

答が予想される。試験体の立面に関しては、各層の高さが2.5mで6層建物であり、基礎を除いた上部構造の重量が750tonfである。試験体詳細および本研究で用いた材料特性は文献²⁾を参照されたい。ただし、コンクリートの強度は材料試験結果 ($F_c = 30MPa$) を用いた。

2.2 入力計画

実大震動実験で用いる地震動は1995年兵庫県南部地震、神戸海洋気象台の記録 (JMA Kobe) のNS, EW, UDの3成分であり、試験体に対する水平成分の入力方向は、NS成分が試験体のX軸から45°、-EW成分がY軸から45°方向に入力することを計画している (図-2)。図-2の矢印はNS, EW成分による試験体に実際入力される地震動の方向およびその大きさを表しており、特に太い矢印は各成分の最大加速度時を示している。図からわかるように2つの成分による地震動の入力がY方向に集中しているのが分かる。

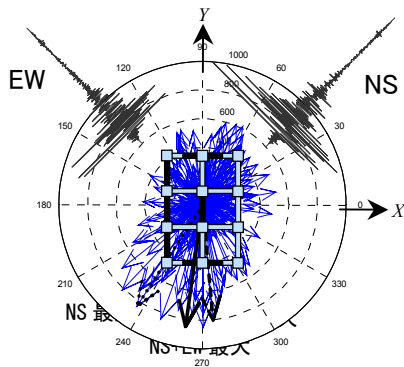


図-2 地震動の入力計画

3. 解析モデル

3.1 耐力劣化型柱および耐震壁モデル

実大試験体を構成している部材のうち特に耐震壁および腰壁構面の短柱はせん断破壊が予測され、これらの部材に対するモデル化手法がポストピックおよび破壊過程予測の精度に大きな影響を与えようと考えられる。

そこで、短柱の部材モデルとしては2軸応力状態による曲げ-軸-せん断力の相互作用およびコンクリートの引張ひずみによるコンクリート圧縮強度の軟化効果を考慮した耐力劣化型提案モデル (PM, Proposed Model) を用いた¹⁾。

図-3に示しているように、2つの節点を持つ1本の線材を3つの面材に変換し、線材では考慮できない平面応力-平面ひずみ関係に基づいているのが特徴である。

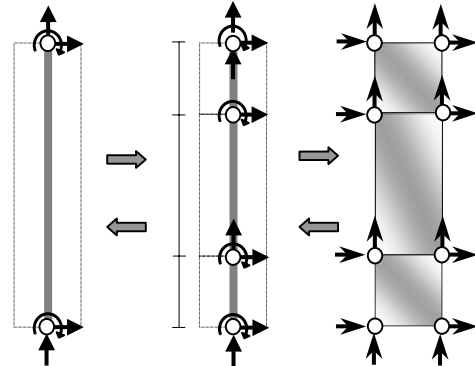


図-3 耐力劣化型柱モデルの概念図

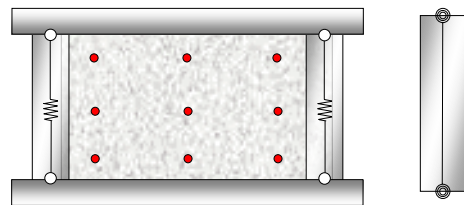
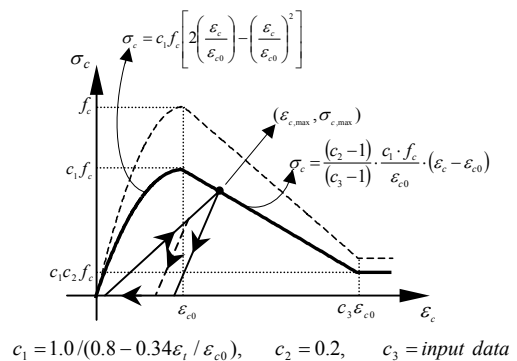
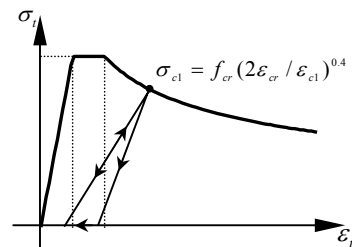


図-4 IPE および X-Z 平面における側柱モデル



(a) 圧縮モデル



(b) 引張モデル

図-5 コンクリートの構成則

耐震壁の耐力劣化型モデルは図-4に示すように、境界部材である側柱を軸ばねで、境界ば

りの曲げ剛性を剛としてモデル化し、壁板には1つの Iso-parametric 平面要素を用いてモデル化している (IPE, Iso-Parametric Element Model)。さらに、壁板要素にはガウス積分点を設け、コンクリートおよび鉄筋の構成則によって求められる応力-ひずみ関係から耐震壁の応答を求める。コンクリートの構成則は耐力劣化型柱モデルと同様に主引張ひずみとの関係からコンクリート圧縮強度の軟化効果を考慮している (図-5)。耐力劣化型耐震壁モデルおよびコンクリート構成則の詳細は文献³⁾を参照されたい。また、鉄筋の構成則としてはバイリニアールモデルを用いた。

耐力劣化型柱モデルは平面要素の応力-ひずみ関係に基づいていることから3次元入力および捩れ挙動によって本試験体に生じる直交方向挙動 (X-Z 平面) に関しては曲げばねを用いてモデル化した (図-4)。また、耐震壁の側柱に関しても同じ方法で直交方向の曲げ挙動を考慮した。

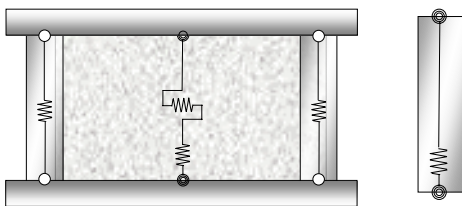


図-6 TVLE モデルおよび OC モデル

3.2 他の部材モデル

すべてのはりに関しては材端ばねモデル (OC, One-Component Model) を用いて両端部に曲げばねのみでモデル化した。ここで、スラブによるはりの有効幅を考慮しその曲げ耐力を算出した⁴⁾。特に腰壁構面のはりには腰壁の高さをはりの断面に加え剛性および耐力を算出し⁵⁾、スラブは剛床とした。

また、純フレームの柱および袖壁は曲げばねおよび軸ばねを用いてモデル化し、せん断に関してはせん断ばねを直接設けることなく、曲げ柔性に比例してせん断成分を間接的に考慮した⁶⁾。ここで、袖壁の曲げ耐力は完全塑性理論に従って算出した結果を用いた⁵⁾。

耐力劣化現象の再現できない既往部材モデルとの比較を目的に短柱を純フレーム構面の柱と同様に材端ばねモデルで、そして耐震壁を既往の TVLE モデル (Three Vertical Line Element, 図-6) を用いてモデル化した。

材端ばねモデルおよび TVLE モデルで用いた履歴モデルとしては線材の曲げばねには Takeda モデルを、TVLE モデルの曲げおよびせん断ばねには原点指向型モデルを用い、すべての軸ばねには Axial Stiffness モデルを用いた。各履歴モデルのスケルトンカーブのひび割れ強度、降伏強度は文献⁴⁾に従い算出した結果を用いた。特に、TVLE モデルの場合、耐震壁のせん断強度は広沢式⁵⁾により求めた結果を採用した。そして、すべての部材の剛域を、節点からその部材の縁より材せいの 1/4 入った点までの距離とした。

4. 解析結果

4.1 Pushover 解析

耐震壁と短柱の部材モデルの種類をパラメータとして2つのケース (IPE-PM と TVLE-OC) に対する pushover 解析を行い、その結果を図-7 に一緒に示す。荷重分布は矩形分布で加力方向は Y 方向である。両ケースともにベースシヤール係数および各構面の最大負担せん断力はほぼ同じであり、耐震壁構面がベースシヤールのうちほぼ半分を負担しているのが分かる。しかし、耐力劣化性状やその後、X3 構面へのせん断力負担の変化は IPE-PM ケースのみで確認できる。

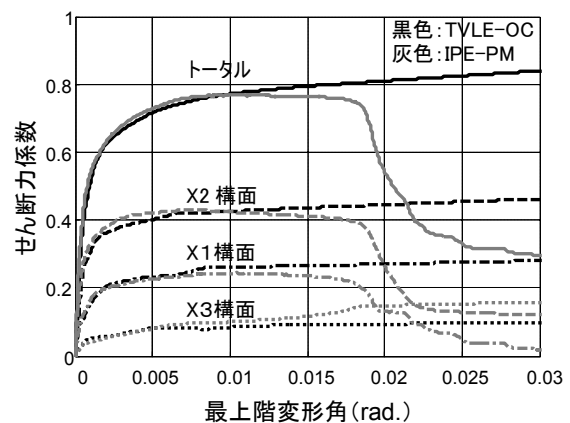


図-7 Pushover 解析結果

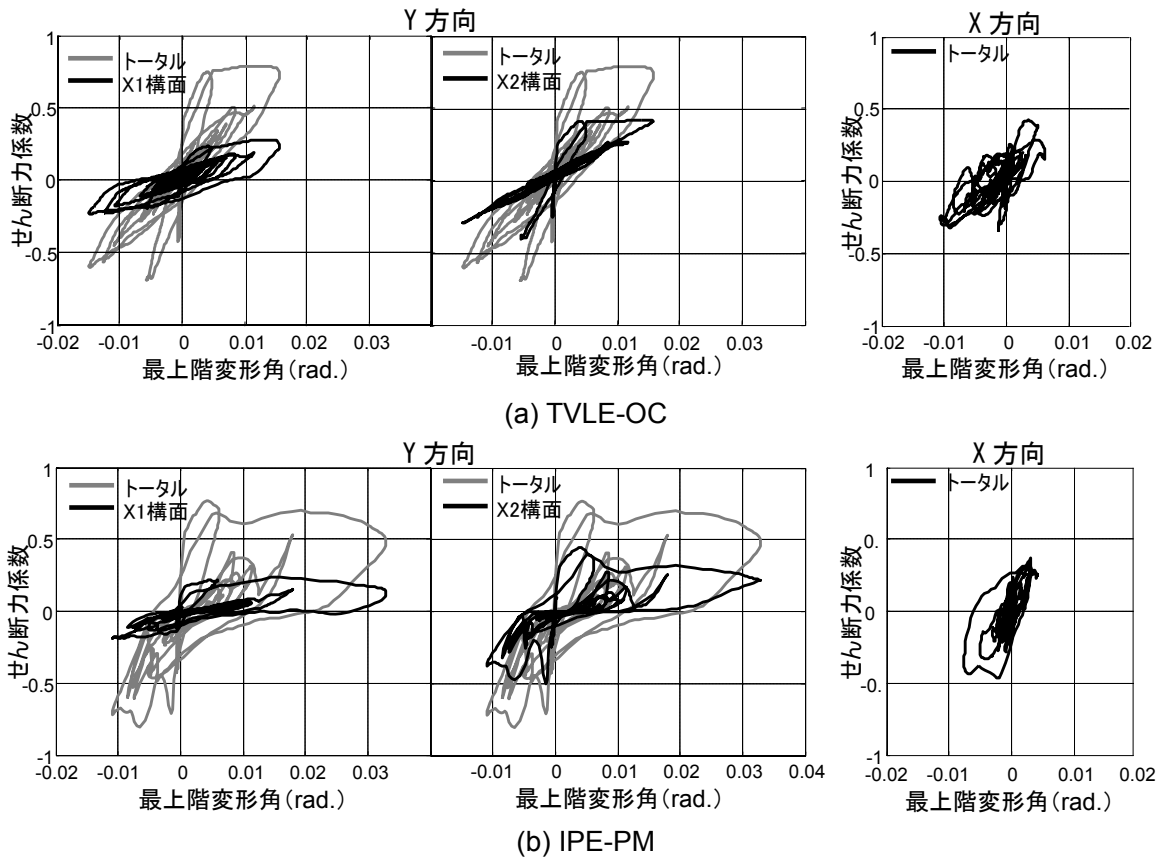


図-8 動的解析結果

4.2 動的解析

Pushover 解析と同様に 2 つのモデルケースに対し、KOBE 地震動 (JMA) の 3 成分 (NS, EW, UD) を図-2 に示す方向から入力して地震応答解析を行った。数値解析方法は Newmark- β 法 ($\beta=0.25$)、数値積分の時間刻み (Δt) が 0.01 秒であり、減衰係数 h を 0.03 とし、瞬間剛性比例型を用いて解析を行った。図-8 に Y 方向および X 方向に対するせん断力係数と最上階変形角の関係を表している。まず、X 方向に関しては図-2 からわかるように 2 つの水平成分によって試験体に入力される地震動が Y 方向に集中していることから Y 方向の応答に比べ X 方向の応答が小さいのが両ケースの結果から確認できる。一方、Y 方向に関しては TVLE-OC および IPE-PM ケースにおける最大ベースシヤーと各構面の最大せん断力そのものはほぼ同じであるものの、最大変形角においては顕著な差が生じているのが分かる。これは、IPE-PM ケースの場合は最大せん断力記録後、次のサイクルの正側で

耐震壁構面と腰壁構面ともに耐力劣化始まっており、その影響で変形が進んでいるのに対し、TVLE-OC ケースでは耐力劣化現象が考慮できないためポストピック領域での挙動が正確に再現できなかったと考えられる。また、耐力劣化型モデルは平面 2 軸応力関係から曲げ-せん断-軸力の相互作用が考慮でき、せん断変形の無視できない耐震壁および短柱のせん断変形を再現しうるのであるのに対し、TVLE および OC モデルでは上記 3 つの力が独立しているのもその影響を評価するには限界があると考えられる。図-9 は IPE-PM において最大変位を記録した時の層崩壊様子を表している。

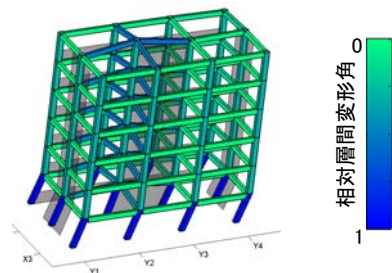


図-9 層崩壊時の試験体様子

5. 解析結果への主な影響因子

5.1 短柱の剛域長さの影響

本解析では腰壁の影響をはりの断面に加えて考えるとともに、腰壁付き柱に関しては腰壁を剛域としてモデル化している。したがって、短柱の高さ方向における剛域長さの評価方法が解析結果に大きい影響を与えると考えられる。そこで、短柱の剛域長さの影響を調べる目的で図-10に示す距離、 L_r が0 (柱のシャースパン比: 1) の場合と、柱のせい (D) の場合 (柱のシャースパン比: 1.5)、2つのケースに対する Y 方向への pushover 解析を行った。

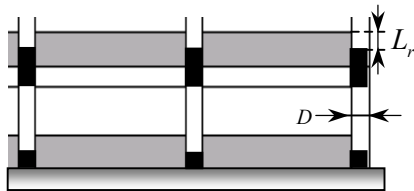


図-10 短柱の剛域長さ

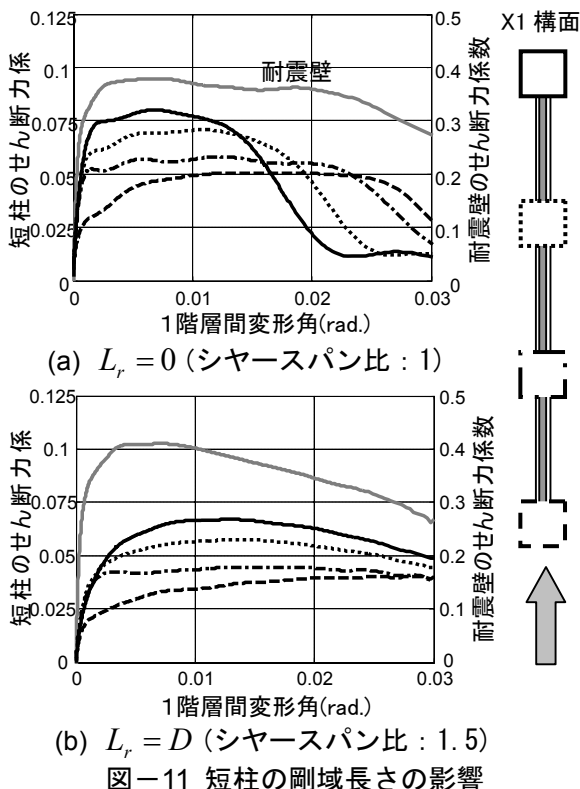


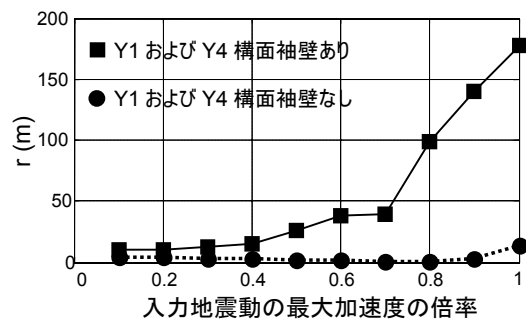
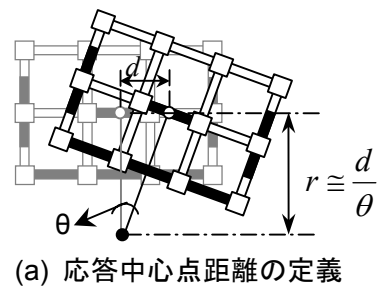
図-11 短柱の剛域長さの影響

図-11 に X1 構面の各短柱のせん断力と 1 層層間変形角関係を耐震壁の結果とともに示す。ここで、短柱のせん断力係数と変形角を表す黒い線の凡例は右側図の柱の輪郭の柄に対応している。両ケースともに圧縮側柱 (Y4) のせん断

力が大きく、また耐力低下が引張側柱 (Y1) に比べ顕著であることが確認でき、シャースパン比が 1 の場合その傾向が著しいのがわかる。また、短柱のせん断力負担率の変化が耐震壁のせん断力負担率およびその耐力劣化傾向に影響を与えているのが確認できる。以上の結果から、剛域長さの設定による短柱のシャースパン比の変化は、短柱そのものの挙動はもとより試験体全体として振れ応答にも影響を与え、耐震壁とのせん断力分担率に変化をもたらしているのが確認できる。

5.2 振れ応答性状

弾性および塑性領域における Y 方向の剛性および耐力偏心によって生じる振れ応答の変化を、応答中心点距離⁷⁾、 r (図-12(a)) を用いて調べて見た。応答中心点距離、 r は試験体重心における回転角 (θ) と Y 方向併進成分 (d) の関係を線形近似して得られる直線の傾きであり、 r が小さいほど振れ応答が卓越しているのを意味する。図-12(b)では KOBE (JMA) 地震動 NS 成分の最大加速度レベルを徐々に変化して Y 方向へ入力して得られた応答重心点距離、 r の変化を示している。■印の変化から試験体が塑性化することによって振れ応答の傾向がだんだん鈍くなるのがわかる。



(b) 応答中心点距離の変化

図-12 振れ応答性状

これは、腰壁構面 (X1 構面) の早い段階でのひび割れ発生および降伏によって剛性が低下し、弾性領域での捩れ応答を支配する剛性偏心率がだんだん小さくなったのがその原因であると考えられる。また、比較的の高い剛性および耐力をもつ直交方向 (X 方向) における袖壁構面の捩れ応答に対する抵抗がもう 1 つの原因として挙げられる。そこで、袖壁構面の捩れ応答に対する影響を調べる目的で Y1 および Y4 の両構面に袖壁のない試験体に対する応答中心点距離を算出したのが図-12(b)の●印である。図-12(b)からわかるように袖壁のある試験体に比べ捩れ応答が顕著かつ試験体の損傷によらずほぼ一定であることが確認できる。

袖壁構面の捩れ応答に及ぼす影響による耐震壁構面 (X2 構面) と腰壁構面 (X1 構面) のせん断力負担率の変化を同じく袖壁 (Y1 と Y4 構面) の有無による Y 方向への pushover 解析結果を図-13 に示す。ベースシヤアは両試験体において同じであるものの、袖壁のない試験体、すなわち捩れ応答が卓越する試験体の方が腰壁構面の負担率が減少することによって耐震壁の負担率が増加し、その影響で耐震壁の耐力低下が早い段階で始まるのが確認できる。これは、本試験体において、直交方向部材が主方向 (Y 方向) の捩れ応答に及ぼす影響を表しており、主方向構面の破壊過程とも関係があることを示している。

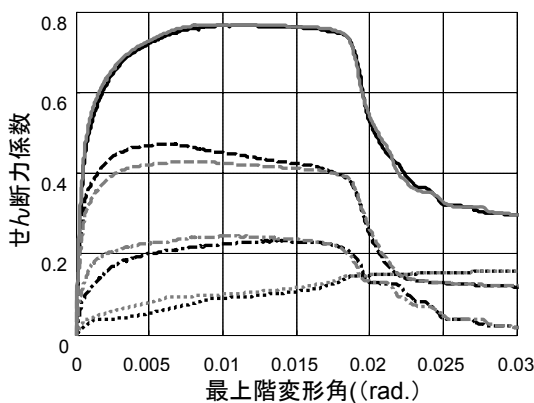


図-13 直交構面袖壁の影響

6. まとめ

鉄筋コンクリート造実大壁フレーム構造震動

実験の破壊過程予測および構造解析手法の検証を目的として行った予備解析結果から得られた内容を以下にまとめる。

- (1) せん断破壊が予測される耐震壁および短柱に対し、部材モデルの耐力劣化性状の有無による解析結果の比較から、破壊過程を精度よく再現するにはポストピック挙動の特徴である耐力低下の考慮できる部材モデルを用いるべきであることを明らかにした。
- (2) 腰壁を境界柱の剛域として扱う際、その長さの定め方によって柱そのものの挙動の変化はもとより、試験体の捩れ性状および隣接構面とのせん断力負担率に変化をもたらすことが試験体の破壊過程にも大きい影響を与えることを示した。
- (3) 弾性および塑性域での本試験体の捩れ応答性状の変化を、応答中心点距離を用いて表し、試験体の損傷に伴い捩れ応答がだんだん鈍くなることを示すとともに、直交方向袖壁構面の捩れ応答に及ぼす影響を明らかにした。

以上の結果から実大試験体の破壊過程を精度よく予測するためには耐力劣化型モデルによるモデル化とともに、捩れ応答性状に影響を及ぼす構造的因子に対する適切な判断が重要だと考えられる。

参考文献

- 1) 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
- 2) 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
- 3) 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
- 4) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説, 1999
- 5) 日本建築防災協会: 既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準・同解説, 2001
- 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
- 7) 金 裕錫, 壁谷澤 寿海ほか: 鉄筋コンクリート偏心ピロティ壁フレーム構造の震動破壊実験, (その 1) 鉄筋コンクリート造試験体の応答性状, 第 11 回日本地震工学シンポジウム講演論文集, pp. 1421-1426, 2002