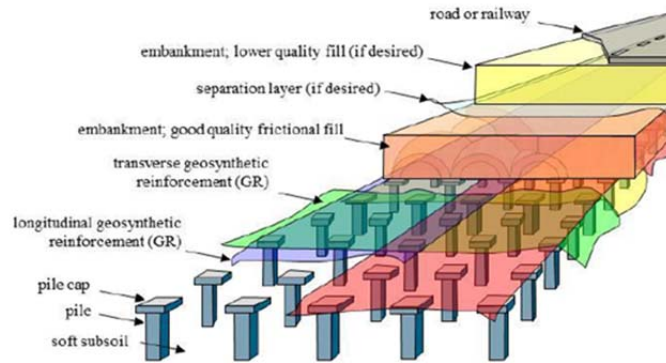


Fig. 1 A basal reinforced piled embankment

### 2.2 섬유보강 성토지지말뚝공법의 하중전달 메커니즘

토목섬유로 보강된 말뚝지지 성토체에서 말뚝, 연약지반, 성토지반, 토목섬유간의 상호작용은 Fig. 2와 같이 나타낼 수 있으며, 성토하중이 말뚝에 집중되는 원리는 크게 두 가지의 작용에 의한 것으로 분류된다.

첫 번째 작용인 말뚝과 연약층 상부 성토지반의 상대적인 침하 차이로 인한 아칭효과(A)는 토목섬유가 설치되지 않은 경우 성토하중이 말뚝에 집중되는 주요 원리이다. 두 번째 작용은 성토지지말뚝에 토목섬유가 보강된 경우에 발생하며, 연약지반에 전달되는 하중을 토목섬유가 부담하게 됨에 따라 토목섬유에 발생하는 인장력의 수직성분(B)이 말뚝에 전달되는 것이다.[2]

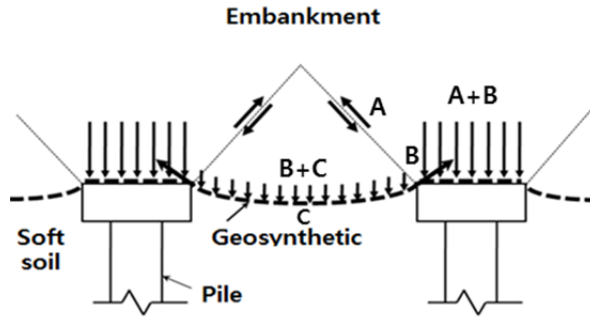


Fig. 2 Load transfer mechanism of GRPS embankment

### 3. 섬유보강 성토지지말뚝공법을 적용한 실대형 동적재하시험

#### 3.1 시험개요

본 실대형시험은 섬유보강 성토지지말뚝 공법의 안정성 및 설계기법 검증을 위해 한국철도기술연구원에서 수행되었으며, 실물크기 말뚝에 대한 성토하중 재하시험 후 반복재하시험을 수행하였다. 동적하중 작용시 아칭효과로 인한 하중전달과 토목섬유(지오그리드)가 기인하는 말뚝으로의 하중전이특성을 분석하기 위하여 Fig. 3과 같이 지오그리드의 강성과 층수를 다르게 하여 두 가지 case로 시험을 진행하였다.

Fig. 3(a)는 Case 1이며 인장력이 40kN/m인 지오그리드를 1층(일방향)으로 설치하였고, Fig. 3(b)는 Case 2이며 인장력이 50kN/m, 100kN/m인 지오그리드를 2층(양방향)으로 보강하였다. 실대형 동적재하시험을 위한 성토높이는 두 가지 case 모두 독일의 기준인 EBGEO에서 동적하중의 영향을 무시할 수 있는 한계성토고로서 말뚝 최대 순간격(1.247m)의 약 2배에 해당하는 2.6m로 성토하였다.[3]

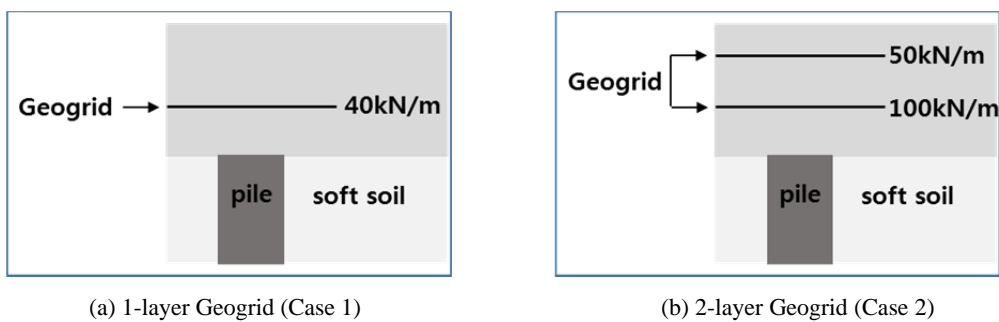


Fig. 3 Cases of full-scale dynamic loading test for GRPS embankment

#### 3.2 시험조건

실대형시험에 사용된 말뚝은 폭이 40cm인 정방형 캡을 포함하여 높이가 40cm인 강철로 제작되어, 말뚝 사이 중심간격이 캡 폭의 3배(1.2m)가 되도록 배치(4×4)하였다. 연약지반은

충분한 침하가 발생하는 매우 연약한 조건으로 설정하기 위해 폴리우레탄폼(Polyurethane Foam)으로 제작된 스폰지를 이용하여 모사하였다. 스폰지의 탄성계수는 40kPa, 두께는 40cm이다.

아칭으로 인해 말뚝으로 전달되는 하중(A)과 토목섬유의 인장력으로 전달되는 하중(B)를 구분하기 위하여 다음 Fig. 4와 같이 지오그리드 상부와 지오그리드 하부인 연약지반 위에 토압계를 같은 위치로 매설하였다. 그림 2(a)는 지오그리드 상부에 설치된 토압계로 S1-1(A), S2-1(대각방향 말뚝중앙), S3-1(최소간격방향 말뚝 중앙)에서 측정되는 토압은 각각 아칭효과로 인해 전달되는 상부하중의 분포이다. 그림 2(b)는 연약지반 위에 설치된 토압계로 S1-2(A+B), S2-2(C), S3-2(C)에서 측정된 토압은 지오그리드의 인장력과 아칭으로 인해 최종적으로 말뚝으로 전달되는 하중과 연약지반이 받는 하중을 의미한다.

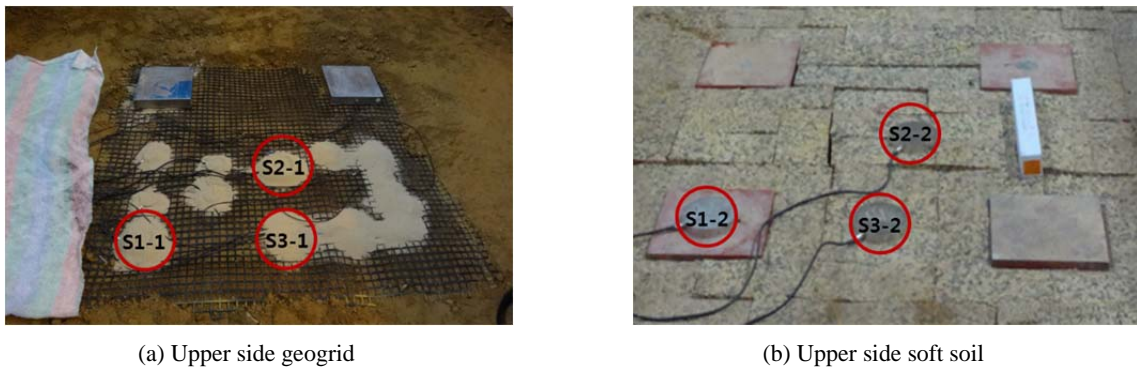


Fig. 4 Arrangement of earth pressure gauge

### 3.3 하중조건

열차가 운행하는 조건을 모사하기 위해 Fig. 5와 같이 침목과 레일을 체결한 궤도를 성토부 중앙에 배치한 후, 동적하중 220kN을 4Hz로 60만회 반복재하 하였다.



Fig. 5 View of dynamic loading

### 3.4 실대형시험 결과

Fig. 6과 Fig. 7은 60만회 동적하중 재하시 각각 case 1(지오그리드 1층 보강, 40kN/m, 일방향)과 case 2(지오그리드 2층 보강, 150kN, 양방향)의 토압계에서 측정된 결과이며, 이는 토목섬유의 강성차이나 보강층수 차이 또는 보강방향 차이로 볼 수 있다.

Fig. 6(a)과 Fig. 7(a)은 아칭으로 인하여 지오그리드 상부에 작용하는 수직응력으로, 상대적으로 강성이 큰 말뚝 위 지오그리드에서의 토압(S1-1)이 말뚝사이 중앙 지오그리드에서의 토압(S2-1, S3-1)보다 1층으로 보강한 경우는 약 7배, 2층으로 보강한 경우는 약 5배 크게 나타났다. 이는 강성이 작은 지오그리드를 사용한 경우, 강성이 큰 지오그리드를 사용한 경우보다 아칭으로 인한 하중전달이 크다는 것을 알 수 있다. 하지만 아칭효과의 불확실성과 동적하중을 무시할 수 있는 성토높이로 시공한 점을 고려한다면 1층으로 보강한 성토지지말뚝 공법이 우수하다고 판단할 수 없다.

Fig. 6(b)과 Fig. 7(b)은 상부의 동적하중이 아칭효과와 지오그리드의 인장력으로 전달되어 최종적으로 연약지반과 말뚝 상부에 미치는 수직응력을 나타낸 그림이다. case 1과 case 2 모두 연약지반에서의 토압(S2-2, S3-2)은 지오그리드의 토압(S2-1, S3-1)보다 감소하는 경향을 나타낸다. 이는 상부로부터의 하중전달이 토목섬유의 인장력으로 인해 말뚝으로 집중되어 연약지반이 부담해야하는 하중(C)이 작아지는 것을 의미한다.

지오그리드의 강성이 하중전이 특성에 미치는 영향은 Fig. 8(a),(b)에서 보여준다. S1-1은 앞서 제시한 아칭효과로 인한 말뚝으로의 하중(A)을 의미하며 S1-2는 아칭효과와 토목섬유의 인장력으로 인한 말뚝으로의 하중(A+B)을 의미한다. 그러므로 S1-2에서 측정된 수직응력에서 S1-1을 제외한 수직응력이 토목섬유가 부담하는 하중(B)이 된다. 지오그리드가 기인하는 하중분담이 미미한 Fig. 8(a)와는 반대로 Fig. 8(b)에서와 같이 강성이 큰 지오그리드로 보강한 경우는 토목섬유가 약 20kPa을 말뚝으로 전달해주는 것을 볼 수 있으며, 이는 말뚝이 받는 동적하중의 약 40%에 해당된다.

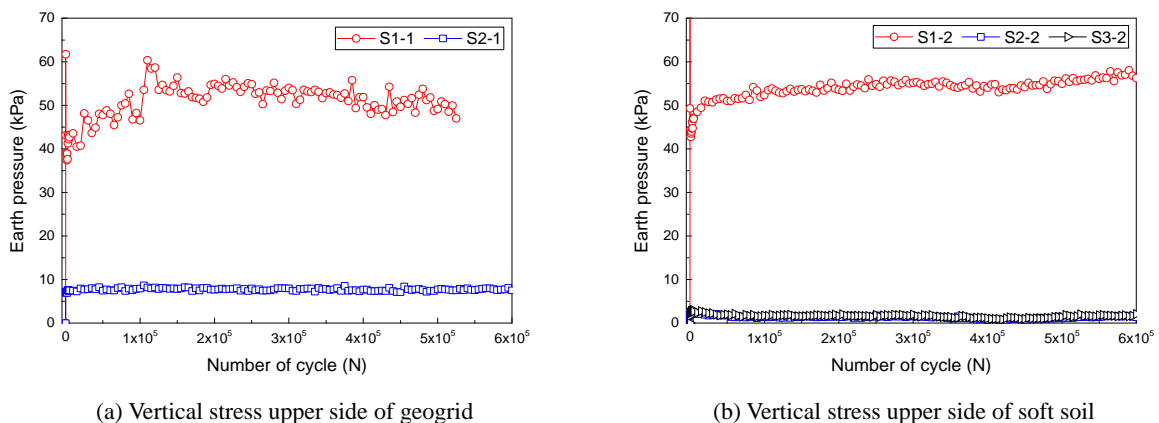
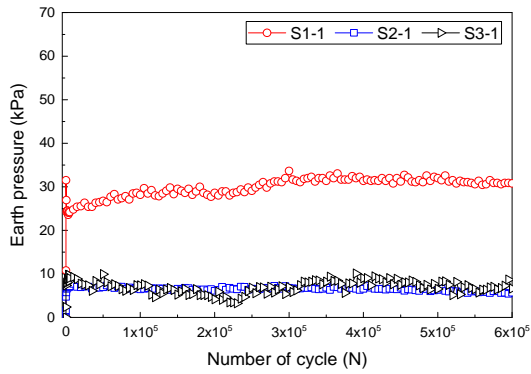
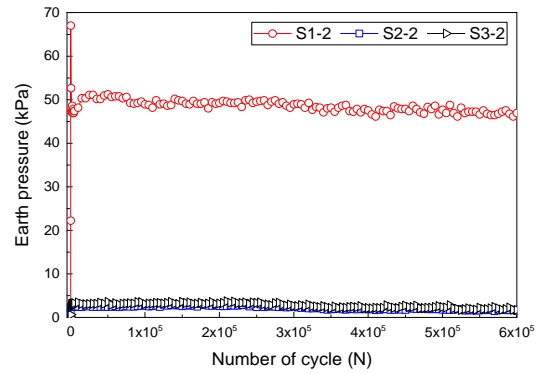


Fig. 6 1-layer geogrid(40kN/m) reinforced pile-supported embankment(Case 1)

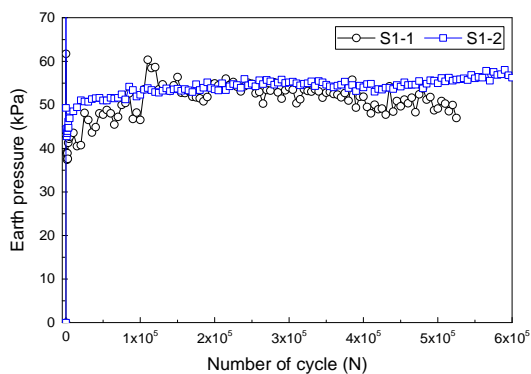


(a) Vertical stress upper side of geogrid

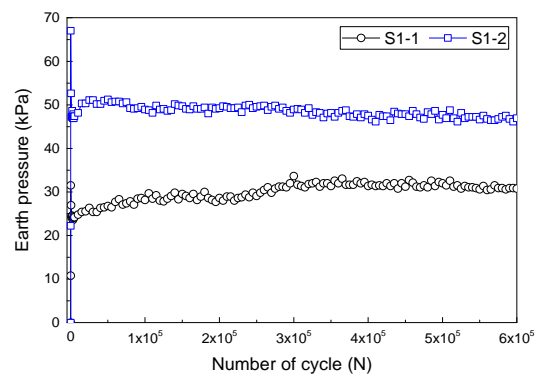


(b) Vertical stress upper side of soft soil

**Fig. 7** 2-layer geogrid(150kN/m) reinforced pile-supported embankment(Case 2)



(a) 1-layer geogrid(40kN/m)-Case 1



(b) 2-layer geogrid(150kN/m)-Case 2

**Fig. 8** Plot the A and A+B vertical stress on the pile

#### 4. 결론

동적하중이 성토지말뚝공법의 하중전이에 미치는 영향을 분석하기 하기 위하여 토목섬유의 강성(층수)을 다르게 하여 실험형 반복재하(60만회)시험을 수행하였다.

- 말뚝 상부에서는 말뚝에 작용하는 토압이 연약지반에 작용하는 토압보다 25~30배 크게 나타났다.
- 말뚝상부에 비해서 지오그리드 상부에서는 말뚝에 작용하는 토압이 감소하며, 지오그리드의 토압이 증가하는 경향을 보였다. 이는 토목섬유의 인장력이 상부하중을 분담하고 있는 것을 의미한다.
- 지오그리드의 강성이 클 때(2층), 토목섬유의 인장력 영향이 더 커지는 경향을 보였다. 따라서 성토지말뚝공법의 안정성을 높이기 위해서는 강성이 큰 토목섬유의 보강이 필요하다.

#### 후 기

본 연구는 국토교통부 철도기술연구사업의 연구비지원(연약지반구간 교량대체를 위한 침하억제공법 개발, 15RTRP-B067919-03)에 의해 수행되었습니다.

## 참고문헌

- [1] Suzanne Van Eekelen (2015) Basal Reinforced Piled Embankment, PhD Thesis, Delft University of Technology.
- [2] S.H. Lee (2009) Numerical Study on the Effects of Geosynthetic Reinforcement on the Pile-supported Embankment, *Journal of the Korea Society for Railway*, 12(2), pp.276-284
- [3] EBGEO (2010) Recommendations for design and analysis of earth structures using geosynthetic reinforcements – EBGEO, *German geotechnical society*.
- [4] S.J. Lee, K.C. Min, S.H. Lee, I.W. Lee (2015) Analysis of Settlement on Geosynthetic-reinforced and Pile-supported embankment by the train loading. *2015 Autumn Conference of the Korea Society for Railway*.