論文 耐力劣化モデルによる鉄筋コンクリート実大6層震動実験の解析

金 裕錫^{*1}·壁谷澤 寿海^{*2}·松森 泰造^{*3}·壁谷澤 寿一^{*4}

要旨: 2006年1月にE-ディフェンスで行われた鉄筋コンクリート実大6層建物に対する震動実験結果を再現する目的で3次元動的解析を行った。せん断破壊した腰壁構面の短柱および耐震壁に耐力劣化型モデルを適用して得られた解析結果は,実験結果の最大耐力および最大変位を過小評価したものの,ポストピーク領域の耐力劣化性状を表す履歴形状においては良好な対応関係を示した。本論文では,実大試験体の解析方法の詳細および解析結果と実験結果の破壊過程における対応関係を示す。

キーワード:実大震動実験,鉄筋コンクリート,短柱,耐震壁,耐力劣化,地震応答解析

1. はじめに

3次元震動破壊実験施設であるE-ディフェン スより2006年1月に鉄筋コンクリート実大6層 建物に対する震動実験が行われ,実験計画段階 で設けられた複数の目的に相当する貴重な実験 データおよび成果が得られた。本実大実験の目 的のうち解析的面では、「部材の耐力低下,層降 伏などを含む崩壊過程を最新の解析手法によっ て再現可能であるかどうかの確認」が目的とし て設けられており¹⁾²⁾,実験実施前から実大試験 体の特性把握および破壊過程予測を目的とした 予備解析が行われた³⁾。

予備解析では,耐力劣化性状の有無による部 材モデルの特徴および腰壁高さの評価による短 柱シヤースパン比の変化が試験体挙動に及ぼす 影響について検討が行われた。また,腰壁構面 と純フレームの間の剛性および耐力偏心により 生じる捩れ応答が耐震壁と短柱のせん断力分担 率に変化を齎し,終局的には試験体の破壊過程 にも影響を与えることを,直交構面である袖壁 の捩れ応答への影響を通じて明らかにした。

以上の予備解析結果および実験で観察された 試験体の挙動に基づき,試験体の破壊過程を再

*1 東京大学地震研究所研究員 工博 (正会員)
*2 東京大学地震研究所教授 工博 (正会員)
*3 防災科学技術研究所研究員 工博 (正会員)
*4 東京大学工学系研究科大学院生 工修 (正会員)

現する目的で3次元動的解析を行った。特に, せん断破壊した短柱および耐震壁に耐力劣化型 モデルを用い,実験結果から得られたポストピ ーク領域における耐力劣化性状や層崩壊の再現 を試みた。本報では,各構面に用いた部材モデ ルの詳細およびモデル化方法とともに破壊過程 における実験結果と解析結果の対応関係を示す。

2. 解析概要

試験体のモデル化における節点の位置を図-1に示す。各節点はX,Y,Z軸方向の水平成分 TX,TY,TZと各軸周りの回転成分RX,RY, RZの6自由度を有しているが,その中で同一層 における各節点の水平成分は,本解析で用いた 剛床仮定により床重心自由度(TX,TY,RZ)の従 属自由度とする。各階の重量は1.225MNとし, 各節点に支配面積の重量を求め集中質量として 振り分けた。自重による各部材の初期応力状態 に関しては鉛直部材の軸応力のみを考慮した。 また,図からわかるように全節点を柱とはりの 接合部に設けており,腰壁および袖壁の高さと 幅に相当する位置には節点を設けていない。し たがって,本解析では腰壁の高さおよび袖壁の 幅をそれぞれの周辺部材である側柱と境界ばり の剛域としてその影響を間接的に考慮すること とした。スラブおよび柱-はり接合部について はそれぞれ剛床および剛域の仮定でモデル化し た。支持条件としては,耐震壁および袖壁のせ ん断力および軸力の計測を目的で設置されたロ ードセルの剛性を無視し,基礎固定の仮定で解 析を行った。



数値積分法としては Newmark – β 法(β = 1/4) を用い、積分の時間刻み、 Δt は 0.01 秒とした。 また、減衰は瞬間剛性比例型で減衰係数を 0.03 と設定した。

試験体を構成する各部材のモデルとしては柱, はりおよび袖壁を線材でモデル化し,耐震壁の みを面材モデルを用いてモデル化した。特に, 本試験体のY方向は異種の構面で構成されてお り,**写真-1**で示すようにそれぞれ違う破壊モー ドを示していることから腰壁構面短柱および耐 震壁には耐力劣化型モデルを、純フレームの長 柱には材端ばねモデルを用いてモデルした。ま た、捩れ応答に影響を与える直交構面の袖壁に 対しては 3 軸の相互作用の考慮できるファイバ ーモデルを用いてモデル化を行った。次章で各 構面のモデル化に対する詳細を示す。また、モ デル化の際用いた試験体の詳細に関しては文献 ^{1) 2)}を参照されたい。



(a) 腰壁構面(X1)



(b) 耐震壁(X2) (c)長柱(X3) 写真-1 実験終了後(100%入力)の試験体様子

3. 各構面のモデル化

3.1 腰壁構面

腰壁構面短柱にはせん断挙動および耐力劣化 性状を考慮するため耐力劣化型柱モデル⁴⁾を適 用した。本モデルの特徴は、2つの節点を持つ1 本の線材を、塑性ヒンジ領域に相当する位置に 内部節点を設け3本の線材に分割した後、それ ぞれの線材を面材に変換し、線材では考慮でき ない平面応力-平面ひずみ関係に基づく2軸応 力状態から曲げー軸-せん断力の相互作用を考 慮していることである。また、コンクリートの 引張ひずみの影響によるコンクリート圧縮強度 の軟化効果から耐力劣化性状を考慮しているこ とが特徴として挙げられる。図-2にコンクリー トの圧縮および引張モデルを示す。

本解析では前述したように腰壁を部材モデル としてモデル化することではなく,短柱の剛域 およびはりの断面にその高さの影響を考慮して いる。特に,腰壁高さの評価による短柱のシヤ ースパン比の変化が腰壁構面と耐震壁構面のせ ん断力分担率に及ぼす影響³⁾と実験で観察され た腰壁の片側拘束と両側拘束による短柱の破壊 モードの相違(写真-2)を考慮する目的で,図 -3に示すように外側短柱および内側短柱のシ ヤースパン比をそれぞれ1.125と1に設定して解 析を行った。



写真-2 短柱の破壊様子 (左:X1Y1, 右:X1Y2)

TCR 00:00:21:00

3.2 耐震壁

耐震壁の耐力劣化型モデルで⁵⁾は境界部材で ある側柱を軸ばねでモデル化し,境界ばりの曲 げ剛性は剛とした(図-4)。また,本解析では 剛床仮定に基づいているので境界ばりの軸変形 は考慮できない。壁板には1枚の4節点アイソ パラメトリック平面要素を用いてモデル化し, ガウス積分点で評価されるコンクリートおよび 鉄筋の応力-ひずみ関係から耐震壁の応答を求 めており、コンクリートの構成則は耐力劣化型 柱モデルで用いたモデル(図-2)と同様である。





3.3 純フレーム

純フレームの柱は、柱両端部に曲げばねを設けるとともに軸ばねを用いてモデル化した(図-5)。曲げばねおよび軸ばねの履歴モデルとしては Takeda モデル(図-5)および Axial stiffness(図-4) モデルを用いた。また、せん断成分に関しては曲げ柔性に比例させてその影響を考慮した⁶⁾。



図-5 材端ばねモデルおよび Takeda モデル



図-6 袖壁のモデル化

3.4 袖壁

Y1, Y4 構面の袖壁はファイバーモデルを用い てモデル化した(図-6)。本解析で用いたファ イバーモデルは柔性法(フォース法)に基づい ており,袖壁の端部における両断面の柔性マト リックス関係を式(1)で表す線形と仮定した。袖 壁および間柱の全断面を図-6 (b)のようにコン クリートおよび鉄筋ファイバーに分割し,線材 に置換した。コンクリートの構成則は図-2と異 なり,圧縮と引張モデルにおいてそれぞれ軟化 効果や Stiffening 効果は考慮していないが,柱の せん断補強筋によるコンクリートへの拘束効果 は修正 Kent-Park モデル⁷⁾より考慮した。

 $f(z) = (1 - z / L_0) \cdot [f_1] + z / L_0 \cdot [f_2]$ (1) 3.5 X-Z 平面

本解析で用いたモデルの中,袖壁に適用した ファイバーモデル以外は X, Y, Z 軸の相互作用 が考慮できないため X-Z 平面における挙動を柱 の両端に材端ばねを設けることより曲げ応答を Y-Z 平面と独立的に考慮した。特に,腰壁構面柱 の X-Z 平面に対するモデル化は腰壁高さの影響 を無視し,柱のシヤースパン比を2と設定した。 また,耐震壁の側柱に対しても同様の方法で X-Z 平面に対する曲げ挙動のみをモデル化した。

3.6 はり

各構面の鉛直部材に採用したモデルの種類に 関係なく、すべてのはりに関しては材端ばねモ デルを用いて曲げ挙動をモデル化した(図-7)。 また、本解析で用いた剛床仮定よりはりの軸変 形は考慮されていないとともに耐震壁の境界ば りの曲げ成分を剛としてモデル化した。はりの 曲げばねに対する履歴モデルとしては Takeda モ デルを用い、特にはりの剛性および強度(ひび 割れ、降伏)の算出時にはスラブの有効幅と腰 壁の高さを考慮した(図-7)。



図-7 はりのモデル化

3.7 各部材モデルの特性

以上の各構面の部材に適用したモデルの特性 を耐力劣化性状,3軸カップリング関係および軸 ー曲げーせん断(N-M-V)の相互作用関係の観 点から表-1にまとめて示す。本解析で用いたモ デルの中では上記3つの項目に対する条件をす べて満足するモデルは存在しないのが確認でき る。しかし、本試験体を構成する短柱および耐 震壁のせん断挙動およびポストピーク領域にお ける耐力劣化性状を再現するためには耐力劣化 型モデルの適用が適切であることがわかる。ま た、上記以外に解析モデルとして要求される条 件としては計算時間の経済性が上げられるが. その観点からは材端ばねモデルが他の部材モデ ルに比べ経済的である。したがって、本解析で は計算時間の経済性と信頼性の両立を図るため, 各構面を構成する部材の特徴から、せん断挙動 および耐力劣化性状が卓越する短柱および耐震 壁には耐力劣化モデルを,純フレームの長柱お よびすべてのはりには材端ばねモデルを用いて 解析を行った。以上のモデルは本格的な有限要 素法に比べ計算時間および部材の挙動を表す自 由度数においてマクロモデルとしてみなすこと ができる。

	耐力劣化	X-Y-Z 軸カップリング	N-M-Ⅴ 相互作用
材端ばねモデル		$ \begin{cases} \{M_x\}\\ \{M_y\}\\ \{N_z\} \end{cases} = \begin{bmatrix} [K_{xx}] & [0] & [0]\\ & [K_{yy}] & [0]\\ sym. & [K_{zz}] \end{bmatrix} \cdot \begin{cases} \{\theta_x\}\\ \{\theta_y\}\\ \{d_z\} \end{cases} $	$ \begin{cases} \{M\}\\ \{N\}\\ \{V\} \end{cases} = \begin{bmatrix} [K_{MM}] & [0] & [0]\\ & [K_{NN}] & [0]\\ sym. & [K_{VV}] \end{bmatrix} \cdot \begin{cases} \{\theta\}\\ \{u\}\\ \{v\} \end{cases} $
ファイバーモデル		$ \begin{cases} \{M_x\}\\ \{M_y\}\\ \{N_z\} \end{cases} = \begin{bmatrix} [K_{xx}] & [K_{xy}] & [K_{xz}]\\ & [K_{yy}] & [K_{yz}]\\ sym. & [K_{zz}] \end{bmatrix} \cdot \begin{cases} \{\theta_x\}\\ \{\theta_y\}\\ \{d_z\} \end{cases} $	$ \begin{cases} \{M\} \\ \{N\} \\ \{V\} \end{cases} = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} K_{MM} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} K_{MN} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 \\ \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} K_{NN} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 \\ \end{bmatrix} \\ \{V\} \end{bmatrix} \cdot \begin{cases} \{\theta\} \\ \{u\} \\ \{v\} \end{cases} $
耐力劣化型柱モデル および 耐震壁モデル		$\begin{cases} \{M_x\}\\ \{M_y\}\\ \{N_z\} \} = \begin{bmatrix} [K_{xx}] & [0] & [0]\\ & [K_{yy}] & [K_{yz}] \end{bmatrix} \cdot \begin{cases} \{\theta_x\}\\ \{\theta_y\} \end{cases}$ sym. $[K_{zz}] \cdot \begin{bmatrix} \{\theta_z\}\\ \{\theta_y\} \end{bmatrix}$	$ \begin{cases} \{M\} \\ \{N\} \\ \{V\} \end{cases} = \begin{bmatrix} [K_{MM}] & [K_{MV}] & [K_{MV}] \\ & [K_{NN}] & [K_{NV}] \\ sym. & [K_{VV}] \end{bmatrix} \cdot \begin{cases} \{\theta\} \\ \{u\} \\ \{v\} \end{cases} $

表-1 部材モデルの特性



図-8 実験結果と解析結果の比較



- (a) 最大耐力記録時(●)
- (b) 短柱のせん断破壊(■)
- (c) 最大変位記録時(▲)

写真-3 試験体の破壊過程

4. 解析結果

気象庁神戸海洋気象台観測波(1995)の3成 分(EW,NS,UD)の入力より振動台で計測された X,Y,Z 方向の加速度記録⁸⁾(振幅倍率25%,50%, 100%)を連続に入力して行った動的解析の結果 を実験結果とともに図-8に示す。図中の●,■, ▲はそれぞれ最大ベースシヤーフォース記録時, 腰壁構面における内側短柱(X1Y2)のせん断破 壊時,そして1階の層間変位が最大値を記録し た瞬間を表す。最大耐力および最大変位ともに 解析結果が実験結果を下回っているものの,実 験結果のベースシヤーフォースと変位関係の履 歴形状から見られる耐力劣化性状やそれぞれの 時刻歴の比較からは大きい位相のずれが見られ ず実験結果と解析結果は良好な対応関係を示し ている。 以下に主要イベント(最大耐力,短柱のせん 断破壊,最大変位)発生時における実験結果と 解析結果を比較する。まず,X1構面短柱(X1Y2) の腰壁高さに相当する部位に曲げひび割れが観 察された最大耐力記録時には(●,写真-3(a)), 解析結果が実験結果を先行しているのが分かる。 その後,短柱がせん断破壊した時刻(■,写真 -3(b))の前後においては解析結果と実験結果 の履歴に大きい相違が確認できる。最大耐力記 録後1秒が経過した時点で,実験では最大変位 を記録し,耐震壁の壁板からは斜めせん断ひび 割れが鮮明に観察できるのに対し(▲,写真-3 (c)),解析結果ではまだ最大変位に達しておらず, その順番において最大耐力記録時と反対の結果 となっている。





図-9 には解析結果から得られた Y 方向各構 面に対する負担せん断力と 2 階変位(X₂Y₁)の 関係を示している。腰壁構面の耐力劣化が顕著 であることに対し,耐震壁構面および純フレー ムではそれと反対に徐々に耐力が上昇している のが確認できる。これは,腰壁構面の短柱およ び耐震壁の破壊後,純フレームおよび耐震壁構 面の外柱(袖壁付き柱)にせん断力負担が移行 された結果だと考えられる。

5. まとめ

鉄筋コンクリート実大 6 層建物に対する震動 実験結果を再現する目的で行った地震応答解析 結果から得られた内容を以下にまとめる。

- (1) 最大耐力および最大変位ともに解析結果が 実験結果を過小評価した。
- (2) 実大試験体の耐力劣化性状は、短柱および耐 震壁に適用した耐力劣化型モデルより再現 でき、また、変位およびせん断力の時刻歴応 答における位相は実験結果と良好な対応関 係を示した。
- (3) 短柱および耐震壁の耐力劣化後,隣接構面へのせん断力負担の移行が解析結果から確認でき、ポストピーク領域におけるせん断力の再分配が模擬できた。

以上より,本解析では定性的には実大震動実 験結果が再現できたものの定量的な精度におい てはまだ不十分である結果となった。今後の課 題としては,材料レベルの鉄筋のひずみ効果, 部材レベルでの解析モデルの改善,そして腰壁 および袖壁のモデル化手法に関する検討が必要 だと考えられる。

参考文献

- Toshimi Kabeyasawa and Taizo Matsumori et al. : Design of the Full-Scale Six-Story Reinforced Concrete Wall-Frame Building for Testing at E-Defense, Proceedings of The First NEES/E-Defense Workshop on Collapse Simulation of Reinforced Concrete Building Structures, pp.23-45, 2005
- 2) 松森泰造,壁谷澤寿海,白井和貴,勝俣英雄:鉄筋 コンクリート造実大6層壁フレーム構造の震動実 験概要,コンクリート工学年次論文報告集,Vol.28, No.2 pp.409-414,2006
- 金裕錫,壁谷澤寿海,松森泰造:鉄筋コンクリート 造実大壁フレーム構造の予備解析-短柱の耐力劣 化性状,コンクリート工学年次論文報告集,Vol.28, No.2, pp.385-390,2006
- 金裕錫,壁谷澤寿海:鉄筋コンクリート柱のモデル 化に関する研究,コンクリート工学年次論文報告集 Vol. 26, No. 2, pp.43-48, 2004
- 5) 陣少華, 壁谷澤寿海: 非線形解析における鉄筋コン クリート耐震壁モデル, コンクリート工学年次論文 報告集, Vol. 21, No. 3, pp.763-768, 1999
- 6) 青山博之,上村智彦:マトリックス法による構造解 析,培風館, pp.104-108,2002
- Kent, D. C., Park, R.: Flexural members with confined concrete, Journal of the structural Division, ASCE, Vol. 97, ST7, pp.99-110, 1971
- 五十嵐克哉,松森泰造,壁谷澤寿海,梶原浩一: E-ディフェンスによる実大6層鉄筋コンクリート建物 実験 その3.加振方法の概要,日本建築学会学術 講演梗概集(C-2,構造IV) pp.689-690,2006