

兵庫県南部地震における神戸市灘区の建物の応答解析 (その2 上部構造物の応答解析)

Kangning LI¹・日比野 浩¹・久保 哲夫²・亀田 弘行³

- 1研究員 理化学研究所・地震防災フロンティア研究センター (〒673-0433兵庫県三木市三木山2465-1)
2教授 理化学研究所・地震防災フロンティア研究センター (〒673-0433兵庫県三木市三木山2465-1)
名古屋工業大学工学部 (〒466-8555名古屋市昭和区御器所町)
3教授 理化学研究所・地震防災フロンティア研究センター (〒673-0433兵庫県三木市三木山2465-1)
京都大学防災研究所 (〒611-0011京都府宇治市五ヶ庄)

This paper presents the analytical study on a 5-story reinforced concrete apartment building. The building located in the area severe-affected by the 1995 Hyogoken-Nanbu Earthquake. However, it was observed only minor cracks on shear walls and non-structural members after the earthquake. The analysis by sophisticated 3-D frame and member models is carried out to investigate the building responses and the damage pattern. The input ground motion is obtained from the soil and foundation response analysis in 2-dimensional model and in simplified model. The building response analysis results in only crack in beams and columns of main frames and some damage in shear walls. The results generally agree with the observed building behavior.

Key Words : 3-D frame, multi-spring model, pushover analysis, dynamic response, damage mechanism

1. はじめに

兵庫県南部地震によって被害を受けた建物についてこれまで数多くの解析研究が内外の研究者によって行われてきた^{1),2),3)}。しかしながら、軽微な被害に止まった建物に対しては比較的注目が少なく解析研究が行われるケースが稀である。このような建物を解析しその地震挙動を究明するのは耐震設計上重要な意味をもつことはいうまでもなく、解析手法及び入力推定方法の信頼性を確認するのにも有効である。

本研究では、軽微な被害に止まった神戸市灘区にあるRC造5階建てのA集合住宅を対象にした。解析では、上部構造物を立体フレームモデル化し、部材レベルの非線形性状を表現する3次元部材モデル^{4),5)}を用いる。杭基礎の効果を支持バネで表現する。入力地盤と基礎の連成応答解析で得られた基礎頭部の応答加速度⁶⁾を使用する。解析結果を検討し、実際の被害と比較することによって、解析モデルの信頼性及び地盤・基礎応答解析で推定された建物への入力の妥当性を確認する。

2. 解析対象建物

解析対象の建物はRC造5階建ての集合住宅で、図-1に示すように東西方向(震災の帯状地域の延長方向)に細長い長方

形の平面配置である。軒高は約15m、鉄筋はすべて丸鋼が使われている。構造体のメインフレームは梁一柱からなり、南北方向(短辺方向)に1スパン、東西方向(長辺方向)に8ユニット12スパンとなっている。短辺方向に戸境壁としてRC連層壁が配置され、長辺方向の壁は、北側の窓と南側のバルコニーへのアクセスドアによって大きく開口し、腰壁、袖壁あるいは垂壁となっている。メインフレームの梁、柱の寸法を表-1、壁部材の寸法・配筋を表-2、代表的な部材の断面形状と配筋を図-2に示す。

対象建物は耐震設計基準が大きく改定された1971年以前に建設された。地震後の被災調査によると、戸境壁および階段室壁にはせん断ひび割れがあったが、メインフレームの梁一柱材には顕著な被害はなく、基礎の被害も見られなかった。周辺に大きく被災された建物とは対照的であった。

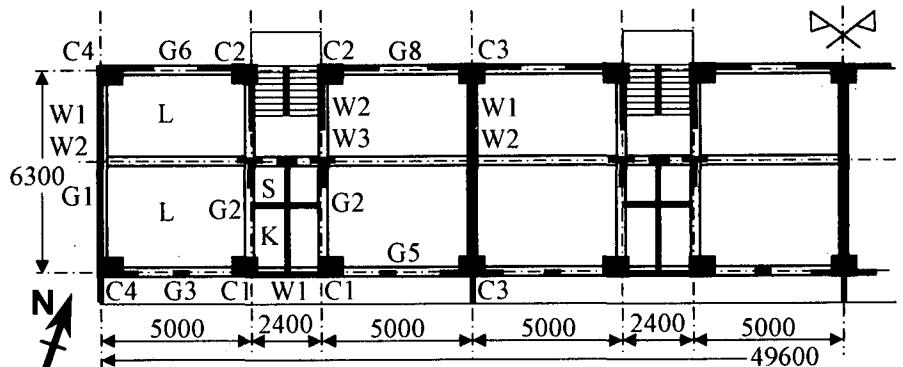


図-1 解析対象建物の基準階平面図

表-1 梁・柱部材断面寸法(cm)

梁	G1,G3,G5~8	G2	G4	柱	
屋上梁	25×75	30×75	25×45	階	B×D
5F梁	25×60	30×60	25×45	5	35×35
4F梁	27×60	30×60	27×45	4	40×35
3F梁	27×60	30×60	27×45	3	45×40
2F梁	30×60	30×60	30×50	2	55×40
基礎梁	30×150/90	30×140	30×90	1	60×40

表-2 壁部材断面寸法(mm)

壁	W1	W2	W3
厚さ	120	150	150
横筋	φ9@250	φ9@200	φ9@300
縦筋	φ9@250	φ9@200	φ9@200
配置	Single	Single	Double

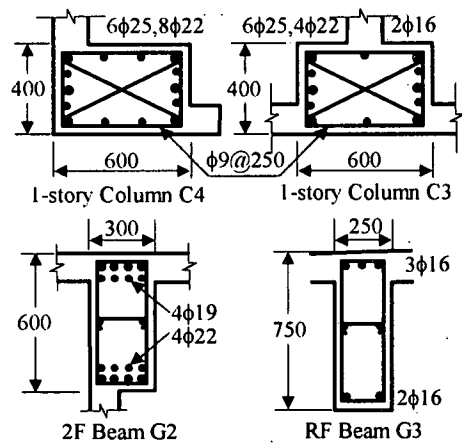


図-2 梁・柱部材断面形状と配筋

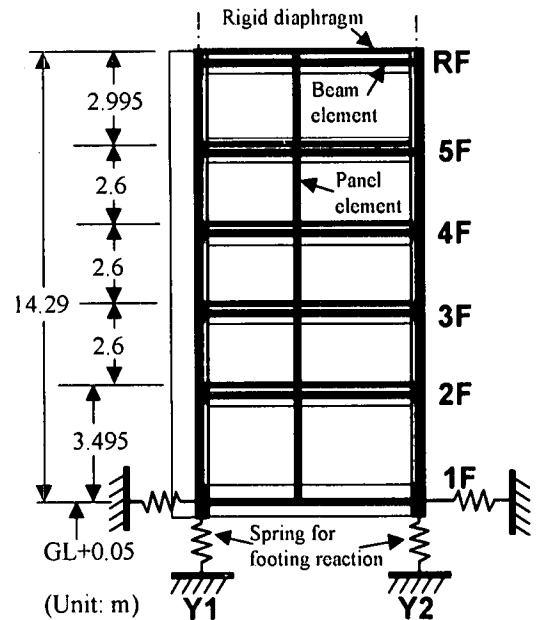


図-3 フレームモデル (X1,X4,X7,X10,X13)

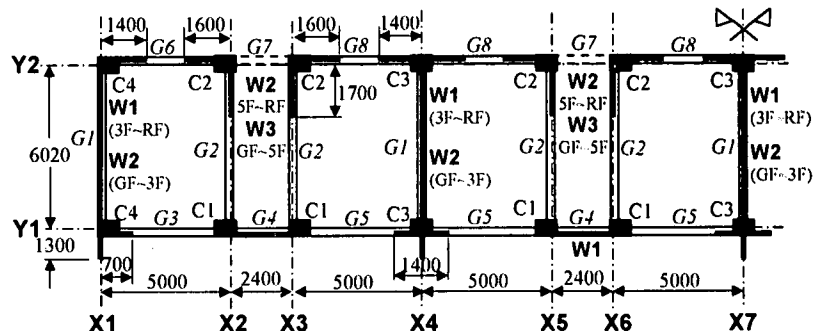


図-4 解析に考慮したメインフレームと梁・柱・壁部材

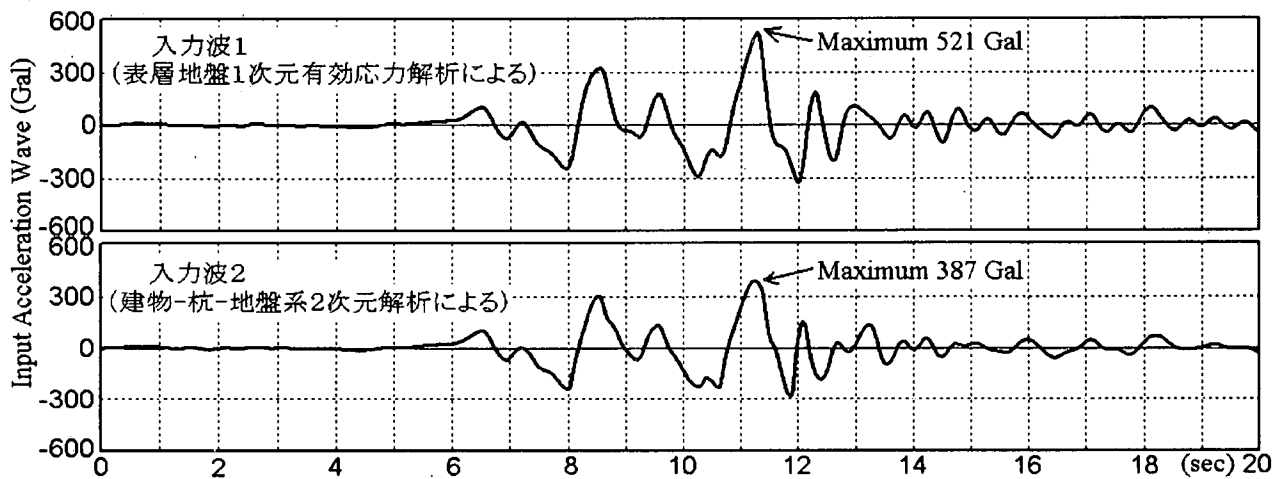


図-5 入力加速度波形

3. 解析モデルと解析方法

解析においてはメインフレームの梁-柱及びメインフレームに配置されたRC壁を考慮して図-3, 図-4に示すフレームモデルを用いた。杭基礎の効果は

支持バネによって表現し、解析モデルに取り入れた。杭基礎に直接載らない階段付近の雑壁の剛性を無視した。床スラブがフロア全体に繋がっているため、2階以上各階で剛床を仮定した。部材のモデル化方法は文献4)、5)に準じ、次の通りとする。

梁部材はフレームの面内に一軸の曲げせん断を受

けるものとして材端回転曲げバネによって非線形曲げ挙動を考慮した。梁のせん断変形及び基礎梁の軸方向変形を弾性と仮定した。柱と壁部材(鉛直部材)は曲げ・軸方向変形を非線形として考え、断面を分割したMSモデル又はファイバーモデルを用いて軸力と曲げの相互作用を表現する。鉛直部材のせん断変形も非線形挙動を考慮し、せん断バネで表現する。フレームの軸線は壁部材の芯に置いて、梁と柱材の軸線からのズレは解析に考慮した。

部材および材料の復元力特性モデルは文献4)、5)と同様なものとした。なお、鉛直荷重(自重と使用荷重)による部材の初期応力を取り入れて部材の復元力履歴への影響を考慮した。鉄筋およびコンクリートの材料特性に関するデータが欠けていたが、鉄筋はすべて丸鋼SR30、降伏強度 300 N/mm^2 を仮定した。コンクリートは圧縮強度 20 N/mm^2 、ヤング係数 $2.0 \times 10^4\text{ N/mm}^2$ とし、引張強度を無視した。

入力加速度として1階の基礎梁芯レベル(GL+0.05 m)に入れた。平面には細長い長方形の建物を考慮して入力は短辺方向の水平成分のみにした。入力加速度波形は、表層地盤の1次元有効応力解析と、建物一杭一地盤系の2次元平面ひずみ解析によって得られた結果を用いた(図-5、文献6)。2つの入力の波形は似しているが、入力のピーク加速度の値にはかなり差があり、それぞれ521Gal(1次元解析)と387Gal(2次元解析)である。

応答計算は逐次積分法Newmark β 法を用いた。建物の一次弾性固有周期が0.33秒に対して数値積分の時間刻みを1/200秒にした。入力の継続時間は20秒でトータル計算ステップ数は4000ステップとなる。減衰は瞬間剛性比例型の粘性減衰としてすべての部材に対して一律に5%の減衰定数を使った。

4. 解析結果及び比較検討

図-5に示す2つの入力波に対して上部建物の応答解析はほぼ類似する結果となっている。すなわち、メインフレームの梁と柱には降伏破壊はなく、曲げひび割れ程度の損傷に止まっている。解析結果は被災調査結果とはほぼ一致しており、推定された入力の妥当性を検証できた。

建物の応答時刻履歴を図-6と図-7に示す。最初から5秒までの応答は小さく、図に示すのは5秒から20秒までの屋上階の相対応答変位、加速度、速度および一階の層せん断力の時刻歴である。11秒まではほぼ弾性挙動で、両入力波に対する建物の応答にはほとんど違いはなかった。それ以降は両入力波に対する応答結果に大きく差が生じる。12秒付近にピーク応答が発生し、その後変位応答には残留変形がわずかであるが出ている。これは何らかの破壊と剛性低下が発生したことを意味する。

その破壊を検討するために、動的応答の最大層間変形角の分布と静的漸増載荷による層せん断力一層間変形角関係を比較する。図-8には実線で漸増載荷による層せん断力一層間変形角関係を示す。その上

に、破線と白抜きマークでRC壁のせん断ひび割れ、せん断破壊および鉛直部材の鉄筋圧縮降伏が生じ始める層間変形角を表示する。静的漸増載荷解析の結果では、最初の剛性低下は曲げひび割れによるもので、その後層間変形角0.25%付近でRC壁のせん断ひび割れ、0.5%の変形角付近からRC壁のせん断破壊が生じている。これに対して、動的応答解析では、2次元解析で得られる入力波においては最大層間変形角は0.2~0.3%、1次元解析で得られた入力波は0.3~0.5%に達している。2つの入力波に対する解析結果は共にRC戸境壁のせん断ひび割れを予測しているが、後者は低層部の壁のせん断破壊も生じている。そのため、両者の応答には差がつく。解析対象とした建物のケースでは、その応答と破壊の程度は入力に依存することを示している。

5. 結び

兵庫県南部地震の被災地域にある軽微な被害を受けたRC造集合住宅について上部建物の応答解析を行った。建物のメインフレームの梁と柱部材には余力があり、無被害または曲げひび割れ程度に止まった。RC壁については、階段付近の壁W3を除いて壁は全部シングル配筋 $\phi 9 @ 250$ で少ない配筋のため、せん断ひび割れあるいは局所のせん断破壊が避けられなかった。解析結果は実際の被害とはほぼ一致した。解析モデルの信頼性及び地盤・基礎応答解析で推定された建物への入力の妥当性が確認できた。

謝辞: 本研究に際し、兵庫県から解析対象とした建物の資料をご提供いただいた。入力加速度波形は文献6)の解析結果を使用した。

参考文献

- 1) 田才晃・北田朋子: 柱が曲げ破壊した1995年兵庫県南部地震による被災RC造建物の被害分析、第10回日本地震工学シンポジウム、Vol.1, pp.345-348.
- 2) 勅使川原正臣、他: 兵庫県南部地震における被災地域での強震動特性と建物の解析、第10回日本地震工学シンポジウム、Vol.1, pp.315-320.
- 3) Y. Hayashi, et al.: Simulation analysis of building damaged in the 1995 Kobe Japan Earthquake, considering soil-structure interaction, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.28, No.4, 1999, pp.371-391.
- 4) Li, K.N., Kubo, T. and Ventura, E.C.: 3-D analysis of building model and reliability of simulated structural earthquake responses, *Proc. of Intl. Seminar on New Seismic Design Methodologies for Tall Buildings*, Oct. 1999, Beijing, pp. 34-41.
- 5) Li, K.N., et al: 3-D analysis of a RC frame-wall building damaged in the 1995 Hyogoken-nambu Earthquake, *Proc. of 12th WCEE*, Paper ID. 596, Jan-Feb 2000, Auckland.
- 6) 渦岡良介、他: 兵庫県南部地震における神戸市灘区の建物の応答解析(その1 地盤と基礎の応答)、構造物の破壊過程解析に基づく地震防災性向上に関するシンポジウム、March 2000.

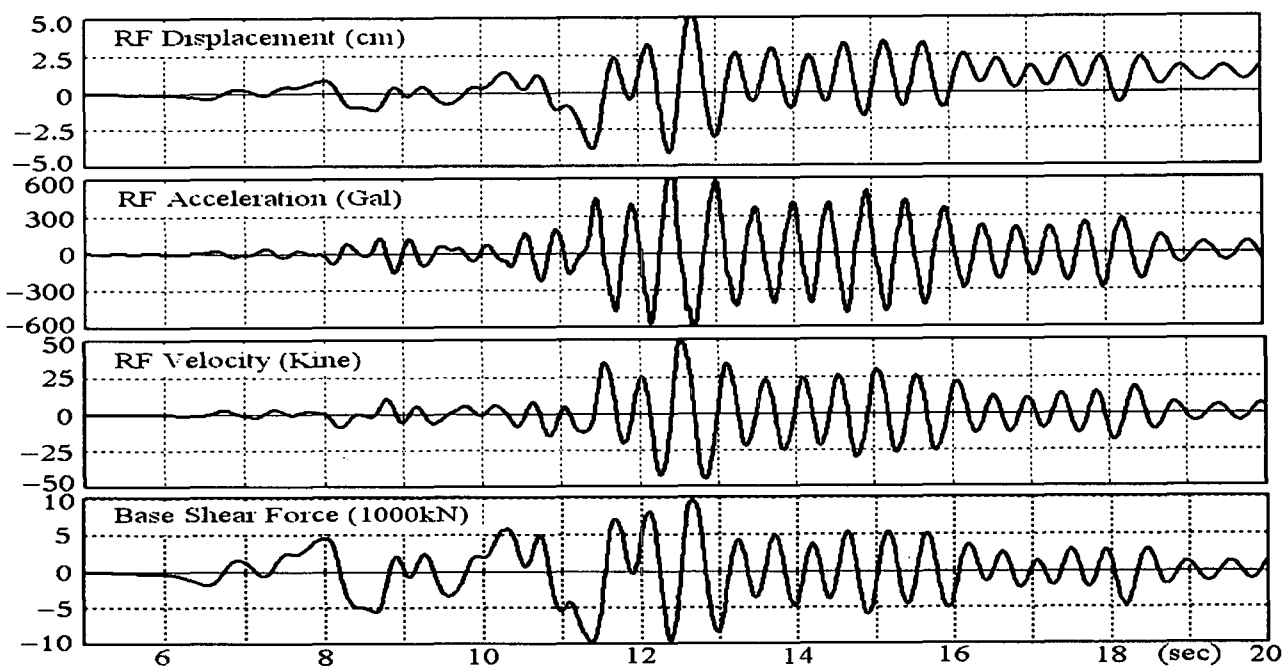


図-6 入力波1に対する建物の短辺方向の応答(基礎に対する相対変位、速度、加速度)

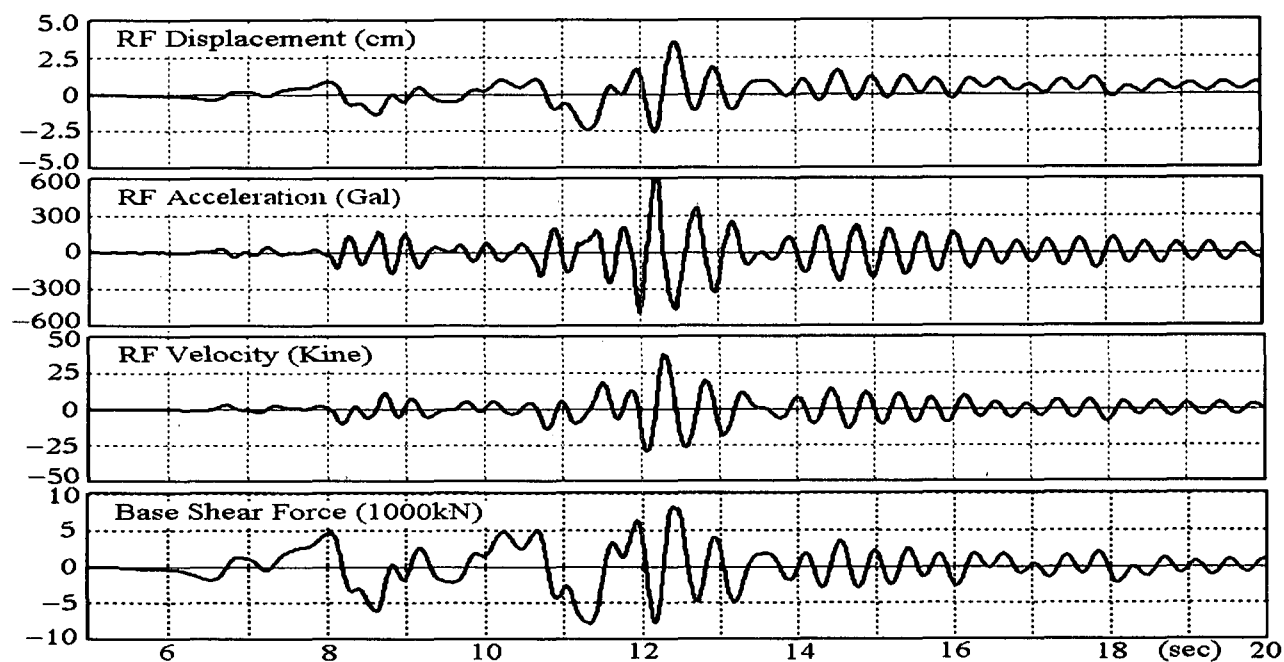


図-7 入力波2に対する建物の短辺方向の応答(基礎に対する相対変位、速度、加速度)

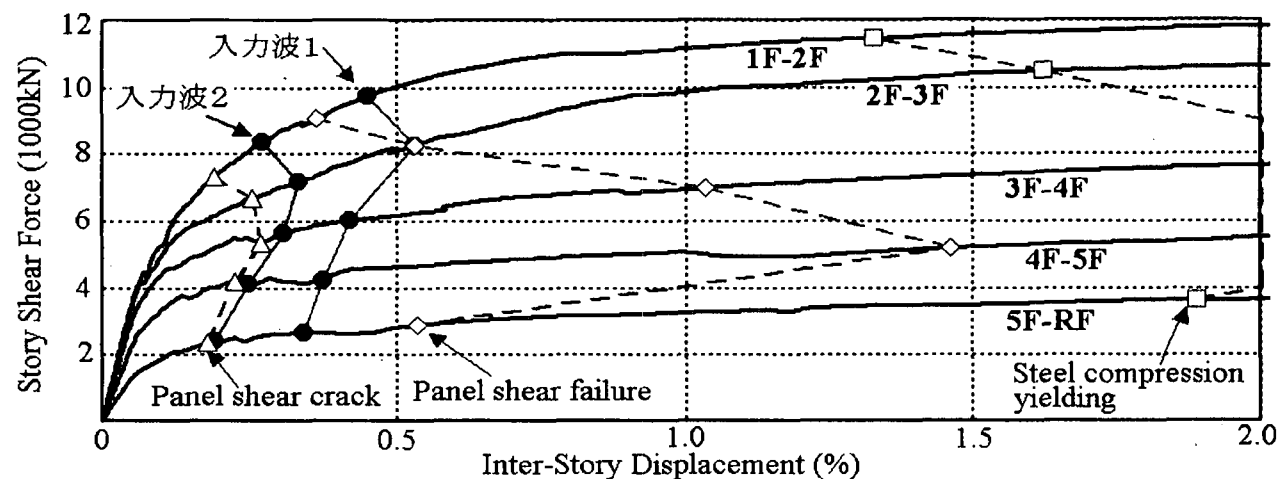


図-8 静的漸増載荷による層せん断力-層間変形角と動的応答最大層間変形角との比較