

비선형 시간 이력법에 의한 목조 가옥의 지진응답해석

Seismic Response Analysis of Wood Structure Using Nonlinear Time History Method

김재관* 류혁** 진병무***

Kim, Jae Kwan Ryu, Hyeuk Jin, Byeong Moo

ABSTRACT

Dynamic analyses are performed for the wood structure modeled as a SDOF hysteretic system. The hysteresis model presented is a modified version of Takeda model. The comparison between the results of numerical simulation and the experimental results shows good agreements in overall tendencies. The response of wood structure subjected to artificially generated earthquakes considering site effects is studied. It appears that the response is very strongly influenced by the intensity and the frequency contents of the ground motion.

1. 서론

일반적으로 목조 구조물은 지진에 대하여 좋은 성능을 갖는 것으로 알려져 있다. 그러나 1995년 1월 발생한 일본의 고베 지진으로 인한 피해는 전통 구조 형식으로 건설된 목조 가옥의 경우 내진 성능이 취약함을 보여준다[1]. 우리나라의 경우 지진으로 인한 목조 가옥의 붕괴 및 인명 손실에 관한 역사 기록이 있으며 목조 전통 문화재나 목조 가옥들이 현재 다수 남아 있다. 따라서 우리나라 목조 가옥의 구조적 특성을 고려한 동적 거동에 관한 연구가 필요하다. 일반적으로 반복 하중을 받는 목조 구조물은 비선형성과 이력 현상을 갖는다. 이러한 이력 현상을 갖는 구조물의 동적 응답 해석은 이력 특성을 잘 모사할 수 있는 이력 모델을 이용해야 한다. 본 연구에서는 목조 가옥의 프레임의 반복 하중 실험 결과[2]를 바탕으로 이력 모델을 개발하고 이를 이용하여 동적 응답 해석을 하였다.

2. 이력 모델 개발과 검증

* 서울대학교 교수, 정회원

** 서울대학교 석사과정, 학생회원

*** 서울대학교 박사과정, 학생회원

목조 가옥의 프레임의 하중-변위 이력 곡선(그림 1)은 뚜렷한 항복점이 없는 비선형, 비탄성 곡선으로 변위가 증가함에 따라 강성이 저하되는 특징을 갖는다. 목조 프레임의 이력 특성인 강성 저하를 모사하기 위하여 콘크리트 부재의 이력 모델로 널리 쓰이는 Takeda 모델[3]을 수정하였다. 수정 Takeda 모델은 하중과 변위 조건에 따라 크게 다섯 부분으로 구성되고 골격 곡선은 Trilinear로 구성하였다(그림 2).

(a) 탄성 재하와 제하 :

탄성 재하와 제하 시 초기 강성 k_1 의 기울기(골격 곡선의 기울기)를 갖는다.

(b) 비탄성 재하 :

하중이 탄성 한계 하중보다 크면 강성 k_2 의 기울기(골격 곡선의 기울기)를 갖는다.

(c) 항복 하중 재하 :

하중이 항복 하중보다 크면 강성 k_3 의 기울기(골격 곡선의 기울기)를 갖는다.

(d) 비탄성 하중 제하 :

탄성 한계 하중보다 큰 하중에서 제하되면 강성 저하가 발생하며, k_4 의 기울기를 갖는다.

(e) 비탄성 하중 재재하 :

제하된 하중 방향으로 하중을 재하하면 k_5 의 기울기를 갖는다.

수정 Takeda 모델의 강성 저하는 k_4 와 k_5 로 표현되고 Meyer 등[4]이 제안한 식을 수정하였다 [5]. 먼저 비탄성 제하 시 기울기가 k_0 이고 원점을 지나는 직선과 기울기가 k_1 이고 제하점 (d_1^+, p_1^+) 을 지나는 직선의 교점을 구한다(그림 3).

$$d_0^+ = \frac{k_1 d_1^+ - p_1^+}{k_1 - k_0} \quad p_0^+ = \frac{k_0}{k_1 - k_0} [d_1^+ k_1 - p_1^+] \quad (1)$$

여기에서 p_1^+ = 현 하중 단계에서 양의 방향 최대 하중

d_1^+ = 하중 p_1^+ 에 상응하는 변위

k_0 = 강성 저하 파라미터

비탄성 제하 시 강성 k_4 와 비탄성 재재하 시 강성 k_5 는 다음 식과 같다.

$$k_4 = \frac{p_1^+}{d_1^+ - d_r^+} \quad k_5 = \frac{p_x^- - p_0^+}{d_x^- - d_0^+} \quad (2)$$

$$d_r^+ = d_0^+ - \frac{p_0^+}{k_5} \quad (3)$$

여기에서 d_r^+ = 양의 방향 하중 시 잉여 변위,

p_x^-, d_x^- = 음의 방향 하중 시 최대 경험 하중과 그에 상응하는 변위이다.

제한한 이력 모델의 검증을 위하여 초가의 1/4 축소 모델의 진동대 실험 결과[6]와 수정 Takeda 모델을 이용한 수치 해석 결과를 비교하였다. 수치 해석은 초가를 1-자유도 이력 시스템으로 모델링 하여 수행하였다(그림 4). 1-자유도 이력 시스템의 비선형 운동 방정식은 다음과 같고 해는 Newmark 방법과 Newton-Raphson 방법을 이용하여 구하였다.

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + f_h(u, \dot{u}) = -m\ddot{u}_g \quad (4)$$

여기서 m 은 시스템의 질량, c 는 감쇠 계수, f_h 는 복원력, \ddot{u}_g 는 지반 운동 가속도이다.

1-자유도로 모델링한 시스템의 질량은 1422 kg으로 벽, 지붕, 프레임의 질량을 프레임의 최상단 한 절점에 집중시켜 구하였고, 감쇠비는 목조 구조물의 일반적인 감쇠비를 따라 5%로 정하였다. 목조 프레임의 이력 거동은 표 1의 골격 곡선으로 구성된 수정 Takeda 모델을 이용하였다. 입력 지반 하중은 Imperial Valley 지진(1979.10)과 Nahanni 지진(1985.12)이다(그림 5). 입력 지반 하중의 PGA는 0.1g이고 초기 20초간의 기록을 사용하였다.

표 1. 골격 곡선의 기울기와 하중

| k_0 (N/m) | k_1 (N/m) | k_2 (N/m) | k_3 (N/m) | p_1 (N) | p_2 (N) |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-----------|-----------|
| 1.36E3 | 84.950E3 | 37.410E3 | 5.574E3 | 108.821 | 446.966 |
| | | 32.922E3 | 4.794E3 | | 403.407 |

수치 해석을 통하여 각 입력 지진에 대한 변위와 가속도 응답의 시간 이력 곡선을 구하고 이를 진동대 실험 결과와 비교하였다(그림 6, 7, 8, 9, 10). 수정 Takeda 모델을 이용한 수치 해석 결과는 초가의 1/4 축소 모델의 진동대 실험 결과와 거동이 유사함을 알 수 있다.

표 2. 입력 지진 별 최대 응답 가속도와 변위

| 입력지반운동 | 최대 응답 가속도(g) | | 최대 응답 변위(cm) | |
|-----------------|--------------|-------|--------------|-------|
| | 수치 해석 | 실 험 | 수치 해석 | 실 험 |
| Imperial Valley | 0.054 | 0.063 | 5.486 | 5.716 |
| Nahanni | 0.021 | 0.073 | 0.707 | 0.476 |

3. 목조 가옥 비선형 해석

지반 조건에 따른 목조 가옥의 거동을 파악하기 위하여 부지의 특성을 고려하여 인공적으로 생성한 경암 지반과 분지 지반의 지진 하중을 입력하여 동적 응답 해석을 하였다. 1-자유도로 모델링한 시스템의 질량은 4.67 ton이고 감쇠비는 5%로 정하였다. 목조 프레임의 이력 거동은 표 3의 골격 곡선으로 구성된 수정 Takeda 모델을 이용하였다. 입력 지반 하중(그림 11)은 경암 지반과 분지 지반에서의 지진 하중으로 경주 지반의 부지 특성을 고려하여 인공적으로 생성된

것이다[7]. 수치 해석을 통하여 경암 지반과 분지 지반에 대한 응답 변위와 응답 가속도의 시간 이력, 하중-변위 이력 곡선을 구하였다(그림 12, 13, 14). 경암 지반과 분지 지반에서의 응답 변위를 비교해 보면 분지 지반에서의 응답은 상당한 양의 영구 변형이 일어나는 것을 알 수 있다. 따라서 목조 구조물의 지진 응답은 입력 지반 운동의 강도와 주파수 내용에 크게 영향을 받는 것을 알 수 있다.

표 3. 골격 곡선의 기울기와 하중

| k_0 (N/m) | k_1 (N/m) | k_2 (N/m) | k_3 (N/m) | p_1 (N) | p_2 (N) |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-----------|-----------|
| 19.41E3 | 485.233E3 | 135.368E3 | 52.203E3 | 194.093 | 888.939 |
| | | 95.586E3 | 50.485E3 | | 695.248 |

4. 결론

목조 프레임의 반복 하중 실험 결과를 이용하여 1-자유도 이력 시스템으로 모델링 한 초가에 대하여 수치 해석 결과와 초가의 1/4 축소 모델의 진동대 시험 결과를 비교하여 이력 모델을 검증하였다. 수정 Takeda 모델을 사용하여 얻은 결과는 진동대 실험 결과와 잘 일치함을 알 수 있었다. 지반의 특성을 고려하여 인공적으로 생성한 경암 지반과 분지 지반에서의 지진을 지반 하중으로 입력하여 동적 응답 해석을 하였다. 분지 지반에서의 응답은 상당한 양의 영구 변형이 일어났다. 목조 구조물의 지진 응답은 입력 지반 운동의 강도와 주파수 내용에 크게 영향을 받는 것을 알 수 있다. 목조 구조물의 거동에 대한 보다 나은 해석을 위해서 손상에 대한 역학적인 이해와 기하학적 비선형에 대한 고려가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 한국원자력연구소의 연구비 지원으로 수행되었으며, 저자들은 연구비 지원에 감사의 뜻을 표하는 바이다.

참고문헌

- [1] D. Tadashi, K. Hiroyuki, and H. J. Lu(1996), "Damage to Wooden Houses Due to the 1995 Great Hanshin-Awaji Earthquake Disaster," *Proc., of 11th World Conference on Earthquake Engineering*, Paper No. 856.
- [2] 서정문, 최인길, 전영선, 이종립, 신재철(1997), "수평 교번하중에 대한 초가삼간 목조 프레임의 이력특성 평가," *한국지진공학회 논문집*, 1(3), 21-27.
- [3] T. Takeda, M. A. Sozen, and N. N. Nielsen(1970), "Reinforced Concrete Response to Simulated Earthquakes," *Journal of the Structural Division, ASCE*, 96(12), 2257-2573.
- [4] C. Meyer, M. S. L. Roufaiel, and S. G. Arzoumanidis(1983), "Analysis of Damaged Concrete Frames for

Cyclic Loads,” *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 11(2), 207-228.

- [5] 류혁(1998), *이력 모델을 이용한 목조 구조물 동적 거동 해석*, 석사학위논문, 서울대학교.
- [6] 서정문, 최인길, 전영선, 이종립, 신재철, 허택영(1997), “전통 초가삼간 가옥의 지진응답특성 실험,” *한국지진공학회 추계학술대회 논문집*, 1(2), 185-192.
- [7] 김재관(1997), “부지특성을 고려한 추계학적 지진지반운동 생성과 이를 이용한 옛 구조물의 지반-구조물 상호작용 해석,” 연구보고서, 연구기관 기초전력공학공동연구소, KAERI/CM-174-96, 한국원자력연구소.

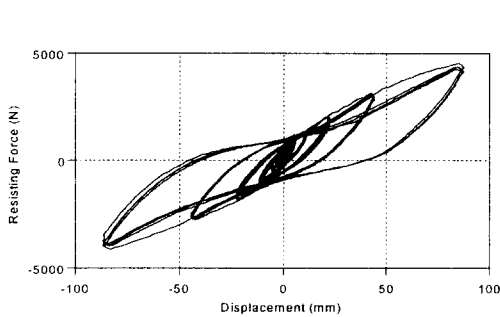


그림 1. 목조 프레임의 하중-변위 이력 곡선

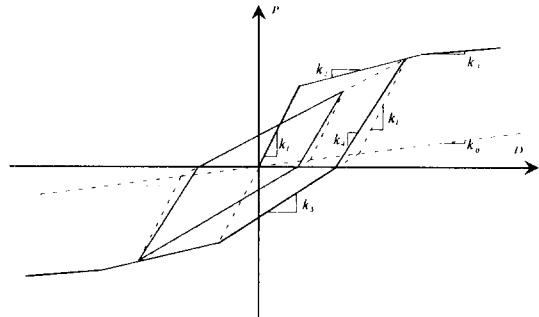


그림 2. 수정 Takeda 모델의 구성

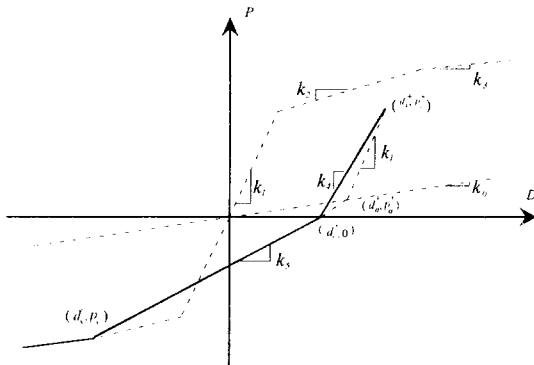


그림 3. 수정 Takeda 모델의 강성 저하

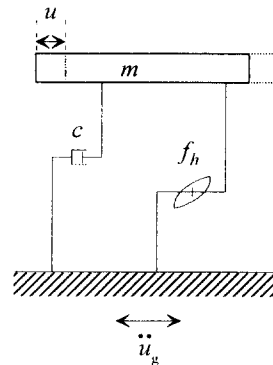
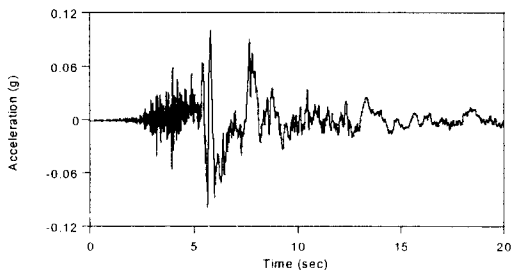
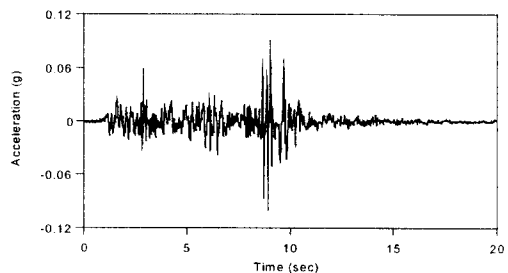


그림 4. 1-자유도 이력 시스템

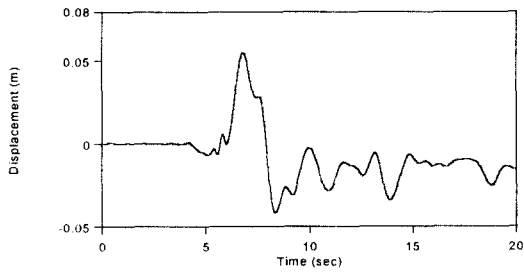


(a) Imperial Valley 지진(1979.10)

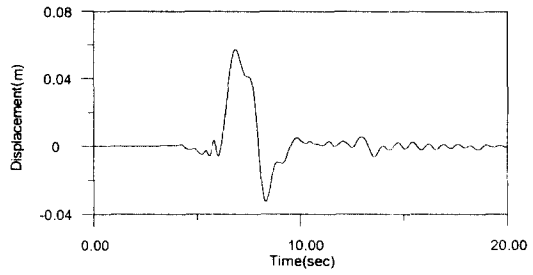


(b) Nahanni 지진(1985.12)

그림 5. 입력 지진의 가속도 시간 이력

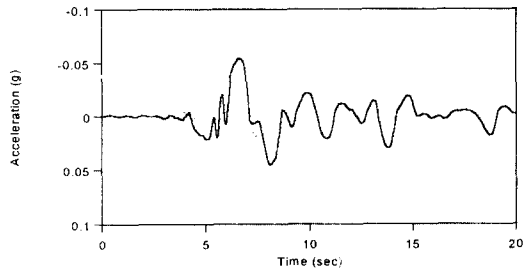


(a) 수정 Takeda 모델

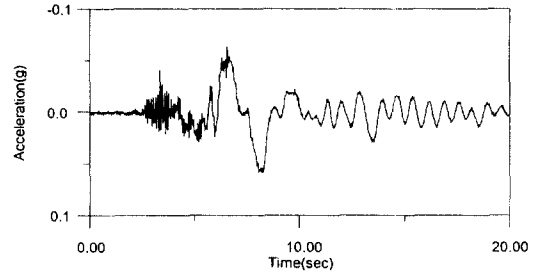


(b) 진동대 실험

그림 6. Imperial Valley 지진에 대한 축소 모델 응답 변위 비교

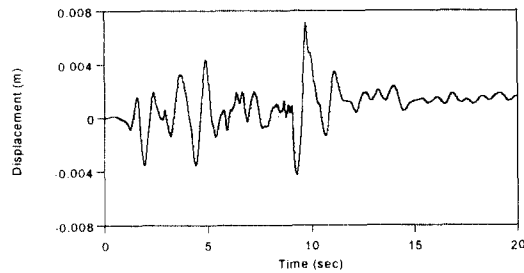


(a) 수정 Takeda 모델

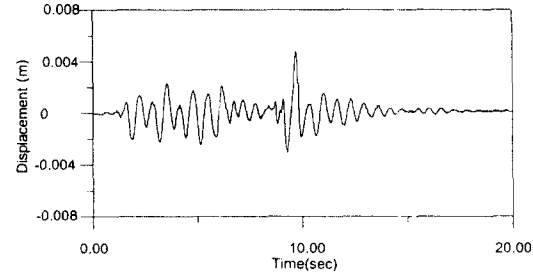


(b) 진동대 실험

그림 7. Imperial Valley 지진에 대한 축소 모델 응답 가속도 비교

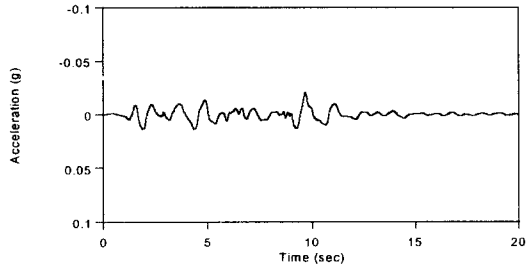


(a) 수정 Takeda 모델

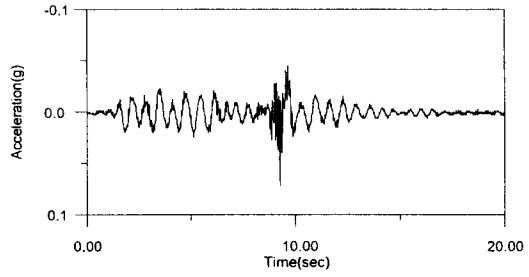


(b) 진동대 실험

그림 8. Nahanni 지진에 대한 축소 모델 응답 변위 비교

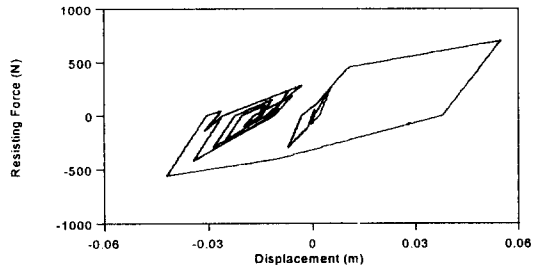


(a) 수정 Takeda 모델

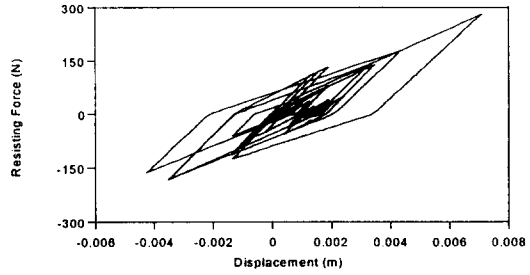


(b) 진동대 실험

그림 9. Nahanni 지진에 대한 축소 모델 응답 가속도 비교

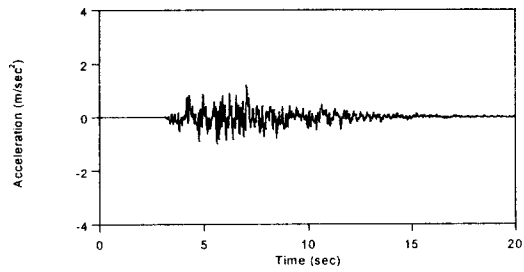


(a) Imperial Valley 지진

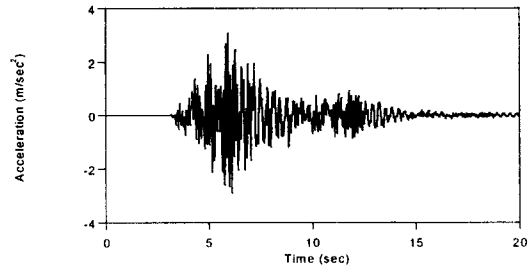


(b) Nahanni 지진

그림 10. 축소 모델 응답의 하중-변위 이력 곡선

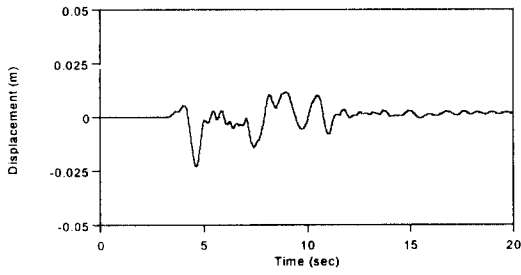


(a) 통계 운동(경암 지반에서 생성된 인공지진)

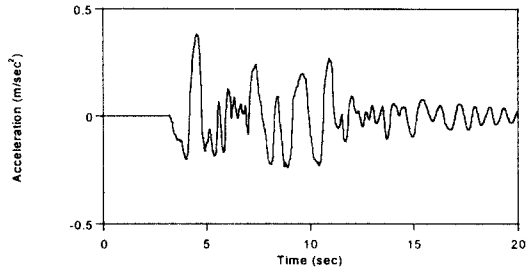


(b) 분지 지반에서 증폭된 인공 지진

그림 11. 입력 지반 운동 가속도 시간 이력

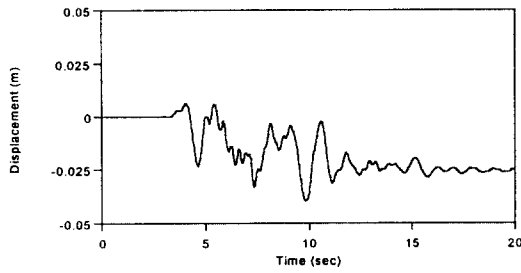


(a) 변위

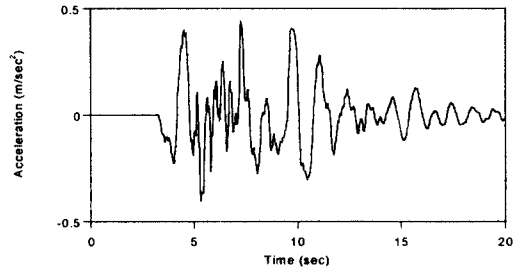


(b) 가속도

그림 12. 경암 지반에서의 추가 모델 지진 응답의 시간 이력

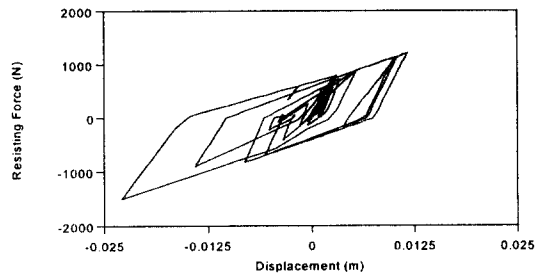


(a) 변위

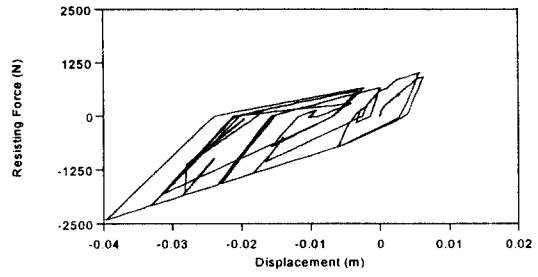


(b) 가속도

그림 13. 분지 지반에서의 추가 모델 지진 응답의 시간 이력



(a) 경암 지반



(b) 분지 지반

그림 14. 추가 모델 지진 응답의 하중-변위 이력 곡선