

인공 매립 지반에서의 지진파 증폭 특성

Seismic Motion Amplification Characteristics at Artificial Reclaimed Land

김용성¹⁾, Yong-Seong Kim, 문 용²⁾, Yong Moon

¹⁾ 한국수자원공사 수자원연구원 선임연구원, Senior Researcher, Korea Water Resources Corporation

²⁾ (주)삼성건설 건설부문 토목기술팀 과장, Senior Researcher, Samsung Corporation

개요(SYNOPSIS) : Seismic motion amplification owing to the input motion level at bedrock is one of the important topics to understand various geomaterials behavior. The extremely valuable borehole records at Port Island were obtained during the 1995 Hyogoken Nanbu Earthquake and also before and after the main event. In this study, the seismic motion amplification at the soft reclaimed ground was discussed. Comparison of measured records with numerical simulation results were made with focus on seismic motion amplification characteristics at the soft reclaimed ground.

Key words : seismic motion, reclaimed land, constitutive model, viscoelastic, viscoplastic

1. 서 론

최근 인도네시아 부근 해상에서 발생한 대지진(지진규모 9.0)으로 수만명이 숨지는 대형 참사가 발생해 지진에 대한 경각심을 새롭게 해주고 있다. 주변국인 일본 및 대만에서도 대형지진이 끊임없이 발생하고 있으며 근래 들어 우리나라에서도 중약진 지진이 년 40회이상 발생하는 등 지진에 대해 한반도도 더 이상의 지진 안전지대가 아니라는 인식이 확대되고 있다. 이러한 실정에서 지진파의 거동 특성이 매립지반에서 지층에 따라 어떻게 변화하는지 검토해 보는 것은 지반 구조물 및 항만구조물의 내진대책 수립에 유의미한 일이라 판단된다.

1995년 Hyogoken Nanbu 지진으로 액상화현상이 발생한 일본 Kobe지역의 Port Island에는 Hyogoken Nanbu 지진 발생 이전부터 지진 관측시스템에 의해 관측이 수행되어져 왔으며, 前震, 本震 및 餘震을 포함한 다수의 관측 자료가 기록되었다. 본 연구에서는 이러한 관측기록과 수치해석 결과를 바탕으로 대형지진 발생전의 지진증폭 특성과 본진에 의한 액상화 발생 이후의 지진증폭 특성의 경시변화에 대하여 고찰하였다.

2. 지반 조건 및 구성모델

본 연구의 해석대상은 일본 Kobe의 Port Island이며, 인공적으로 조성된 매립지반으로 1995년 Hyogoken Nanbu 지진(M=7.2)이 발생하였을 때 넓은 범위에 걸쳐 액상화 현상이 관측되어 많은 지반공학자들의 관심의 초점이 되기도 한 지반이다.

그림 1은 모델지반의 지층도 및 전단파 속도분포를 나타내며 지진계는 GL.0.0m와 -16.0m, -32.0m, -83.0m로 네 군데에 매설되어 계측되었다.

그림 2는 본 연구에 이용된 지반모델의 유한요소망을 나타내며, 깊이는 83m이고 118요소로 구성되

었다. 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 지진파 그리고 임의의 요소면상의 표면력 등으로 주어질 수 있으나 본 연구에서는 실제 계측된 지진파(GL.-83m, Hyogoken Nanbu Earthquake)를 지반모델의 최하단 고정절점에 입력하였다.

Port Island 지반의 매립작업은 1969년에 완료되었으며 화강풍화토가 매립재료로서 이용되었다(그림 3 참고).

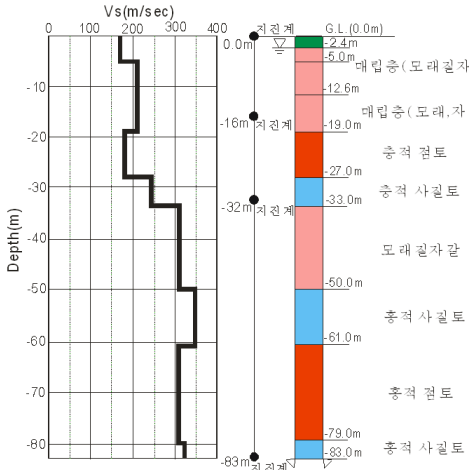


그림 1. 지층도 및 전단파속도 분포

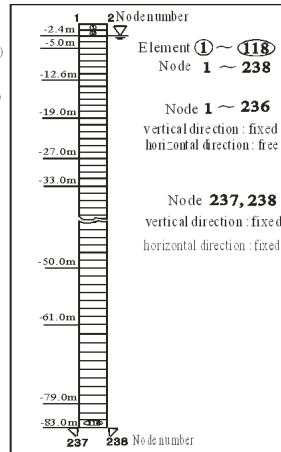


그림 2. 유한요소망

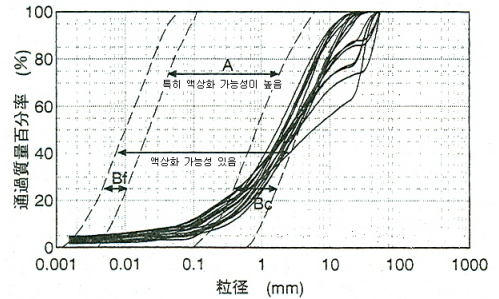


그림 3. 매립재료의 입경가적곡선

2.2 구성모델

2.2.1 사질토의 동적 탄-소성 모델

사질토 지반의 구성모델은 동적 탄소성 모델을 적용하였으며 탄-점소성 모델의 전변형률 속도에서는 다음의 식(1)과 같이 표현된다(Oka et al., 1999). 그림 4는 동적 탄-소성 모델을 이용한 사질토의 응력변형률 관계 및 유효응력경로를 나타낸 것으로 반복 재하에 따른 응력-변형률 관계에 따른 유효응력의 감소 현상을 잘 표현하고 있음을 알 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon}_{ij} = & \frac{1}{2G_1} S_{ij} + \frac{\kappa}{3(1+e)} \frac{\dot{\sigma}_m}{\sigma_m} \delta_{ij} \\ & + \frac{\langle \Phi'(F) \rangle}{\sigma_m} \frac{(n_{ij}^* - \chi_{ij}^*)}{n_x^*} + \frac{\langle \Phi'(F) \rangle}{\sigma_m} \left\{ \bar{M}^* - \frac{n_{mn}^* (n_{mn}^* - \chi_{mn}^*)}{n_x^*} \right\} \frac{1}{3} \delta_{ij} \end{aligned} \quad (1)$$

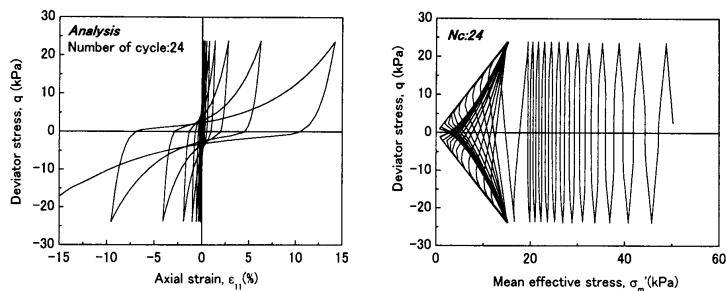


그림 4. 동적 탄-소성 모델을 이용한 사질토의 응력변형률 관계 및 유효응력경로

2.2.2 점성토의 동적 탄-점소성 모델

본 연구에서는 저전단변형률 영역에서의 점성토의 거동특성 파악을 위해 점성토의 구성모델로서 탄-점소성 모델 및 점탄-점소성 구성모델을 비교·검토하기로 한다.

점-탄소성 모델의 전변형률 속도텐서는 다음 식으로 나타낼 수 있다(Oka, 1992).

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon}_{ij} = & \frac{1}{2G_1} S_{ij} + \frac{\kappa}{3(1+e)} \frac{\dot{\sigma}_m}{\sigma_m} \delta_{ij} \\ & + C_{01} \frac{\langle \Phi'(F) \rangle}{\sigma_m} \frac{(\nu_{ij}^* - X_{ij}^*)}{\nu_x^*} + C_{02} \frac{\langle \Phi'(F) \rangle}{\sigma_m} \left\{ \widetilde{M}^* - \frac{\nu_{mn}^*(\nu_{mn}^* - X_{mn}^*)}{\nu_x^*} \right\} \frac{1}{3} \delta_{ij} \end{aligned} \quad (2)$$

2.2.3 점성토의 동적 점탄-점소성 모델

점탄-점소성 모델의 전변형률 속도텐서는 다음의 (3)식과 같이 표현된다(김용성, 2001). 그림 5는 반복 삼축시험 결과 및 점탄-점소성 모델을 이용한 점성토의 응력변형률 관계 및 유효응력경로를 시뮬레이션 한 결과를 나타낸 것으로 점탄-점소성 모델이 타당성을 있음을 알 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon}_{ij} = & \frac{1}{2G_1} S_{ij} + \frac{1}{\mu} (S_{ij} - 2G_2 e_{ij}^{vev}) + \frac{\kappa}{3(1+e)} \frac{\dot{\sigma}_m}{\sigma_m} \delta_{ij} \\ & + C_{01} \frac{\langle \Phi'(F) \rangle}{\sigma_m} \frac{(\nu_{ij}^* - X_{ij}^*)}{\nu_x^*} + C_{02} \frac{\langle \Phi'(F) \rangle}{\sigma_m} \left\{ \widetilde{M}^* - \frac{\nu_{mn}^*(\nu_{mn}^* - X_{mn}^*)}{\nu_x^*} \right\} \frac{1}{3} \delta_{ij} \end{aligned} \quad (3)$$

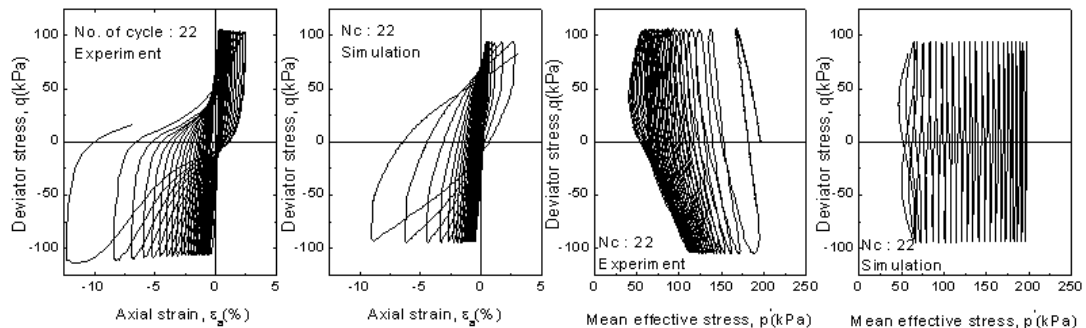


그림 5. 반복 삼축시험 및 점탄-점소성 모델을 이용한 점성토의 응력변형률 관계 및 유효응력경로

3. 매립지반의 지진과 증폭 특성

1995년 1월 17일 발생한 Hyogoken Nanbu 지진은 강진으로서 진원과 근접한 지점에서 기록된 지진 파의 분석 결과 지층에 따른 비선형적인 증폭 특성을 나타냈다.

표 1은 인공 매립지(Port Island, Japan)에서 계측된 지진파 증폭비 현황을 나타낸 것으로 그룹을 A, Main event, B, C, E, F 등 6개 그룹으로 분류하였으며, 계측 기록은 년·월·일·시·분의 조합으로 표시된다(그룹 Main event의 경우에서 51170546은 1995년 1월 17일 5시 46분을 의미함, 단 그룹 A 및 F에서 a는 10월, b는 11월임).

표 1에서 Hyogoken Nanbu 지진을 본진(Main event) Group으로 설정하였고, A는 본진 발생 전의 지진, B, C, E, F그룹은 여진으로서 그룹간의 구분은 본진을 기준으로 여진이 발생한 경과 시간(B: 본

진 발생 후 2일 이내, C: 본진 발생 후 2~3일 사이, E: 본진 발생 후 8~40일 사이, F: 본진 발생 후 약 47일~6개월 사이)으로 결정하였다.

표 1. 인공 매립지(Port Island, Japan)에서 계측된 지진과 증폭비 현황

Group	Record data	Amplification ratio			Time (year)	Group	Record data	Amplification ratio			Time (year)
		0m/83m	16m/83m	32m/83m				0m/83m	16m/83m	32m/83m	
A	46281309	2.333	1.069	1.264	0.0015	E	51260101	1.949	0.876	1.101	0.58094
	47281002	1.964	1.446	1.196	0.08333		51262308	2.042	0.747	1.032	0.58346
	4a241151	1.335	0.546	0.784	0.40957		51280806	2.12	0.876	1.537	0.58723
	4b092027	1.202	0.543	0.564	0.45165		51290941	2.673	0.859	1.212	0.59015
	4b100038	1.343	0.578	0.618	0.45213		51291602	2.58	1.043	1.444	0.59087
Main event	51170546	0.503	0.832*	0.801	0.55681		52021619	1.732	0.953	1.088	0.60186
	Corrected	0.648	1.072**	1.032	0.55681		52030436	2.44	0.671	1.368	0.60326
B	51170553	0.336	4.921*	0.879	0.55684		52032037	2.271	0.789	1	0.60509
	51170858	1.592	3.593*	1.012	0.55719		52182137	1.89	1.266	0.844	0.6463
	51180525	1.443	0.829	1.159	0.55952		52240803	2.78	0.86	1.274	0.66119
	51181334	1.397	0.586	0.956	0.56045	53051004	1.72	0.827	1	0.68608	
	51190100	1.154	0.572	0.716	0.56176	55281034	2.017	1.017	0.943	0.91627	
C	51190152	1.27	0.818	0.953	0.56186	56190838	2.021	1.249	0.979	0.97633	
	51190223	1.505	0.724	1.057	0.56192	59120630	1.693	1.023	0.936	1.20896	
	51190510	1.266	0.533	0.781	0.56223	5a140204	1.31	1.048	0.896	1.38106	

(*표는 error data, **표는 second peak, time의 기준은 1994년 6월 28일 00시)

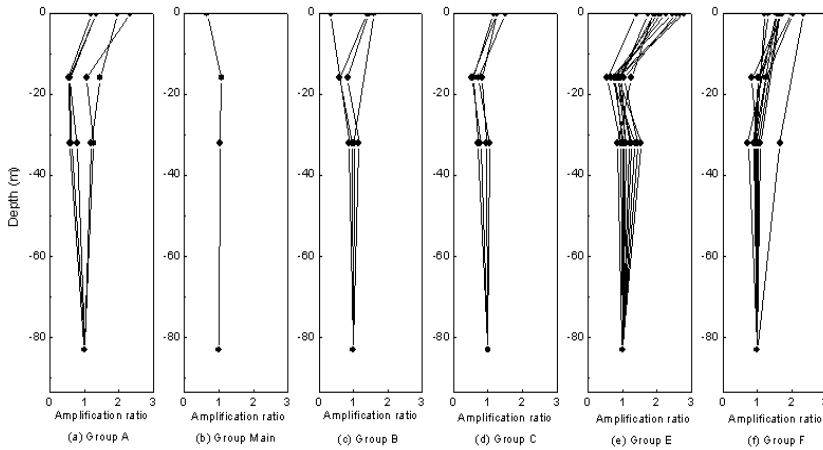


그림 6. 본진 전·후의 지진과 증폭 특성

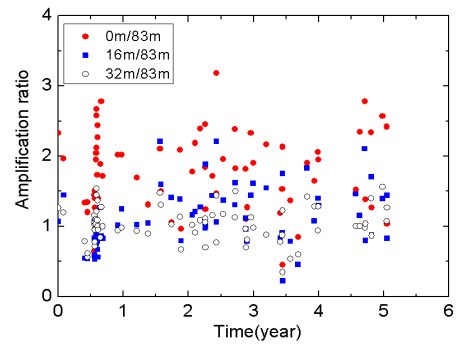


그림 7. 시간 vs. 증폭비 관계도

그림 6은 본진 전·후의 지진과 증폭 특성을 나타내며, 여기에서 증폭비는 GL.0m, 16m, 32m에서 기록된 지진파를 GL.83m(base rock)에서 기록된 지진파로 나누어 정규화한 것을 말한다. 본진이 발생하기 전의 지진과 증폭 특성을 살펴보면 GL.16m~83m까지는 약간의 증폭 및 감쇠 특성을 나타내지만 그 정도가 미미하나 GL.0m~16m에서는 지진파의 증폭 특성이 뚜렷함을 볼 수 있다.

본진 발생 시 GL.16m~83m까지는 증폭비가 거의 일직선으로서 지진파의 증폭이 발생하지 않았지만 매립지반에서의 액상화 현상으로 인해 지진파의 감쇠 특성이 두드러졌다. 따라서 지반의 증폭은 구속압이 작아지는 지표면과 가까운 표층부(약 30m 이내)에서 발생하는 현상임을 알 수 있으며, 액상화 발생 시 지진파는 감쇠되는 특성이 있음을 확인하였다.

한편 본진 후의 여진의 그룹별 지진과 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 회복되다(표 1 그룹 B의 기록 참조). 그러나 본진 전과 같은 지진파의 증폭 특성의 완전한 회복은 적어도 액상화가 발생한 후 약 10일 정도부터 확인할 수 있다(표 1 그룹 C의 기록 참조). 그림 6에서 본진 발생 후 GL.16m 지진계가 강진의 영향에 따른 고장으로 일부 데이터에 상식적으로 납득할 수 없는 기록이 간혹 기록되었으며 이러한 데이터는 기

록 분석에서 제외되었다(그룹 B 및 F).

그림 7은 시간 경과에 따른 지진파의 증폭 특성을 나타낸 것으로 비록 계측기록의 분산성은 존재하나 약 5년간 계측된 기록의 평균값을 분석해 보면 GL.32m의 증폭비는 1.033, GL.16m는 1.110, GL.0m는 1.786으로 지반의 증폭 특성은 지표면에 가까울수록 현저하고, 지표하 16m이하는 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.

4. 구성모델을 이용한 지진파 증폭 특성 분석

본 연구에서는 1995년 Hyogoken Nanbu 지진(M=7.2) 발생 전 후의 지진파 증폭 특성에 대하여 분석하고자 액상화 해석 프로그램 LIQCA-2D(VE-VP)으로 지진응답해석을 실시하였다. 사질토 지반은 탄소성모델, 점성토 지반은 탄-점소성모델 및 점탄-점소성모델을 적용하여 1)매립지반의 액상화 거동특성 분석 2) 지진파의 증폭 특성 분석 3) 저진단변형률영역에서의 점성토의 점탄성 거동 특성 분석 등을 검토하였으며 본 연구에서는 2)와 3)에 대하여 논하기로 한다. 표 2는 본 해석에 이용된 토질정수를 나타낸다.

표 2. 본 해석에 이용된 토질 정수

Parameters	Depth(-m) Soil type	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
		Sand	Sand	Sand	Sand	Clay	Sand	Sand	Sand	Clay	Sand
Compressional wave V_p (m/sec)		260	330	780	1480	1180	1330	1530	1610	1610	2000
Shear wave V_s (m/sec)		170	170	210	210	180	245	305	350	303	320
Viscous parameter μ (kPa·sec)		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/sec)		-	-	-	-	2.0E-09	-	-	-	1.0E-11	-
Viscoplastic parameter C_{02} (1/sec)		-	-	-	-	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_m^*		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

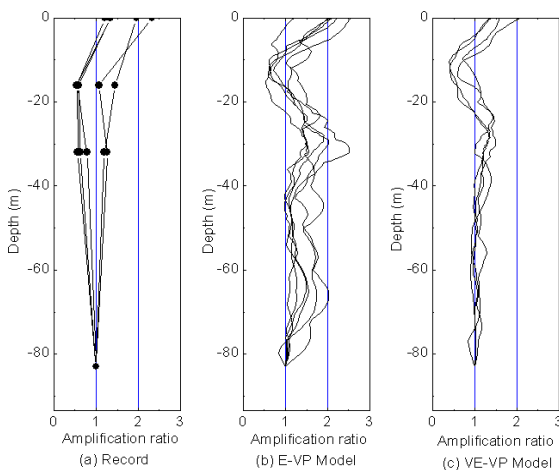


그림 8. Group A의 해석 결과

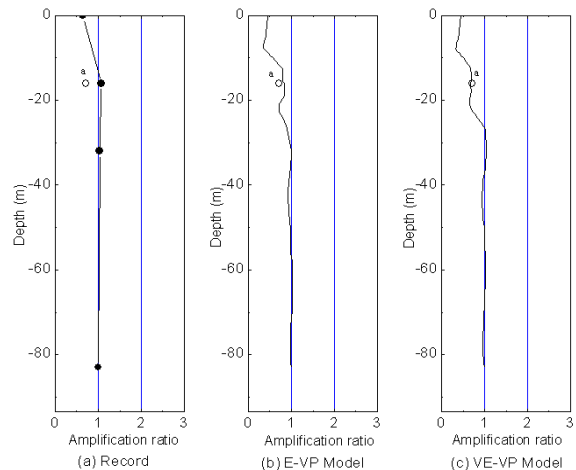


그림 9. Group Main의 해석 결과

그림 8과 9는 A그룹 및 Main event에 대하여 E-VP모델(사질토 지반은 탄-소성모델, 점성토지반은 탄-점소성모델 적용) 및 VE-VP모델(사질토 지반은 탄-소성모델, 점성토지반은 점탄-점소성모델 적용)로서 해석한 결과를 계측기록과 비교한 것으로 거의 비슷한 결과를 나타내나 E-VP모델의 경우가 몇몇

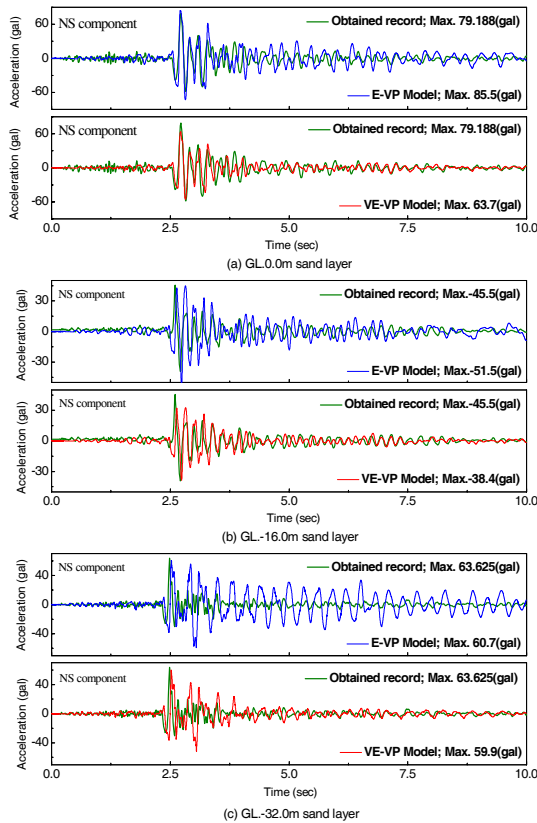


그림 10. 가속도 시간이력 해석 결과(51180525)

5. 결론

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 30m 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 저전단변형률 영역에서 점탄성 거동특성이 우세하여 동적거동해석 시 점탄성 거동 특성을 잘 표현할 수 있는 구성모델을 적용하는 것이 타당할 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 김용성(2001), “점성토의 점탄성 및 점소성 거동 특성”, *대한토목학회논문집*, 제 21권, 제 5-C호, pp.513~523.
2. 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, Vol.1, pp.105~114.
3. Oka, F., Yashima, A., Tateishi, A., Taguchi, Y. and Yamashita, S.(1999), “A Cyclic Elasto-Plastic Constitutive Model for Sand considering a Plastic-Strain Dependence of the Shear Modulus”, *Geotechnique*, Vol.49, No.5, pp.661~680.

해석 결과에서 좀 더 많이 증폭되는 것으로 나타났다. 해석 결과에서 지반 깊이별 증폭비는 유한요소 각 mesh에서 나타내는 최대 가속도의 피크치를 GL.83m의 기록으로 나눈 값을 도시한 것이다.

VE-VP모델이 GL.32m~83m에서 거의 일직선에 가까운 증폭 특성을 나타내는데 비해 E-VP모델은 지진규모에 따라 증폭특성이 달라지는 양상을 나타냈다. A그룹의 경우 10gal이하의 약진으로, 지반 모델에서 층적 점성토가 GL.19m~27m, 홍적점성토가 GL.60m~79m에 존재한다. 탄성모델과 점탄성 모델은 점성토의 지진파의 증폭특성 해석 시 저전단변형률 영역에서는 서로 다른 결과를 나타내게 된다.

그러나 Main event와 같이 500gal이 넘는 강진일 경우 그림 9에서 보는 바와 같이 E-VP모델과 VE-VP모델은 거의 비슷한 증폭 특성을 나타내는데 이것은 두 모델 모두 점소성모델이 우세하게 작용하기 때문이다.

그림 10은 51180825에 대한 가속도 시간이력의 계측 및 해석 결과이며, 가속도의 최대피크치를 기록한 이후의 감쇠특성이 E-VP모델과 VE-VP모델과 크게 다를 수 있다. VE-VP모델의 경우 저전단변형률 영역에서 Voigt 성분을 추가한 3요소 점탄성모델이 탄성모델 보다 점성토의 동적 거동을 더 정확하게 표현함을 알 수 있다.