

매립 지반에서의 지진파 증폭 특성

Seismic Motion Amplification Characteristics at Reclaimed Ground

김 용 성* · 김 기 영** · 전 제 성**

Kim, Yong-seong · Kim, Ki-Young · Jeon, Je-Sung

Abstract

In this study, borehole records were analyzed to verify the amplification of seismic motion at the soft reclaimed ground before and after the main event of the 1995 Hyogoken Nambu Earthquake at Port Island, Japan. From the analysis, it was shown that the amplification of seismic motion occurred near the soft ground surface (within 30 m below) where confining stress is low. Moreover, it was found that recovery of dynamic soil stiffness at the liquefied ground began gradually 3 hours after the liquefaction and completed in 10 days, when the ground exhibited the same seismic motion characteristics as those before the liquefaction.

Keywords : Seismic motion, Reclaimed ground, Constitutive model, Viscoelastic, Viscoplastic

I. 서 론

2004년 12월 26일 인도네시아 부근 해상에서 발생한 대지진(지진규모 9.0)으로 수십만명이 숨지는 대형 참사가 발생해 지진에 대한 경각심을 새롭게 해주고 있다. 주변국인 일본 및 대만에서도 대형지진이 끊임없이 발생하고 있으며 근래 들어 우리나라에서도 중·약진 지진이 년 40회 이상 발생하여 한반도도 더 이상의 지진 안전지대가 아니라는 인식이 확대되고 있다(기상청, 2005). 최근 10

년 동안 중국, 대만 일본 등 우리나라 주변국에서 100명 이상의 사망자를 야기한 강진은 4회나 되며(Table 1, 기상청, 2005), 이들은 비교적 안전하다고 인식되어 왔던 지중 구조물, 터널 및 깊은 기초, 그리고 라이프라인 시설 등에도 큰 피해를 가져왔다(Iida et al., 1996).

지진에 의해 생성된 지진파가 표층 퇴적토에서 증폭하는 것은 오래 동안 널리 인식되어져 왔다(Kanni et al. 1956; Gutenberg, 1957). 예를 들면 멕시코시티의 기초 지반인 연약 점성토층은 1985년 Michoacan 지진 발생시 지반운동 증폭의 원인이 되었으며, 1989년 Loma Prieta 지진은 샌프란시스코만에 퇴적된 점성토층에 의해서 지반운동이 증폭되고 성토지역에서 액상화가 발생되어 샌프란시스코 지역에 큰 피해를 야기하였다(Borcherdt

* 한국수자원공사 수자원연구원
** 한국수자원공사 수자원연구원
* Corresponding author. Tel.: +82-42-860-0593
Fax: +82-42-860-0339
E-mail address: nakisuna@kowaco.or.kr

& Glassmoyer, 1992). 이 지진들은 지반운동의 국부적 부지 효과(local site effect)가 구조적 피해에 큰 영향력을 가지는 것을 명확히 인식시켜 주었다(Hank & Krawinkler, 1991). 지반 운동의 국부적 부지 효과란 지반이 연약하면 지반의 운동이 하부의 암반 운동보다 증폭되어 더 심한 피해를 초래하는 현상을 가리킨다. 근래에 진보된 기술에 의한 다양한 발전으로 국부적 부지 효과에 관한 인식이 증가하였지만 특히 고주파수 영역(high frequency range)에서의 부지 효과 예측은 아직도 많은 연구가 필요한 실정이다. 이것은 불규칙적인 형상의 지반 구조물들이 다양한 지반재료로 구성된 표층에 건설되기 때문에 강한 지반진동에 따른 국부적 부지 효과의 이해는 지반 구조물의 내진설계 및 지진재해 예방을 위해 특히 중요하다고 할 수 있다.

지진파의 부지 증폭(site amplification)을 평가하는 가장 좋은 방법은 표면 및 시추공 내에 깊이 별로 지진계를 같이 배치하는 것으로 이것은 "vertical array" 관측이라 하며 부지 효과 연구의 초기 단계로부터 시작되었다. 1995년 Hyogoken Nambu 지진으로 액상화 현상이 발생한 일본 Kobe지역의 Port Island에는 Hyogoken Nambu 지진 발생 이전부터 지진 관측시스템에 의해 관측이 수행되어져 왔으며, 전진(前震), 본진(本震) 및 여진(餘震)을 포함한 다수의 관측 자료가 기록되었다(Kobe City Development Bureau, 1995).

본 연구에서는 이러한 관측기록과 수치해석 결과를 바탕으로 대형지진 발생 전의 지진파 증폭 특성과 본진에 의한 액상화 발생 이후의 지진파 증폭

특성의 경시변화에 대하여 고찰하였으며, 매립지반에서의 지층별 지반운동 증폭 특성을 분석하여 향후 농업용 지반구조물 및 항만 시설의 내진대책 수립시 기초 자료로 제공하고자 한다.

II. 지반조건 및 구성모델

1. 지반조건

본 연구의 해석대상은 일본 Kobe의 Port Island이며, 인공적으로 조성된 매립지반으로 1995년 Hyogoken Nambu 지진(M=7.2)이 발생하였을 때 넓은 범위에 걸쳐 액상화 현상이 관측되었다. 내륙 활성단층에 의하여 발생한 Hyogoken Nambu 지진의 경우, Kobe시 지역에 일본기상청(JMA) 기준으로 진도 7의 재해가 집중된 소위 재해벨트존(disaster belt zone)의 형성이 확인되기도 하였다(Hisada et al., 1998).

Fig. 1은 모델지반의 지층도 및 전단파 속도분포를 나타내며 지진계는 GL.0.0 m와 -16.0 m, -32.0 m, -83.0 m 등 네 군데에 매설되어 계측되었다. Fig. 2는 본 연구에 이용된 지반모델의 유한요소망을 나타내며, 깊이는 83 m이고 118요소로 구성되었다. 하단의 두 절점은 수평 수직 모두 고정조건, 그 이외의 절점은 수직만 고정이고 수평은 자유조건으로 동일한 깊이의 두 절점에 대하여는 등변위가 발생하는 것으로 가정하였으며 지표면만 배수조건으로 설정되었다.

동적해석에 있어서 하중의 입력은 정현파와 지진

Table 1 Strong Earthquake Distribution in near Korea (during the last 10 years)

Date	Epicenter	Area	Magnitude	Loss of lives (death/injury)
2003. 02. 24	39.6N 77.2E	China Xinjiang	6.4	263 / 4,000
1999. 09. 21	23.8N 121.1E	Taiwan Taichung	7.6	2,400 / 11,000
1996. 02. 03	27.3N 100.3E	China Yunnan	6.5	322 / 3,925
1995. 01. 17	34.4N 135.0E	Japan Kobe	7.2	6,432 / 40,000

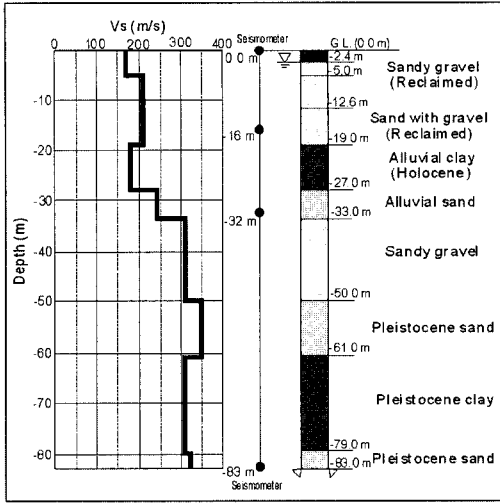


Fig. 1 Soil profile & Vs distribution

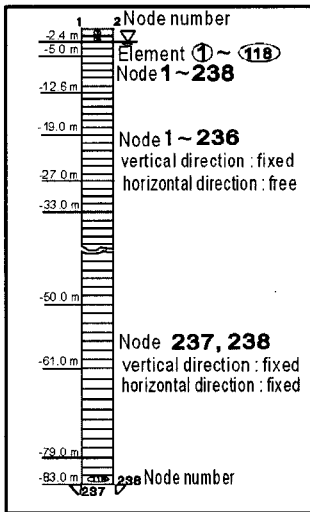


Fig. 2 FEM meshes

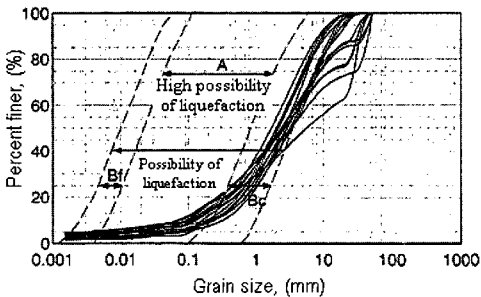


Fig. 3 Grain size curve of reclaimed materials

파 그리고 임의의 요소면상의 표면력 등으로 주어 질 수 있으나 본 연구에서는 실제 계측된 지진파 (GL.-83m, Hyogoken Nambu Earthquake)를 지반모델의 최하단 고정절점에 입력하였다. Port Island 지반의 매립작업은 1969년에 완료되었으며 화강풍화토가 매립재료로서 이용되었다(Fig. 3 참고).

2. 구성모델

본 연구에서는 저전단변형률 영역에서의 매립지반의 지진시 거동특성 파악을 위해 점성토의 구성 모델로서 탄-점소성 모델 및 점탄-점소성 구성 모델을 이용한 지진응답해석을 수행하고 그 결과를 비교·검토하기로 한다. 사질토 지반의 구성모델은 동적 탄소성 모델을 적용하였다.

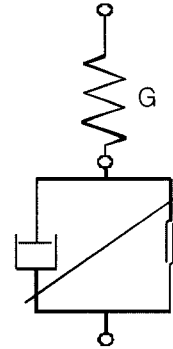


Fig. 4 Elastic-viscoplastic model

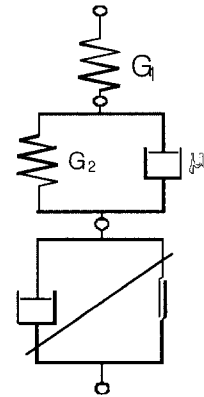


Fig. 5 Viscoelastic-viscoplastic model

일반적으로 대형 지진에서와 같이 파괴를 포함하는 중·대변형률 영역(10^{-3} 이상)에서의 시간 의존성 거동을 모델링하기 위해서는 탄-점소성 모델을 필요로 한다(Fig. 4 참조). 대규모 지진 이외의 지진에서 점성토 지반의 변형률 영역은 미소변형률 영역(10^{-5} 이하) 또는 소변형률 영역($10^{-3} \sim 10^{-5}$)이며, 지진시 지반거동 특성을 효과적으로 설명하기 위해서는 이러한 변형률 영역에서의 지반거동 특성을 적절히 설명할 수 있는 점탄-점소성 모델이 필요하게 된다(Fig. 5 참조).

가. 사질토의 동적 탄소성 모델

탄소성 모델의 전변형률 속도텐서($\dot{\epsilon}_{ij}$)는 다음의 식(1)과 같이 표현된다(Oka et al., 1999).

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon}_{ij} = & \frac{1}{2G_1} S_{ij} + \frac{\chi}{3(1+e)} \frac{\dot{\sigma}_m}{\sigma_m} \delta_{ij} \\ & + \frac{\langle \Phi'(F) \rangle}{\sigma_m} \frac{(\eta_{ij}^* - \chi_{ij}^*)}{\eta_x^*} + \frac{\langle \Phi'(F) \rangle}{\sigma_m} \\ & \left\{ \widetilde{M}^* - \frac{\eta_{mn}^*(\eta_{mn}^* - \chi_{mn}^*)}{\eta_x^*} \right\} \frac{1}{3} \delta_{ij} \end{aligned} \quad \dots (1)$$

여기서 $\dot{\epsilon}_{ij}$ 은 탄성 변형률 속도텐서, G_1 은 제 1 전단탄성계수, S_{ij} 은 편차응력 속도텐서, σ_m 은 평균유효응력 증분, $\eta_{ij}^* = S_{ij}/\sigma_m$ 는 응력비, χ_{ij}^* 는 비선형 이동경화텐서, \widetilde{M}^* 는 현재응력과 σ_{mc} 에 의해서 결정되는 변수, $\langle \Phi'(F) \rangle$ 는 실험적으로 결정되는 변형률 속도효과를 표시하는 범함수, e 는 간극비, χ 는 $e \sim \ln \sigma_m$ 곡선상의 팽창과 정에서의 경사이다.

나. 점성토의 동적 탄-점소성 모델

탄-점소성 모델의 전변형률 속도텐서는 다음 식으로 나타낼 수 있다(Oka, 1992).

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon}_{ij} = & \frac{1}{2G_1} S_{ij} + \frac{\chi}{3(1+e)} \frac{\dot{\sigma}_m}{\sigma_m} \delta_{ij} \\ & + C_{01} \frac{\langle \Phi'(F) \rangle}{\sigma_m} \frac{(\eta_{ij}^* - \chi_{ij}^*)}{\eta_x^*} + C_{02} \frac{\langle \Phi'(F) \rangle}{\sigma_m} \\ & \left\{ \widetilde{M}^* - \frac{\eta_{mn}^*(\eta_{mn}^* - \chi_{mn}^*)}{\eta_x^*} \right\} \frac{1}{3} \delta_{ij} \\ & \dots \dots \dots (2) \end{aligned}$$

여기서, C_{01} 는 전단성분의 점소성계수, C_{02} 는 체적성분의 점소성계수이다.

다. 점성토의 동적 점탄-점소성 모델

점탄-점소성 모델의 전변형률 속도텐서는 다음의 (3)식과 같이 표현된다(Kim, 2001).

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon}_{ij} = & \frac{1}{2G_1} S_{ij} + \frac{1}{\mu} (S_{ij} - 2G_2 e_{ij}^{vev}) + \frac{\chi}{3(1+e)} \frac{\dot{\sigma}_m}{\sigma_m} \delta_{ij} \\ & + C_{01} \frac{\langle \Phi'(F) \rangle}{\sigma_m} \frac{(\eta_{ij}^* - \chi_{ij}^*)}{\eta_x^*} + C_{02} \frac{\langle \Phi'(F) \rangle}{\sigma_m} \\ & \left\{ \widetilde{M}^* - \frac{\eta_{mn}^*(\eta_{mn}^* - \chi_{mn}^*)}{\eta_x^*} \right\} \frac{1}{3} \delta_{ij} \\ & \dots \dots \dots (3) \end{aligned}$$

여기서, μ 는 점성계수, G_2 는 Voigt 요소의 제 2 전단탄성계수, e_{ij}^{vev} : 점탄성 편차변형률 텐서이다.

III. 매립지반의 지진파 증폭 특성

1995년 1월 17일 발생한 Hyogoken Nanbu 지진은 강진으로서 진원과 근접한 지점에서의 지진파 기록 분석 결과 지층에 따른 비선형적인 증폭 특성을 나타내었다.

Table 2는 인공 매립지(Port Island, Japan)에서 계측된 지진파 증폭비(지반 깊이별 최대 가속도의 피크치를 기반암의 최대가속도 기록으로 나누

Table 2 Seismic motion amplification ratio at reclaimed ground (Port Island, Japan)

Group	Record data (Time)	Max. Acceleration at 83 m (gal)	Amplification ratio			Time (year) from 1994.6.28.00:00
			0 m / 83 m	16 m / 83 m	32 m / 83 m	
I	46281309	2.25	2.333	1.069	1.264	0.0015
	47281002	1.75	1.964	1.446	1.196	0.08333
	4a241151	6.813	1.335	0.546	0.784	0.40957
	4b092027	2.938	1.202	0.543	0.564	0.45165
	4b100038	3.188	1.343	0.578	0.618	0.45213
Main event	51170546	678.781	0.503	0.832*	0.801	0.55681
	Corrected	526.711	0.648	1.072**	1.032	0.55681
II	51170553	84.781	0.336	4.921*	0.879	0.55684
	51170858	28.625	1.592	3.593*	1.012	0.55719
	51180525	54.875	1.443	0.829	1.159	0.55952
	51181334	31.375	1.397	0.586	0.956	0.56045
III	51190100	6.281	1.154	0.572	0.716	0.56176
	51190152	4.625	1.27	0.818	0.953	0.56186
	51190223	8.719	1.505	0.724	1.057	0.56192
	51190510	15.25	1.266	0.533	0.781	0.56223
IV	51260101	5.563	1.949	0.876	1.101	0.58094
	51262308	2.969	2.042	0.747	1.032	0.58346
	51280806	8.844	2.12	0.876	1.537	0.58723
	51290941	4.875	2.673	0.859	1.212	0.59015
	51291602	6.469	2.58	1.043	1.444	0.59087
	52021619	37.313	1.732	0.953	1.088	0.60186
	52030436	8.656	2.44	0.671	1.368	0.60326
	52032037	4.156	2.271	0.789	1	0.60509
	52182137	9.406	1.89	1.266	0.844	0.6463
52240803	5.125	2.78	0.86	1.274	0.66119	
V	53051004	2.344	1.72	0.827	1	0.68608
	55281034	11.00	2.017	1.017	0.943	0.91627
	56190838	8.781	2.021	1.249	0.979	0.97633
	59120630	49.969	1.693	1.023	0.936	1.20896
	5a140204	45.906	1.31	1.048	0.896	1.38106

*mark denotes error data, **mark denotes second peak, 'a' and 'b' in the name of record data denote 'October' and 'November' respectively

어 정규화 한 것) 현황을 나타낸 것으로 그룹을 분류하였다. 계측 기록은 년·월·일·시·분의 조합으로 표시하였으며, 예를 들면 Group Main I, Main event, II, III, IV, V 등 6개 그룹으로

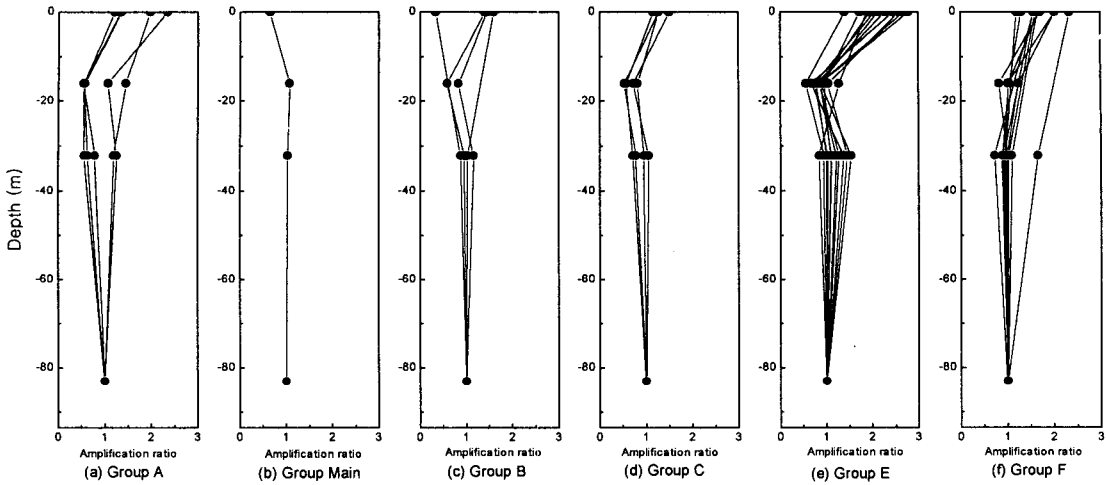


Fig. 6 Seismic motion amplification characteristics before & after main shock

event의 경우 51170546은 1995년 1월 17일 5시 46분을 의미한다(단, 그룹 I 및 V에서 a는 10월, b는 11월을 의미함).

Table 2에서 Hyogoken Nanbu 지진을 본진(Main event) 그룹으로 설정하였고, Group I은 본진 발생 전의 지진이며, II, III, IV, V 그룹은 여진으로서 그룹간의 구분은 본진을 기준으로 여진이 발생한 경과 시간(II: 본진 발생 후 2일 이내, III: 본진 발생 후 2~3일 사이, IV: 본진 발생 후 8~40일 사이, V: 본진 발생 후 약 47일~6개월 사이)으로 결정하였다.

Fig. 6은 본진 전·후의 지진파 증폭 특성을 나타내며, GL.0 m, 16 m, 32 m에서 기록된 지진파를 기반암의 위치인 GL.83 m (bedrock)에서 기록된 지진파로 나누어 정규화하여 증폭비로 나타내었다. 본진이 발생하기 전의 지진파 증폭 특성을 살펴보면 GL.16 m~83 m까지는 약간의 증폭 및 감쇠 특성을 나타내지만 그 정도가 미미하나 GL.0 m~16 m에서는 지진파의 증폭 특성이 뚜렷함을 볼 수 있다.

본진 발생 시 GL.16 m~83 m까지는 증폭비가 거의 일직선으로서 지진파의 증폭이 발생하지 않았지만 매립지반에서의 액상화 현상으로 인해 지진파

의 감쇠 특성이 두드러졌다(Kim, 2002). 따라서 지진파의 증폭은 구속압이 작아지는 지표면과 가까운 표층부(약 30 m 이내)에서 발생하는 현상임을 알 수 있으며, 액상화 발생 시 지진파는 감쇠되는 특성이 있음을 확인하였다.

한편 본진 후의 여진의 그룹별 지진파 증폭특성을 살펴보면 강진으로 인해 매립지반에 액상화가 발생하여 지표면에 설치된 지진계의 기록이 감쇠특성을 나타내는 51170553의 계측기록으로 1월 17일 05시 46분~53분 사이에는 지표면에 액상화의 영향이 지배적임을 알 수 있다. 이러한 현상은 3시간 후에는 지반구조가 재배치되어 지진파의 증폭 특성이 서서히 회복된다(Table 2 Group II의 기록 참조).

그러나 본진 전과 같은 지진파의 증폭 특성의 완전한 회복은 적어도 액상화가 발생한 후 약 10일 정도부터 확인할 수 있다(Table 2 Group IV의 기록 참조). Group 4와 같은 변화가 발생한 이유는 시간이 경과함에 따라 과잉간극수압이 소산되어 지반구조가 재배치되고 지반의 강성이 완전히 회복하여 액상화가 발생하기 이전인 상태 즉 Group I와 같은 상태로 복귀하고 있기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 6에서 본진 발생 후 GL.16 m 지진계가 강

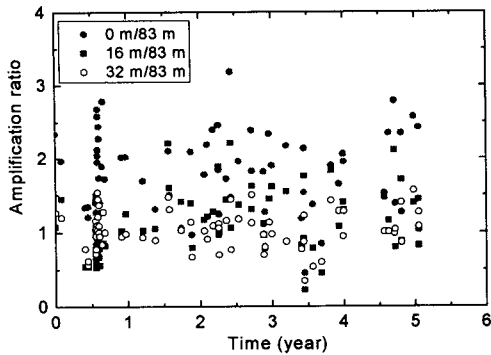


Fig. 7 Time vs. amplification ratio

진의 영향에 따른 고장으로 일부 데이터에 상식적으로 납득할 수 없는 기록이 간혹 기록되었으며 이러한 데이터는 기록 분석에서 제외되었다(그룹 II 및 V는 에러 기록 제외한 후의 기록임).

Fig. 7은 Port Island에서의 시간 경과에 따른 지진파의 증폭 특성을 나타낸 것으로 비록 계측기록의 분산성은 존재하나 약 5년간 계측된 기록(Kobe City Development Bureau, 1995)의 평균값을 분석해 보면 GL.32 m의 증폭비는 1.033, GL.16 m는 1.110, GL.0 m는 1.786으로 지반의 증폭 특성은 지표면에 가까울수록 현저하고, 지표하 16 m이하의 그 영향이 크지 않음을 알 수 있으며 이는 지진파가 지반의 구속압에 의존하기 때문인 것으로 판단된다. 그러나 이러한 결과는 더 많은 시간과 다양한 지반의 자료를 바탕으로 면밀한 분석이 필요할 것으로 사료된다.

IV. 구성모델을 이용한 지진파증폭 특성 분석

본 연구에서는 1995년 Hyogoken Nanbu 지진(M=7.2) 발생 전 후의 지진파 증폭 특성에 대하여 분석하고자 사질토의 탄소성 모델(식(1) 참조), 점성토의 탄-점소성 모델(식(2) 참조) 및 점탄-점소성 구성모델(식(3) 참조)을 기초로 한 액상화 해석 프로그램 LIQCA-2D(VE-VP)으로 지진 응답해석을 실시하였다. LIQCA-2D(VE-VP)는 Oka

등(1999)에 의해 개발된 프로그램(LIQCA)에 점탄-점소성 구성모델(2.다.절 참조)을 추가하여 확장, 개발된 프로그램으로서 미소변형을 이론을 기초로 한 유효응력해석, u(고상)-p(간극수압) 형식(formulation), FEM-FDM에 의한 공간이산화, Newmark's β method를 이용한 시간이산화 등의 기법을 이용한 수치연산을 수행한다. 이 프로그램을 이용하여 a) 매립지반의 액상화 거동특성 분석 b) 지진파의 증폭 특성 분석 c) 저전단변형률영역에서의 점성토의 점탄성 거동 특성 분석 등을 수행하였으며, 매립지반의 액상화 거동특성 분석은 참고문헌 2)를 통해 고찰한 바 있으므로 본 연구에서는 b)와 c)에 대해서만 논하기로 한다.

본 연구에서는 최대가속도 1.75 gal~526.7 gal 사이의 다양한 지진규모의 데이터를 입력자료로 이용하여 지진응답해석을 수행하였으며, Table 3은 본 해석에 이용된 토질정수(Kim, 2002)를 나타낸다.

Fig. 8과 9는 Group I 및 Main event에 대하여 탄-점소성모델(사질토 지반은 탄-소성모델, 점성토지반은 탄-점소성모델 적용) 및 점탄-점소성 모델(사질토 지반은 탄-소성모델, 점성토지반은 점탄-점소성모델 적용)로서 해석한 결과를 계측기록과 비교한 것으로 거의 비슷한 결과를 나타내나 탄-점소성모델의 경우가 몇몇 해석 결과에서 좀 더 많이 증폭되는 것으로 나타났다. 점탄-점소성모델이 GL.32 m~83 m에서 거의 일직선에 가까운 증폭 특성을 나타내는데 비해 탄-점소성모델은 지진 규모(최대가속도)에 따라 증폭특성이 달라지는 양상을 나타내었다. 본진 이전 발생된 Group I (약진, 10 gal이하)의 경우 지진응답해석 시 저전단변형률 영역에서의 점성토에서의 비선형 거동 특성을 잘 설명할 수 없는 탄-점소성 모델의 경우 층적 점성토층(GL.19 m~27 m)과 홍적 점성토층(GL.60 m~79 m)이 존재함으로 인해 점성토에서의 비선형 거동 특성을 잘 설명할 수 있는 점탄-점소성 모델과는 서로 다른 해석 결과를 나타내었다(Kim, 2001).

Table 3 Soil parameters used in this study

Parameters	Depth (-m)	0~2.4	2.4~5.0	5~12.6	12.6~19	19~27	27~33	33~50	50~61	61~79	79~83
	Soil type	Sand	Sand	Sand	Sand	Clay	Sand	Sand	Sand	Clay	Sand
Compressional wave V_p (m/s)		260	330	780	1480	1180	1330	1530	1610	1610	2000
Shear wave V_s (m/s)		170	170	210	210	180	245	305	350	303	320
Viscous parameter μ (kPa·s)		0	0	0	0	5.0E+03	0	0	0	5.0E+03	0
Viscoplastic parameter m'		-	-	-	-	2.0E-07	-	-	-	1.0E-09	-
Viscoplastic parameter C_{01} (1/s)		-	-	-	-	2.0E-09	-	-	-	1.0E-11	-
Viscoplastic parameter C_{02} (1/s)		-	-	-	-	20	-	-	-	20	-
Viscoplastic parameter B_0		100	100	70	500	50	1000	2000	3000	100	5000
Viscoplastic parameter B_s		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Viscoplastic parameter B_t		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Stress ratio at maximum compression M_{cm}^*		0.71	0.71	0.75	0.75	0.74	0.91	1.16	1.16	0.99	1.16
Stress ratio at failure state M_f^*		1.01	1.01	1.05	1.05	1.24	1.21	1.41	1.57	1.24	1.57
Compression index λ		0.03	0.3	0.03	0.3	0.39	0.02	0.02	0.02	0.34	0.03
Swelling index κ		0.00026	0.00027	0.00054	0.00072	0.05	0.00133	0.0011	0.00114	0.00261	0.00203
Poisson's ratio ν		0.25	0.25	0.25	0.25	0.488	0.25	0.25	0.25	0.3	0.25
Initial void ratio e_0		0.6	0.6	0.6	0.6	1.75	0.6	0.5	0.5	1.2	0.5

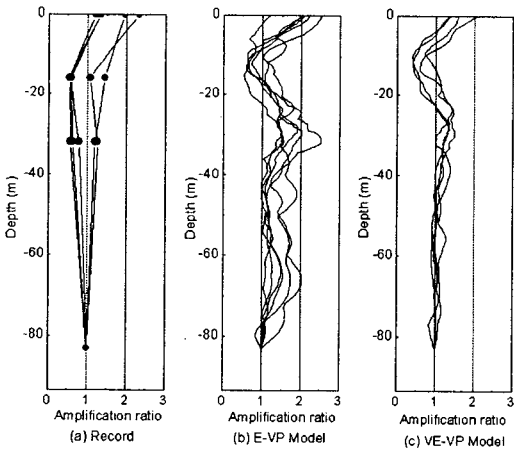


Fig. 8 Analysis results of Group I

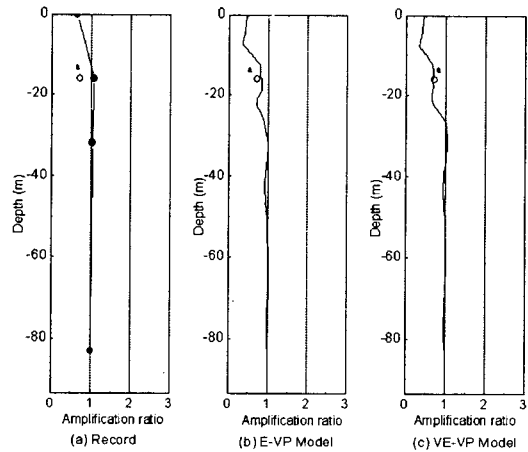


Fig. 9 Analysis results of Group Main

그러나 본진(Main event)과 같이 500 gal이 넘는 강진일 경우 Fig. 9에서 보는 바와 같이 탄-점소성모델과 점탄-점소성모델은 거의 비슷한 증폭 특성을 나타내는데 이것은 두 모델 모두 점소성모델이 우세하게 작용하기 때문이다(Kim, 2002).

Fig. 10은 51180825(1995년 1월 18일 08시 25분에 발생한 여진)에 대한 가속도 시간이력의 계측 및 해석 결과로서 지진과의 최대가속도가 지표에서 79.1 gal, GL.-16 m에서 45.5 gal, GL.-32 m에서 63.6 gal을 기록하였다. 본 연구에

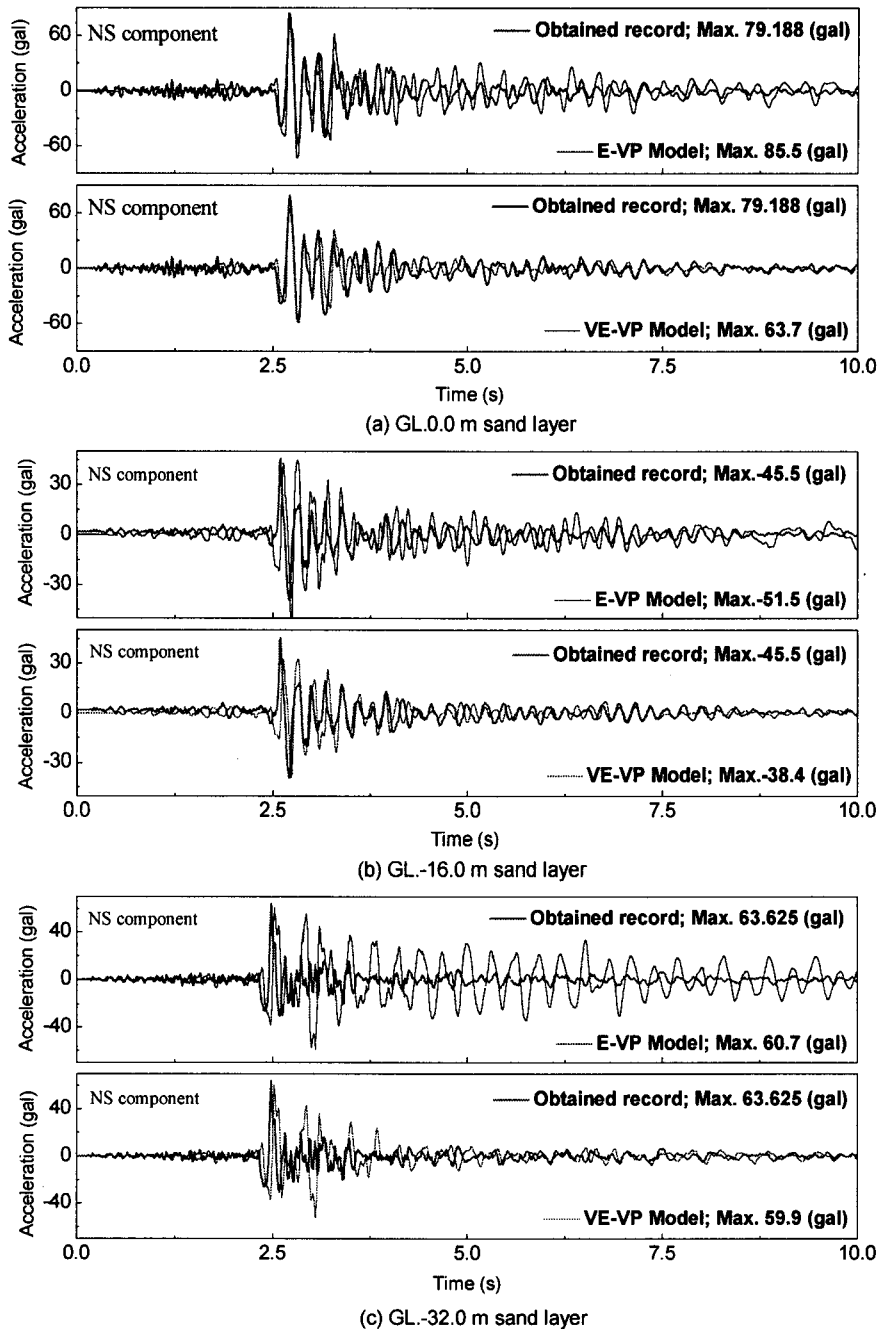


Fig. 10 Analysis results of acceleration time history (51180525)

서는 2차원 평면변형을 조건의 해석이므로 NS성분만을 대상으로 하였으며 각각 Fig. 10(a) 및 Fig.

10(b), Fig. 10(c)에 지표에서의 지진기록과 탄-점소성 모델을 이용한 지진응답 해석 결과(상부) 및

점탄-점소성 모델을 이용한 해석 결과(하부)를 나타내었다. Fig. 10(c)에서 가속도의 최대 피크치를 기록한 이후의 감쇠특성이 탄-점소성모델과 점탄-점소성모델과 크게 차이를 볼 수 있으며, 저전단변형을 영역에서 점탄성모델이 탄성모델 보다 점성토의 동적 거동을 더 정확하게 표현함을 알 수 있다. Fig. 10(b) 및 Fig. 10(a)에서도 역시 동일한 결과를 나타냈으며, 이는 점탄-점소성 모델의 경우 3 요소 점탄성 모델 부분이 GL.19~27 m 사이에 존재하는 점성토층의 감쇠 거동을 효과적으로 해석함으로써 이와 같은 차이를 나타내는 것으로 판단된다.

V. 결 론

본 연구에서는 지진 관측기록과 수치해석 결과를 바탕으로 대형지진 발생 전의 지진증폭 특성과 본진에 의한 액상화 발생 이후의 지진증폭 특성의 경시변화에 대하여 고찰하였으며 주요한 결론은 다음과 같다.

1) 매립지반에서 지진파의 증폭은 구속압이 작아지는 지표면과 가까운 표층부(약 30 m 이내)에서 발생하였으며, 액상화 발생시 지진파는 감쇠되는 특성이 있음을 확인하였다.

2) 액상화가 발생된 지반에서 지반의 강성 회복은 3시간 이후 서서히 시작되어 약 10일 후에는 액상화 발생 이전의 지진파 증폭 특성을 나타내는 것으로 판단된다.

3) 점성토는 저전단변형을 영역에서 점탄성 거동 특성이 우세하므로 점성토의 동적거동해석 시 점탄성 거동 특성을 잘 표현할 수 있는 점탄-점소성 구성모델을 적용하는 것이 타당할 것으로 사료된다.

References

1. Borcherdt, R. D. and Glassmoyer, G. 1992. On the Characteristics of Local Geology and Their Influence on Ground Motions Gene-

rated by the Loma Prieta Earthquake in the San Francisco Bay Region. *Bull. Seism. Soc. Am.* 82:603-641

2. Gutenberg, B. 1957. Effects of Ground on Earthquake Motion. *Bull. Seism. Soc. Am.* 47:221-250.

3. Hank, T. C. and Krawinkler, H. 1991. The Loma Prieta Earthquake, Ground Motion, and Damage in Oakland, Treasure Island, and San Francisco. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 81: 2019-2047.

4. Hisada, Y., H. Bao, J. Bielak, O. Ghattas and D. O'Hallaron 1998. Simulation of Long-Period Ground Motions during the 1995 Hyogoken-Nanbu Earthquake using 3D Finite Element Method, *Proc. 2nd International Symposium on the Effect of Surface Geology on Seismic Motion*. Yokohama, Japan. CD-Rom.

5. Iida, H., T. Hiroto, N. Yoshida and M. Iwafuji 1996. Damage to Daikai Subway Station, Special Issue on Geotechnical Aspects of the January 17 1995 Hyogoken-Nanbu Earthquake. *Soils and Foundations*, pp.283-300.

6. Kanai, K., R. Takahashi and Kawasumi, H. 1956. Seismic Characteristics of Ground. *Proc. WCEE*. Berkeley, CA. 31-1-16.

7. Kanai, K. and Tanaka, T. 1951. Observation of the Earthquake-Motion at the Different Depths of the Earth. *Bull. Earthq. Res. Inst. Univ. Tokyo*. 29:107-397.

8. Kim, Y. S. 2001. Viscoelastic and Viscoplastic Behavior Characteristics of Clay. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers* 21(5-C): 513-523. (in Korean)

9. Kim, Y. S. 2002. Seismic Response Analysis at Multi-layered Ground During Large Earthquake. *Journal of the Korean Geotechnical Society* 18(4): 55-64. (in Korean)

10. Korea Meteorological Administration. 2005. Earthquake Information.

11. Kobe City Development Bureau. 1995. Re-

- port on the Ground Deformation at Reclaimed Land During the 1995 Hyogoken Nanbu Earthquake. pp.1-119. (in Japanese)
12. Oka, F. 1992. A Cyclic Elasto-Viscoplastic Constitutive Model for Clay Based on the Non-linear Hardening Rule. *Proc. of 4th Int. Symp. on Numerical Models in Geomechanics*. Balkema. 1: 105-114.
13. Oka, F., A. Yashima, A. Tateishi, Y. Taguchi and S. Yamashita. 1999. A Cyclic Elasto-Plastic Constitutive Model for Sand considering a Plastic-Strain Dependence of the Shear Modulus. *Geotechnique* 49(5): 661-680.