

Downhole 지진계측자료에 의한 지반의 비선형성 평가에 관한 연구

A Study on the Evaluation of Soil Nonlinear Characteristics by Seismic Recorded Data at Downhole Array

장 정 범* 서 용 표** 이 종 립*** 이 계 희****
Jang, Jung Bum Suh, Yong Pyo Lee, Jong Rim Lee, Gye Hee

국문요약

전단파속도가 1,050m/sec 이하인 경우의 기초지반에 대한 내진해석에서는 지반-구조물 상호작용해석이 반드시 수행되어야 하며, 이러한 기초지반에서는 강지진동 작용시 지반의 비선형성이 현저하게 나타나므로 내진해석시 지반의 비선형성은 필수적으로 고려되어야 한다. 따라서, 본 연구에서는 입력지진동에 따른 지반의 비선형 거동을 평가하기 위한 방법으로서 기존의 수치해석적인 방법에 비하여 평가절차가 단순하고 신뢰성이 높은 Downhole 지진계측자료에 의한 평가방법을 제안하였다. 대만 화련부지를 대상으로 본 연구에서 제안한 지반의 비선형성 평가방법에 대한 신뢰성을 검증한 결과, 기존의 SHAKE 프로그램에 의한 평가결과 및 지진응답 계측결과에 잘 일치하는 높은 수준의 정확성을 보임으로써 그 신뢰성 및 가용성을 확인할 수 있었다.

주요어 : downhole 지진계측자료, 지반의 비선형성, 전단파속도, 지반-구조물 상호작용해석

ABSTRACT

The soil-structure interaction(SSI) analysis is essential to soil site where shear wave velocity is less than 1,050 m/sec and soil nonlinear characteristics for this kind of soil site have to be considered in SSI analysis. In order to consider soil nonlinear characteristics in the SSI analysis, simple and reliable soil nonlinear evaluation technique with seismic recorded data at downhole array is proposed in this study. The SSI analysis is carried out in order to prove the reliability of the proposed evaluation technique with Hualien large scale seismic test(HLSST) site in Taiwan. The analytical results are compared with Hualien earthquake recorded data and the analytical results with SHAKE program which is prevailed at present.

As a result, the proposed evaluation technique shows a good agreement with both the Hualien earthquake recorded data and the analytical results with SHAKE program and the reliability and usefulness are confirmed.

Key words : seismic recorded data, downhole array, soil nonlinear characteristics, shear wave velocity, SSI analysis

1. 서 론

지진하중으로 인한 구조물의 거동은 부지조건에 크게 영향을 받으며, 그러한 대표적인 예가 최근의 주요 지진에 있어서 1985년에 발생한 Maxico 지진과 1989년에 발생한 Loma Prieta 지진이다. 특히, 전단파속도가 1,050m/sec 이하의 강성을 지니는 지반, 즉 지반-구조물 상호작용해석이 수행되어지는 지반에서는 입력 지진동의 규모에 따른 지반의 비선형성이 구조물의 거동에 큰 영향을 미친다. 이러한 지반의 비선형 특성은 크게 "1차 비선형 거동(global nonlinearity)"과 "2차 비선형 거동(local nonlinearity)"으로 구분하여 정의할 수 있다. 1차 비선형 거동이란 지반 자체만의 운동에 의한 재료의 비선형 거동을 말하며, 2차 비선형 거동은 지반-구조물의 상호작용효과로 인하여 구조물의 거동이 지반에 전달됨으로써 발생하는 재료의 비선형 거동을 말한다.

지반의 비선형 특성은 대부분 수치해석적인 방법으로서

직접법 또는 근사해법을 이용하여 고려하여 왔으며, 특히 Schnabel 등이 개발한 SHAKE 프로그램이 입력지진동에 따른 지반의 비선형성을 평가하기 위해 이 분야에서 가장 널리 사용되어져 왔다.⁽¹⁾

그러나, 최근 이 분야에서 기존의 수치해석방법에 비하여 평가절차가 단순하고 신뢰성이 높은 새로운 형태의 평가방법인 역해석 기법이 제안되어 연구되고 있는데, 이는 지진계측자료를 활용하여 지반의 비선형 특성을 평가하는 방법이다.^{(2),(3)} 지진계측자료는 현장 및 실내시험의 많은 제한사항들, 즉 시료의 교란이나 현장상태의 지반응력과 지진하중이력을 재현하는데 있어서의 어려움 등을 보완하는데 있어서 중요한 가치를 지니고 있으며, 특히 지진계측자료 중 지반의 수직방향으로 지진파의 전달특성을 규명할 수 있는 downhole 지진계측자료는 현장 및 실내시험에 의하여 쉽게 표현할 수 없는 넓은 범위의 하중조건에 대하여 실제 지반의 동적특성을 제공하여 줄 수 있다는 장점을 지니고 있다. 따라서, 지진활동이 활발한 지역인 미국, 멕시코, 일본 및 대만 등지에서 downhole 지진계측시스템의 설치를 증가시키고 있는 추세이다.

본 연구에서는 지진 관련 연구에 있어서 활용도와 중요도가 증가하고 있는 downhole 지진계측자료를 이용하여 그 평가절차가 단순하고 신뢰성이 향상된 지반의 비선형성을

* 정희원 · 한국전력공사 전력연구원, 선임연구원(대표저자 : jbjang@kepri.re.kr)
** 정희원 · 한국전력공사 전력연구원, 선임연구원
*** 정희원 · 한국전력공사 전력연구원, 수석연구원
**** 정희원 · 시설안전기술공단, 과장
본 논문에 대한 토의를 2002년 2월 28일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.
(논문접수일 : 2001. 8. 8 / 심사종료일 : 2001. 10. 24)

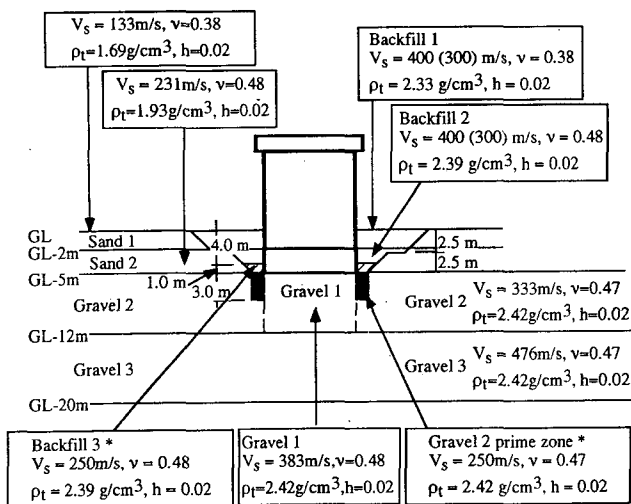
평가할 수 있는 방법을 제안하고, 대만 화련(Hualien)부지를 대상으로 기존의 SHAKE 프로그램에 의한 평가결과 및 지진응답 계측결과와 비교함으로써 그 적용성 및 신뢰성을 검토하였다.

2. 대만 화련 대형 내진시험모델

지반 및 구조물의 지진응답특성을 계측하고 분석함으로써 지반-구조물 상호작용 해석기법을 개선하기 위하여 미국의 EPRI와 대만의 대만전력이 주관하고 일본(TEPCO, CRIEPI), 미국(NRC), 프랑스(CEA, EDF, Framatome)가 공동 참여하는 대만 화련 국제공동연구가 착수되었으며, 한국에서는 한전 전력연구원, 한국 원자력안전기술원 및 한국전력기술(주)이 1991년 8월부터 공동 참가하였다.⁽⁴⁾ 본 연구는 대만 화련 국제공동연구가 수행된 화련부지의 지반특성 및 지진계측자료를 기초로 수행되었다.

2.1 지반특성

대만 화련부지에 대한 구조물 주위 및 하부의 지반재료특성은 보어링, 대구경 관입시험, PS-logging과 같은 현장시험과 동결 비교란 샘플의 삼축압축시험과 같은 실내시험을 수행하여 결정되었다. 일본 전력중앙연구소(CRIEPI)는 이들 시험결과를 기초로 "통일지반모델(unified soil model)"을 작성하여 대만 화련 국제공동연구에 참가한 기관에 제공하였으며, 그 후 1994년 10월 일부 지반재료를 수정한 "수정지반모델(modified soil model)"을 제안하였다. 따라서 본 연구에서는 해석대상인 대만 화련부지의 기본 지반물성으로서 CRIEPI로부터 제공된 그림 1의 "수정지반모델"을 이용하였으며, 지반의 비선형성 평가에 필요한 각 지층의 전단변형률에 대한 전단탄성계수비 및 감쇠비 곡선은 그림 2 및 표 1과 같다.⁽⁴⁾



Notes:
Values in parentheses are those of the modified ground model.
Zones designated by asterisk (*) have been introduced in the modified ground model.

그림 1 대만 화련부지의 지반특성

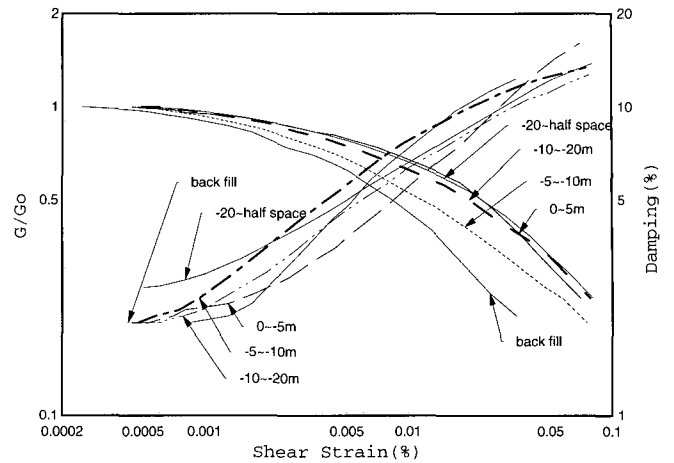


그림 2 대만 화련부지의 $G/G_0 - \gamma$ 곡선 및 $h - \gamma$ 곡선

2.2 지진계측

지진계측자료를 확보하기 위하여 화련부지에는 가속도계가 그림 3과 같이 구조물을 중심으로 격납건물 모델 직경의 5배가 되는 지점까지 3곳의 방사선상에 위치하도록 설치되어 있다. 특히 계측지점 A15, A21 및 A25 지반하부에는 downhole을 따라 수직방향으로 깊이 5.3m, 15.8m, 26.3m, 52.6m 되는 지점에 가속도계가 설치되어 있어 지하 심도에 따른 지진파의 증폭특성을 관측할 수 있다.⁽⁴⁾

대만 화련부지는 강진이 빈번하게 발생하는 지역으로 1993년 지진계측이 시작된 이후 약 140건의 지진이 발생되었으며, 이중 본 연구에서는 대만 화련부지에 대한 지반의 비선형성을 평가하기 위한 지진계측자료로서 최근 대만에 큰 피해를 일으켰던 Chi-Chi 지진계측자료(HLSST 38, 1999년 9월 20일)를 활용하였다.⁽⁵⁾ 또한, Chi-Chi 지진에 의한 A15, A21 및 A25의 downhole 지진계측자료 중 계측결과가 양호하고 일관성이 있는 것으로 평가된 A15 및 A25 지점의 동서방향 downhole 지진계측자료를 본 연구에 적용하였다. A15 및 A25 지점의 동서방향 downhole 지진계측자료는 그림 4와 같다.

3. 지반의 비선형 특성

3.1 Cross correlation 해석

전단파의 전달특성 분석기법은 주파수영역과 시간영역에 따라 Fourier spectral ratio 기법과 cross correlation 해석기법이 있으며, 본 연구에서는 cross correlation 해석기법을 적용하였다.⁽⁶⁻⁸⁾

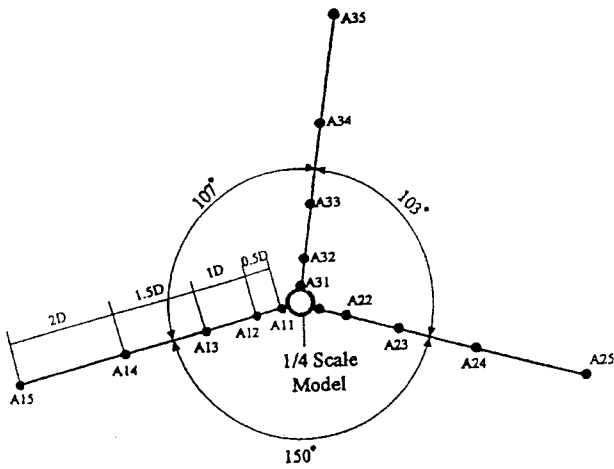
Downhole 계측점 i 와 j 에서의 지진동 $a_i(t)$ 와 $a_j(t)$ 의 cross correlation 함수는 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.⁽⁹⁾

$$C_{a_i a_j}(\tau = m\Delta t) = \frac{\frac{1}{N-m} \sum_{n=1}^{N-m} a_i(n\Delta t) a_j[(n+m)\Delta t]}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N a_i^2(n\Delta t)} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N a_j^2(n\Delta t)}}, \quad m = 0, 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

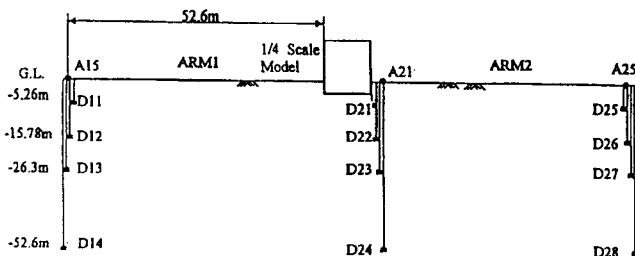
표 1 대만 화련부지의 전단변형률에 따른 전단탄성계수비 및 감쇠비

Shear strain(%)	G/G ₀	h(%)	Shear strain(%)	G/G ₀	h(%)	Shear strain(%)	G/G ₀	h(%)	Shear strain(%)	G/G ₀	h(%)
0.00044	1.0	2.0	0.00047	1.0	2.0	0.00049	1.0	2.0	0.0005	1.0	2.6
0.00053	0.99	2.0	0.00057	0.99	2.1	0.00059	1.0	2.0	0.0006	0.996	2.63
0.0007	0.98	2.1	0.00075	0.96	2.2	0.00078	0.98	2.1	0.0008	0.981	2.75
0.0008	0.96	2.2	0.00094	0.94	2.4	0.00098	0.96	2.2	0.001	0.996	2.87
0.0013	0.94	2.3	0.0014	0.89	2.9	0.0015	0.92	2.6	0.0015	0.930	3.22
0.0018	0.91	2.5	0.0019	0.85	3.4	0.0020	0.89	2.9	0.002	0.900	3.55
0.0026	0.87	2.8	0.0028	0.78	4.2	0.0029	0.83	3.5	0.003	0.850	4.10
0.0035	0.83	3.2	0.0038	0.73	4.9	0.0039	0.79	4.1	0.004	0.812	4.56
0.0044	0.81	3.5	0.0047	0.69	5.4	0.0049	0.75	4.6	0.005	0.779	4.99
0.0053	0.78	3.9	0.0057	0.65	6.0	0.0059	0.72	5.0	0.006	0.750	5.40
0.0070	0.74	4.5	0.0075	0.59	6.9	0.0078	0.67	5.6	0.008	0.702	6.07
0.0088	0.70	5.1	0.0094	0.54	7.6	0.0098	0.63	6.3	0.010	0.664	6.60
0.013	0.63	6.4	0.014	0.47	8.8	0.015	0.56	7.4	0.015	0.590	7.72
0.018	0.57	7.5	0.019	0.41	9.8	0.020	0.50	8.3	0.02	0.534	8.63
0.026	0.47	9.5	0.028	0.34	11.0	0.029	0.42	9.6	0.03	0.445	10.09
0.035	0.39	11.4	0.038	0.29	11.9	0.039	0.37	10.6	0.04	0.380	11.24
0.044	0.33	13.0	0.047	0.26	12.4	0.049	0.33	11.1	0.05	0.328	12.18
0.053	0.29	14.3	0.057	0.24	12.8	0.059	0.29	11.8	0.06	0.294	12.81
0.070	0.24	16.0	0.075	0.20	13.4	0.078	0.24	12.7	0.08	0.241	13.80

Notes : G=shear modulus G₀=initial shear modulus h=hysteretic damping ratio



(a) 지표면에 설치된 가속도계



(b) Downhole array에 설치된 가속도계

그림 3 대만 화련부지에 설치된 가속도계

여기서 Δt 는 지진계측자료의 시간간격을 의미하며, $\tau = m \Delta t$ 는 m 번째 계측자료의 계측시간이고 $N \Delta t$ 는 지진계측자료의 총 계측시간을 나타낸다. $\tau = \tau_d$ 에서 cross correlation 함

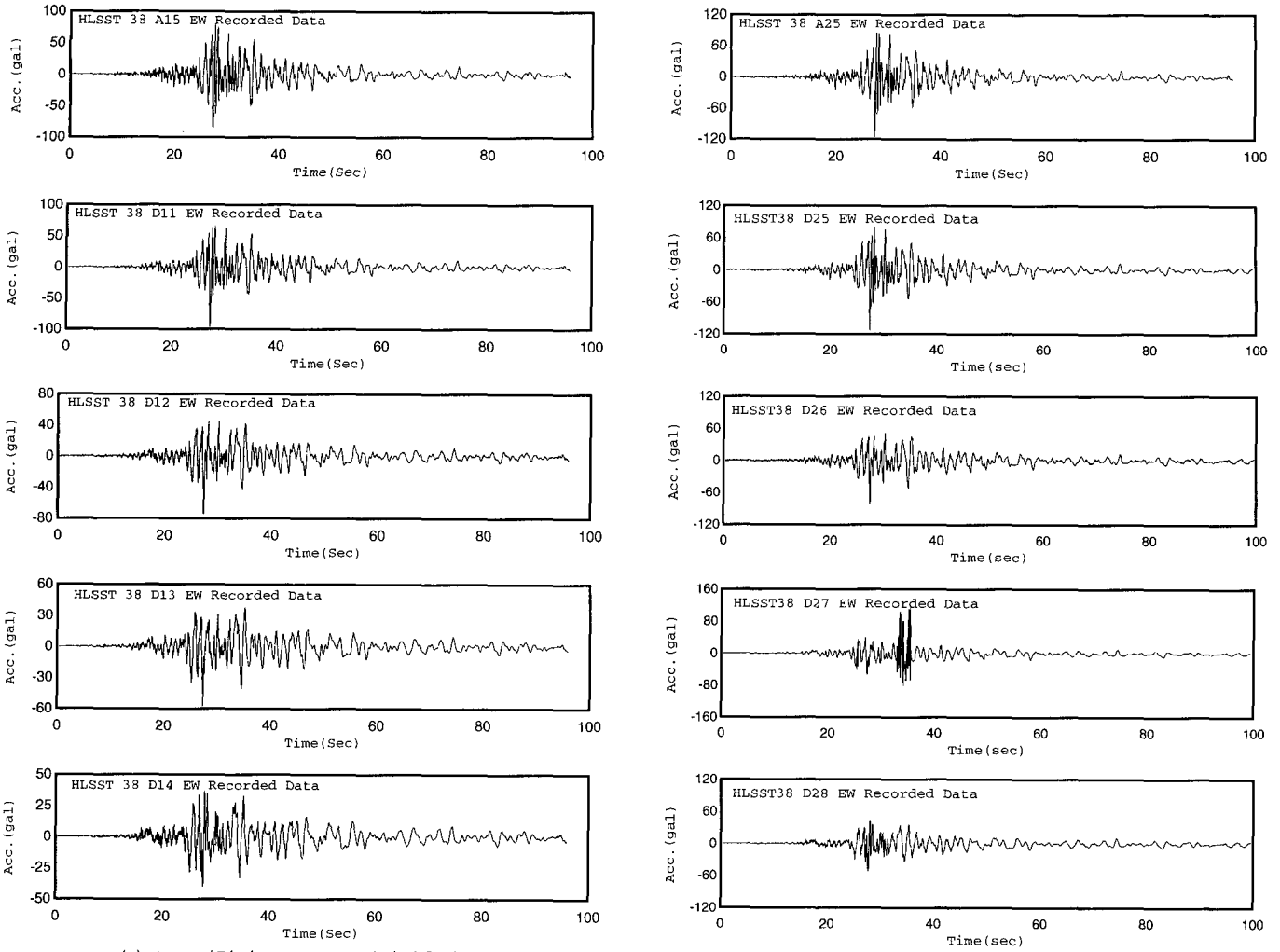
수가 최대 첨두값을 나타내면 τ_d 는 지진파가 두 계측점 i 와 j 를 이동한 시간을 의미한다. 따라서, 두 계측점 i 와 j 간의 평균 전단파속도 v_a 는 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$v_a = \frac{d}{\tau_d} \quad (2)$$

여기서, d 는 두 계측점 i 와 j 사이의 거리이다. 그러나, 상기 식의 적용에 있어서 지진파가 두 지점을 수직으로 통과해야 한다는 가정이 전제되어야 하며, 이러한 가정사항은 계측점이 진원으로부터 충분히 멀다면 전단파가 수직으로 전파한다고 가정할 수 있고 실제 전단파속도를 측정한 계측결과에서도 이와 같은 조건을 만족시키는 것으로 나타났다. 상기 과정을 통하여 평가된 전단파 속도는 입력 지진동의 규모에 따른 지반의 비선형거동을 반영한 것이므로 이 결과를 이용한 지반-구조물 상호작용해석에서는 기존의 수치해석적인 평가방법과는 달리 지반의 비선형성 평가를 위하여 추가적인 자유장해석이 불필요하다.

3.2 지반의 비선형특성 평가

본 절에서는 본 연구에서 제안한 downhole 지진계측자료에 의한 지반의 비선형성 평가기법을 지진계측자료와 지반 조사결과가 체계적으로 확보되어 있는 대만 화련부지를 대상으로 그 적용성을 검토하였다. 또한, 지진계측자료로서는 앞서 언급한 바와 같이 Chi-Chi 지진을 적용하였으며, 이중 계측결과가 양호하고 일관성이 있는 것으로 평가된 A15



(a) A15 지점의 downhole 지진계측자료

(b) A25 지점의 downhole 지진계측자료

그림 4 Chi-Chi 지진계측자료

및 A25 지점의 동서방향 지진계측자료를 이용하여 두 경우에 대한 지반의 비선형특성 평가를 수행하였다.

그림 4(a)의 A15 downhole 지진계측자료에 대하여 식 (1)에 의해 평가된 cross correlation 해석결과는 그림 5(a)와 같다. 그림 5(a)에서 알 수 있는 바와 같이 A15-D11의 침투깊은 시간지연을 거의 보이지 않고 있으며, A15-D12와 A15-D13의 침투깊은 순서가 서로 바뀌어 있다. 그러나, A15-D14의 cross correlation 해석결과는 0.2초의 시간지연을 나타내며 다른 지진계측자료의 해석결과에 비해 합리적인 결과를 보여주고 있다. 따라서, 본 연구에서는 A15-D14에서 얻어진 평균 전단파 속도를 이용하여 지반의 비선형성을 평가하였다. 또한 동일한 방법으로 그림 4(b)의 A25 downhole 지진계측자료에 대한 cross correlation 해석결과는 그림 5(b)와 같으며, A25-D28의 cross correlation 해석결과가 0.225초의 시간지연을 나타내며 다른 지진계측자료의 해석결과에 비하여 합리적인 결과를 보여주는 것으로 나타나 A25-D28에서 얻어진 평균 전단파 속도를 이용하여 지반의 비선형성을 평가하였다.

식 (2)에 의한 A15-D14 및 A25-D28의 평균 전단파 속도는 식 (3)과 같다.

$$v_{a15} = \frac{52.6 \text{ m}}{0.2 \text{ sec}} = 263 \text{ m/s} \quad (3a)$$

$$v_{a25} = \frac{52.6 \text{ m}}{0.225 \text{ sec}} = 233.8 \text{ m/s} \quad (3b)$$

식 (3)에서 평가된 A15-D14 및 A25-D28의 평균 전단파 속도를 수정지반모델의 평균 전단파 속도와 비교하여 각 지층에서 동일한 비로 전단파 속도가 지반의 비선형성으로 인해 저하되었다고 가정하여 새로운 전단탄성계수와 감쇠비를 구하였다. 수정지반모델의 평균 전단파 속도는 그림 1에 나타난 4개 지층의 전단파 속도와 층 두께로부터 식 (4) 및 식 (5)와 같이 구하였다.

$$t_{total} = \sum_{i=1}^4 \frac{th_i}{v_{s_i}} = 0.135 \text{ sec} \quad (4)$$

$$v_s = \frac{th_{total}}{t_{total}} = \frac{52.6 \text{ m}}{0.135 \text{ sec}} = 389.63 \text{ m/s} \quad (5)$$

식 (3)과 식 (5)에 의해 입력지진동에 따른 지반의 비선형성에 의한 수정지반모델의 지반특성 보정계수는 식 (6)과 같이

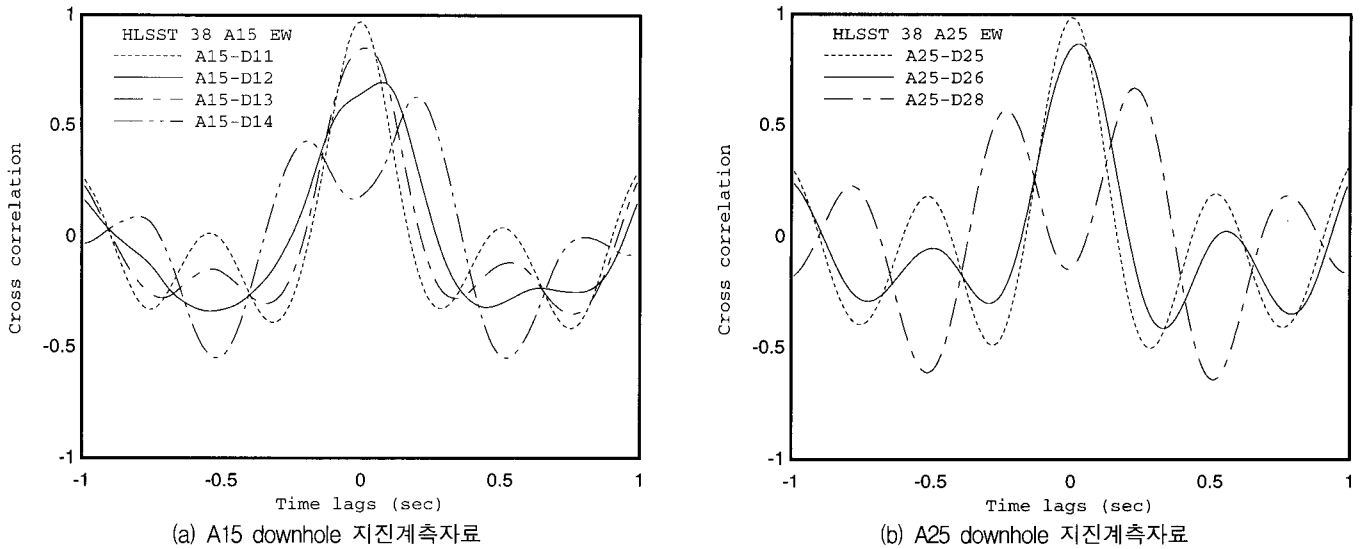


그림 5 Cross correlation 해석결과

표 2 입력지진동에 따른 지반의 비선형성이 반영된 지반특성

지반	심도 (m)	수정 지반모델		지반의 비선형 특성					
		전단파 속도 (m/s)	전단 탄성계수 (tonf/m ²)	A15			A25		
				전단파 속도 (m/s)	전단 탄성계수 (tonf/m ²)	감쇠비 (%)	전단파 속도 (m/s)	전단 탄성계수 (tonf/m ²)	감쇠비 (%)
Sand 1	0 ~ -2	133	4,167	90	1,375	8.1	80	1,084	9.1
Sand 2	-2 ~ -5	231	12,893	156	4,734	8.0	139	3,741	8.5
Gravel 2	-5 ~ -12	333	26,789	225	12,337	7.5	200	9,748	8.5
Gravel 3	-12 ~ -52.6	476	53,385	321	24,578	7.5	286	19,423	8.5

구할 수 있으며, 식 (6)의 보정계수를 이용하여 Chi-Chi 지진에 따른 지반의 비선형성이 반영된 화련부지의 새로운 지반특성, 즉 전단탄성계수와 감쇠비를 구하였다. 표 2는 본 연구에서 제안한 downhole 지진계측자료에 의한 지반의 비선형성 평가방법에 의하여 예측된 지반특성을 나타내고 있다.

$$R_{A15} = \frac{v_{a15}}{v_s} = \frac{263}{389.63} = 0.674 \quad (6a)$$

$$R_{A25} = \frac{v_{a25}}{v_s} = \frac{233.8}{389.63} = 0.6 \quad (6b)$$

4. 지반-구조물 상호작용해석

본 연구에서 제안한 downhole 지진계측자료에 의한 지반의 비선형성 평가방법의 신뢰성을 검증하기 위하여 기존에 널리 사용되고 있는 수치해석적인 방법인 SHAKE 프로그램에 의한 지반의 비선형성 평가결과 및 지진응답 계측결과와 비교검증을 수행하였다. 즉, downhole 지진계측자료에 의한 지반의 비선형성 평가모델과 SHAKE 프로그램에 의하여 지반의 비선형성이 반영된 등가선형모델을 사용하여 각각의 경우에 대해 지반-구조물 상호작용해석을 수행함으로써 최종 결과인 구조물에서의 지진응답을 실제 지진응답 계측결과와 비교하였다. 지반-구조물 상호작용해석 프로그램으로는 Lysmer

등이 개발한 SASSI를 사용하였으며⁽¹⁰⁾, 대상 구조물은 대만 화련부지에 건설된 철근 콘크리트구조의 100만 KWe급 원자로건물의 1/4 축소모델이다. 지반-구조물 상호작용해석에 사용된 구조물 및 근역지반(near field)의 유한요소모델은 그림 6과 같다.

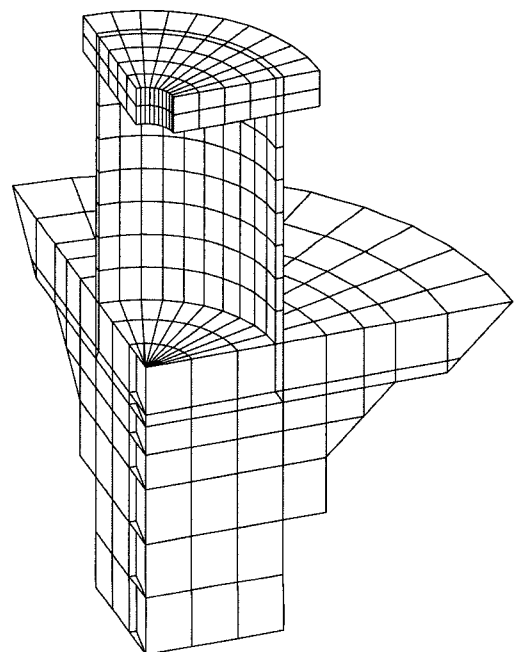
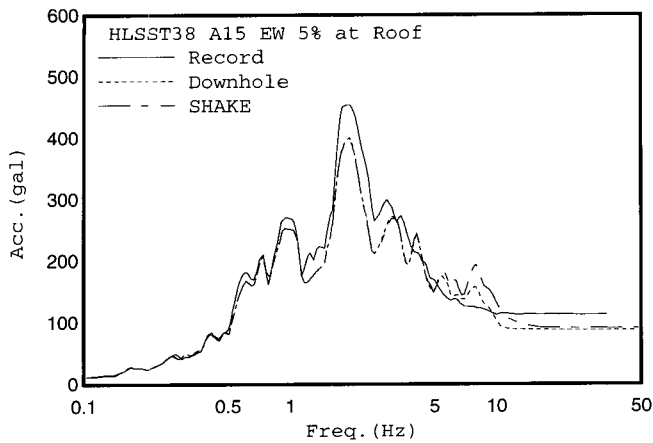
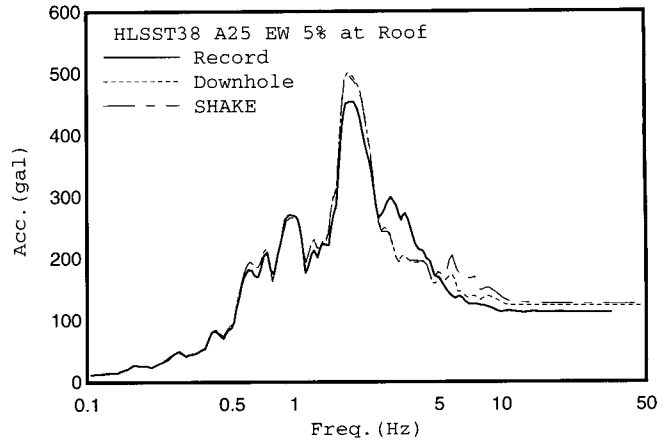


그림 6 지반-구조물 상호작용해석을 위한 SASSI 유한요소모델



(a) A15 지진계측자료



(b) A25 지진계측자료

그림 7 지반-구조물 상호작용해석결과

지반-구조물 상호작용해석을 위한 입력지진동으로는 Chi-Chi 지진에 의한 A15 및 A25 동서방향 지진을 각각의 경우에 대하여 적용하였다. 그림 7은 대만 화련부지에 건설된 원자로건물의 축소모델에서 계측된 지진응답자료와 downhole 지진계측자료 및 SHAKE 프로그램에 의하여 각각 지반의 비선형성을 평가한 후 수행한 지반-구조물 상호작용해석결과를 보여주고 있다. 그림 7에서 알 수 있는 바와 같이 지반-구조물 상호작용 해석결과, 구조물의 기본진동수는 A15 및 A25 각각의 경우에 대하여 실제 지진응답 계측결과와 downhole 지진계측자료 및 SHAKE 프로그램의 두 평가방법에 의한 해석결과가 거의 정확하게 일치하고 있음을 알 수 있다. 또한, 구조물의 최대 가속도응답도, 본 연구에서 제안한 downhole 지진계측자료에 의한 평가결과가 A15 및 A25에 대해 실제 지진응답 계측결과와 11.6% 및 10.1%, SHAKE 프로그램에 의한 평가결과와 0.5% 및 0.8%의 미소한 차이를 보이는 등 본 연구에서 제안한 방법에 의한 평가결과가 기존에 널리 활용되고 있는 SHAKE 프로그램에 의한 해석결과 및 지진응답 계측결과에 잘 일치하는 높은 수준의 정확성을 보임으로써 그 신뢰성을 확인할 수 있었다.

5. 결 론

본 연구에서는 지반-구조물 상호작용해석에 큰 영향을 미치는 지반의 비선형 특성을 평가하기 위한 방법으로서 기존의 수치해석적인 방법에 비하여 그 평가절차가 단순하고 신뢰성이 높은 downhole 지진계측자료에 의한 평가방법을 제안하였다.

본 연구에서 제안한 지반의 비선형 평가방법에 대한 신뢰성을 대만 화련부지를 대상으로 검증한 결과, 본 연구에서 제안한 방법에 의한 평가결과가 기존에 널리 활용되고 있는 SHAKE 프로그램에 의한 해석결과 및 지진응답 계측결과에 잘 일치하는 높은 수준의 정확성을 보임으로써 그 신뢰성 및 가용성을 확인할 수 있었다. 따라서, 본 연구에서 제안한 downhole 지진계측자료에 의한 지반의 비선형성 평가방법이 강지진동 작용시 지반의 비선형성이 현저하게 나타나는 기초지반의 비선형성 평가에 효과적으로 활용될 수 있을 것

으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. Schnabel, P. B., Lysmer, J., and Seed, H. B., "SHAKE : A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites," Report No. UCB/EERC-72/ 12, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 1972. 12.
2. Zeghal, M., Elgamal, A. W., Tang, H. T., and Stepp, J. C., "Lotung downhole array. I : Evaluation of site dynamic properties," *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 121, No. 4, 1995. 4, pp. 350-362.
3. Zeghal, M., Elgamal, A. W., Tang, H. T., and Stepp, J. C., "Lotung downhole array. II : Evaluation of soil nonlinear properties," *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 121, No. 4, 1995. 4, pp. 363-378.
4. 이종립, 송영철, 연관희, "격납건물 내진안전성 평가기술 개발 (I)", 한국전력공사 전력연구원, 2000. 3.
5. Huang, W. G., Liu, C. C., and Liu, W. H., *LSSST Strong-Motion Records from the Chi-Chi, Taiwan Earthquake of 20 September 1999*, Institute of Earth Sciences, Academia Sinica, Republic of China, 2000. 6.
6. Chang, C. Y., Mok, C. M., Power, M. S., and Tang, Y. K., "Analysis of ground response data at Lotung large-scale soil-structure interaction experiment site," Rep. No. NP-7306-SL, Electric Power Research Institute, Palo Alto, Calif., 1991.
7. Chang, C. Y., Mok, C. M., Power, M. S., Tang, Y. K., Tang, H. T., and Stepp, J. C., "Development of shear modulus reduction curves based on Lotung downhole ground motion data," Proc., 2nd Int. Conf. on Recent Adv. in Geotech. Earthquake Engrg. and Soil Dynamics, National Science Foundation, Washington D. C., 1991, pp. 111-118.

8. Madera, G. A., "Fundamental period and amplification of peak acceleration in layered systems," *Res. Rep. R70-37*, Dept. of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, 1970.
9. Bendat, J. S. and Piersol, A. G., *Engineering Application of Correlation and Spectral Analysis*, John Wiley and Sons, New York, 1980.
10. Lysmer, J., Ostadan, F., Tabatabaie, M., Vahdani, S., and Tajirian, F., *A System for Analysis of Soil-Structure Interaction*, University of California, Berkeley, 1988.