

論文 層崩壊防止のために必要な RC 耐震壁の剛性の推定法

二木 秀也^{*1}・日高 桃子^{*2}・崎野 健治^{*3}

要旨：本論は、転倒降伏耐震壁の層間変形一様化機能に着目した研究であり、耐震性能が劣る骨組の地震時の挙動を向上させるために必要な耐震壁の剛性を検討している。耐震壁の解析モデルとしては転倒モーメントを負担しない下端がピン支持の弾性曲げ要素を用いる。耐震壁と連結する耐震性能が劣る骨組としては、柱降伏型または全層等断面の魚骨モデルを用いる。耐震壁の必要剛性は、モデルの静的解析によって得られる最大層間変形角を整形な梁降伏型魚骨と同等にすることを条件に定める。3つの記録地震波を用いた動的解析を行い、耐震壁付き魚骨の層間変形角の最大応答値が梁降伏型魚骨と概ね同等となることを示している。

キーワード：耐震壁、層間変形一様化、梁降伏型骨組、柱降伏型骨組、降伏層、地震応答

1. 序

一般に、耐震壁に期待される主な機能は、大きなせん断抵抗力を発揮することである。一方、建物の層間変形を高さ方向に一様化する機能も層崩壊を防止、また層間変形角の最大応答値の低減につながる建物の耐震性能向上に有効な機能である。

通常の耐震壁の変形能力は大きくないが、著者らが提案している転倒降伏耐震壁を用いれば、鉄筋コンクリート(RC)骨組の降伏変形レベルを上回る、0.01rad.以上といった大きな層間変形角レベルにおいても、壁パネルは弾性を維持し、層間変形一様化機能を発揮する¹⁾。図-1aの耐

震壁は、下端がピン支持で転倒モーメントを負担しないが、大変形時まで層間変形一様化機能を発揮する。図-1cのような柱降伏型骨組は、一般にP δ 効果のために耐震性能が図-1bのような梁降伏型骨組より劣る。しかしながら、図-1aのように、耐震壁に連結されると、壁が無ければ層崩壊する骨組の降伏機構も全体降伏機構となり、耐震性能が図-1bの梁降伏型骨組と同程度までにまで向上すると期待される。

転倒降伏耐震壁は、図-2のように、壁パネル・繫梁・周辺フレームとRCパネルを繋ぐ短柱からなる合成耐震壁である。降伏機構形成時には繫梁と短柱が塑性化する。終局転倒モーメン

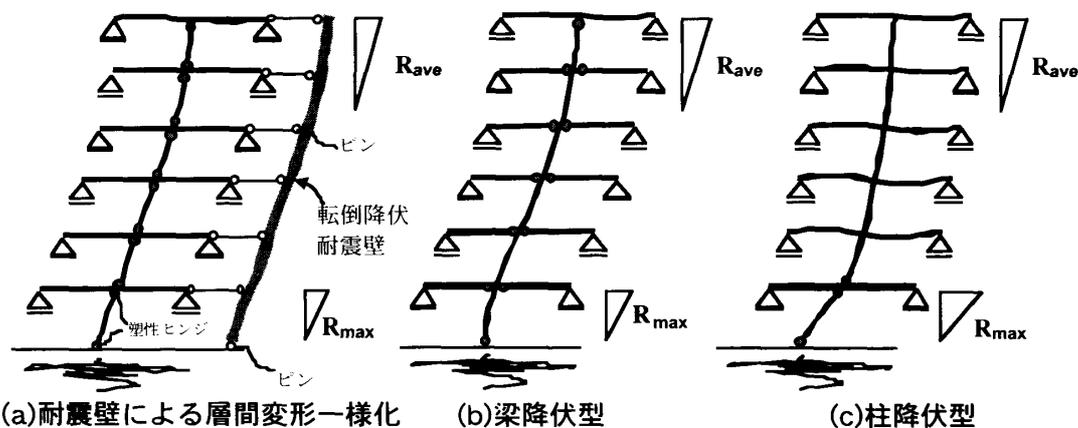


図-1 各降伏型魚骨降伏機構図

*1 九州大学大学院 人間環境学大学院生 (正会員)

*2 九州大学大学院 人間環境学研究院助手 人間環境博 (正会員)

*3 九州大学大学院 人間環境学研究院教授 工博 (正会員)

ト耐力は、繫梁の降伏耐力に概ね比例する。したがって、繫梁がない転倒降伏耐震壁は、概ね、図-1aの耐震壁と等価である。

本論の目的は、図-1aの耐震壁を連結した骨組の耐震性能をAi分布層剪断耐力をもつ図-1bの梁降伏型骨組と同等にするために必要な耐震壁の曲げ剛性を調べることである。耐震壁と連結する骨組は、基本としてAi分布の層剪断耐力をもつ柱降伏型骨組と柱梁が全層等断面である2種類の骨組である。耐震性能の評価は、各モデルに平均層間変形角 R_{ave} (頂点水平変位を建物高さで除した変形角)の最大応答値 $R_{ave,max}$ が0.01rad.となるよう増幅した3つの記録地震波を用いた動的解析を行う。解析結果から、柱降伏型骨組や全層等断面骨組の層間変形角の最大応答値を梁降伏型骨組と同等とする耐震壁の曲げ剛性の算定法を検討する。

2. 解析方法

数値解析に用いたモデルを、図-3aに示す、RC魚骨のみのモデルと、図-3bのようなRC魚骨と最下層でピン支持される曲げ要素からなる。全てのモデルにおいて、全体降伏機構時の保有ベースシア係数が0.3であるようにする。ピン支持の曲げ要素は耐震壁をモデル化したものであり、以降、この曲げ要素を耐震壁とよぶ。耐震壁は、下端がピンであることから転倒モーメント耐力は零であり、層間変形を一様化する機能のみを有する耐震要素である。

魚骨は、6層で、全層同じ質量で70ton, 全層同

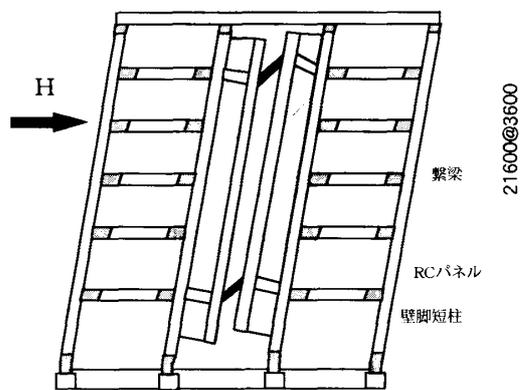


図-2 転倒降伏耐震壁

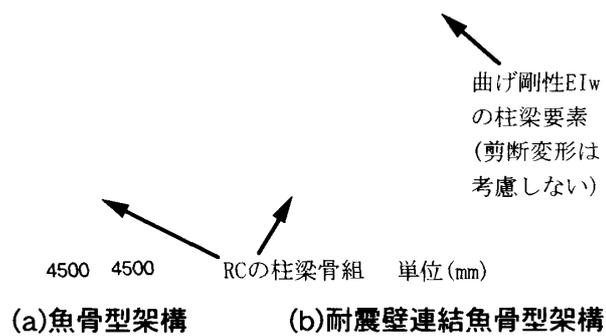
じ階高で3600mmとする。i層の柱梁接合部周りの柱梁端部の最大曲げ耐力、 $M_{i-1,c}, M_{i,c}, M_{i,b}$ (順にi-1,i層柱およびi層梁の最大曲げ耐力)に関して次式(1)で定義する柱梁耐力比COFは一定値であり、各層がAi分布に従う層剪断耐力となるような魚骨とする。

$$COF = \frac{M_{i-1,c} + M_{i,c}}{2M_{i,b}} \quad (1)$$

耐震壁は、全層等断面とし、6層程度の高さである骨組に生じる剪断変形は、曲げ変形と比較すると極めて小さいので、剪断変形を考慮しない弾性棒とした。

解析に用いたプログラムは河野によって組まれた2次元非線形解析用プログラム²⁾で、幾何学的非線形も考慮している。柱梁はファイバーモデル要素で、1つの柱梁部材をヒンジが形成される部材端部と中央の3つに分割する。静的解析はAi分布水平力による一方向静的漸増水平加力解析とする。動的解析にはNewmarkのβ法を用い、減衰は3%のレーリー型とする。使用する地震波は、El Centro(NS)波、八戸(EW)波、東北大(NS)波の3波であり、各地震波の地動加速度の最大値を、モデルの平均層間変形角の最大応答値が0.01rad.となるように増幅して用いた。

材料強度はコンクリートの圧縮強度が24MPaで、鋼材の降伏強度が350MPaとする。材料の応力-歪み関係は、鋼材については完全弾塑性モデルとし、コンクリートについては解析の安定性確保のため最大耐力後の劣化を考慮しないモデルとした¹⁾。



(a)魚骨型架構 (b)耐震壁連結魚骨型架構
図-3 解析モデル

3. 解析モデル

表-1に解析モデルを示す。モデル名中, BFおよびCFは, それぞれ魚骨が梁降伏型および柱降伏型であることを示す。モデルBFおよびCFは, A_i 分布に従う層剪断耐力を有す。魚骨BFは耐震壁がなくとも層崩壊が生じない安定した挙動を示す魚骨であることが予想されるので, 以降, 健全魚骨とよび, 魚骨CFは柱降伏型魚骨とよぶ。柱降伏型魚骨のうち, 魚骨CF-w1とCF-w4は, それぞれ1層と4層の層剪断耐力が A_i 分布に従う層剪断耐力より20%小さい。このように, 層剪断耐力が小さい特定層を弱点層とよぶことにする。

モデル名中, SFは, 魚骨の柱梁が全層にわたって等断面の魚骨であることを示す。魚骨SFの柱断面は, 文献3の最小鉄筋比の観点から定め, 梁断面は, 耐震壁を連結した魚骨SF-FWの静的解析において, 平均層間変形角が0.01rad.時の魚骨ベースシア係数が0.3となるように定める。魚骨SFの各層のCOFを表-2に示すが, 全ての層においてCOFが小さい。したがって, 魚骨SFも全

層にわたって柱が降伏する魚骨であるが, 他の柱降伏型魚骨と区別して, 以降, 魚骨SFを均等魚骨とよぶ。

モデルCF-FWおよびSF-FWは耐震壁を連結した魚骨モデルである。耐震壁は曲げ剛性(EIw)をもつ。EIwの値は, 4.1で述べる方法を用いて算定する魚骨の性状によって異なる値とする。

4. 解析結果と考察

4.1 静的解析結果

図-4はベースシア-平均層間変形角(R_{ave})関係を示し, 図-5は $R_{ave}=0.005rad.$ 時, $0.0075rad.$ 時, $0.01rad.$ 時のモデルCF-w1の各層の層間変形角を示している。弱点層である最下層の柱は $R_{ave}=0.005rad.$ 時に降伏し, これ以降, この層に層間変形が集中する。この層の層剪断耐力(この場合, ベースシア耐力に等しい)は, 層間変形の急増に伴う大きなP δ 効果のため, $R_{ave}>0.005rad.$ では著しく減少する。このように, 柱の降伏後の大きなP δ 効果のために層剪断耐力が劣化す

表-1 解析モデル

| 解析モデル | 魚骨 | | 1次固有周期(sec.) | 耐震壁の剛性 | Γ_{PGA} | | | $R_{ave} \geq 0.01rad.$ での最大ベースシア係数 | 最大耐力時の $R_{ave}(\times 10^{-2}rad.)$ |
|----------|-------|-----|--------------|--------|----------------|--------|------|-------------------------------------|--------------------------------------|
| | COF | 弱点層 | | | El | Centro | 八戸 | | |
| BF | 1.5 | - | 1.00 | - | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 0.29 | 0.9 |
| CF | | - | 0.94 | | 1.08 | 1.00 | 1.03 | 0.27 | 0.8 |
| CF-w1 | 0.75 | 1層 | 0.95 | - | 1.08 | 0.99 | 1.29 | 0.21 | 0.6 |
| CF-w4 | | 4層 | 0.95 | | 1.15 | 1.06 | 1.00 | 0.23 | 0.9 |
| SF | 表-2参照 | - | 0.88 | - | 1.28 | 1.08 | 1.40 | 0.23 | 0.6 |
| CF-FW | | - | 0.94 | | 1.06 | 0.97 | 1.02 | 0.29 | 1.1 |
| CF-FW-w1 | 0.75 | 1層 | 0.94 | EIw | 1.11 | 0.92 | 0.93 | 0.27 | 1.3 |
| CF-FW-w4 | | 4層 | 0.95 | | 1.09 | 0.97 | 0.96 | 0.28 | 1.2 |
| SF-FW | 表-2参照 | - | 0.85 | EIw | 1.25 | 0.94 | 1.07 | 0.30 | 2.0 |

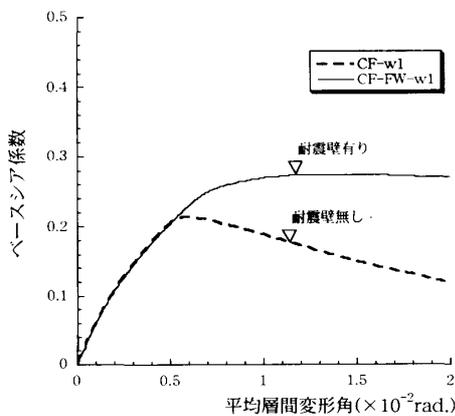


図-4 荷重-変形関係

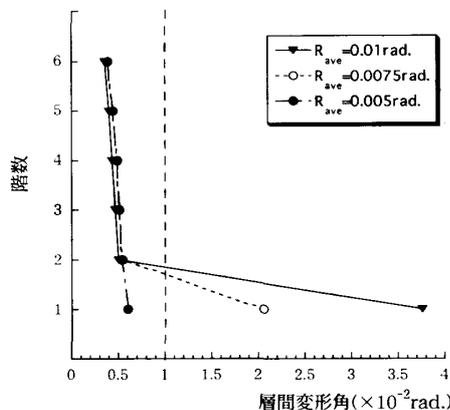


図-5 層間変形角

表-2 均等魚骨の各層の柱梁耐力比

| 階 | COF |
|---|------|
| 6 | 0.17 |
| 5 | 0.38 |
| 4 | 0.46 |
| 3 | 0.54 |
| 2 | 0.60 |
| 1 | 0.65 |

る層を、以降、降伏層とよぶ。図-4には示していないが、梁降伏型魚骨の場合は、耐震壁に連結されずとも降伏層が生じないので、履歴曲線は耐震壁を連結した魚骨(CF-FW-w1)の履歴曲線と同様である。他の魚骨は、耐震壁無しでは降伏層が生じ、CF-w1の耐力劣化勾配と同様の負勾配で、耐力が劣化する。表-1に $R_{ave} \leq 0.01rad.$ における各モデルの最大ベースシア係数および

魚骨においては降伏層は生じないが、2層の層間変形角が最大で、 R_{ave} より0.002rad.大きい層間変形が生じている。

魚骨に連結する耐震壁の曲げ剛性 EI_w は、静的解析より得られる $R_{ave}=0.01rad.$ 時のモデルに生じる最大層間変形角が0.012rad.(=モデルBFと同等)となる剛性とする。 EI_w の値はこの方針にしたがって試行錯誤的に求める。図-6bに耐震

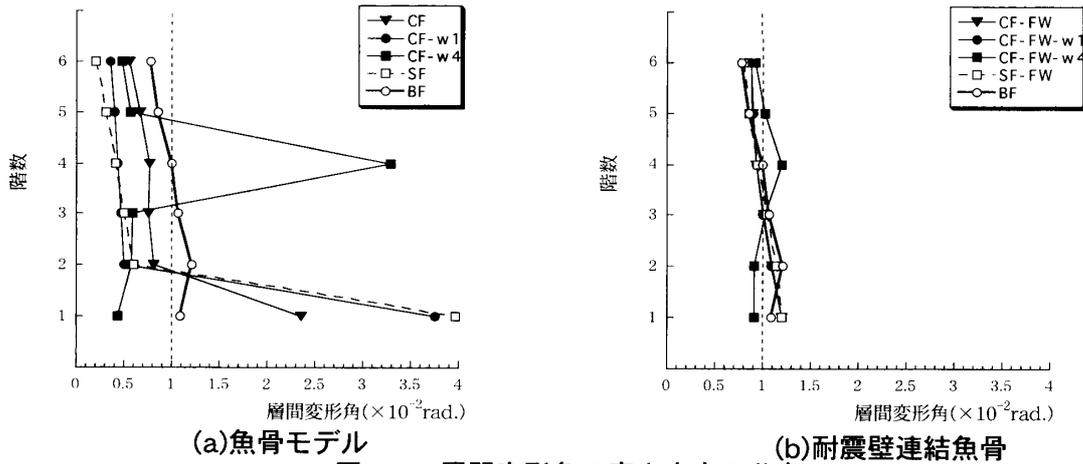


図-6 層間変形角の高さ方向の分布

最大耐力時の R_{ave} を示す。SF-FWを除く全てのモデルについて、 $P-\delta$ 効果のために最大ベースシア係数は設計用ベースシア係数を下回る。

図-6aは $R_{ave}=0.01rad.$ 時の耐震壁を連結していない魚骨の各層に生じる層間変形角である。層間変形角0.02rad.を上回る大変形が生じている層は降伏層であり、健全魚骨(BF)以外の魚骨には降伏層が生じている。降伏層は、弱点層有り魚骨では弱点層、弱点層無し魚骨CFでは、 $P-\delta$ 効果が最も大きく現れる最下層である。均等魚骨は A_i 分布の層剪断耐力を有していないために、静的解析の載荷水平力によって生じる層剪断力に対して最も保有層剪断力が小さい最下層が降伏層となる。一方、先述のように、健全

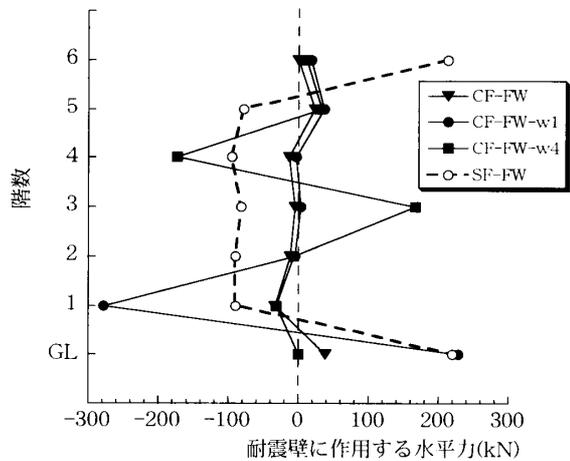


図-7 耐震壁に作用する水平力

表-3 耐震壁に作用する水平力と魚骨の不足層剪断耐力の比較

| 解析モデル | 弱点層 | 1) (kN) | 2) (kN) | 3) (kN) | 4) (kN) | 5) |
|----------|-----|------------|------------|------------|------------|------|
| CF-FW | — | — | 41 | 41 | 36 | 1.13 |
| CF-FW-w1 | 1 | 247 | 41 | 288 | 253 | 1.14 |
| CF-FW-w4 | 4 | 165 | 21 | 186 | 170 | 1.09 |

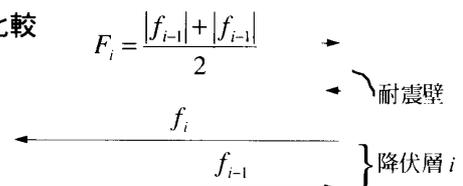


図-8 降伏層に作用する水平力

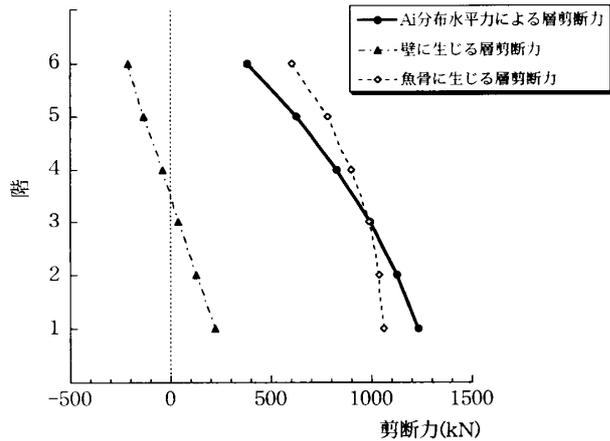


図-9 均等魚骨に生じる層剪断力

壁を連結した魚骨の各層の層間変形角を示す。表-1の最大耐力を見ると、耐震壁を連結したモデルの最大耐力は全ての魚骨が健全魚骨に近い耐力を示し、耐力劣化性状が改善されている。

4.2 壁に作用する水平力

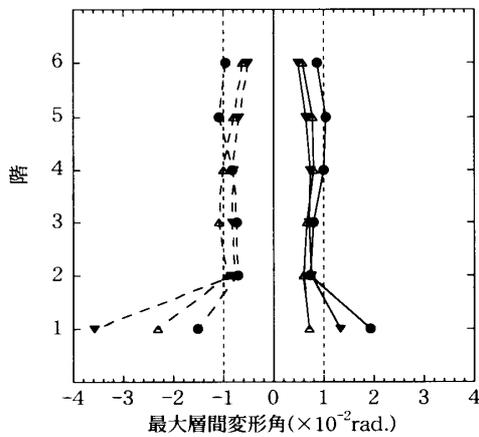
図-7は耐震壁を連結したモデルの $R_{ave}=0.01rad.$ 時に耐震壁に作用する水平力の高さ方向の分布である。図-7を見ると均等魚骨以外の柱降伏型魚骨ではそれぞれの降伏層の上下梁の位置に比較的大きな水平力が作用していることがわかる。表-3の1)に弱点層の保有層剪断耐力の不足分を、2)に $P\delta$ 効果による $R_{ave}=0.01rad.$ 時の耐力不足分を示す。ここで保有層剪断力の不足分とは、全体降伏機構時の弱点層に生じる層剪断力から弱点層の保有層剪断力を差し引いた剪断力である。3)に1)と2)の和を示すが、この値は $R_{ave}=0.01rad.$ 時の層剪断耐力の不足分である。一方、表-3の4)に $R_{ave}=0.01rad.$

時に降伏層の上下梁位置で耐震壁に作用する水平力の絶対値の平均を示す。この値は、図-8に示す F_i で耐震壁の降伏層に生じる剪断力である。表-3の5)に剪断力 F_i に対する3)の層剪断耐力の不足分の比を示す。5)の値は1.0に近く、3)と4)の値は概ね等しいことがわかる。

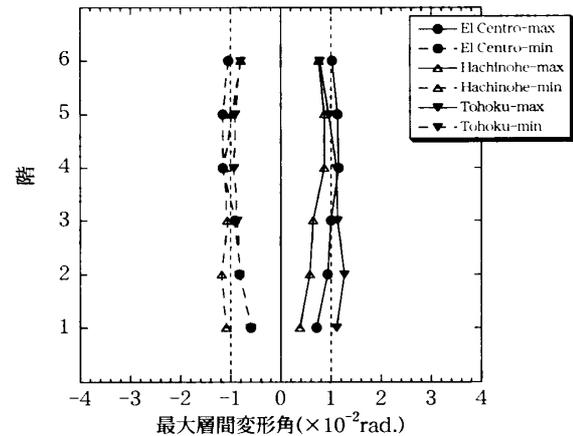
均等魚骨の柱は全層等断面であるが、柱の断面耐力は各層の柱の作用軸力によって異なる。柱の軸力比は0.3未満であり、断面耐力は下層ほど大きい。このため、図-9に示すように $R_{ave}=0.01rad.$ 時の魚骨の層剪断力も下層ほど大きい。しかしながら、魚骨の層剪断力の高さ方向の変化は、モデルに作用する A_i 分布層剪断力より小さい。この層剪断力の差分が耐震壁に生じている。

4.3 動的解析結果

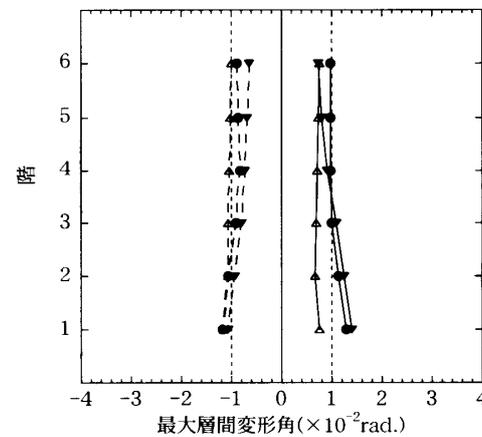
表-1に各モデルの動的解析に用いた地動加速度の最大値(PGA)を健全魚骨のPGAで無次元化した値(r_{PGA})を示している。 r_{PGA} は、健全魚骨



(b)モデル CF-w1



(a)モデル BF



(c)モデル CF-FW-w1

図-10 最大層間変形角

と均等魚骨を除いた柱降伏型魚骨では同じ大きさである。均等魚骨の r_{PGA} は、他の魚骨より4割程度大きい。これは均等魚骨のみ剛性が他の魚骨より大きく固有周期が異なるためと思われる。

モデルBF, CF-w1, CF-FW-w1の動的解析から得られる各地震波に対する最大層間変形角の高さ方向の分布を図-10にそれぞれ示す。梁降伏型魚骨であるモデルBFでは、層間変形角が高さ方向に概ね均等で、最大でも0.013rad.未満である。一方、柱降伏型のモデルCF-w1では最下層に層間変形が偏り、その絶対値の最大は東北大波で0.036rad.に達している。しかし、その魚骨に耐震壁を連結したモデルCF-FW-w1では最大も東北大波で0.014rad.に低減されている。

図-11aに動的解析から得られる魚骨のみのモデルの最大層間変形角を示す。どのモデルの最大層間変形角も、破線で示した0.012rad.を上回っており、特に弱点層有り魚骨と均等魚骨の最大層間変形角が大きい。

続いて、図-11bは、耐震壁を連結したモデルの動的解析を行った場合の最大層間変形角を示す。最大層間変形角は、静的解析から得られる値(=0.012rad.)を上回っているが、平均では同程度であり、最大でも0.014rad.未満におさまっている。

以上から柱降伏型でさらに弱点層有り魚骨や均等魚骨の耐震性能を、魚骨の性状に応じて適切な剛性をもつ耐震壁を連結することにより、健全魚骨と同等にすることができることが分かる。

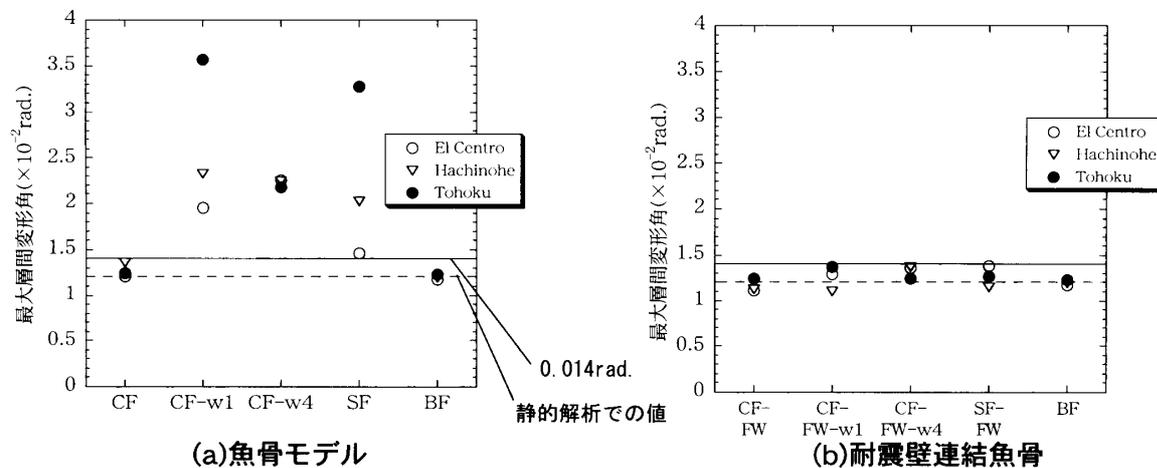


図-11 最大層間変形角

5. 結論

RC魚骨と転倒モーメントを負担しない耐震壁で構成される解析モデルの静的・動的解析を行い、以下の結論を得た。

1. 建物の層崩壊は柱降伏後に生じ、変形能力の大きい耐震壁を用いれば防止できる。
2. 骨組から耐震壁に作用する水平力は、降伏層の上下梁位置に集中し、その大きさは降伏層の不足層剪断耐力と同等である。
3. 静的解析において、柱降伏型魚骨でも、梁降伏型の整形な魚骨と最大層間変形角を同じ程度に抑制できる曲げ剛性をもつ耐震壁が連結されると、耐震性能は梁降伏型の整形な魚骨と同等となる。
4. 動的解析から得られる層間変形角の最大応答は、3波の平均では静的解析で得られる値と同程度であり、最大でも0.014rad.未満に収まる。

参考文献

- 1) 崎野健治：転倒降伏耐震壁に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.26, No.2, pp.1435-1440, 2004.7
- 2) Kawano, A, Griffith M.C., Joshi, H.R. and Warner, R.F: Analysis of the Behavior and Collapse of Concrete Frames Subjected to Seismic Ground Motion, Research Report No.R163, Department of Civil and Environmental Engineering, The University of Adelaide, Australia, Nov.1998
- 3) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説，1999