

전통 초가삼간 가옥의 내진성능 평가 실험 (II): 연약지반 조건

A Test on the Aseismic capacity of a Traditional Three-bay-straw-roof House (II): Soil Site Condition

서 정 문* 최 인 길** 전 영 선* 이 종 립*** 신 재 철****
Seo, Jeong Moon Choi, In Kil Choun, Young Sun Lee, Jong Rim Shin, Jae Chul

국문요약

우리 나라 전통 초가삼간의 1/4 축소모델을 제작하여 연약지반 조건에 대한 내진 성능 실험을 수행하였다. Imperial Valley 지진 파를 사용하여 모델의 파괴 시까지 거동을 분석하였다. 탄성한계 내에서 초가삼간의 고유진동수는 장방향 및 단방향 각각 1.66 Hz 및 1.76 Hz로 측정되었다. 탄성한계 내에서의 감쇠비는 약 7%이다. 수평방향의 최대 가속도응답은 입력에 비해 감소하며 이는 목조 프레임의 비선형·비탄성 특성 때문이다. 수평방향의 변위응답은 입력이 증가함에 따라 급격히 증가하여 최대 지반가속도 0.25g에서 모델이 붕괴되었다. 비선형 지진해석 결과와 실험결과를 비교하였다.

주요어 : 전통초가삼간, 내진성능, 축소모델시험, 연약지반조건

ABSTRACT

The aseismic capacity of a traditional three-bay-straw-roof wooden house for soft soil site condition is quantitatively estimated. One 1/4 scale model was tested for the Imperial Valley Earthquake up to failure. The natural frequency of the wooden house measured in elastic range is 1.66 Hz and 1.76 Hz in the longitudinal and transversal direction, respectively. Damping ratio of the house measured in elastic range is 7%. The peak horizontal acceleration response of the house was reduced compared with input motion due to the nonlinear inelastic characteristics of the wooden frame. The horizontal displacement response was significantly increased as the level of input motion was increased. The model was collapsed at 0.25g due to the low frequency contents of the input motion. The results of nonlinear seismic analysis were compared with the test results.

Key words : traditional wooden house, aseismic capacity, model test, soil site condition

1. 서 론

일본의 대규모 지진시 피해에 관한 Ohsaki의 연구결과에 의하면⁽¹⁾ 국부적인 지반조건이 지진피해에 큰 영향을 미치는 것으로 밝혀졌다. 그 예로 1923년 규모 7.9의 관동지진시 목조가옥의 피해는 충적층인 저지대에서 반과 이상의 비율이 11% 이었으나 홍

적층인 고지대에서의 그 비율은 2%이었다.

또한 목조가옥의 지진손상은 충적층의 두께에 영향을 받아서 두께가 증가할수록 가옥의 손상이 증가하였다. 일 예로 관동지진시 동경에서의 목조가옥의 손상비율은 충적층의 두께가 5 m 일 때 약 1%, 40 m 두께일 때 약 25%로 나타났다. 동일 지진에 대한 요코하마의 목조가옥의 손상비율은 연약지반의 두께 15 m에서 약 60%, 40 m 두께에서 약 85% 정도였다. 1995년의 고베지진시 목조가옥에 대한 교토대학의 피해조사 결과⁽²⁾에서도 화강암으로 구성된 단구층인 북쪽 산측의 피해는 경미하고 매립지인

* 정회원 · 한국원자력연구소 책임연구원

** 정회원 · 한국원자력연구소 선임연구원

*** 정회원 · 전력연구원 부처장

**** 충남대학교 교수

남쪽은 매우 큰 것으로 조사되었다.

현재까지 조사된 우리 나라의 역사지진 중 가옥의 붕괴 및 인명의 손실과 관련된 것은 주로 경주 지역에서 발생하였다. 경주지역은 두께 20 m 내외의 층적층 지반으로서 연약지반이다. 그리고 조선시대까지 우리 나라의 민가로서 가장 일반적인 형태이었던 초가삼간은 매우 유연한 구조로서^{(3),(4)} 일본의 전통 목조가옥에 비해 더 작은 고유진동수를 갖는다. 따라서, 일본의 지진피해 예에서 보듯이 경주 지역에서의 큰 피해는 지반과 초가삼간의 동적 특성에 의한 것이 중요한 요인의 하나로 추정할 수 있다.

본 연구에서는 층적층 지반인 경주지역을 대상으로 하여 초가삼간의 1/4 축소모델에 대한 지진실험을 수행하여 초가삼간의 동적 특성과 응답특성 및 파괴시 지진가속도 수준을 파악하였다. 가옥의 피해는 지진동에 의한 것으로 가정하였으며, 실험에 사용된 지진파는 경주지역 지반과 유사한 미국 서부의 Imperial Valley에서 1979년에 발생한 지진 중 Array No.5에서 측정된 지진기록이다. 가옥파괴에 관한 역사지진의 최대 진도를 평가하기 위하여 초가삼간의 파괴시 최대 지반가속도를 구하였으며, 초가삼간 가옥의 비선형 지진해석을 위하여 개발한 개량형 Double-Target모델⁽⁵⁾을 이용하여 축소모델에 대한 지진해석을 수행하고 그 결과를 실험결과와 비교하였다.

2. 축소모델 실험

2.1 축소모델의 제작 및 설치

축소모델은 암반지반 조건에 대한 실험에서와 같이 동일한 방법으로 제작하고 설치하였다.⁽⁴⁾ 즉, 그림 1과 같이 신선한 소나무를 이용하여 초가삼간의 1/4 축소모델을 제작하였으며, 지붕의 총 자중 및 기둥과 주추의 경계도 동일한 장치를 이용하여 설치하였다. 실험에는 암반지반 조건과 동일한 상사율과 인공질량 모델을 적용하였으며, 한국기계연구원이 보유하고 있는 6자유도 MTS진동대를 사용하였다.

축소모델의 기둥 상단에서의 응답을 측정하기 위하여 가속도계(B&K4370)와 ± 25 mm 용량의 변위계(Tokyoosokki)를 그림 2와 같이 세 지점에 설치하고 각 지점에서 수평 2방향 및 연직 방향의 가속도

와 수평 2방향의 변위응답을 측정하였다. 공간상의 제약으로 인하여 가속도계는 기둥과 근접한 들보에 설치하였으며 변위계는 보 하단에서 0.1 m 아래의 기둥에 설치하였다. 변위계의 설치시 모델의 비틀림 영향을 고려하기 위한 별도의 장치를 제작하여 사용하였다.

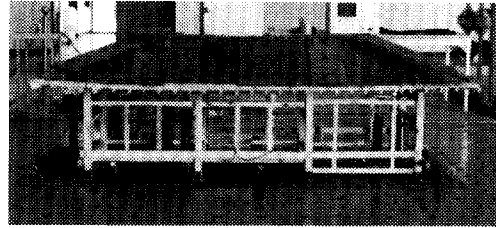


그림 1 초가삼간의 1/4 축소모델

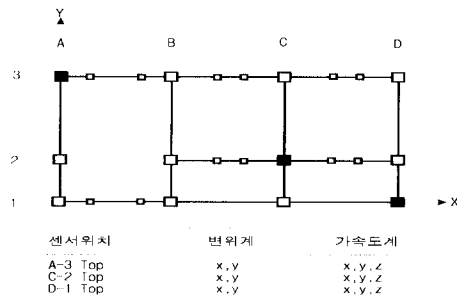


그림 2 계측센서의 부착위치

2.2 입력지진

경주시는 폭이 3~4 km인 양산단층대 상에 위치한다. 경주시의 지반은 형산강과 북천 및 남천 등의 하천이 범람하여 만든 대표적인 층적층 지반이다.

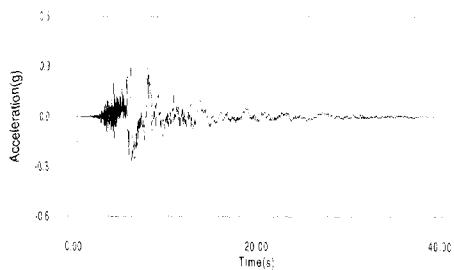
지표에서 약 20 m 까지는 호박돌 및 모래, 자갈 층으로 구성되어 있으며, 그 아래에는 약 5 m 두께의 풍화암과 기반암인 화강암으로 구성되어 있다. 경주시내의 시추자료^{(6),(8)}를 근거로 층적층의 전단파속도를 추정된 결과 약 186~350 m/sec로 나타났다.

따라서 본 연구에서는 이와 같은 경주시의 지반 특성에 따른 지진파의 특성을 잘 나타낼 수 있는 지진기록으로 1979년 10월 미국 서부에서 발생한 규모 6.5의 Imperial Valley 지진의 Array No.5에서 측정된 지진기록을 입력지진으로 사용하였다.

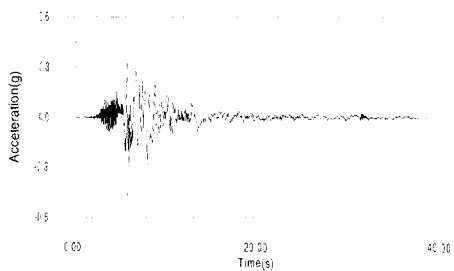
Imperial Valley 지역의 지반은 20 m 두께의 층적층이 기반암 상에 놓이며, 폭이 수 km 이내인 계

곡으로 충격층의 전단파속도가 180~360 m/sec로서 경주지역과 매우 유사하다.

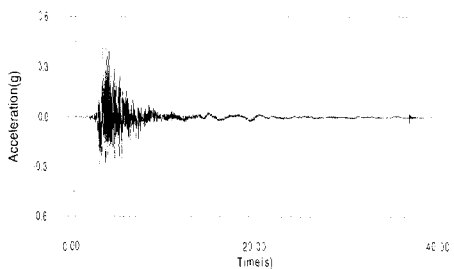
그림 3에 Imperial Valley 지진의 가속도 시간이력을 나타내었으며, 그림 4에 각 방향성분의 최대가속도로 표준화된 가속도 응답스펙트럼을 나타내었다. 그림 4에서 2 Hz 이하의 저진동수 대역에서의 수평방향 응답성분이 매우 커서 충격층 지반의 영향이 크게 나타난 것을 알 수 있다. 지진의 지속시간은 약 40초이나 실험에서는 강진구간 약 20초만의 기록을 이용하여 상사법칙을 적용하여 시간축으로 1/2로 압축하여 사용하였다. 각 입력가속도 수준에 따른 연직성분 가속도의 크기는 수평성분의 2/3로 하였으며 3방향 지진파를 동시에 입력하였다.



(a) 수평방향(x)



(b) 수평방향(y)



(c) 연직방향

그림 3 Imperial Valley 지진의 가속도-시간 이력 (1979년, 미국 서부, 충격지반)

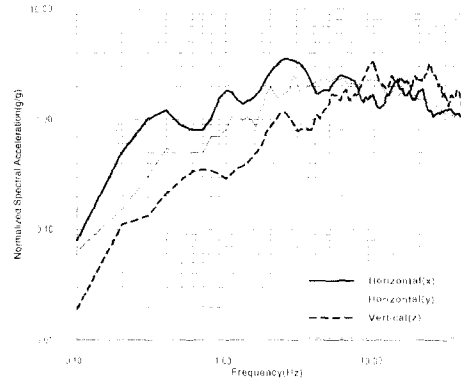
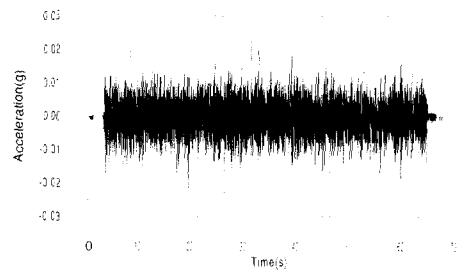


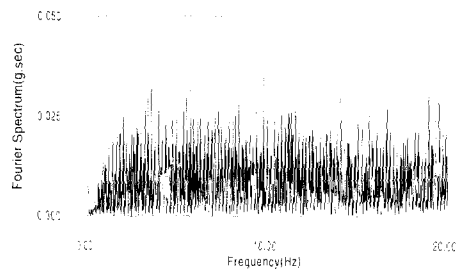
그림 4 Imperial Valley 지진의 표준화 응답스펙트럼

2.3 실험결과 및 분석

축소모델에 대한 진동대 실험은 최대 지진가속도 수준을 0.05g, 0.08g, 0.1g, 0.15g, 0.2g, 및 0.25g의 6 단계로 수행하였다. 축소모델의 고유진동수 및 감쇠비 측정을 위해 시험전 및 각 가속도 단계별 시험 후 백색잡음(White Noise)파를 이용한 랜덤 진동시험을 수행하였다. 시험에 사용한 백색잡음파는 그림 5와 같으며 백색잡음파의 최대가속도는 0.025g 이다.



(a) 가속도-시간 이력



(b) Fourier Spectrum

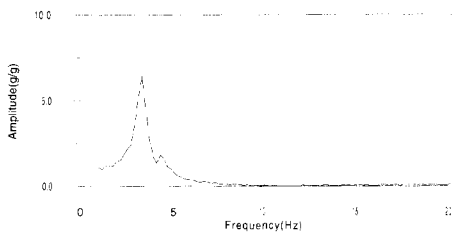
그림 5 랜덤 진동실험의 백색잡음파

(1) 고유진동수 및 감쇠비

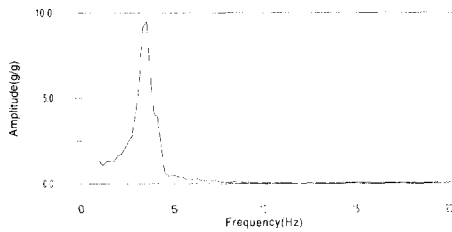
실험전 백색잡음파에 의한 랜덤 진동실험으로부터 구한 전달함수(Transfer Function)를 그림 6에 나타내었다. 전달함수로부터 추정된 모델의 고유진동수는 장방향(x방향) 및 단방향(y방향)의 경우 각각 3.32 Hz, 3.52 Hz로 나타났다. 이를 실제 초가삼간의 진동수로 환산하면 각각 1.66 Hz, 1.76 Hz이다.

또한 전달함수를 이용하여 축소모델의 감쇠비를 Bandwidth법을 이용하여 계산한 결과 양 방향에서 약 7%로 나타났다.

그림 7은 가속도 수준 0.1g에 대한 실험후 수행한 랜덤 진동실험으로부터 구한 장방향 응답의 전달함수를 대표적으로 나타낸 것이다. 0.1g 실험후 축소모델의 장방향 고유진동수는 3.13 Hz로서 실험전에 비해 약간 감소하였다. 이는 축소모델의 소성변위로 인해 사개마춤 조인트의 조임이 다소 느슨해져 강성이 저하되어 고유진동수의 저하가 발생한 것으로 판단된다. 그림 8에는 0.1g 실험에 대한 A3 지점의 가속도 응답의 Power Spectrum을 대표적으로 나타내었다. 그림에서 점선은 실제의 Power Spectrum을 나타내며 실선은 지배진동수를 잘 나타내기 위하여 Parzen Window를 이용하여 평활화한 것이다. 양방향의 지배 진동수는 각각 0.68 Hz, 1.85 Hz로서 탄성한계시의 고유진동수보다 매우 낮은 값을 보여주고 있다. 이는 목조 프레임의 큰 소성변형으로 인한 것이다.



(a) 장방향(x)



(b) 단방향(y)

그림 6 백색잡음파 입력에 대한 축소모델의 전달함수

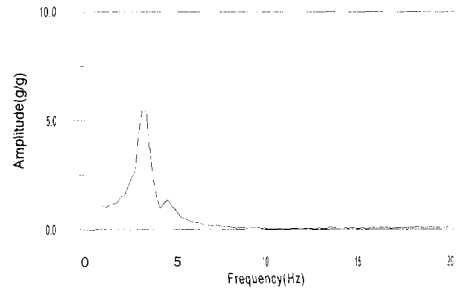
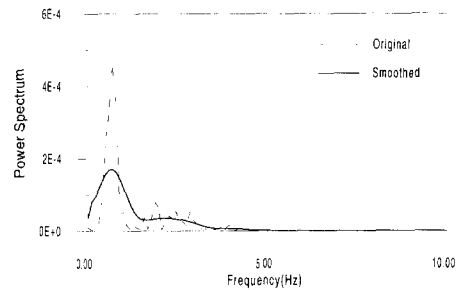
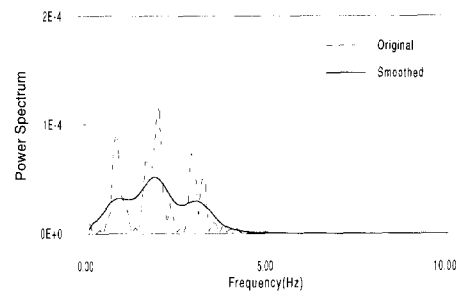


그림 7 0.1g 지진 실험 후의 축소모델의 장방향(x) 전달함수



(a) 장방향



(b) 단방향

그림 8 0.1g 입력 시 축소모델의 가속도 응답 Power Spectrum, A3 기둥

(2) 가속도 수준별 응답

입력 지진가속도 수준별로 세 측정점에서의 가속도 및 변위 응답의 최대값을 표 1에 나타내었다. 0.15g 이상의 입력가속도 수준에서는 A3 기둥의 장방향(x방향) 가속도 및 변위 응답만을 측정하였으나, 최대 변위는 측정한계인 ± 25 mm를 초과하였다. 그림 9는 0.25g의 입력에서 축소모델이 완전히 붕괴된 모습을 보여주고 있다.

표 1 가속도 수준별 모델의 최대 가속도 및 변위 응답

입력가속도수준	방 향	최대 가속도응답 (g)			최대 변위응답 (mm)		
		A3'	C2'	D1'	A3'	C2'	D1'
0.05 g	x	0.040	0.043	0.052	4.28	4.20	5.13
	y	0.037	0.029	0.037	2.33	1.59	0.80
	z	0.036	0.044	0.039	-	-	-
0.08 g	x	0.056	0.059	0.065	9.74	9.40	10.71
	y	0.046	0.042	0.042	4.13	3.14	2.44
	z	0.069	0.076	0.069	-	-	-
0.10 g	x	0.063	0.060	0.066	14.29	13.29	14.96
	y	0.048	0.052	0.049	4.97	4.29	2.46
	z	0.086	0.088	0.081	-	-	-
0.15 g	x	0.099	-	-	-	-	-
0.20 g	x	0.148	-	-	-	-	-
0.25 g	Collapse						

* A3, C2, D1의 위치는 그림 2 참조.

표 1에서 각 측정점에서 측정된 최대변위 크기에 약간의 차이가 발생되었는데, 이는 모델이 전단거동 외에도 약간의 편심에 의한 비틀림거동을 나타내고 있음을 보여주고 있다. 그러나 초가삼간의 강성중심과 질량중심의 차이가 적기 때문에 세 측정점에서 비교적 유사한 응답을 나타내고 있다. 수평성분 가속도응답은 입력에 비해 감소하며 그 비율은 입력 가속도의 크기가 증가할수록 증가한다. 그리고, y방향의 응답은 x방향에 비해 전반적으로 작다. 이것은 y방향 입력지진의 에너지가 x방향에 비해 적기 때문이다. 연직방향의 가속도응답은 입력에 비해 다소 증가하는 경향을 보인다.

변위응답은 입력지진의 가속도 수준이 증가함에 따라 증가함을 보인다. 특히 장방향의 변위증가가 현저하게 나타나고 있다. 입력 가속도 수준에 따른 장방향의 최대 변위응답의 변화를 그림 10에 나타내었다. y방향의 변위가 x방향에 비해 적은 것은 강성과 입력지진의 차이 때문이다. 이상과 같은 가속도 및 변위 응답의 특성은 암반지반 조건에 대한 실험결과와 매우 유사하며⁽⁴⁾, 이는 수평력에 저항하는 목조 프레임의 매우 큰 비선형·비탄성 특성 때문이다.

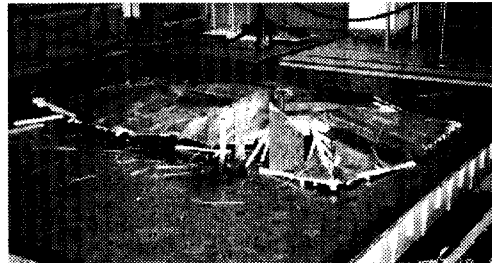


그림 9 0.25g 입력에 대한 모델의 붕괴된 모습

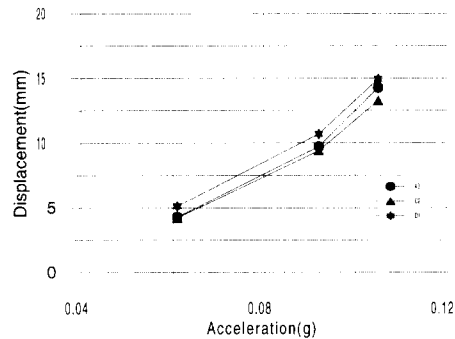
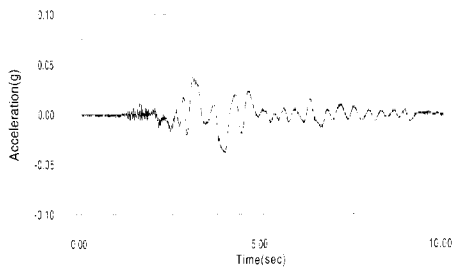


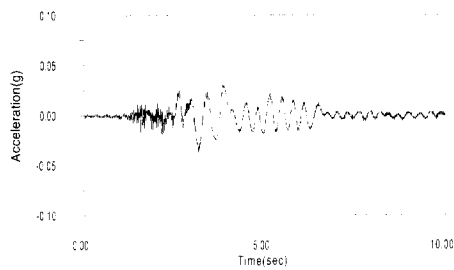
그림 10 가속도 수준별 최대 변위응답, 장방향변위

0.05g 및 0.1g의 입력에 대한 A3 기둥 상부에서의 가속도 및 변위 응답 시간이력을 각각 그림 11~14에 각각 나타내었다. 수평방향 가속도응답 시간이력에서 초기의 약 3초 구간은 탄성응답을 나타내기 때문에 입력지진과 유사한 파형을 나타낸다. 3초 이후 큰 변위가 발생하여 강성이 저하된 구간에서는 입력지진과의 고진동수 성분이 매우 감소하였다.

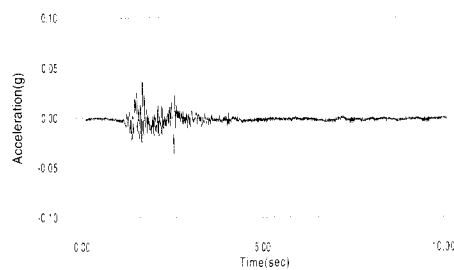
그러나, 암반지반 조건에 대한 실험에서와 같이 진동대의 기계적 진동에 의해 발생된 고진동수 성분이 일부 추가되었다.⁽⁴⁾



(a) 장방향(x)

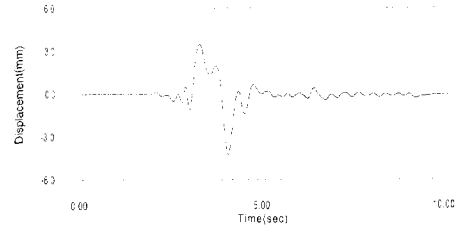


(b) 단방향(y)

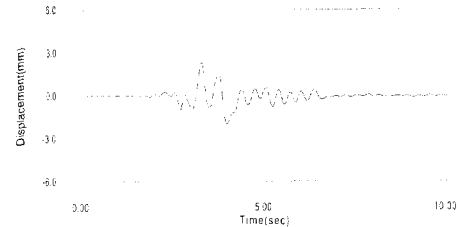


(c) 연직방향(z)

그림 11 0.05g 입력 시 축소모델의 가속도응답 시간이력

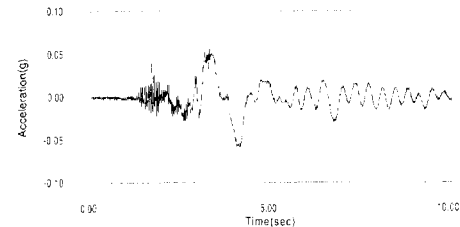


(a) 장방향(x)

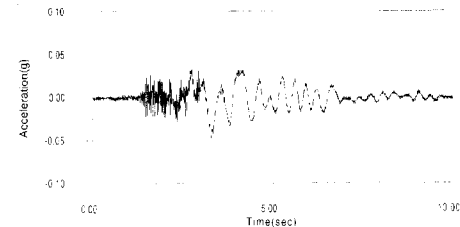


(b) 단방향(y)

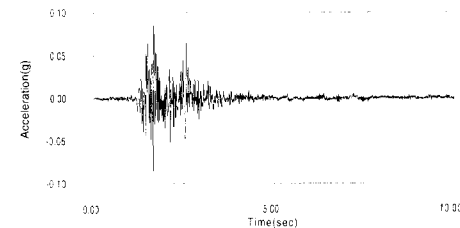
그림 12 0.05g 입력 시 축소모델의 변위응답 시간이력



(a) 장방향(x)

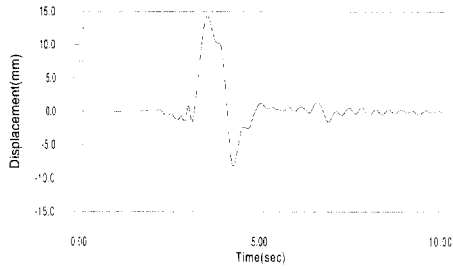


(b) 단방향(y)

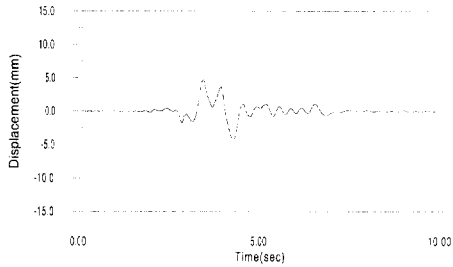


(c) 연직방향(z)

그림 13 0.1g 입력 시 축소모델의 가속도응답 시간이력

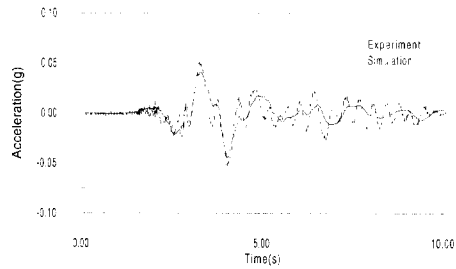


(a) 장방향(x)

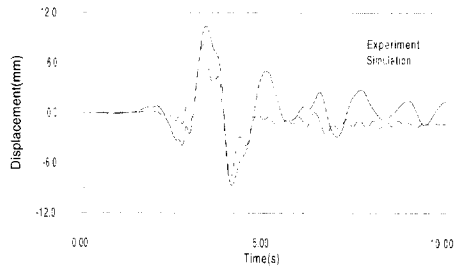


(b) 단방향(y)

그림 14 0.1g 입력 시 축소모델의 변위응답 시간이력



(a) 가속도 응답



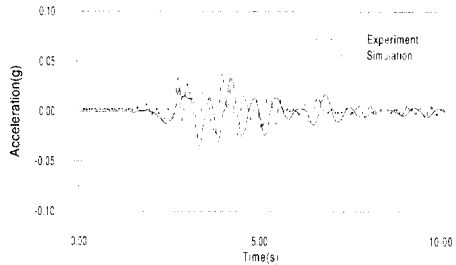
(b) 변위응답

그림 15 0.08g 입력에 대한 C2 기둥의 장방향(x) 응답

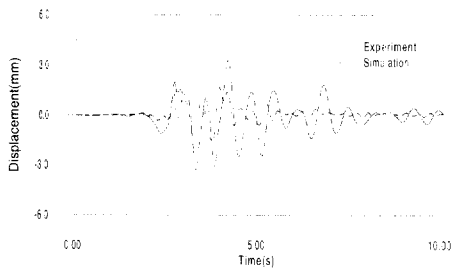
3. 비선형 지진해석

비선형 해석에는 축소모델을 1자유도의 1절점계로 모델링 하였다. 운동방정식 중 복원력 특성은 목조 프레임의 수평내력에 관한 이력특성 실험결과와 이를 모사한 개량형 Double Target 모델을 이용하였다.⁽⁵⁾ 감쇠비는 이력곡선으로부터 구한 동가 점성 감쇠비를 사용하였으며 그 값은 장방향의 경우 27%, 단방향의 경우 13%이다.

최대 지반가속도가 0.08g인 1방향 수평성분 각각의 지진입력에 대한 축소모델의 실험결과와 해석결과를 비교하였다. 그림 15~16은 C2 기둥에서의 장방향 및 단방향 가속도 응답과 변위응답을 각각 비교한 것이다. 그림에서 가속도 및 속도 응답은 장방향에서는 비교적 잘 일치하고 있으나 단방향의 경우 차이를 보이고 있다. 또한 최대변위가 발생한 이후에는 해석결과가 실험결과에 비해 비교적 장주기 응답을 보여주고 있다. 최대 변위응답의 크기는 비교적 잘 일치하여 해석에 의한 장방향의 최대 변위 응답은 10.4 mm로 실험에 의한 값 8.2 mm에 비해 2 mm 정도 크게 나타났으며, 단방향의 경우 해석에 의한 최대 변위응답은 3.2 mm, 실험에 의한 값은 2.2 mm로 해석에 의한 값이 1 mm 정도 크게 나타났다.



(a) 가속도 응답



(b) 변위응답

그림 16 0.08g 입력에 대한 C2 기둥의 단방향(y) 응답

그림 18은 해석결과로부터 구한 장방향 및 단방향의 하중-변위 이력을 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 장방향의 경우 비선형 구간에서 큰 변위가 발생되었으며 단방향의 경우에는 거의 선형구간

에서 거동하였음을 알 수 있다.

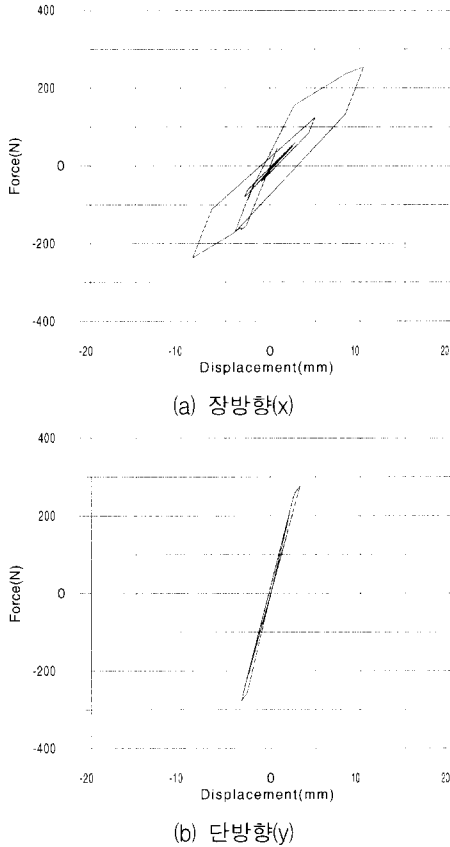


그림 17 0.08g 입력에 대한 축소모델의 하중-변위 이력곡선, Double Target 모델

4. 결 론

연약지반 상에 위치한 우리 나라 전통 초가삼간의 내진 성능 평가를 위한 지진실험을 수행하였다.

신선한 소나무를 이용하여 1/4 축소모델을 제작하였으며, Imperial Valley 지진파를 입력으로 사용하였다. 실험 결과 및 비선형 지진해석 결과를 분석하여 도출된 결론은 다음과 같다.

- (1) 초가삼간의 탄성한계 내의 고유진동수는 장방향이 1.66 Hz, 단방향이 1.76 Hz으로 추정되었다. 탄성한계 내의 감쇠비는 양 방향 모두 약 7%이다.
- (2) 수평방향의 가속도응답은 목조 프레임의 비선

형·비탄성 거동 특성으로 인하여 입력에 비해 감소한다. 연직방향의 가속도응답은 입력에 비해 약간 증가한다.

- (3) 전통 초가삼간은 저진동수 특성으로 인하여 저진동수가 지배적인 연약지반의 지반운동에 대하여 매우 취약하다. 입력 가속도 수준이 증가함에 따라 구조물의 변위응답은 급격히 증가하며, 입력 지진가속도 0.25g에서 파괴되었다. 따라서 가옥의 노후도 및 지반파괴에 의한 붕괴가능성의 증대 등을 고려하면 역사지진에 나타난 경주지역의 지진은 가속도 0.25g 또는 MMI 진도 VIII 이하로 추정된다.
- (4) 비선형 지진해석에 사용된 개량형 Double-Target모델은 우리 나라 전통 초가삼간의 지진 시 거동평가에 효과적으로 사용할 수 있다.

참 고 문 헌

1. Ohsaki, Y., "The Effects of Local Soil Conditions upon Earthquake Damage," *Proceedings of Specialty Session 2 Seventh Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Mexico, 1969.
- 2.鈴木祥之, 藤原梯三, "神戸市中央区における木造建物の被害", 1995年兵庫縣南部地震 木造建物の被害, 日本建築學會近畿支部, 1995.
3. 서정문, 최인길, 전영선, 이종립, 신재철, 허택영, "고대 민가의 구조 및 목조 프레임의 수평내력에 관한 연구", 한국지진공학회 논문집, 제1권, 제2호, 1997.
4. 서정문, 최인길, 전영선, 이종립, 신재철, "전통 초가삼간 가옥의 내진성능 평가 실험(I) : 압반지반 조건", 한국지진공학회 논문집, 제1권 제4호, 1997.
5. 서정문, 최인길, 전영선, 이종립, 신재철, "수평 교번하중에 대한 초가삼간 목조 프레임의 이력 특성 평가", 한국지진공학회 논문집, 제1권 제3호, 1997.
6. 한국고속철도공단, 경부고속철도 제12공구 노반 신설 기타공사 지질조사보고서, 1994.
7. 세창지질콘설탄트(주), 경주 우주로알맨션 신축부지 지질조사보고서, 1990.
8. 세창지질콘설탄트(주), 경주 우주주택 APT 신축부지 지질조사보고서, 1991.