

전통 초가삼간 가옥의 지진응답특성 실험

Experimental Study on the Seismic Response Characteristics of a Traditional Three-bay-straw-roof House

서 정 문¹ 최 인 길² 전 영 선¹ 이 중 립³ 신 재 철⁴ 허 태 영⁵
Seo, Jeong-Moon Ckoi, In-Kil Choun, Young-Sun Lee, Jong-Rim Shin, Jae-Chul Heo, Taek-Young

ABSTRACTS

Many uncertainties are found in the evaluation of historical earthquake records. The seismic response characteristics of a three-bay-straw-roof house which is a typical form of residence in ancient period is quantitatively estimated. Two 1:4 scaled models are used in the test. Real earthquake time histories for rock and competent soil conditions are used.

1. 서론

건물, 교량, 원전 등 중요한 산업시설의 내진설계 수준을 구조물의 중요성이나 수명 등을 고려하여 적절한 수준으로 결정하는 것은 매우 중요하다. 일반적으로 설계지진 수준을 결정하는 데에는 지진의 크기에 따른 재현주기 또는 연 발생확률로 표시되는 지진재해도 곡선이 사용된다. 현재까지 우리 나라는 강진기록이 전무하여 지진재해도 분석은 주로 역사지진 기록 및 미국 동부의 감쇄식에 의존하고 있다. 과거 수행된 지진재해도[1,2,3]에 대한 분석결과, 전문가의 평가결과에 많은 편차를 보이며 전반적으로 많은 보수성과 불확실성을 발견하게 되었다.

역사문헌을 살펴보면 현대까지 지진시 가옥의 붕괴 및 이로 인한 인명의 손실을 입은 대지진 기록은 10여개 정도가 있다. 이 중에서 4개 정도가 신라시대에 경주지역에서 발생하였고, 4개 정도가 조선시대에 전국 및 일부 지역에서 발생하였다[1]. 경주 지역은 분지지형이며 모래, 자갈 등 충적층이 비교적 발달한 곳이다. 우리 나라의 경우 20세기 이전의 옛 도읍지였던 경주, 개성, 서울 등을 제외한 대부분의 지역은 표토층의 두께가 수 m 내외에 불과하여 일반적으로 암반지반으로 간주할 수 있다. 조선시대 가옥파괴 피해는 암반 지반상의 가옥에 관한 것으로 판단된다.

1 한국원자력연구소 책임연구원, 정회원
2 한국원자력연구소 선임연구원, 정회원
3 전력연구원 부장, 정회원
4 충남대학교 교수
5 전력연구원 일반연구원, 정회원

가옥 파괴에 관한 역사지진 기록에 대한 진도 평가결과는 전문가에 따라 MM진도로는 8-10까지 편차를 보인다. 이러한 진도의 편차를 최대 지진가속도로 환산하면 경험식의 종류에 따라 최소 0.14 g에서 0.63 g, 최대 0.52 g에서 2.75 g 정도까지 매우 큰 편차를 보인다.

지진시 지반의 조건 및 가옥의 구조, 노후도 등에 따라 가옥의 피해 정도는 매우 상이하다. 지반 조건에 따라 지진파의 특성이 변화하며 그에 따라 건물의 거동이 변하는 것은 이미 오래전에 규명된 사항이다. 지반조건에 따른 피해 현상은 관동 지진[4], 고베 지진[5] 등 대규모 지진시 자주 목격되었다. 고베 지진시 목조 가옥의 노후도에 따른 피해정도를 분석한 결과[6] 흰개미 등의 피해를 입은 가옥은 건물의 사용년수에 관계없이 모두 파괴되었다. 우리 나라의 고대 가옥구조는 사회적 계층 및 지역에 따라 큰 차이를 보이며 일본의 전통적인 농가와는 구조상 큰 차이를 보인다[7,8,9]

본 연구는 우리 나라 지진재해도의 불확실성을 저감하기 위한 연구의 일환으로 수행되었다. 가옥의 손상에 관한 역사지진의 크기를 평가하기 위해서는 위에서 기술한 바와 같은 사항을 종합적으로 고려하여야 한다. 이를 위하여 조선시대 초가삼간 가옥에 대한 1/4 축소모델 2개를 제작하여 사용하였다. 지반조건은 암반 및 경주지역 지반으로 가정하고, 이와 유사한 지반조건을 갖는 외국의 계기지진 자료를 이용하였다. 사용 재료는 강도손상이 거의 없는 소나무를 사용하였다. 지진가속도 수준을 단계별로 증가시켜 가옥이 파괴에 도달할 때까지 시험을 수행하였다.

2. 전통 초가삼간의 구조 및 축소모델의 특성

근대까지 우리 나라는 농업을 주로한 농경사회로서 도읍지를 제외한 대부분 지역의 가옥은 초가집이었다. 도읍지에서도 잦은 외적의 침입으로 인한 경제적 어려움으로 인해 초가집이 많았던 것으로 알려져 있다. 조선시대 이전의 가옥 구조에 대해서는 구체적으로 파악할 수 있는 자료가 거의 없는 실정으로 조선시대의 가옥으로부터 유추할 수 밖에 없다. 농경사회의 주 구성원은 일반 소농으로서 이들의 가옥구조는 초가삼간이며, 현존하는 고려말의 가옥과 농경사회의 특수성을 고려한다면 조선시대의 가옥과 그 이전의 가옥구조에는 큰 차이가 없다[7,8]. 일본 에도시대의 농가는 목조 뼈대가 조거식(또는 2단량)으로 되어 있어 지진하중에 대한 내력이 크며, 지붕의 무게가 상대적으로 적고, 뼈대의 이음 방식이 다른 점이 우리 나라의 초가삼간과 큰 차이를 보인다[9].

조선시대 및 그 이전의 가장 일반적인 가옥은 일반 소농이 살던 전퇴가 있는 초가삼간이었다[7,8]. 초가삼간은 그림 1과 같이 방 2개, 부엌 1개로 이루어져 있다[10]. 뼈대는 기둥과 도리, 보 및 인방으로 구성된다. 부재의 크기는 비교적 크며 재료는 소나무가 사용되었다. 각 부재간의 연결에는 쇠못, 볼트 또는 금물 등이 사용되지 않고, 전단벽이나 사재가 전혀 설치되어 있지 않다. 뼈대를 형성하고 있는 기둥-보, 기둥-도리의 연결은 그림 2와 같은 사재맞춤이, 기둥-인방의 연결은 그림 3과 같은 장부맞춤이 일반적으로 사용되어 왔으며 도리에 비해 보에 큰 부재가 사용되었다. 또한 칸막이용 벽체로서 뼈대에는 심벽이 설치되어 있는데, 심벽은 주로 수수깡, 싸리나무 등으로 짜여 있으며 그 위에 흙을 발랐다. 지붕은 서까래 위에 산자를 덮고 5~7cm 정도의 보토를 한 다음 최종적으로 30~45cm 정도의 뗏집으로 만든 이엉을 얹어 구성하였다. 지붕의 무게는 약 170 kg/m^2 로서 매우 무거운 편이다. 주추는 일반적으로 다듬지 않은 판석형의 돌이 사용되었다. 기둥의 하단은 주추의 요철에 맞추어 그랭이질을 하여 밀착시켰다.

인공질량 방법에 의한 상사법칙을 적용하여 1/4 축소모델을 제작하였으며, 모델 제작에는 소나무가 이용되었다. 각 부재의 연결부도 동일한 비율로 제작되었다. 지붕의 층 자중과 벽체 자중의 1/2 및 부가 인공질량을 환산하여 그림 4와 같이 지붕에 등분포 질량으로 작용시켰다.

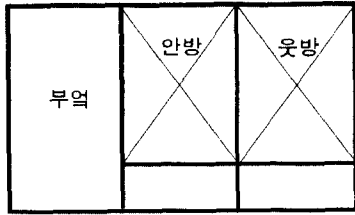


그림 1. 추가삼간의 평면배치

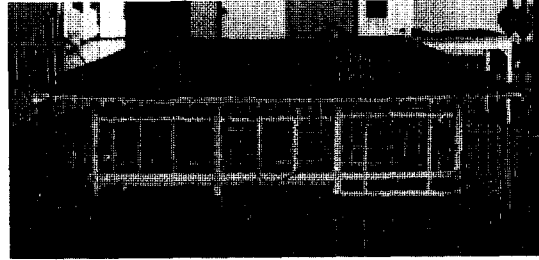
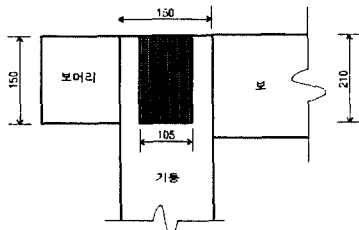
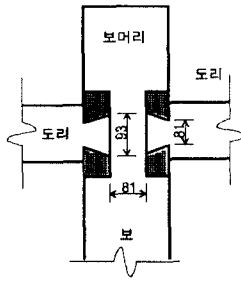


그림 4. 추가삼간의 1/4 축소모델



(a) 측면도



(b) 평면도

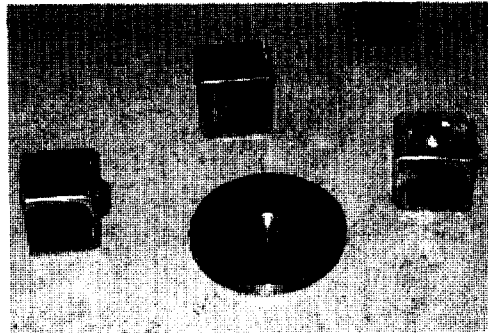


그림 5. 현지용 볼베어링 형태

그림 2. 기둥-보의 사개맞춤

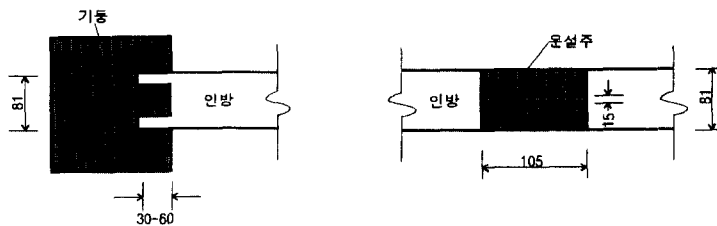


그림 3. 기둥-인방 및 인방-문설주의 연결

총 무게는 930 kg으로서 15 cm(w) x 60 cm(l) x 2.5 cm(t)의 철판이 주로 사용되었다. 기둥과 주추의 경계는 완전한 힌지로 가정하고 그림 5와 같은 볼베어링을 특별히 제작하여 이용하였다. 기둥 하단의 경계를 힌지로 가정한 이유는 그랜지질로 인한 마찰계수의 증가 및 질량 중심이 유연한 뼈대구조의 상부에 놓이게 됨으로서 기둥의 거동이 미끄러짐보다는 힌지 거동에 가까울 것이라고 판단하였기 때문이다. 시험모델은 진동대에 고정된 10 mm 철판위에 설치되었다.

3. 축소모델의 시험

본 시험에 사용된 진동대는 기계연구원이 보유하고 있는 MTS진동대이다. 진동대의 하중용량은 최대 30톤, 자유도는 6자유도, 가진 가속도 성능은 수평 및 수직 각각 1.5 g 및 1.0 g, 최대 가진 진동주파수는 50 Hz이다. 구조물의 응답을 측정하기 위하여 9개의 가속도계(B&K4370)와 ±25 mm 용량의 LVDT 6개(Tokyosokki 5개, Kyowa 1개)를 그림 6과 같이 설치하였다.

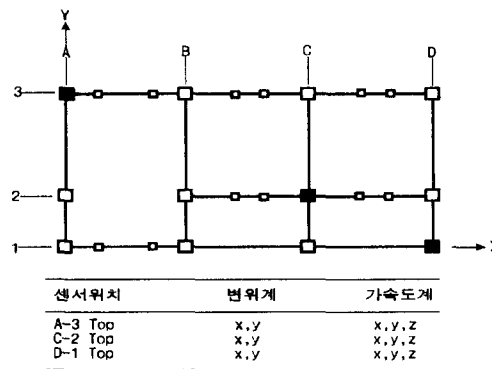


그림 6. 계측장비 부착위치

입력 지진으로는 미주 동부지역의 Nahanni 지진(1985.12)과 미국 서부에서 발생한 규모 6.5의 Imperial Valley 지진(1979.10)으로서 Array No. 5에서 계측된 지진파를 사용하였다. Nahanni 지진은 비교적 고진동수 성분이 지배적인 지진기록으로 암반지반 조건을 모사하기 위하여 사용하였으며, Imperial Valley 지진은 연약지반 조건을 모사하기 위하여 사용하였다.

Imperial Valley의 지반은 20 m 두께의 충적층이 기반암 상에 놓이며, 폭이 수 km 이내인 계곡이다. 충적층의 전단파속은 180 ~ 360 m/sec 이다. 한편 경주시는 양산단층 상에 위치하며 폭 3 ~ 4 km인 분지지형이다. 경주시의 지반은 형산강, 북천 및 남천 등의 하천이 범람하여 만든 충적층 지반으로서 지표에서 약 20 m 까지는 호박돌 및 모래, 자갈층으로 구성되어 있고, 그 아래는 약 5 m 두께의 풍화암과 기반암인 화강암으로 구성되어 있다. 경주시내의 시추자료를 근거로 충적층의 전단파속을 추정된 결과는 약 186 ~ 350 m/sec이며 이는 Imperial Valley의 지반 자료와 매우 유사하다.

상사법칙을 적용하여 시험에 사용된 수평방향 지진파는 각각 그림 7 및 그림 8과 같으며, 시험에는 최초 10초간의 기록만 사용하였다. 이들 그림에서 보는 바와 같이 Nahanni 지진기록의 경우 고진동수 성분이 지배적임을 보여주고 있으며, Imperial Valley 지진의 경우 저진동수 영역에서의 크기가 일반적인 지진파에 비해 크게 나타남을 알 수 있다. 이는 이 지진이 발생한 지역의 지질특성을 잘 나타내주고 있다.

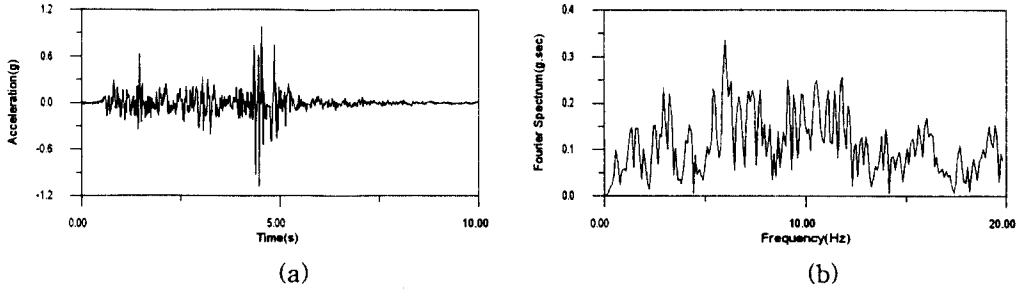


그림 7. Nahanni 지진; (a) 수평성분 시간이력 (b) Fourier 스펙트럼

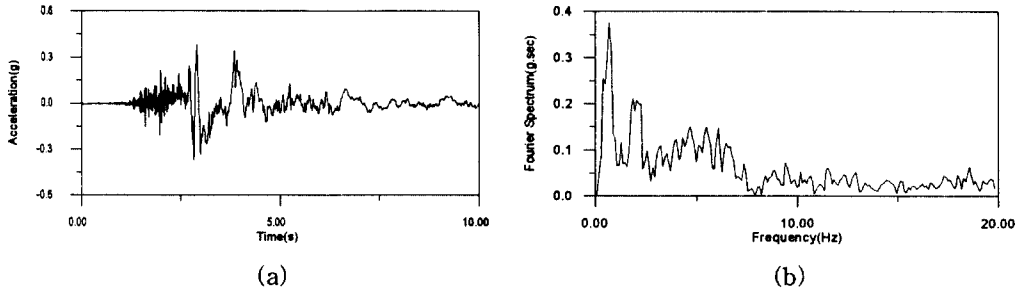


그림 8. Imperial Valley 지진; (a) 수평성분 시간이력 (b) Fourier 스펙트럼

시험시 3방향 지진파를 동시에 입력시켰으며, 연직성분은 수평성분의 2/3로 하였다. 고유진동수 및 감쇠비 측정을 위해 랜덤 진동시험을 수행하였다.

4. 실험결과 및 분석

4.1 고유진동수 및 감쇠비

축소모델의 고유진동수를 측정하기 위하여 시험전 및 각 시험 단계후에 백색잡음(White Noise)파를 이용하여 미세진동에 의한 진동수 측정을 하였다. 이때 사용된 백색잡음의 크기는 0.025g를 사용하였으며 수평 2방향 및 연직방향에 대하여 별도로 수행하였다. 시험전 수행한 랜덤진동 시험 결과를 이용하여 작성한 전달함수를 그림 9에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 장방향(도리 방향) 및 단방향(들보 방향)의 고유진동수가 모델 1의 경우 각각 약 3.32 Hz, 3.52 Hz, 모델 2의 경우 각각 약 3.32 Hz, 4.29 Hz로 유사하나 단방향이 약간 크게 나타났다.

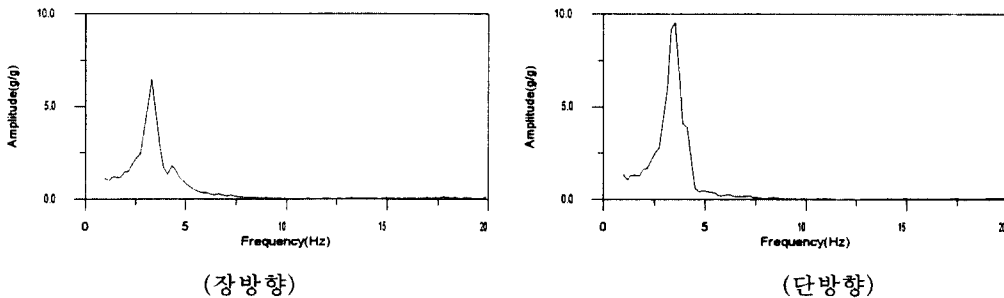


그림 9. 백색잡음 입력에 대한 초가의 전달함수

일본의 목조가옥에 대한 고유진동수 측정결과[11] 미동계측에 의한 고유진동수는 실제 구조물의 고유진동수의 약 1.4배 정도로 나타났다. 이는 목조의 강성이 작고 비선형성이 매우 커서 미동계측에 의한 값이 실제보다 큰 값을 보이기 때문이다. 초가삼간을 구성하는 뼈대의 수평강성은 일본의 가옥보다 매우 작을 뿐만아니라 큰 비선형성을 보이고 있기 때문에[10] 실제 구조물의 고유진동수는 1 Hz 내외로 추정된다.

고유진동수 측정에 이용한 전달함수를 이용하여 축소모델의 감쇠비를 Bandwidth법을 이용하여 추정한 결과 양방향에서 약 7% 정도로 나타났다. 그러나 1:1 뼈대 모델에 대한 큰 변형상태에서의 감쇠비 측정결과는 단방향 뼈대의 경우 13%, 장방향 뼈대의 경우 27% 정도로서 장방향 뼈대의 감쇠비가 단방향 뼈대에 비해 2배 정도 크게 나타났다[12]. 따라서 실제 구조물의 감쇠비는 13% 이상으로 추정할 수 있다.

시험 전 및 각 단계 시험 후 수행한 백색잡음 입력에 대한 고유진동수 측정결과 고유진동수의 변화는 거의 없었다. 이는 랜덤진동 자체의 크기가 매우 작아 한정된 변형 한계내에서 측정된 결과에 의한 것으로 추정된다.

4.2 지반 조건별 응답

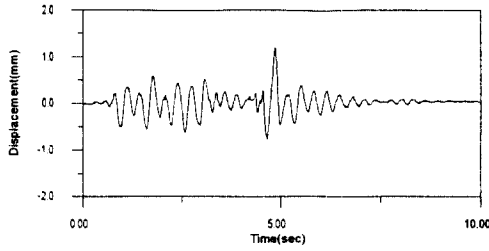
서로 다른 지반조건에 대한 축소모델의 가속도 및 변위 응답을 측정하였다. 최대가속도 0.1g에 대하여 A3 지점의 기둥상부에서 측정된 응답의 최대값을 표 1에 대표적으로 나타내었다.

표에서 x방향은 장방향을 나타내며 y방향은 단방향을 나타낸다. 표에서 동일한 최대 지반가속도에서의 입력지진에 따른 응답 특성을 잘 나타내 주고 있다. 수평방향 가속도 응답은 비교적 고진동수 성분이 큰 Nahanni 지진의 경우가 더 크지만, 수평방향 변위 응답은 저진동수 성분이 우세한 Imperial Valley 지진의 경우가 더 크다. 그리고, 수평방향 가속도 응답은 입력가속도 수준에 비해 모두 작게 나타났다. 이는 목조 가옥의 고유진동수가 매우 작고 비선형성이 매우 커서 발생하는 현상이다. 수직방향의 가속도 응답은 입력에 비해 다소 증가하는 경향을 보이고 있다.

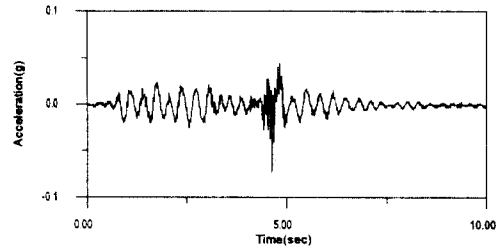
표 1. 입력지진별 기둥 상부(A3)에서의 최대응답

입력	방향	최대가속도(g)	최대변위(mm)
Nahanni Earthquake	x	0.073	1.19
	y	0.056	1.09
	z	0.091	-
Imperial Valley Earthquake	x	0.063	14.29
	y	0.048	4.79
	z	0.086	-

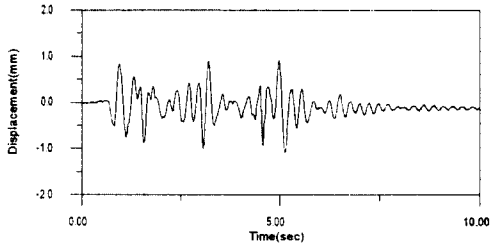
두 지진입력에 대한 기둥 상부 A3에서의 x, y 방향 변위 및 가속도 응답의 시간이력을 그림 10과 11에 각각 나타내었다.



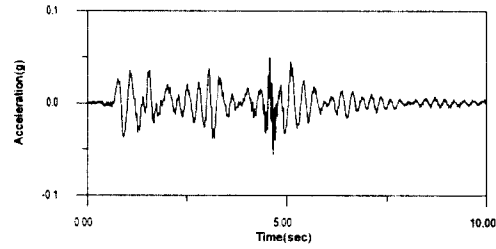
(a) x 방향변위 시간이력



(b) x 방향 가속도 시간이력

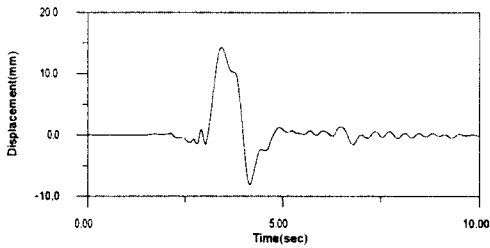


(a) y 방향변위 시간이력

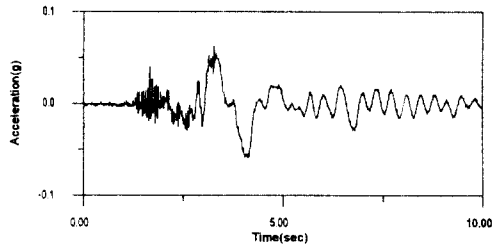


(b) y 방향 가속도 시간이력

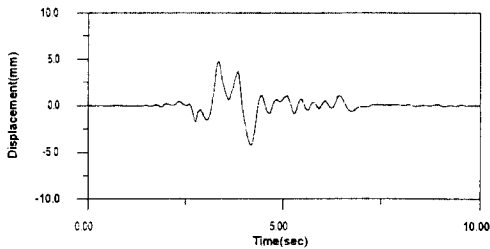
그림 10. Nahanni 지진에 대한 A3 기둥상단의 응답 시간이력



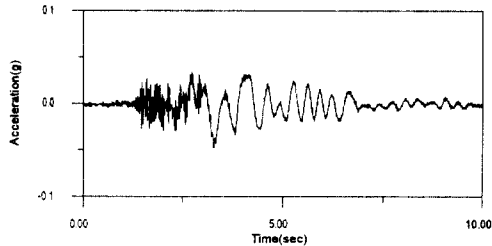
(a) x 방향변위 시간이력



(b) x 방향 가속도 시간이력



(a) y 방향변위 시간이력



(b) y 방향 가속도 시간이력

그림 11. Imperial Valley 지진에 대한 A3 기둥상단의 응답 시간이력

5. 결론

강도손상이 매우 적은 소나무로 제작된 전통 초가삼간 목조가옥의 1/4 축소모델에 대한 지진 응답 특성 실험결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 우리 나라 전통 초가삼간 가옥은 유연성이 매우 큰 구조로서 고유진동수는 1 Hz 정도, 감쇠비는 13% 이상으로 추정된다.
- 수평성분 가속도응답은 입력에 비해 감소하며 이는 입력 에너지를 사개맞춤의 변형이 흡수하기 때문이다.
- 목조가옥은 암반지반 보다 연약지반상에 놓일 때 지진에 매우 취약하다.
- 초가삼간은 비선형성이 매우 큰 유연구조이기 때문에 비선형해석이 필수적이며, 가옥의 손상 정도는 가속도보다는 수평변위의 크기에 따라 판별되어야 한다.
- 역사지진의 평가시에는 지진파의 성분 및 강진 지속시간, 지반조건, 가옥의 노후화 및 해충등에 의한 강성 및 강도의 저하, 목수의 숙련도 등이 종합적으로 고려되어야 한다.

참고문헌

- [1] 한국에너지연구소(1982), 한반도의 지진위험도, KAERI/RR-380/82.
- [2] 한국에너지연구소(1986), “원자력발전소 내진설계 기준 타당성 검토보고서 (산포부지)”.
- [3] 한국전력공사, 원자력발전소 안전성점검 연구(외부사건분석분야), 최종보고서 제2권, 1993.
- [4] Y. Ohasaki(1969) "The effects of Local Soil Conditions upon Earthquake Damage", Proc. Specialty Session 2 Seventh International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico City, Mexico.
- [5] Yoshiyuki Suzuki, Teizo Fujiwara, Masayoshi Nakashima, Michel Bruneau, Satoshi Iwai, and Akio Kitahara(1995), "Overview of Building Damage and Damage to Wood Houses from the 1995 Hyogoken-Nambu Earthquake", Journal of Natural Disaster Science, Vol. 16, No. 2.
- [6] Tadashi Doi, Hiroyuki Kitamoto, and Lu Heng Jian(1996), "Damage to Wooden Houses Due to the 1995 Great Hanshin-Awaji Earthquake Disaster", Proceedings of 11th World Conference on Earthquake Engineering, Paper No. 856.
- [7] 김홍식(1992), 한국의 민가, 한길사.
- [8] 신영훈(1983), 한국의 살림집, 열화당 미술선서 37, 열화당.
- [9] 杉山英男(1996), 地震と木造住宅, 丸善株式會社.
- [10] 서정문, 최인길, 전영선, 이종립, 신재철(1997), “전통 목조 가옥 프레임의 정적 전단내력 실험”, 한국지진공학회 논문집(심사중).
- [11] 田圭植(1992), “小田原市における建築物の震害豫測に関する研究”, 博士學位論文, 東京大學工學系建築學.
- [12] 서정문, 최인길, 전영선, 이종립, 신재철(1997), “전통 목조가옥 프레임의 전단 이력거동 특성 평가”, 한국지진공학회 논문집(심사중).