

EPS블록이 뒤채움재로 활용된 교대의 동적해석에 관한 연구 A Study on Dynamic Behavior of EPS Blocks Backfill Behind Abutment

김홍택¹⁾, Hong-Taek Kim, 강인규²⁾, In-Kyu Kang, 조용권³⁾, Yong-Kwon Cho, 이상오³⁾, Sang-Oh Lee,

¹⁾ 홍익대학교 토목공학과 부교수, Associate Prof., Dept' of Civil Eng., Hong-Ik University

²⁾ (주)브니엘컨설턴트 책임, Chief Engineer, Vniel Consultant Co., Ltd.

³⁾ 홍익대학교 토목공학과 대학원, Graduate Student, Dept' of Civil Eng., Hong-Ik University

개요(SYNOPSIS) : EPS(Expanded Polystyrene) block is used widely as the backfill material and embankment material in civil engineering construction, due to it's lightness and workability. But, the abutment with EPS backfill are expected in different dynamic behavior to the contrary of general abutment with cohesionless soil backfill. So this paper propose the approach method of dynamic behavior analysis of the bridge abutment which is constructed on the weak soil with the EPS block backfill. And considering the dynamic responds with the reflection of the variation in the initial lengths and shapes of embankment, the basic materials will be presented about aseismic design.

주요어(Key words) : EPS block, abutment-backfill stiffness, dynamic response analysis

1. 서론

EPS(Expanded Polystyrene) 블록은 폴리스티렌 수지에 발포제를 첨가한 후, 가열 연화시켜 만든 재료로서, 초경량성 및 작업의 용이성 등의 특징 때문에 뒤채움재 및 성토재로서 토목공사에 널리 사용되고 있다. 또한 국내에서도 서해안 고속도로나 남해안 고속도로 공사시, 연약지반상에 축조되는 도로제방이나 교대의 경우, 잔류침하 및 측방유동 억제 등의 목적으로 EPS블록을 적용한 시공사례가 있으며, 향후 EPS 블록(이하 EPS로 명기)의 활용성이 더욱 기대되는 실정이다.

그러나 EPS로 뒤채움된 교대는 상부구조가 무거운 반면 하부구조는 가볍기 때문에 일반적인 교대와는 상이한 동적거동이 예상되며, 따라서 본 연구에서는 EPS로 뒤채움된 교대의 동적거동에 대한 해석과 내진설계 방법을 제시하고, 또한 EPS 뒤채움재의 폭 및 배치형태 등에 따른 교대-뒤채움 지반의 상호작용(interaction)을 분석하여 내진설계에 기초적인 자료를 제시하고자 한다.

2. 교대의 내진설계

지진시 교대는 뒤채움 지반의 주동토압에 저항하는 옹벽으로서의 역할과 동시에, 교량상판의 길이방향으로 발생하는 지진하중에 대한 발생변위에 저항하고 억제하려는 추가적인 기능이 있다. 따라서 교대의 내진설계는 그림 1과 같이 주동개념과 수동개념의 두가지 접근방법으로 검토되어야 한다. 먼저 수동개념의 접근방법은 교량의 상부구조물이 지진시 관성력에 의해 교대를 뒤채움 지반쪽으로 밀 경우 교대의 수동저항 및 허용변위에 대한 안정성 여부를 검토하는 방법이며, 주동개념의 접근방법은 지진시 뒤채움 지반이 관성력에 의해 교대에 작용하는 토압이 증가될 경우 교대의 활동, 전도 및 지지에 대한 안전성을 검토하는 방법이다.

일반적인 교대의 경우 지진시 교량상판에 작용하는 지진력에 대한 뒤채움지반의 수동저항력은 충분하기 때문에 교대에 작용하는 동적주동토압에 대한 외적안정성만을 검토하는 주동개념의 설계방법으로 내진설계가 이루어진다. 그러나 EPS로 뒤채움된 교대의 경우에는 교대에 발생하는 동적주동토압은 일반 교대의 경우보다 작기 때문에 교대의 안정성은 확보되나, 교량상판에 작용하는 지진력에 대한 교대의 수동저항 능력은 떨어지기 때문에 이로인한 교대의 횡방향 변위가 커질 것으로 예상된다. 따라서 EPS로 뒤채움된 교대는 수동개념의 설계방법으로 내진설계가 이루어져야 한다.

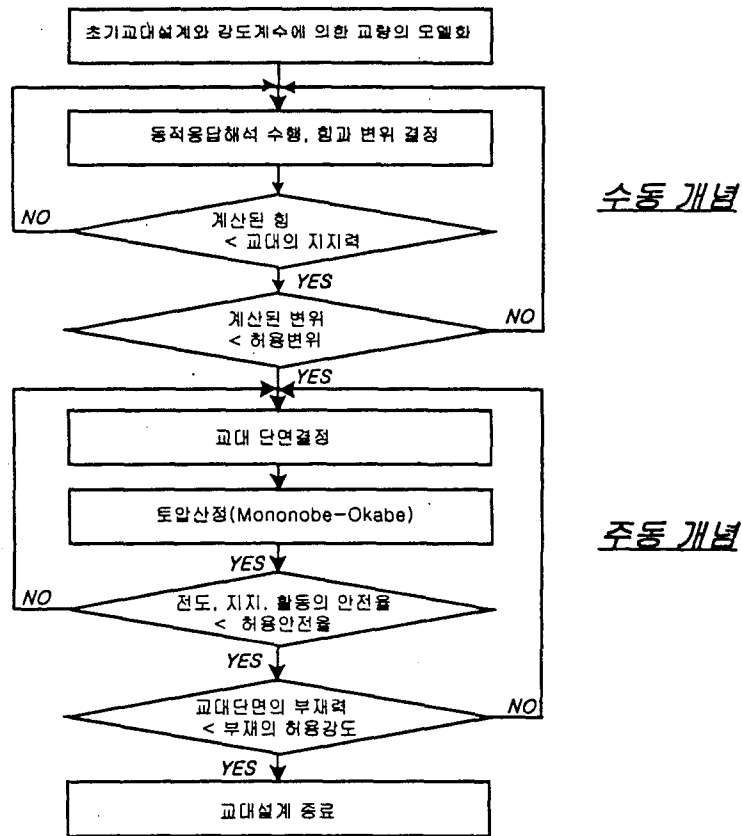


그림 1. 교대의 내진설계 흐름도

3. 교대-지반의 상호작용

Harr 등(1966)은 선형탄성체로 지반을 가정하여 연직방향에 대한 지반의 강성계수(stiffness)의 결정방법을 제시한 바 있으며, 이를 토대로 Wilson(1988)은 U자형 일체식 교대에 대한 연직 및 수평방향에 대한 뒤채움 지반의 강성계수를 결정하는 방법을 제시한 바 있다. 본 연구에서는 Wilson이 제안식을 토대로 EPS블럭의 수평방향 및 회전시 교대-지반의 강성계수를 다음과 같이 결정하였다.

$$k_x^{EPS} = \frac{E_{EPS}}{(1 - \nu_{EPS}^2) I_x} I_E \quad (1)$$

$$k_\theta^{EPS} = \frac{E_{EPS} I_\theta}{(1 - \nu_{EPS}^2) H I_x} \left[\frac{D^3}{24} + \frac{1}{3} \left(H - \frac{D}{2} \right)^3 \right] \quad (2)$$

- 여기서, k_x^{EPS} : EPS 뒤채움 지반의 수평방향 강성계수
 k_θ^{EPS} : EPS 뒤채움 지반의 회전시 강성계수
 I_x : 교대의 배면형상에 의해 결정되는 영향계수
 I_E : 뒤채움과 EPS블럭간의 상관관계에 의한 영향계수
 E_{EPS} : EPS 뒤채움재의 탄성계수
 I_θ : 회전에 의한 형상계수

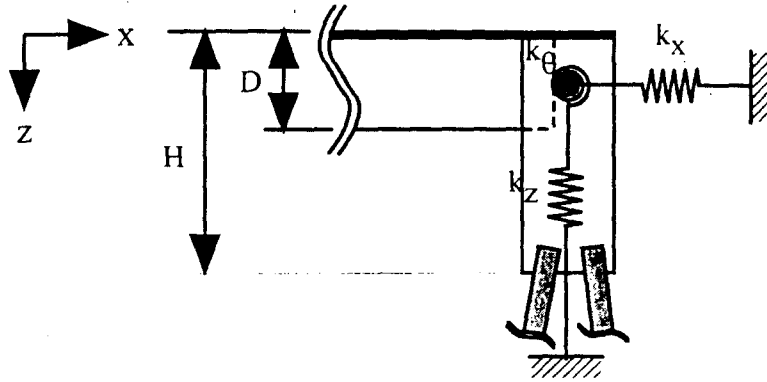


그림 2. 교대-지반의 상호작용 모델링

교대의 기초부는 교량의 상부구조에 작용하는 사하중 및 운하중 등의 하중에 대해 지지력 및 침하에 대한 안정성을 확보해야 함으로, 일반적으로 기초부에 말뚝을 사용한다. 따라서, 교대의 전체적인 강성에 이 영향을 고려하면, 그림 2에 나타난 강성계수들은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$k_x = k_x^{EPS} + k_x^P \quad (3)$$

$$k_z = \frac{E_S}{(1-\nu^2)I_z} + k_z^P \quad (4)$$

$$k_\theta = k_\theta^{EPS} + k_x^P \left(H - \frac{D}{2} \right)^2 \quad (5)$$

여기서, I_z : 수직방향 형상계수

E_S : 기초 및 뒤채움 부분에 사용된 흙의 탄성계수

또한 k_x^P , k_z^P 는 각각 말뚝의 수평·수직방향의 강성으로 다음과 같이 나타낼 수 있다(Poulos and Davis, 1974).

$$k_x^P = \frac{E_S L^p}{l_x^P} \quad (6)$$

$$k_z^P = \frac{E_S L^p}{l_z^P} \quad (7)$$

여기서, I_x^P , I_z^P : 수평 및 수직 방향의 영향계수(참고문헌 5 참조)

L^p : 말뚝의 길이

4. EPS 뒤채움재의 수평방향 강성

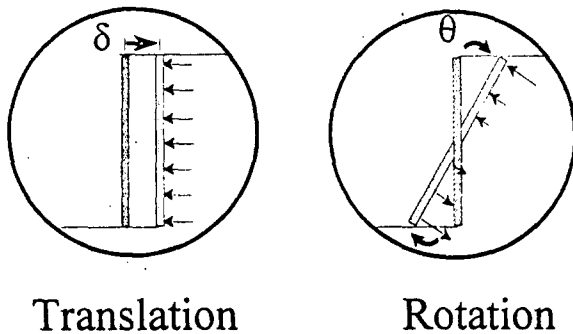
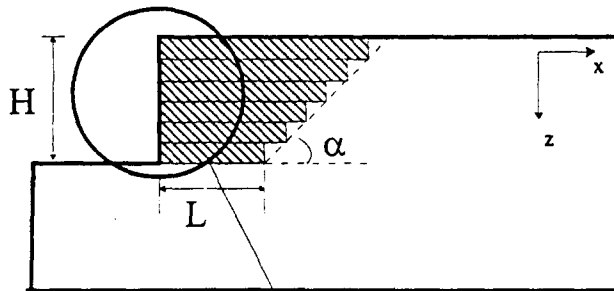
4.1 교대-지반의 상호작용에 대한 수치모델링

본 연구에서는 교대-지반의 상호작용 관계를 규명하기 위해 FLAC(Fast Lagrangian Analysis of Continua) 프로그램을 이용하였으며, 지진시 발생하는 하중에 의한 교대-EPS 뒤채움 지반 사이의 강성 계수 k_x^{EPS} 및 k_θ^{EPS} 를 규명하기 위해 변위제어방식으로 수치해석을 수행하였다.

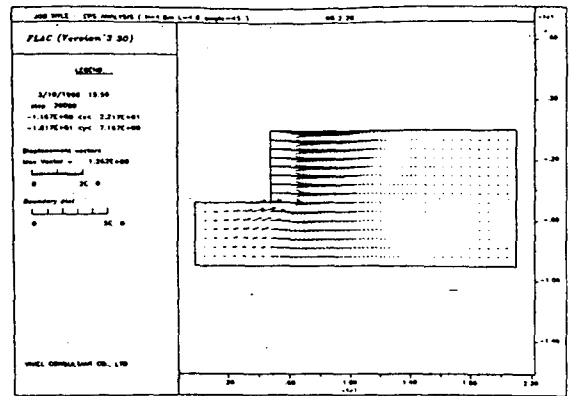
수치모델에 사용된 해석조건으로는 먼저 지반은 선형탄성체로 가정하였으며, 교대와 EPS블럭은 서로 일체되어 거동하는 것으로 가정하였다.

표 1. 수치해석에 사용된 설계변수 및 재료의 물성치

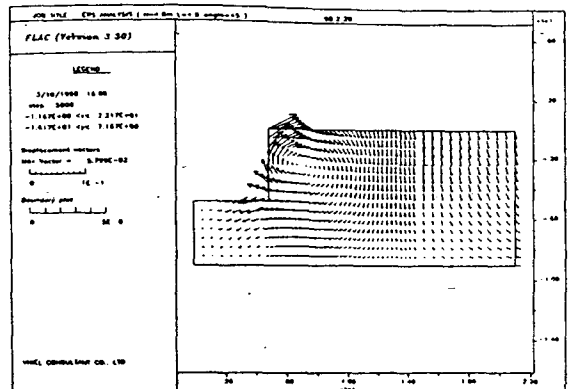
구 분	설계변수의 제원	재료의 물성치
벽체높이(H)	4.8m, 6.0m	EPS블럭의 단위 중량 : 0.02 t/m ³ EPS블럭의 포아슨비 : 0.10 흙의 단위 중량 : 1.80 t/m ³ 흙의 포아슨비 : 0.30
초기설치길이(L)/벽체높이(H)	0.0, 0.5, 1.0	
설치각도(α)	30°, 45°, 60°	
흙의 탄성계수(Es)	200, 400, 600 kPa	



(a) FLAC 프로그램 기본 모델링



(b) 수평이동에 대한 변위



(c) 회전에 대한 변위

그림 3. FLAC 프로그램 기본 모델링 및 변위 해석결과

4.2 EPS의 설치형태에 따른 교대-지반의 상호작용

EPS의 뒤편을 무시하고 교대-지반 사이의 강성계수를 계산하면 3가지의 뒤편 흠에 대하여 식(1)의 계산결과와 수치해석에 의한 예측치가 거의 유사하게 나타났으며, 교대-지반사이의 회전방향 강성비 ($= k_{\theta_{EPS}} / k_{\theta_S}$)에 대해서는 수치해석결과 식(2)에서 $D=H$ 로 하여 계산된 값과 유사하게 나타났다.

EPS로 뒤편된 교대에서 EPS의 설치각도(α) 및 초기설치길이(L)에 따른 교대-지반의 수평방향 강성계수($k_{x_{EPS}}$)와 흠으로 뒤편된 교대의 수평방향 강성계수(k_{x_S})를 강성비($= k_{x_{EPS}} / k_{x_S}$ 식 (1)에서 I_E)로 나타내어 각각의 경우에 대하여 도시하면 그림 4 및 그림 5와 같다. 그림 4 및 5의 결과에서 알 수 있듯이 EPS 뒤편재의 설치각도(α)는 교대-지반 사이의 수평방향 및 회전이동에 대한 강성계수에 크게 영향을 미치지 않는 것으로 나타났으며, 지반의 탄성계수가 증가함에 따라 강성비는 점차적으로 감소하는 경향을 보였다. 또한 EPS의 초기설치길이(L)가 길어질수록 강성비에 대한 영향은 점차 감소하는 것으로 나타났으며, 전체적으로 분석해 볼 때 회전이동에 대한 강성비는 수평이동에 대한 강성비보다는 EPS에 의한 강성계수의 감소효과가 적음을 알 수 있다. 특히 초기설치길이에 대한 영향의 경우 초기설치길이가 벽체높이의 0~0.25배 범위에서 강성비의 차이가 심하게 변하며, 0.25배 이상에서는 초기설치길이가 강성비에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

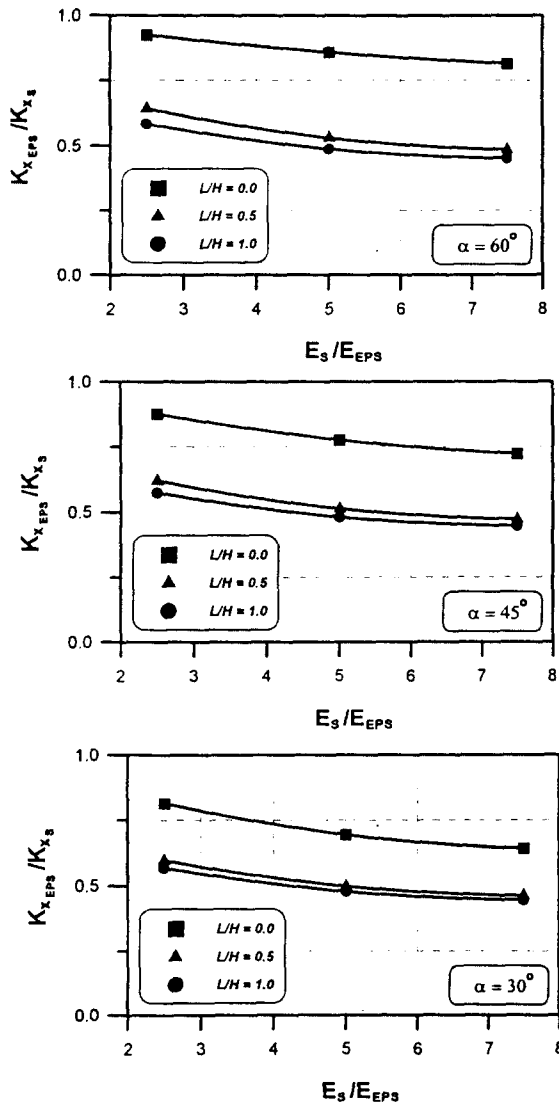


그림 4. 수평이동에 대한 강성

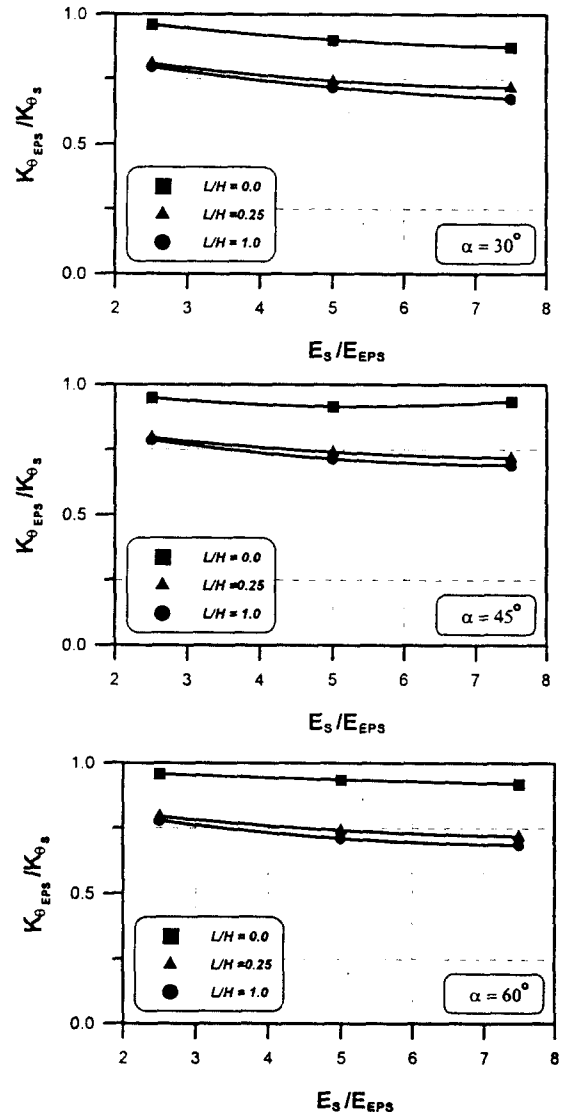


그림 5. 회전이동에 대한 강성

5. 교대의 동적거동 분석

5.1 EPS 설치형태에 따른 교량의 모드해석

본 연구에서는 표 2와 같은 단경간 교량을 대상으로 EPS 뒤펀재의 설치형태 및 교대기초부의 경계 조건에 따른 교량의 동적거동을 상용프로그램인 SAP90 프로그램을 이용하여 분석하였다. 교대 기초부에 설치되는 말뚝의 제원은 표 3과 같으며, 각 모드별 기본진동수(fundamental frequency)를 도시하면 그림 6 및 7과 같다. 교량의 전체적인 거동을 지배하는 모드는 휨(bending)에 의한 모드와 수평방향 이동에 대한 모드로 나타났다. 분석결과 EPS의 설치각도(α)에 상관 없이 거의 유사한 양상을 나타내므로 대표적인 예를 30° 에 한하여 그림 6과 그림 7에 나타내었다. 휨에 의한 모우드는 그림 6에서와 같이 EPS의 초기설치길이(L)에 큰 영향을 받지 않는 것으로 나타났으며, 말뚝에 의한 영향이 지배적으로 나타났다. 그림 7에서와 같은 수평이동에 대한 모우드에서는 뒤펀재의 영향(초기설치길이의 증가)이 다소 반영된다고 볼 수 있으며, 이 경우에도 말뚝에 의한 영향이 중요한 요소로 나타났다.

표 2. 교량 상부구조의 설계제원

길이 (l)	30 m
상판 높이 (D)	2.4 m
단면적 (A)	5 m ²
단면 2차 모멘트	2 m ⁴
단위길이당질량	2600 kg/m
탄성계수	22000 MPa
포아손 비	0.2

표 4. 말뚝의 설계제원 및 강성(stiffness)

직경	30
길이 / 직경	25
탄성계수	23500 MPa

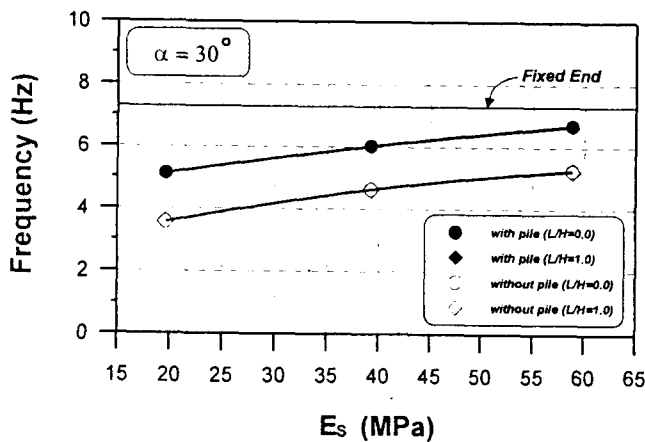


그림 6. 휨에 의한 모드

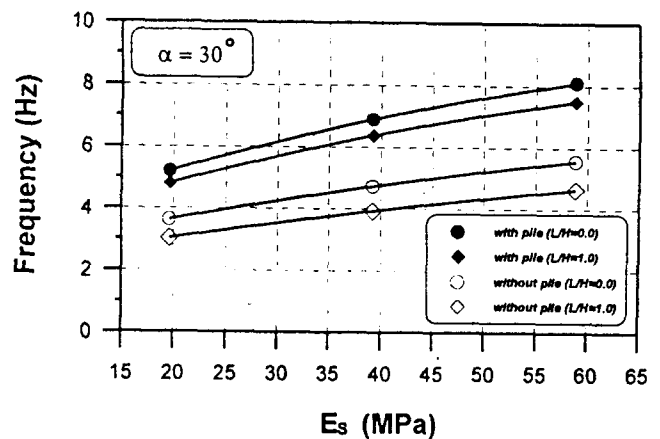


그림 7. 수평이동에 의한 모드

5.2 시간력(time history)해석에 의한 교대의 최대수평변위

본 절에서는 1940년 El Centro 지진발생시 초기 10초동안의 가속기록을 본 연구에 사용된 모델에 적용하여 교량 길이방향의 최대 수평변위를 알아보았다. 가속기록에 관한 시간력은 그림 8과 같으며, damping비는 0.05로 가정하여 SAP90 프로그램을 이용하여 표 2의 단경간 교량에 대한 동적해석을 수행하였다.

분석결과 지진력에 의해 발생하는 수평변위는 EPS의 설치각도보다는 초기설치길이에 영향을 크게 받는 것으로 나타났으며, EPS 뒤채움의 설치각도가 30° 인 경우에 대한 교대의 최대 수평변위를 도시하면 그림 9 및 그림 10과 같다. 교대의 수평변위는 EPS로 뒤채움된 경우가 토사로 뒤채움된 경우에 비해 말뚝이 설치되지 않은 경우에는 1.2~3.0배 정도, 말뚝이 설치된 경우에는 1.2~2.0배 정도 더 크게 나타났다.

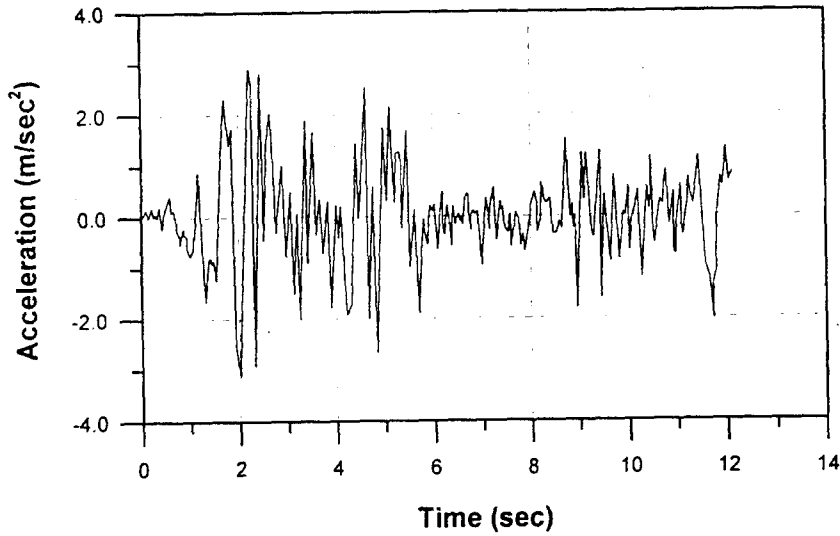


그림 8. El Centro 지진(1940) 발생시 가속도에 대한 시간력

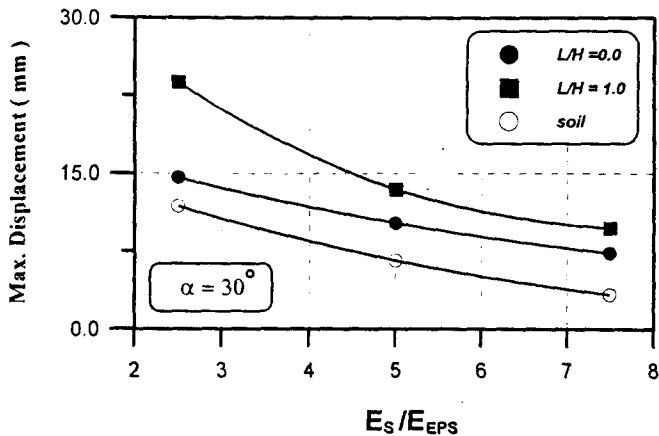


그림 9. 말뚝이 없는 경우의 최대 수평 변위

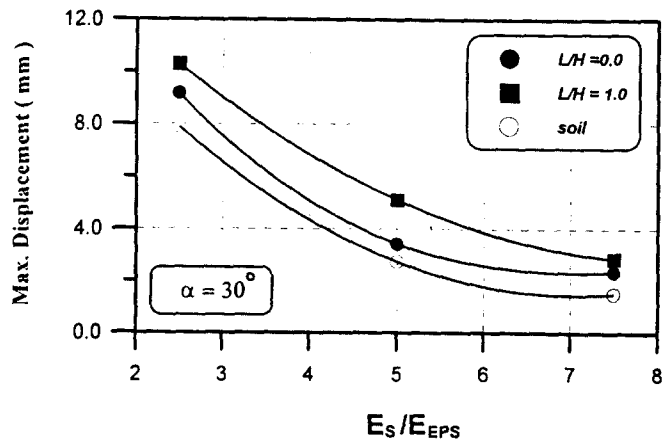


그림 10. 말뚝이 있는 경우의 최대수평변위

6. 결과 및 향후 연구과제

본 연구에 의한 결과 및 향후 연구과제에 대한 내용을 요약하면 다음과 같다.

- (1) EPS로 뒤펀된 교대는 수동개념의 설계방법으로 내진설계가 이루어져야 한다.
- (2) EPS 뒤펀재의 설치각도(α) 및 초기설치길이에 따른 교대-지반 사이의 수평방향 및 회전이동에 대한 강성계수의 영향 및 결정방법을 제시하였다.
- (3) 회전이동에 대한 강성비는 수평이동에 대한 강성비보다는 EPS에 의한 강성계수의 감소효과가 적음을 알 수 있었으며, EPS의 초기설치길이가 벽체높이의 0~0.25배 범위에서 강성비의 차이가 심하게 변하는 것으로 나타났다.
- (4) 교량의 전체적인 거동을 지배하는 모드는 휨(bending)에 의한 모드와 수평방향 이동에 대한 모드로 나타났다. 분석결과 EPS의 설치각도(α)에 상관 없이 거의 유사한 양상을 나타났다.
- (5) 지진력에 의해 발생하는 수평변위는 EPS의 설치각도보다는 초기설치길이에 영향을 크게 받는 것으로 나타났으며, EPS 뒤펀의 설치각도가 30° 인 경우에 대하여 교대의 수평변위는 EPS로 뒤펀된 경우가 토사로 뒤펀된 경우에 비해 말뚝이 설치되지 않은 경우에는 1.2~3.0배 정도, 말뚝이 설치된 경우에는 1.2~2.0배 정도 더 크게 나타났다.
- (6) 본 연구는 EPS로 뒤펀된 교대의 내진설계에 기초적인 연구결과이며, EPS의 동적거동을 규명하기 위해서는 EPS의 에너지 감쇄효과 및 지반가속도에 따른 비선형거동에 대한 실험적인 연구가 뒷받침되어야 한다고 사료된다.
- (7) 또한 날개벽(wing wall)이 있는 교대에 대한 3차원적인 교대-지반의 상호작용 및 각 강성계수 간의 상호작용에 대한 고려 등은 장차의 연구과제 이다.

7. 참고문헌

1. AASHTO(1996), *Standard Specifications for Highway Bridges* 17th, pp.389-413.
2. Lam, I. P., Martin, G. R. and Imbsen, R.(1991), "Modeling Bridge Foundations For Seismic Design and Retrofitting", *The Third Bridge Engineering Conferece*, Denver, March, pp.10-13.
3. Martin, G. R. and Yan. Liping(1995), "Modeling Passive Pressure For Bridge Abutments", *Earthquake-induced Movements and Seismic Remediation of Existing Foundations and Abutment*", ASCE, *Geotechnical, Special Publication 55*, New York.
4. Paz, M.(1991), *Structural Dynamics Theory and Computation 3rd edition*, Van Nostrand Reinhold.
5. Poulos, H. G., Davis, E. H.(1974), *Elastic Solutions for Soil and Rock Mechanics*, John Wiley & Sons, Inc., pp.54-62.
6. Tonia, D. E.(1994), *Bridge Engineering, Design, Rehabilitation and Maintenance of Modern Highway Brigeds*, McGraw-Hill, pp.354-383.
7. Wilson, J. C.(1988), "Stiffness of Non-Skew Monolithic Bridge Abutments for Seismic Analysis", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol, 16, pp.867-883.
8. 發泡スチロール土工法開發機構(1993), EPS工法, 理工圖書