

철근콘크리트 건물의 지진응답해석에 관한 연구

A Study on the Seismic Response Analysis of Reinforced Concrete Building

한 상 훈* 이 상 호**

Han, Sang-Hoon Lee, Sang-Ho

ABSTRACT

The objective of present paper is to provide the fundamental data of earthquake-resistance design such as estimating the resistance capacity and evaluating the design seismic load.

With one bending failed building, it is checked and compared between real damaged result and analysis value by means of static and dynamic analysis using multi-degree of freedom system. In this analysis, four kinds of the earthquake waves are used.

Through elasto-plastic seismic response analysis of reinforced concrete building, we could estimate dynamic behaviour of building.

Keywords: elasto-plastic seismic response analysis, dynamic behaviour, earthquake-resistance capacity

1. 서론

1.1 연구배경 및 목적

건물의 내진설계는, 사용연한 이내에 발생하는 지진력에 대하여 건물의 사용성을 보장하고, 대지진 시라도 건물의 취성파괴를 방지하여 인명피해를 줄이는데 그 목적이 있다. 兵庫縣南部地震으로 크게 피해를 입은 건물이 5만동 이상이었던 일본의 경우, 1970년 이전에 건축된 건축물은 전단파괴를 많이 입었으나, 1970년대 이후의 건축물은 전단에 대한 규정의 강화로 전단파괴보다는 부재의 휨항복등의 피해를 입은 건축물이 많았다¹⁾.

한편, 국내에서는 1996년 12월 13일의 영월지진 이후 설계용 지진력에 의한 동적거동을 파악하여 건물전체 및 구조부재의 응력, 변형을 내진안전성 범위내로 제한하는 등의 내진규정 강화에 관한 인식이 고조되고 있다. 따라서 본 연구는, 일본 兵庫縣南部地震에서 기둥 및 보 부재의 휨파괴를 입은 철근콘크리트건물 1동을 대상으로, 탄소성지진응답해석을 통하여 건물의 동적거동을 파악하고, 건물의 피해현황과 해석결과를 비교 검토하여 내진설계를 위한 기초자료를 제공하는 데에 그 목적이 있다.

1) * 부산대학교 건축공학과 석사과정

2) ** 정희원, 부산대학교 건축공학과 조교수, 공학박사

1.2 연구방법

1995년 1월 17일 발생한 일본의 兵庫縣南部地震시 피해를 입은 학교건물중에서 골조가 철근콘크리트 라멘조이고 기둥 및 보부재가 휨항복한 1동을 대상으로 하여, 전단형 다질점계의 탄소성 지진용담 해석 프로그램의 동적해석을 통해 해석결과와 피해상황을 비교 검토한다.

입력지진동은 4종류(Kobe파, El Centro파, Taft파, Hachinohe파)의 기록지진동으로, Kobe파 이외의 지진파는 최대가속도의 크기를 Kobe파와 동일하게 증폭시킨 것도 사용한다.

2. 구조물의 해석

2.1 대상건물 및 피해의 개요

해석대상 건물은 1978년 준공된 兵庫縣立西宮高等學校 특별교실동으로, 구조형식은 철근콘크리트조로서 장변방향은 순라멘, 단변방향은 일부 내진벽을 가진 라멘이다. 규모는 지상 4층 옥탑 1층(층고 : 3.6m)의 12×2 span이고, 사용된 전층의 콘크리트 압축강도(F_c)는 225kg/cm^2 , 철근은 주근이 SD35 ($f_y=3500\text{kg/cm}^2$), 띠근(帶筋)이 SR24 ($f_y=2400\text{kg/cm}^2$)이다(건물의 1층 평면도는 그림1에, 기둥과 보의 단면은 표1 및 표2에 나타낸다).

지진동에 의한 피해는 주로 3층에서 주두, 주각부분의 휨 및 전단파괴(사진1, 2)가 두드러졌으며, 1, 2층 보단의 압축 파괴(사진3)도 발생했다. 기둥 주근의 항복에 의한 소성거동으로 3층에서 잔류변형이 최대 $16/1000\text{ rad}$ 정도 생겼다. 내진벽의 영향으로 단변방향의 피해는 적었다²⁾.



사진1. ㉔-A, 3F 주두부의 파괴

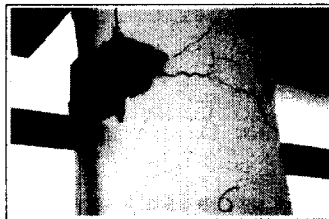


사진2. ㉔-C, 3F 기둥상부의 파괴



사진3. ㉔-B, 2F 보단부의 압축파괴

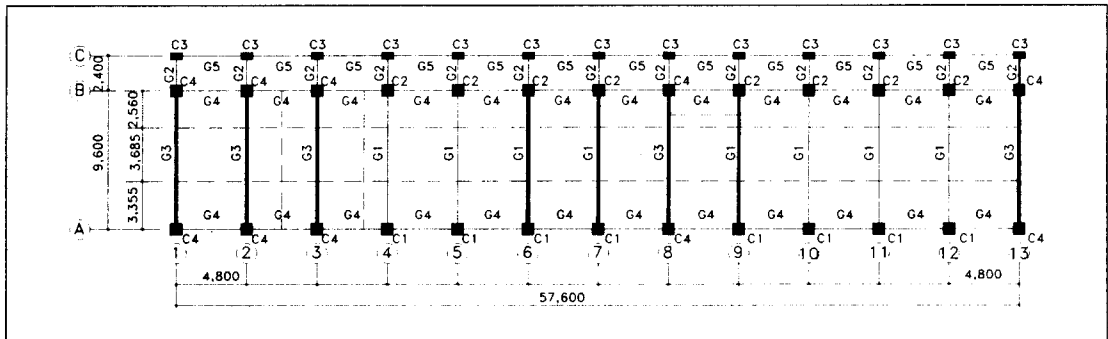


그림1. 1층 평면도

* 단변방향 내진벽의 두께: 15cm(①,③,⑥,⑦,⑧,⑨), 18cm(②,⑬)

** 단위는 mm, 방위는 그림상단이 북쪽.

표1. 기둥단면 리스트

	C1	C2	C3	C4
4 3 2 층	600×650*1) 	600×650 	600×300 	600×650
	12-D22*2) (13ø@100)	12-D22 (13ø@100)	6-D19 (9ø@100)	12-D22 (13ø@100)
1 층	600×650 	600×650 	600×300 	600×650
	14-D22 (13ø@100)	14-D22 (13ø@100)	8-D19 (13ø@100)	14-D22 (13ø@100)

*1)부재 크기(가로×세로) *2)배근: 주근(후프)

표2. 보단면 리스트

	G1	G2	G3	G4	G5
R 4 층	400×850 	500×350 	400×700 	400×700 	250×700
	7-D25*1) (3-D25)	3-D25 (3-D25)	4-D22 (4-D22)	3-D22 (3-D22)	3-D19 (3-D19)
3 층	400×850 	500×350 	400×850 	400×700 	250×700
	7-D25 (4-D25)	3-D25 (3-D25)	4-D22 (4-D22)	4-D22 (4-D22)	3-D19 (3-D19)
2 층	400×850 	500×350 	400×850 	400×700 	250×700
	8-D25 (5-D25)	4-D25 (4-D25)	4-D22 (4-D22)	5-D22 (4-D22)	5-D19 (5-D19)

*1)배근: 상단근(하단근)

멘트 M_c 는 보통 콘크리트를 사용한 실험치의 평균적인 값인 다음 식으로 나타낸다³⁾.

$$M_c = 1.8\sqrt{F_c} \cdot Z_e + ND/6 \quad (1)$$

여기서, F_c : 콘크리트의 압축강도(kg/cm²), Z_e : 균열전의 단면계수(cm³),

N : 축방향력(kg), D : 부재 춤(cm)

휨항복강도는 (2)식과 같다.

$$M_y = \{g_1q + 0.5\eta_0(1 - \eta_0)\} F_c \cdot bD^2 \quad (2)$$

2.2 해석 방법

대상 건물의 골조를 모델화하고 횡하중분포를 역삼각형으로 가정하여 평면골조형으로 정적 탄소성 해석을 행한다. 해석결과(휨과 변형관계)로부터, 균열전 항복점, 초기 강성, 항복후 강성을 구한다. 해석에 사용되는 골격곡선(skeleton curve)은 Trilinear model로 가정하고 여기서 건물의 피해가 큰 장변방향을 전단형 다질점계로 동적해석한다.

2.2.1 골조의 모델화

골조의 모델은 순수 구조 부재만을 고려하여 이상화한다. 라멘선은 각 부재의 중심으로 하고, 절점은 회전변위, 각층 바닥은 수평병진운동의 변위 자유도를 갖는다. 부재단의 강역길이는 보의 경우 연결된 기둥폭의 1/2에서 보춤의 1/4을 뺀 길이로, 기둥은 보춤의 1/2에서 기둥폭의 1/4을 뺀 길이로 한다.

정적하중 및 지진력 입력의 위치는 각층 슬래브의 중심에 작용하고, 평면골조의 수평연결은 각층 바닥위치에서 직력만 전달하는 것으로 가정한다. 각층의 중량은 고정하중과 지진력 계산용 적재하중³⁾을 더한 값으로 R층 736.34t, 4층 714.82t, 3층 717.96t, 그리고 2층은 722.39t이다.

2.2.2 부재의 모델화

부재의 중앙부는 탄성(휨+전단)이고 소성변형이 모두 부재 양단부에 배치된 탄소성 회전스프링에 집중한다고 가정하여 휨과 변형의 관계를 나타낸다.

부재단면의 인장측에 첫 휨균열이 생길 때의 모

$$g_1 = (\text{인장, 압축철근간 거리}) / D, \quad q = p_t \cdot \sigma_y / F_c \quad (p_t = a_t / bD)$$

$$\eta_0 = N / bDF_c \quad (\text{축력비})$$

여기서, a_t : 인장철근(m^2), b : 부재폭(cm), σ_y : 주근의 항복강도(kg/cm^2)

균열에 의한 항복시 강성저하율 a_y 는 (3)식과 같다.

$$a_y = (0.043 + 1.64np_t + 0.043a/D + 0.33\eta_0) \left(\frac{d}{D}\right)^2 \quad (3)$$

여기서, n : 탄성계수비, a : 전단스팬길이(m)

2.2.3 정적해석과 층강성의 평가

가력은 수평일방향으로 하며 하중의 분포는 역삼각형 분포로 가정한다. 가력의 변위증분은 0.05cm, 최상층의 수평변위 제어치는 1/100로 한다. 각층의 균열강도는 최상층부터 144.25t, 211.59t, 259.51t, 288.34t이고, 항복강도는 최상층부터 각각 322.19t, 559.35t, 739.02t, 825.40t이다(그림2).

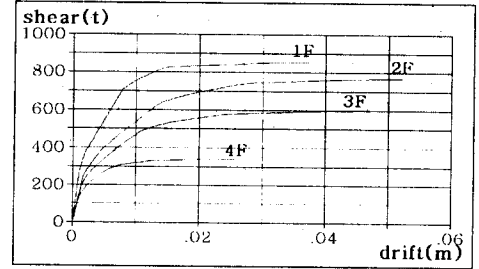


그림2. 층별 층간변위-전단력

2.2.4 동적해석

탄소성 복원력특성모델을 포함한 비선형 방정식을 순차적으로 적분하는 수치적분법을 이용하여, 앞 시간 스텝에서 다음 스텝까지의 미소간격 Δt (0.005초) 사이에 변화하는 외력에 대해, 이 미소구간 내에서는 구조물의 복원력특성 강성은 변하지 않는 것으로 간주하여, 운동방정식의 해를 구한다.

감쇠의 모델화는 속도에 비례하는 점성감쇠력으로 나타내므로 (4)식과 같다.

$$\{FD\}_i = [C_0] \cdot \{V\}_i \quad (4)$$

위 식에서 속도 벡터에 비례하는 순간감쇠 매트릭스 $[C_0]$ 는 (5)식으로 나타낸다.

$$[C_0] = DC[M] + DK[K_0] \quad (5)$$

여기서, DC, DK는 각각 질량 매트릭스 $[M]$ 과 순간강성 매트릭스 $[K_0]$ 에 비례하는 감쇠매트릭스의 비례상수이다. 그리고, 초기탄성상태의 1차 진동 모드에 대한 감쇠정수는 5%로 가정한다.

1) 복원력의 모델화

소성변형이 진행되는데 따라서 골조의 강성이 저하되거나, 또는 반복 가력으로 나타나는 구조물의 복원력특성으로 철근 콘크리트 부재의 이력거동을 비교적 잘 나타내는 Takeda model⁴⁾을 이용한다.

이 모델은, 초기 탄성강성을 사용하고 가력방향 최대응답 점을 지향하는 Clough(bilinear) model 과 비교하여, 균열에 의한 부재의 강성저하를 고려하고, 대진폭 후의 소진폭 반복은 가력시 외측 이력루프의 정점을 지향한다(그림3).

항복내력과 항복점의 강성저하율(K_2/K_1) 및 탄성강성에 대한 항복 후 강성의 비(K_3/K_1)를 입력한다.

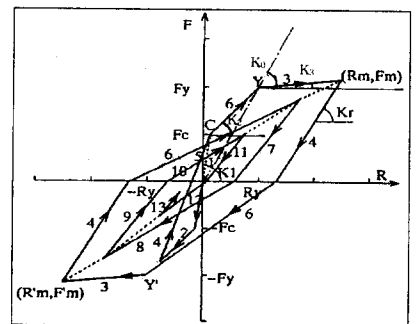


그림3. Takeda model

2) 지진동의 입력

본 연구에서는, 각각 다른 지진규모 및 지반 조건에서 얻어진 기록지진동 파형으로 구조물의 동적특성을 시간력 응답해석을 통해 검토하기 위해, 대표적인 4 종류의 기록 지진동(그림4)을 입력한다. 일본 Kobe의 NS성분(최대 818gal, 1995.1.17)은 0.25~0.4초 및 1초전후의 장주기 성분이 탁월한 지진파이고, 미국 서해안 경질지반에서 기록된 El Centro의 NS성분(최대 326gal, 1940.5.18)과 Taft의 NS성분(최대 153gal, 1952.7.21), 그리고 비교적 연약지반

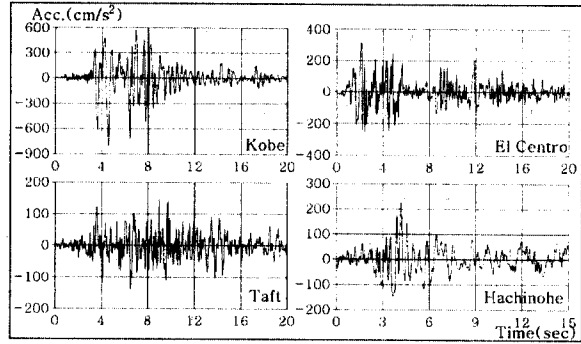


그림4. 사용 지진파의 지동가속도

에서 기록된 Hachinohe의 NS성분(최대 225gal, 1968.5.16)은 각각 원파 및 최대 가속도를 Kobe파와 동일하게 증폭시킨 파를 사용, 총 7개의 파형을 입력한다.

3) 다질점계의 동적해석

정적 탄소성해석에서 얻은 층강성을 바탕으로 전단형 다질점계의 동적해석을 수행한다. 우선, 한 층의 질량은 슬래브의 중심에 집중한다고 가정하고 수평외력에 대하여 하층의 방향으로만 변위가 생기는 전단거동형 모델을 설정하여 입력지진동에 대한 시간에 따른 응답을 얻기위해 건물을 부재수준으로 모델링한다. 가정한 복원력특성에 따라 초기 탄성강성과 균열발생 후 및 항복 후 강성저하에 따른 상태별 강도변화를 입력하고, 수치적분상수($\beta=1/6$)와 적분시간(0.002sec)을 설정한다. 정적해석에서 산출한 건물의 고유주기는 1차가 0.387초, 2차가 0.139초, 3차가 0.092초, 4차는 0.076초이다. 입력지진동의 시간은 20초로, 단 Hachinohe파는 15초로 한다.

3. 해석결과 및 고찰

3.1 구조물의 동적특성

Kobe파를 입력한 시간력 응답해석 결과의 각 층별 층간변위-층전단력도를 그림5에 나타내고, El Centro, Taft, Hachinohe파의 가속도를 증폭시켜 입력하여 얻은 결과 중 3층의 층간변위-층전단력도를 Kobe파와 비교해서 그림6에 나타낸다.

해석의 결과에서 잔류변형량의 각층별 양상으로 보아 Kobe와 Hachinohe파는 어느 정도 대상 건물의 지진피해를 설명해 주고 있으며, Kobe파가 훨씬 큰 응답을 나타내고 있다.

Taft와 El Centro파는 초기에 저층의 층항복에 의해 응답이 한쪽으로 치우치면서 소성역에 진입하여 변위량이 증가함을 보인다. 그러나, 각각의 증폭시키지 않은 원파를 적용한 경우는 탄성적인 거동 및 이력루프에 따른 안정된 결과를 얻는다.

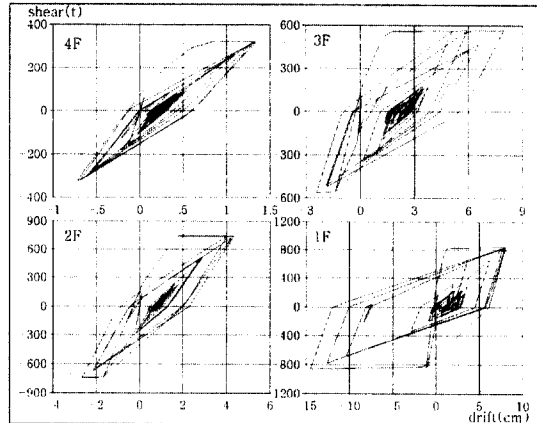


그림5. Kobe파의 층별 층간변위-층전단력도

구조부재의 파괴형상은 저층에서 상층으로 향
 북이 진행되었고, 지진동의 가속도가 커지면서 최
 대 층간변형각은 상층에서 발생하였다.

3.2 구조물의 변형특성

지진파의 종류와 가속도 증폭에 따른 응답량의
 변화를 표3에 나타내었다. 이상의 해석에서 살펴
 본 지진하중을 입력한 철근콘크리트 건물의 변형
 특성은 건물의 고유주기에 따라 지진파의 진동수
 와 가속도의 크기에 의해 거동형이 달라짐을 알
 수 있었다.

구조형식, 부재, 재료 등의 연성으로 결정되는
 구조물의 소성율이 과대하지 않고 전층의 부재각이 1/100이하일 때, 그 건물의 내진성은 충분하다고
 여기므로, 대상건물은 설계용 지진력(국내 기준은 0.12g)에 대하여는 충분한 안정성을 갖는다. 그러나
 과대한 지진력에 대해서는 저층의 층붕괴를 막을 수 있는 전단저항기구를 필요로 한다.

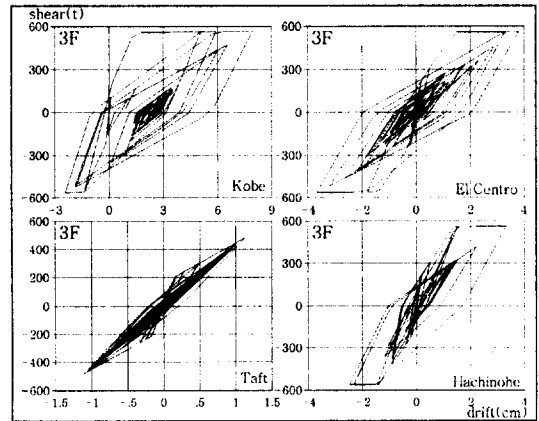


그림6. 지진파별 층간변위-층전단력도(3F)

표3. 동적해석의 최대응답치

	최상층변위(cm)	밀면전단력(t)	최대층간변위(cm)	응답상대가속도(m/s ²)
Kobe	최대 21.28 (--) ^{*1)}	842.32 (--)	7.94③ ^{*2)} (--)	10.74④ (--)
	최소 -20.01 (--)	-857.82 (--)	-14.49① (--)	-8.44④ (--)
El Cen- tro	최대 23.18 (5.15)	855.35 (826.32)	13.46① (1.76②)	9.84③ (6.67④)
	최소 -9.69 (-8.76)	-832.01 (-829.33)	-3.75① (-2.86②)	-10.75④ (-4.87④)
Taft	최대 4.25 (1.50)	825.91 (385.62)	1.49① (0.59②)	10.18① (2.48④)
	최소 -25.02 (-1.88)	-876.35 (-558.41)	-22.20① (-0.68②)	-11.61④ (-2.65①)
Hachi- nohe	최대 15.88 (2.53)	842.94 (580.73)	8.30① (0.93②)	7.24④ (3.14④)
	최소 -30.96 (-3.22)	-885.53 (-685.53)	-26.06① (-1.10③)	-10.08④ (-4.05④)

*1) 수치는 증폭파(원파)의 응답치 *2) ○안의 숫자는 층수.

4. 결론

이상의 연구에서 지진피해를 받은 건물의 탄소성 지진응답해석을 수행하여 지진파의 특성에 의한
 피해임을 설명하였다. 그리고 지진파의 종류에 따라 건물의 동적거동 및 파괴의 양상이 달라지며, 시
 간력해석으로 구조물 전체 또는 부재의 내진성능 및 파괴 진전 상황을 관찰, 예측할 수 있음을 알았
 다. 부가하여 평면골조형의 동적해석으로 피해의 원인을 모색하고, 국내외의 내진설계 기준을 비교하
 는등 국내 기준 검토에 대한 연구가 계속 진행되어야 할 것이다.

참고문헌

- 1) 渡辺史夫, 「兵庫縣南部地震におけるRC建物の舉動」, 콘크리트工學, Vol.33, No.11, 1995, p.12
- 2) 日本建築學會, 「兵庫縣南部地震鐵筋콘크리트造建築物の被害調査報告書」, 東京, 1997, p.108
- 3) 日本建築學會, 「鐵筋콘크리트構造 計算規準・同解説」, 1988改定, 東京, 1991
- 4) 青山博之, 「鐵筋콘크리트建物の終局強度型耐震設計法」, 1版, 技報堂出版, 東京, 1990, p.454