

유효응력모델을 이용한 침매터널의 동적거동 해석 **Dynamic Analysis of an Immersed Tunnel using an Effective Stress Model**

박성식¹⁾, Sung-Sik Park, 문홍득²⁾, Hong-Duk Moon

¹⁾ 원광대학교 토목환경도시공학부 전임강사, Full-time Lecturer, Division of Civil, Environmental & Urban Engineering, Wonkwang University

²⁾ 진주산업대학교 토목공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, Jinju National University

SYNOPSIS : The George Massey immersed tunnel passes the Fraser River near Vancouver, Western Canada. In this paper, dynamic analysis of the tunnel on sandy soils was performed using an effective stress constitutive model called UBCSAND. This model is able to calculate pore pressure rise and resulting tunnel deformation due to cyclic loading. Centrifuge tests conducted at RPI are used to verify the model performance. Centrifuge tests consist of 3 models: Model 1 is designed for an original ground condition, Model 2 for a ground improvement by compaction method, Model 3 for a ground improvement by gravel drainage. The results of centrifuge Model 1 are presented and compared with predictions of UBCSAND model. This model well captured the results of centrifuge test and therefore can be used to predict dynamic behavior of similar tunnels or underground structures on sandy soils.

Key words : Immersed tunnel, Effective stress constitutive model, Centrifuge test

1 서 론

침매터널이란 지상에서 미리 제작한 여러 개의 터널 구조물을 현장으로 이동시킨 뒤 강바닥이나 해저에 가라앉힌 다음 서로 연결시킨 후 묻는 방식으로 건설되는 터널이다. 수심 수십 m 아래의 하상이나 해상에 설치된 터널구조물은 높은 부력 때문에 침매터널 구조물의 일부만 하중으로 기초지반에 작용하기 때문에 연약지반에도 건설할 수 있다. 지하를 굴착하는 방식의 굴착터널은 단단한 지반에서만 가능하다. 현재 일본 중국 유럽 등을 중심으로 세계적으로 140여 개의 침매터널이 건설되었으며, 국토 및 지형적인 특성으로 네덜란드가 가장 많은 침매터널을 가지고 있다. 국내에서는 경남 거제시와 부산의 가덕도를 잇는 총 길이 8.2km의 거가대교에 처음으로 침매공법을 이용하여 가덕도와 대죽도를 연결하는 3.7km의 침매터널을 시공하고 있다. 이 침매터널은 세계에서 가장 깊은 바다 최고 수심 50m에 설치되는 터널이며 연약지반을 개량한 다음 길이 180m짜리 터널구조물 18개를 연결하여 완공할 예정이다. 일본과 인접한 남해안 지역은 지진이 발생할 가능성이 상당히 높으며 느슨한 모래 지반이나 연약지반 위에 설치되는 지반구조물은 지진 시에 액상화로 인하여 과도한 변형이 발생할 수 있다. Kimura 등(1995)과 Nakata 등(1991)은 각각 원심모형실험과 1 g진동대 실험에서 진동으로 인하여 상대적으로 낮은 유효응력상태에 있는 터널 저부로 물의 흐름이 발생하여 터널을 위쪽으로 밀어 올리려는(지지력과 피형상의 뒤집힌 형태) 실험 결과를 발표하였다. 이와 같은 연구 결과는 느슨한 모래 지반이나 연약지반 위에 설치되는 터널이나 파이프라인과 같은 구조물은 지진 시에 uplift, rotation, sliding 등의 복합

적인 형태의 파괴가 발생한다는 것을 보여주었다. 이와 같은 피해를 방지하기 위해서는 배수 또는 다짐을 이용한 지반개량공법이나 sheet pile cutoff walls을 이용하는 방법 등이 있다.

본 논문에서는 캐나다 브리티시 콜로비아주에 있는 Fraser 강 밑으로 관통하는 길이 629m짜리 George Massey 침매터널이 지진 시에 어떻게 거동하는지를 연구하였다. 이 터널은 밴쿠버시와 미국 국경을 연결하는 주요 간선도로로서 6개의 105m짜리 콘크리트구조물로 이루어져 있다. George Massey 침매터널은 액상화로 인한 피해나 관련 지식이 없었던 1959년에 준공되었기 때문에 터널 저부에는 분사된 느슨한 모래로 이루어진 지지층이 존재한다. 이와 같이 해저나 강바닥에 매립된 콘크리트 구조물은 지진 시에 지지층이나 주변 지반의 액상화로 구조물이 수면위로 부상하거나 불균등침하로 인하여 침매함 사이의 연결부 파괴로 터널 전체에 피해가 발생할 수 있다. 지진 시에 예상되는 터널의 거동을 예측하기 위해서는 실시간으로 변하는 유효응력의 변화를 예측할 수 있는 유효응력모델이 터널 내진설계 또는 내진보수 및 보강에 가장 필요하다. 따라서 본 연구에서는 저자가 개발한 유효응력모델을 이용하여 이 모델이 터널의 거동예측에 이용가능한지를 원심모형실험 결과를 이용하여 비교 및 검토하였다.

2 유효응력모델

본 연구에서 사용한 유효응력모델은 UBCSAND모델(박성식 등, 2005)이다. UBCSAND모델은 연속체 역학에 기초하여 상용 유한차분해석 프로그램인 FLAC(Fast Lagrangian Analysis of Continua)(Itasca, 2000)을 이용하여 사용자 정의모델로 구현되었다. UBCSAND모델은 지진 시에 발생하는 전단파로 전달되는 전단력으로 인한 지반의 변형을 가장 잘 모사하는 직접단순전단 시험에 기초하고 있다. UBCSAND모델은 흙의 응력-변형을 관계를 계산하며, 그 이외의 부분은 FLAC이 계산을 한다. 진동이 발생하면 흙은 체적 감소가 발생하며, 이러한 체적이 감소하려는 경향 또는 움직임이 흙 입자들 사이에 물이 있을 때 물로 전달되어 간극수압이 상승하게 된다. 이와 같은 현상을 본 모델은 전단변형으로 발생하는 체적변화(소성변형)를 계산하여 이 값에 물의 체적계수를 곱하여 간극수압의 발생을 계산함으로써 진동 시에 실시간으로 변하는 유효응력의 변화를 실시간으로 고려할 수 있다. 간극수압을 계산하는 특별한 식이나 어떤 모듈이 존재하는 것은 아니다. 두 개의 탄성변수와 네 개의 소성변수를 요구하며, 이들 변수는 해석지반 또는 실험 시료의 상대밀도를 이용해서 구할 수 있다. UBCSAND모델의 입력변수를 탄성변형과 소성변형으로 나누어 설명한다.

2.1 탄성변형 입력변수

탄성변형을 계산에는 흙의 전단계수 G 와 체적계수 B 가 사용되며, 두 탄성계수는 일반적으로 평균응력 $\sigma'_m (= (\sigma'_x + \sigma'_y)/2)$ 에 따라 그 값이 달라진다. 먼저 전단계수는 다음과 같이 정의하였다.

$$G = k_G^e \cdot P_a \cdot (\sigma'_m / P_a)^{0.5} \quad (1)$$

여기서 P_a 는 대기압 (=100kPa); k_G^e 는 탄성 전단정수로 Seed 등(1986)에 의하면 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$k_G^e = 21.7 \cdot K_{2max} \quad (2)$$

K_{2max} 는 사질토의 상대밀도에 따라 값이 달라지며, 보통 느슨한 사질토의 경우에는 40, 그리고 단단한 사질토의 경우에는 55정도의 값을 가진다.

전단계수는 실내실험이나 현장실험으로부터 많은 경험식이 제안되었다. 하지만 체적계수는 실험을 통

해서 직접적으로 구하는 방법보다는 일반적으로 포아송비 ν 를 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$B = \alpha \cdot G \quad (3)$$

여기서 α 는 $2(1+\nu)/[3(1-2\nu)]$ 이며 본 연구에서는 포아송비로 0.33을 사용하여 α 는 2.6이다.

2.2 소성변형 입력변수

소성변형을 계산에 필요한 네 가지 소성변수는 최대마찰각 ϕ'_f , Constant volume마찰각 ϕ'_{cv} , 소성전단계수 G^p (소성상태에서의 전단계수), 그리고 파괴비 R_f 이다. 첫번째 변수인 파괴마찰각은 구성모델에서 모래의 파괴상태를 설정하는데 사용되며, 일반적으로 모래의 상대밀도에 따라 증가한다. 두번째 변수인 Constant volume마찰각은 모래의 전단변형으로 인한 체적변형의 경계(즉, 체적감소 또는 증가)를 나타내며, 모래종류, 상대밀도, 유효응력 크기에 관계없이 일반적으로 32-33도의 값을 가진다. 세번째 변수인 소성전단계수 G^p 는 G 와 유사한 형태로서 탄성전단정수 대신 소성전단정수 k_G^p 를 사용하였다. k_G^p 는 k_G^e 와 D_r 을 이용하여 $k_G^p \approx 4 \cdot (D_r)^4 \cdot k_G^e + 100$ 과 같이 나타낼 수 있다. 네번째 변수인 R_f 는 파괴비를 나타내며, 상대밀도에 따라 0.8에서 0.95 사이의 값을 가진다. 수치해석에서 요구되는 두 개의 탄성변수와 네 개의 소성변수는 해석지반 또는 실험 시료의 상대밀도를 이용해서 구할 수 있으며, 더 자세한 사항은 박성식 등(2005)을 참조하기 바란다. 이와 같이 얻은 입력변수를 이용하여 그림 1과 같은 직접단순전단시험 결과를 해석하여 모델을 검증한 다음, UBCSAND모델로 실제 구조물의 거동을 예측하였다.

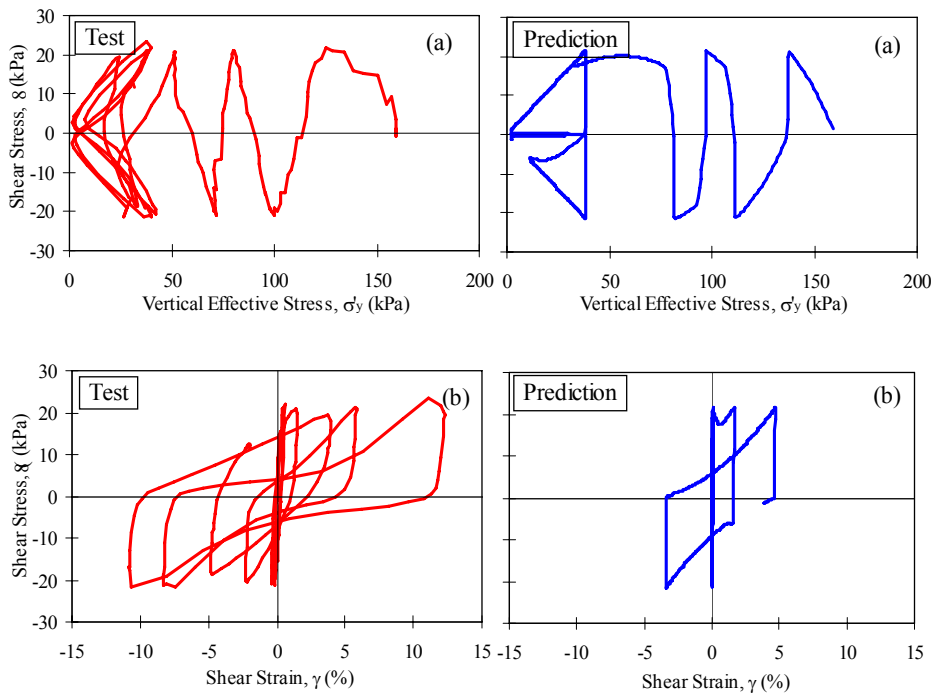


그림 1. 반복직접단순전단시험 결과(왼쪽)와 UBCSAND모델의 예측치(오른쪽): (a) 유효응력도, (b) 전단응력-변형률(박성식과 김영수, 2006)

3. 침매터널의 원심모형실험

본 논문에서 사용한 George Massey터널의 원심모형실험 자료는 내진보수공사를 맡은 캐나다

Buckland & Taylor사로부터 제공받았다. Buckland & Taylor사는 원심모형실험 분야 중에서도 특히 액상화와 관련된 많은 경험을 가지고 있는 미국 Rensselaer Polytechnic Institute(RPI)대학에 의뢰하여 원심모형실험을 실시하였다. 원심모형실험은 3종류로 구성되었으며, 모델 1은 지반개량 전의 지반, 모델 2는 터널 양쪽에 폭 10m의 다짐공법으로 지반개량을 한 경우, 모델 3은 터널 양쪽에 폭 10m의 자갈을 이용한 배수공법으로 지반개량을 실시한 경우이다. 원심모형실험에 사용하는 모형 박스는 rigid 박스와 laminar 박스로 나눌 수 있다. 본 실험에서는 여러 개의 얇은 판이 높이 방향으로 연결된 형태의 laminar 박스를 사용하였으며, 박스의 크기는 가로 71cm, 세로 36cm, 높이 38cm 이다. 모형 제작에 사용한 모래는 Nevada No. 120 모래이며, 이 모래는 입도가 균등하고 둥글다. 그림 2는 모형지반의 단면과 모형터널을 나타내고 있다. 박스 내에 평평한 지반으로 구성된 모형지반의 총 높이는 25cm이며, 그림 2와 같이 맨 아래 4cm 두께의 상대밀도 90%의 단단한 모래층과 그 위에 21cm 두께의 상대밀도 40%의 느슨한 모래로 구성되었다. 그리고 실제 터널의 아래에 존재하는 느슨한 모래층을 모델링하기 위하여 2cm 두께의 상대밀도 25%의 모래층을 설치하였다.

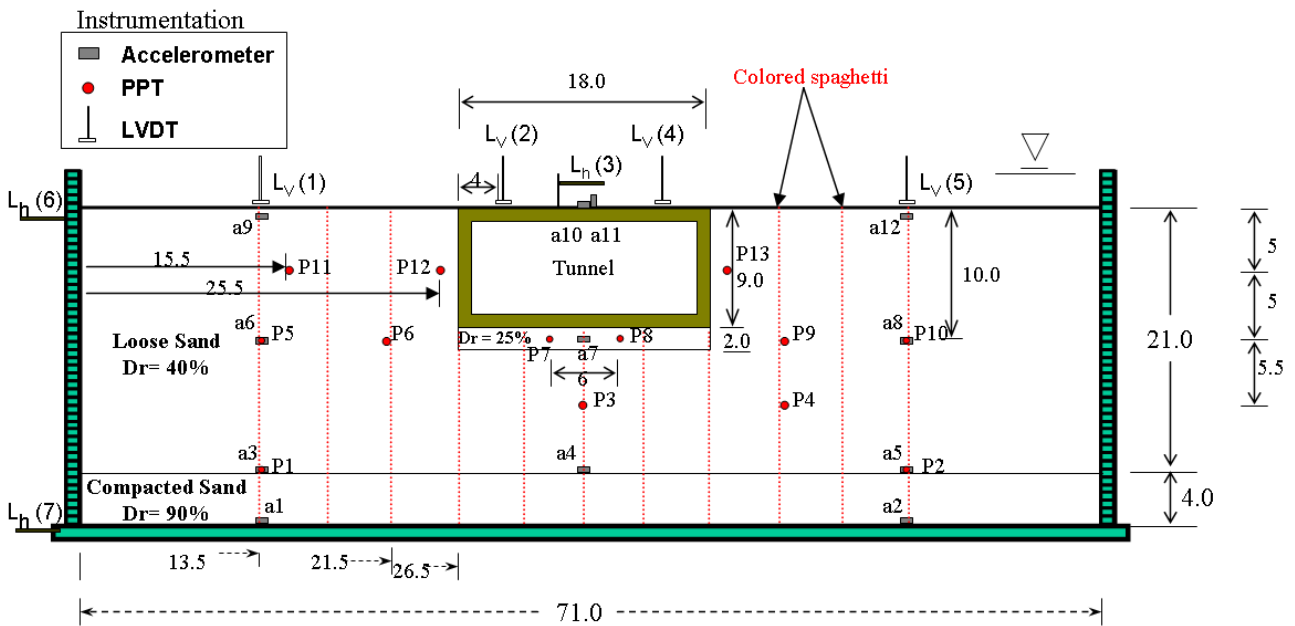


그림 2. 침매터널의 원심모형실험단면과 계측기기의 배치도(길이단위는 cm)

지반의 계측기기는 간극수압계, 가속도계, LVDT로 구성되었으며, 설치 위치는 그림 2와 같이 터널중앙부분을 중심으로 좌우대칭으로 배치하였다. 수평방향의 변위를 계측하기 위하여 스파게티를 수직방향으로 매설하였다. 이와 같은 모형에 원심가속도 100g를 가하였으며, 실물 크기는 모형 크기의 100배인 가로 71m, 높이 25m이며 알루미늄으로 제작된 모형 터널의 실물 크기는 너비 18m, 높이 9m가 된다. 높은 중력장을 가진 원심모형실험에서 간극수로 물을 사용할 경우 진동으로 인한 과잉간극수압의 발생 및 소산과정이 실제 지구 중력장과 다르다. 이와 같은 문제점을 보완하기 위하여 물보다 25배 점성이 높은 액체를 사용하여 과잉간극수압의 발생과 소산과정이 실제 중력장에서의 거동과 유사하게 시뮬레이션하고자 하였다. 원심모형실험에 사용한 점성유체와 투수계수의 관계는 박성식과 김영수(2006)를 참조하기 바란다. 모형지반의 하부에 입력할 지진가속도는 그림 3과 같이 최대 가속도 0.13g를 40초(실물크기) 동안 입력하였다. 모형지반은 현장 지반의 하상 경사를 고려하여 시계방향으로 2도 정도 기울어진 상태에서 진동실험을 실시하였다. 모형지반의 제작 및 실험과 관련된 더 자세한 사항은 Adalier 등(2003)을 참조하기 바란다. 원심모형실험 결과는 시간에 따른 과잉간극수압과 가속도의 변화, 그리고 지표면과 터널의 수직, 수평 변위를 계측하였다. 이와 관련된 결과는 다음 장에 수치해석결과와 서로 비교하였다.

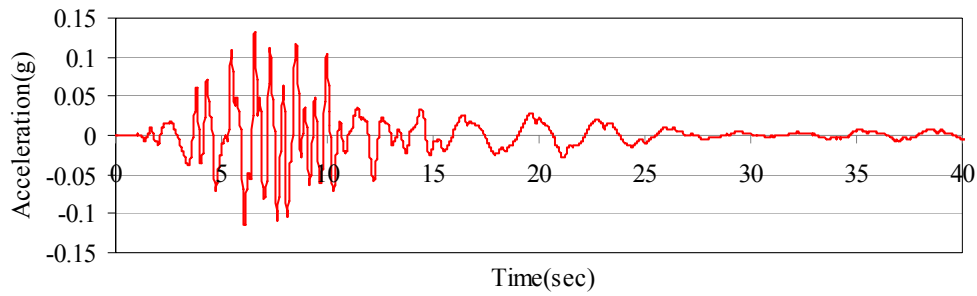


그림 3. 지진 입력과

4. 수치해석과 원심모형실험의 비교

본 논문에서는 3종류의 원심모형실험 가운데 지반개량을 실시하지 않은 원지반 상태를 시뮬레이션한 모델 1의 지진 시 거동을 예측하였으며, 그 결과를 원심모형실험의 측정치와 서로 비교하였다. 실험결과와 수치해석은 모두 실물크기로 비교하였다. 터널을 포함하여 가로 71m, 높이 25m의 지반을 UBCSAND모델로 모델링하였다. 수치해석에 사용한 FLAC 해석모델은 그림 4의 ‘진동전의 지반’과 같으며, mesh의 간격은 $1m \times 1m$ 이다. 입력변수는 표 1과 같다. 그림 3과 같은 원심모형실험에 사용한 동일한 지진파를 입력하여 수치해석을 실시하였다. 모델 1에서 측정된 모든 간극수압계(PPT), 가속도계(Acc), LVDT의 시간에 따른 변화를 나타내기 어렵기 때문에 중앙을 기준으로 오른쪽에 있는 측정값을 서로 비교하였다. 즉 간극수압은 P3, P8, P9, P13을, 가속도는 a2, a5, a8, a12를, 변위는 터널의 수직변위를 나타내는 Lv(4), 평지반의 수직변위를 나타내는 Lv(5)를 각각 비교하였다.

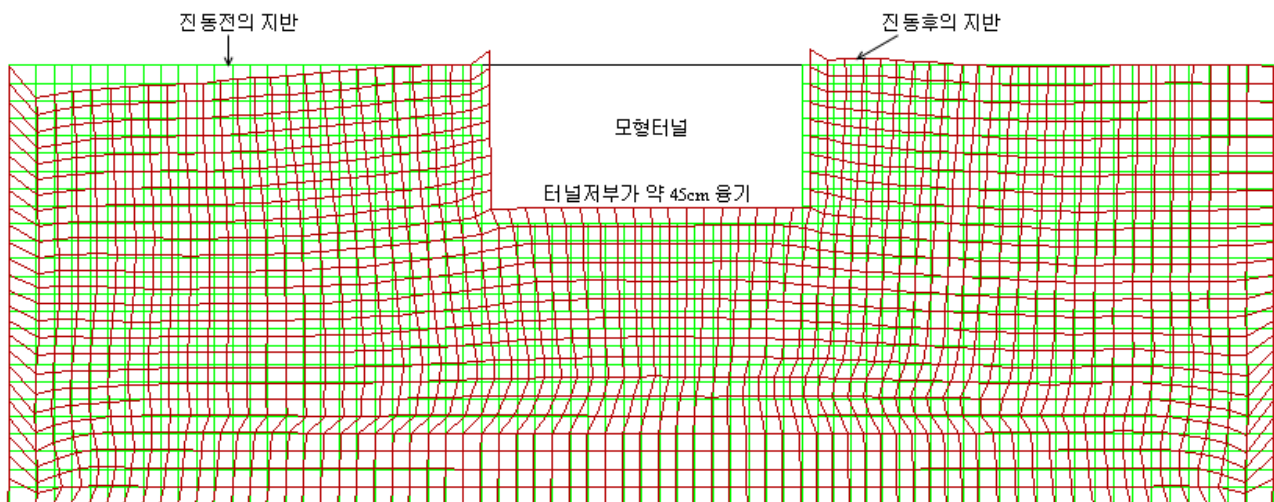


그림 4. 수치해석 Mesh 및 진동전과 후의 지반변위(진동후의 지반변위는 2배 확대)

표 1. 모델 1의 수치해석에 사용한 입력변수

상대밀도(%)	k_G^c	$\phi'_f (^\circ)$	$\phi'_{cv} (^\circ)$	k_G^p	R_f	투수계수(m/sec)
25	622	34	33	110	0.97	8.0×10^{-5}
40	651	35	33	167	0.96	6.6×10^{-5}
90	1075	40	33	2921	0.87	2.3×10^{-5}

그림 5는 모델 1에서 계측된(그림 5에서 왼쪽) 과잉간극수압을 예측치(그림 5에서 오른쪽)와 비교하고 있다. 터널아래 약 1m와 7m지점에 위치한 P8와 P3는 각각 40kPa와 100kPa정도의 과잉간극수압이 발생하였다. 터널 옆쪽의 깊이 5m 아래에 위치한 P13은 비교적 큰 간극수압인 60kPa정도가 발생하여 액상화가 발생하였으며, 이 값은 10m아래에 위치한 P9에서 계측된 과잉간극수압과 비슷한 값이다. 진동 시작 후 25초정도에 대부분의 진동이 끝나고 40초에는 진동이 거의 발생하지 않았으나, 지반의 아래층에서 올라오는 침투수의 영향으로 터널 주위에는 아직 간극수압의 소산이 시작되지 않았다. UBCSAND모델이 계산한 과잉간극수압은 최대값, 발생속도 및 소산속도 측면에서 계측치와 비교적 잘 일치하였다. 하지만 P13의 예측치는 최대값에 도달한 후 모래의 다이레이션 효과를 과대평가하여 간극수압이 감소하는 경향을 보였으며, 이는 계측치와는 상당히 다른 결과이다. 그림 6은 모델 1에서 계측된 가속도와 예측된 가속도를 비교하고 있다. A5는 아주 작은 시간간격으로 계산과정에서 발생하는 노이즈가 제거되지 않아 가속도 spikes가 많이 포함되어 있다. 예측된 가속도 A8과 A9는 계측치와는 상당히 다르다. UBCSAND모델에서 계산된 높은 과잉간극수압은 지반이 액상화되어 더 이상의 전단파를 전달하지 못하기 때문에 입력파보다 훨씬 작은 가속도를 예측하였다. 그림 7은 계측 및 예측된 변위를 비교하고 있다. 터널의 변위를 나타내는 Lv(4)는 계측치보다 약 2배정도 큰 변위를 예측하였다. 터널에서 오른쪽 방향으로 비교적 먼 평지반의 침하량을 나타내는 Lv(5)의 값은 다소 작게 예측하였다. 하지만 터널의 왼쪽 부분의 지표면침하를 나타내는 Lv(1)(계측 불능)은 상대적으로 크게 예측한 것으로 판단된다. 그림 4에도 진동 전후의 예측된 지반변위를 나타내고 있으며, 터널 구조물이 전체적으로 약 45cm 정도로 위쪽으로 올라갔다. 이와 같은 지반의 변형으로 사질토 위에 놓여 있는 침매터널에 불균등 침하가 발생하거나 혹은 터널과 터널사이의 접합부가 파손될 우려가 있다. 따라서 터널이 지진으로 원래의 기능을 상실하지 않도록 기초지반의 지반개량이 필요하다.

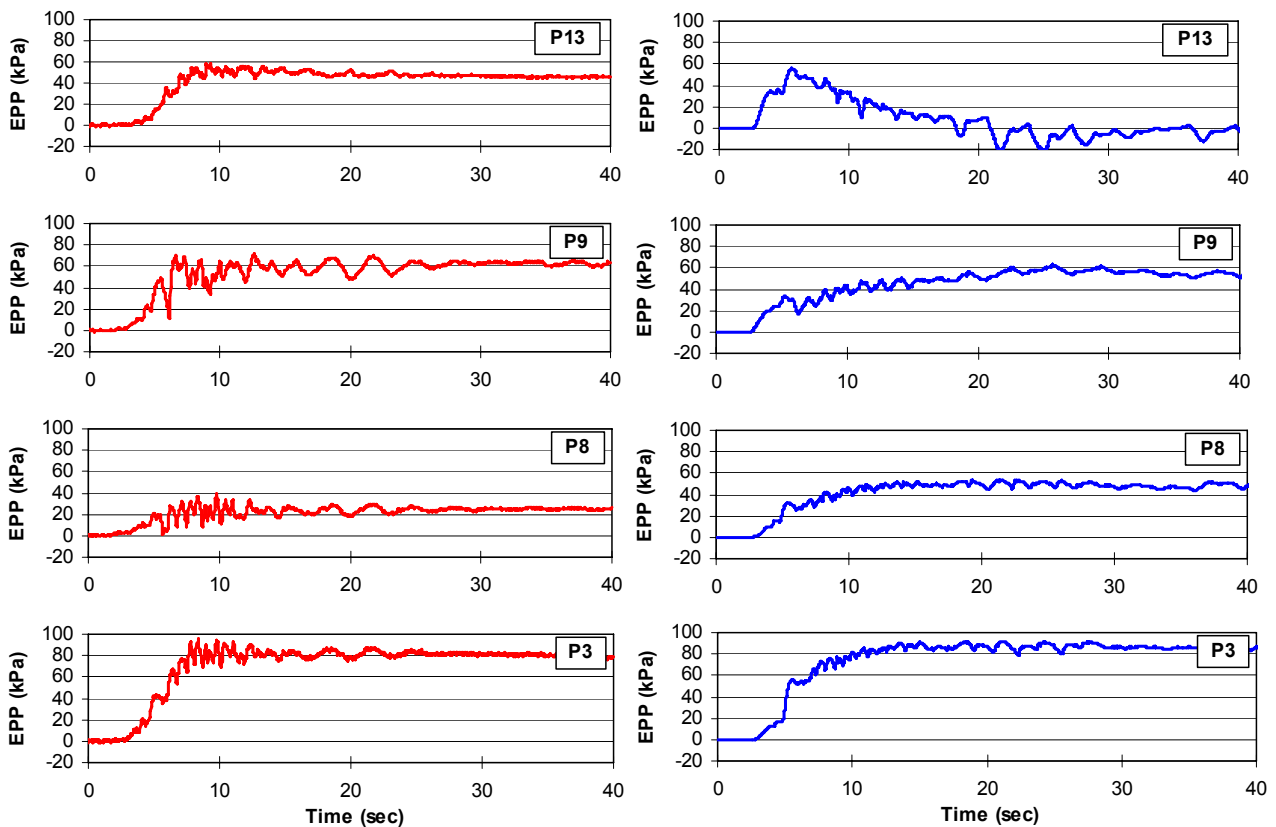


그림 5. 진동으로 발생한 과잉간극수압의 비교(왼쪽은 계측치, 오른쪽은 예측치)

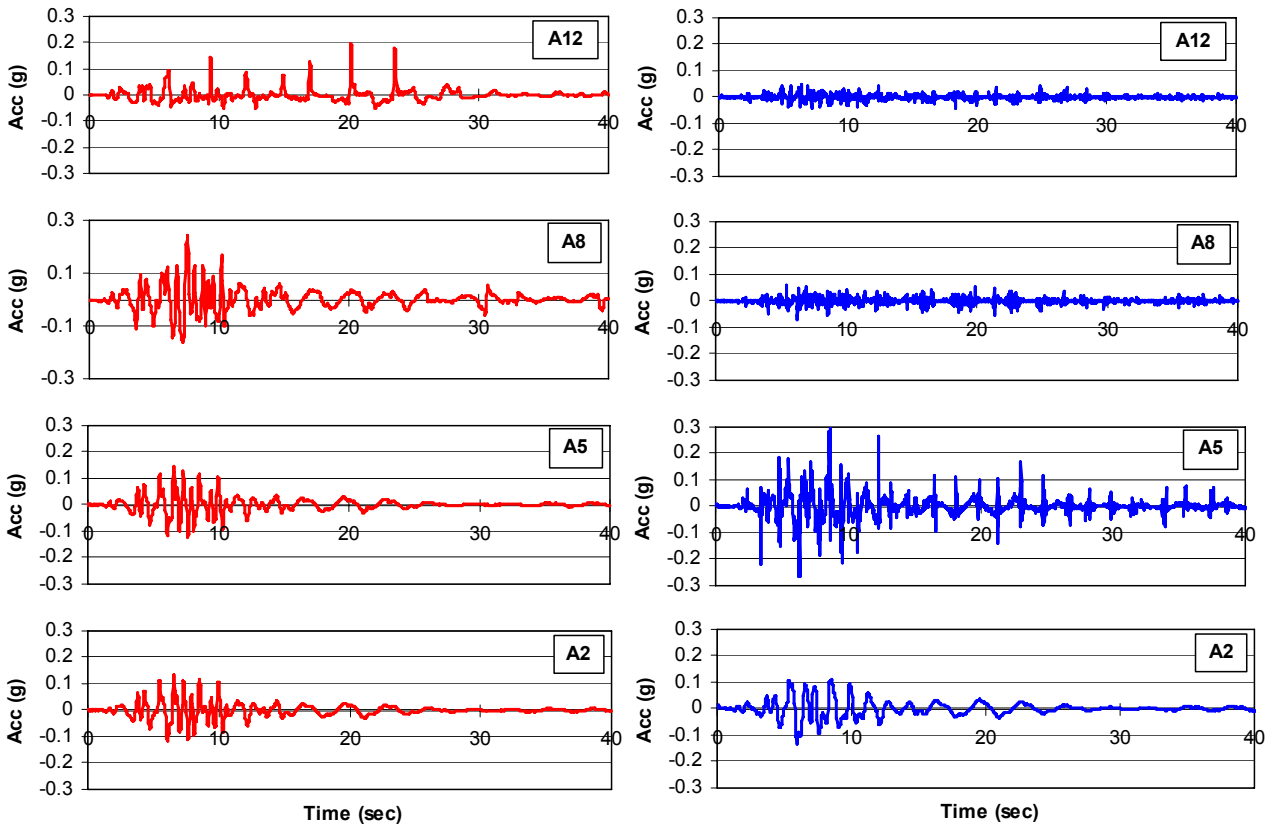


그림 6. 진동으로 발생한 가속도의 비교(왼쪽은 계측치, 오른쪽은 예측치)

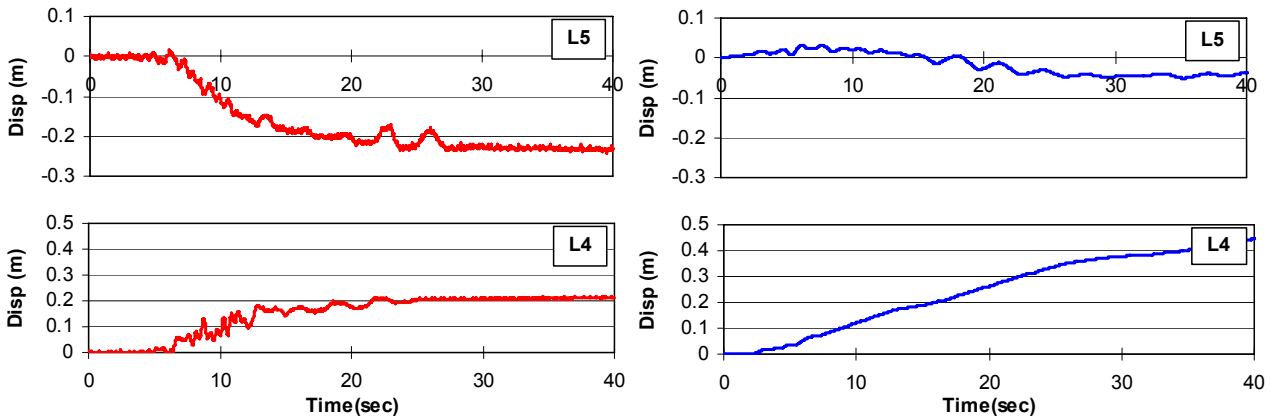


그림 7. 진동으로 발생한 변위의 비교(왼쪽은 계측치, 오른쪽은 예측치)

5. 결론

우리나라와 인접한 일본에서는 액상화로 인하여 강이나 해안에 위치한 교량의 붕괴나 해안구조물의 피해가 자주 발생하였다. 이와 같은 피해를 사전에 방지하기 위하여 포화된 사질토 지반에 설치되는 교량의 교각이나 해저 구조물의 기초지반이 지진 시에 지반의 변위를 포함하여 어떻게 거동하는지를 반드시 예측하여야 한다. 진동으로 인한 간극수압의 발생과 그에 따른 지반의 변형을 예측하기 위해서는 유효응력모델이 필요하다. 본 논문에서는 UBCSAND 유효응력모델을 이용하여 사질토지반에 설치된 침매 터널이 지진 시에 어떻게 거동하는지를 예측하였으며, 그 결과를 원심모형실험 결과와 비교하여 유효응력모델의 적용 가능성을 검토하였다. 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 유효응력모델은 침매터널의 원심모형실험에서 진동으로 발생한 과잉간극수압, 가속도, 변위를 예측할 수 있으며, 최대값과 경향 면에서 실험결과와 유사한 예측을 할 수 있었다.
- (2) 이와 같이 검증된 유효응력모델은 유사한 침매터널의 지진 시의 거동예측과 내진설계에 사용될 수 있다.

감사의 글

George Massey 침매터널의 원심모형실험 자료를 제공해준 Buckland & Taylor사의 Dr. Yang에게 감사드립니다.

참고문헌

1. 박성식, 김영수(2006), "유효응력모델을 이용한 동적 원심모형실험의 수치해석", **한국 지반공학회 논문집**, 제22권, 1호, pp.25-34.
2. 박성식, 김영수, Byrne, P.M., 김대만(2005), "액상화해석을 위한 간단한 구성모델", **한국 지반공학회 논문집**, 제21권, 8호, pp.27-35.
3. Adalier, K., Abdoun, T., Dobry, R., Phillips, R., Yang, D. and Naesgaard, E. (2003), "Centrifuge modelling for seismic retrofit design of an immersed tube tunnel", *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, Vol. 2, pp.23-35.
4. Itasca(2000), FLAC, version 4.0. Itasca Consulting Group Inc., Minneapolis.
5. Kimura, T., Takemura, J., Hiro-oka, A., Okamura, M., and Matsuda, T. (1995), "Countermeasures against liquefaction of sand deposits with structures", *In Proceedings of the First International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, Vol. 3, pp.1203-1224.
6. Nakata, H., Miyake, K., and Muraoka, T. (1991), "Shaking table tests of submerged tunnel in sandy ground", *In Proceedings of the International Conference on Geotechnical Engineering for Coastal Development: Theory and Practice in Soft Ground-Geo-Coast'91*, Yokohama, Japan, 3-6 September 1991. Japan Coastal Development Institute of Technology, Tokyo. pp.483-486.
7. Seed, H. B., Wong, R. T., Idriss, I. M. and Tokimatsu, K. (1986), "Moduli and damping factors for dynamic analyses of cohesionless soils", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.112, No.11, pp.1016-1032