

論文 東日本大震災で被災した境界梁付き連層耐震壁架構の弾塑性解析

久保 彰平^{*1}・鶴飼 里奈^{*2}・高橋 之^{*3}・市之瀬 敏勝^{*4}

要旨：本研究は2011年東北地方太平洋沖地震で短スパン境界梁のせん断破壊等の大きな被害を受けたRC造建物を対象とする。建物の非構面外直交壁の有無やペントハウス部の取り付け方法をパラメータとした複数の解析を行い、被害に至るメカニズムの把握を試みた。解析の結果、建物変形が小さい場合でも短スパン境界梁が破壊することがわかり、当該建物の様に、構面外の非構造壁を考慮した補強計画の検討が必要となる場合もあることが示された。構面外の非構造壁の影響は、境界梁の破壊が生じやすいという建物の継続使用に関わる問題で、建物全体としての保有水平耐力、荷重変形関係自体には、ほぼ影響がないことも確認できた。
キーワード：東北地方太平洋沖地震、耐震補強、短スパン梁、直交壁

1. はじめに

東北大学工学部電子・応物系実験研究棟は、地上8階、ペントハウス2階建のRC造建築物であり、1996年にはRC耐震壁の新設および打ち増しによる耐震補強が施されている。しかしながら、2011年3月11日発生の東北地方太平洋沖地震において甚大な被害を受けた。特に短スパン境界梁のせん断破壊が顕著であり、被災度区分判定基準¹⁾では大破に分類されたため、取り壊しに至った。

文献²⁾より構面外の壁が被害に大きく関与していると疑われる。また当該建物では、耐震壁の配置や開口の位置からR階の梁の変形を考慮する必要があると考えられる。

そこで本報では、耐震補強を施し十分な耐震性能を有すると判断されたにも関わらず大きな地震被害を受けた建物について被害状況を報告するとともに、構面外の壁、R階の梁の変形を考慮し、通常的设计とは異なる建物のモデル化を行う。構面外の壁の有無やペントハウスの取り付け方法をパラメータとした複数の解析を行い応答状況を比較することで、被害に至ったメカニズムの把握を試みる。

2. 建物諸元

2.1. 概要

当該建物(図-1)は、東北大学青葉山キャンパス内



図-1 建物外観

に位置する。図-2に示すように、当該建物は長手方向に7スパン、短手方向に3スパンを有し、I-J構面間にコア部分を配する平面形である。また、ペントハウス階は長手方向に3スパン、短手方向に1スパンを有する平面形である。長手方向ではI,J構面が、短手方向では7, 9, 11, 14通りが耐震壁を多く有するフレームとなっている。

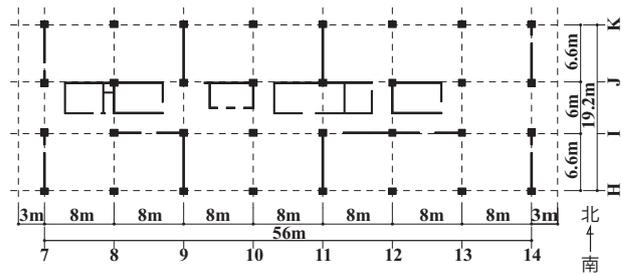
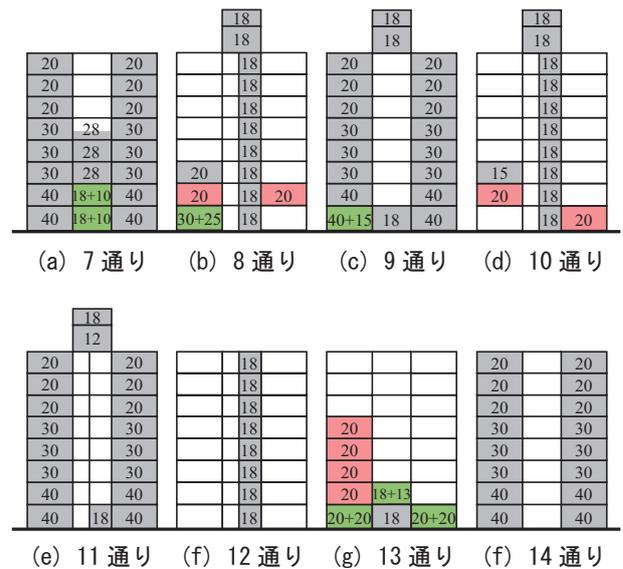


図-2 本棟6階平面図

■新設 ■打ち増し ■無補強 数字は壁厚(cm)



(a) 7通り (b) 8通り (c) 9通り (d) 10通り

(e) 11通り (f) 12通り (g) 13通り (h) 14通り

*1 名古屋工業大学 工学部建築・デザイン工学科 (学生会員)
 *2 名古屋工業大学大学院 工学研究科社会工学専攻 (会員外)
 *3 名古屋工業大学 工学部建築・デザイン工学科助教 工博 (正会員)
 *4 名古屋工業大学 工学部建築・デザイン工学科教授 工博 (正会員)

2.2. 耐震診断・補強

当該建物は1996年に耐震補強が施され、1～5階にかけてのみ耐震壁の新設および打ち増しが行われた。図-3に短手方向の壁の位置を示す。図中の赤色は新設、緑色は打ち増し、灰色は無補強の耐震壁、図中の数字は壁厚をcmで示す。8, 10, 13通りに関しては1～5階に部分的に20cmの壁が新設されており、11, 12, 14通りに関しては無補強となっている。また、補強設計資料に記載はないが、境界梁の短スパン部分に炭素繊維補強が行われている。

図-4に、当該建物の短手方向の補強後の $C_T S_D$ 値を示す。これは、第2次診断法による耐震診断より得られたものである。なお、ペントハウスについては診断が行われていなかったため、現行基準に基づいて算出を行った。一般階においては各階0.65以上の値となっており、十分な耐力を有していると判断される。

3. 被害概要

本報では、全構面の中でも損傷が大きかった11通りに注目して検討を行う。図-5に現地調査による短手方向のひび割れ図を示す。11通りの境界梁は、構面外の直交壁によって二分されており、短スパンとなった梁にせん断破壊(図中の赤色部分)が生じた。短スパン境界梁には、大きいもので直径45cm程度の開孔があり、これに繋がるひび割れが確認された。梁が大きく損傷する一方で、柱および耐震壁のひび割れ幅は概ね1mm以下となった。特に1階に関しては、上階と比較してひび割れが少なく、軽微な被害であったことが確認された。

11通りの7階短スパン梁の被害状況を、図-6に示す。これに対し、長スパンとなった梁には殆ど被害が生じていない。ペントハウス階は耐震補強設計による補強は無いため、当該地震によって甚大な被害を受けた。特にペントハウス1階の損傷が大きく、柱主筋の座屈や壁の崩壊などが見られた。梁の損傷と同様に、11通りにいくにつれてペントハウス部分の損傷が拡大したことが確認されている。

4. 静的解析

4.1. モデル化

短手方向を対象とし、解析を行う。各部材のモデル化は、梁・柱は、両端弾塑性バネを配した線材に置換する。耐震壁は、上下の剛梁にピン接続する二本の側柱と壁板要素の三本柱モデル(壁谷澤モデル)とする。また、各部材の耐力は断面形状より計算し、柱および耐震壁においては軸力との相関関係(M-N)を考慮する。復元力特性は、軸方向をBi-Linear型、曲げをTri-Linear型、せん断をBi-Linear型(但し、耐震壁のせん断についてはTri-Linear型)としている。

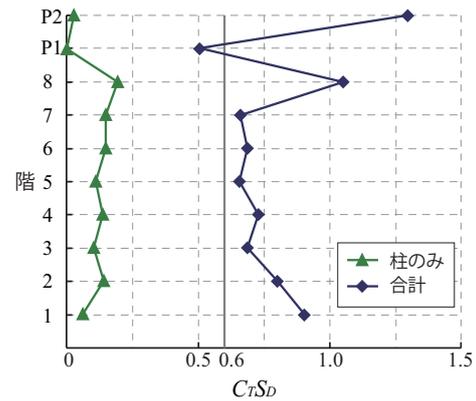


図-4 短手方向の各階 $C_T S_D$ 値

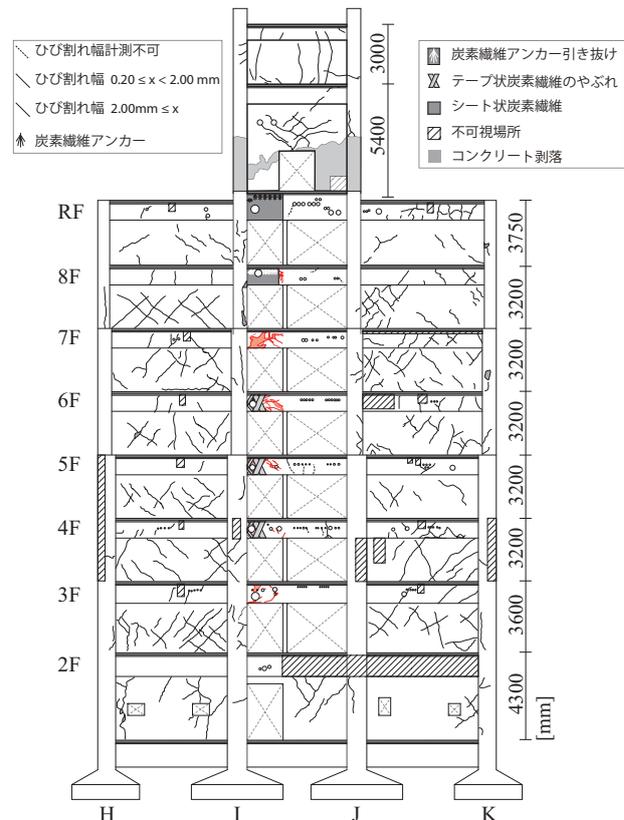


図-5 11通りひび割れ図

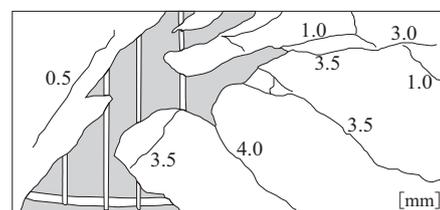


図-6 7階短スパン梁の被害状況

また、梁は軸方向に変形しないものとし、耐震壁の側柱は、軸方向のみに変形するものとしている。壁板は開口低減も考慮し、各部材のひび割れ耐力、終局耐力は建築物の構造関係技術基準解説書³⁾にしたがって計算している。

有孔梁はRC規準⁴⁾より孔を考慮したひび割れ強度、終局強度を適用した。有孔梁の孔径が $\phi 100$ に満たない孔は無視し、複数の開孔を有する場合は、等価な単独円形孔⁵⁾

に置換して計算を行った。表一 1 に 11 通りの短スパン境界梁の開孔によるせん断強度の低減率とせん断余裕度 (Q_{su}/Q_{mu}) を示す。ほぼ全ての層でせん断破壊が生じる結果であり、被害状況と同様の傾向であった。また、境界梁には炭素繊維補強がなされているが、文献²⁾からアンカー長さの不足が確認されていることや、補強計画が不明確であることが報告されているため、境界梁強度には考慮せずに解析を行った。

直交壁を有する構面を I' 構面とし、通常の構造解析では計算対象とならない小梁を考慮する。非構造壁は、壁板と仮想柱に該当する箇所を決め、耐震壁として扱うことでモデル化を行った。これらの方針により作成した各モデル化平面図 (直交壁あり、なし) を、それぞれ図一 7, 8 に示す。仮想柱は壁板端部、梁と交差する軸に配置して計算を行っており、置換方法を図一 9 に示す。図中の数字は、図一 7, 8 の仮想柱数字と対応しており、壁の断面 (青領域) と等価な面積になるように柱の断面 (赤領域) を設定した。RC 規準³⁾において袖壁圧縮時のコンクリート許容圧縮力の簡略法より、仮想柱せい 800 mm は許容範囲内であるとして採用している。梁と交差する軸上の仮想柱の有効幅は、スラブ協力幅の考え方を参考にしており、直交壁内法高さの 1/10 の範囲が軸抵抗に寄与するとした。また、材端にピン、中央に軸バネを有する柱モデル図を図中に示す。

モデル化建物の重量が耐震診断における重量より小さかったため、差分を各階に追加補正して解析を行っている。

4.2. 静的解析結果

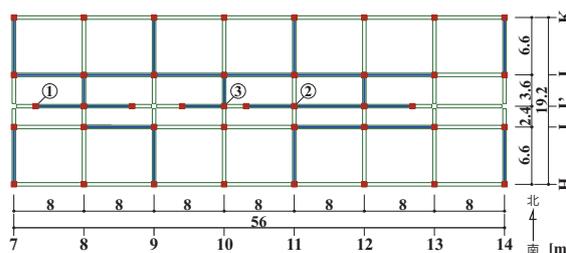
解析には一貫構造計算ソフト (SuperBuild/SS3⁶⁾) を使用した。外力は建物自重による鉛直力及び、Ai 分布に基づく地震力を設定した。地震力についてはベースシア係数 1/1000 相当の荷重増分解析を行った。また、地震力の方向は南→北方向 (正載荷) と北→南方向 (負載荷) の 2 種類について検討した。

表一 2 に示す 4 つのモデルについて比較検討する。モデル O は設計図書通りペントハウス 1 階を耐震壁としたものである (図一 10 (a))。解析ソフトのモデル化の都合上、耐震壁に取り付く上下の梁は剛体となるため、RF の梁は H~K 通りに一続きの剛梁となる。また、モデル O に I' 通りの直交壁を考慮したモデルを Os としている。一方、ペントハウス 1 階の耐震壁を耐震壁と判定せず、剛域を拡張した梁を I-J 間に設けるモデルを図一 10 (b), (c) に示す。I' 通りの直交壁を考慮しないモデルを H, 直交壁を考慮するモデルを Hs とする。以上のモデルについて、下式 (1) および (2) により⁷⁾等価一自由度系に縮約した代表変位が 5 cm となるまで解析を実行する。得られた変位を建物の代表高さ 2403 cm で割ることにより代

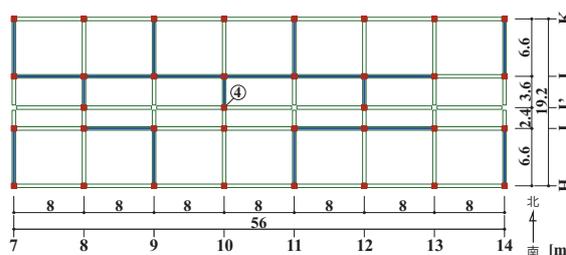
$$S_d = \left(\sum_{i=1}^N P_i \cdot \delta_i \right) / \left(\sum_{i=1}^N m_i \cdot \delta_i \right) \quad (1)$$

表一 1 短スパン梁せん断余裕度

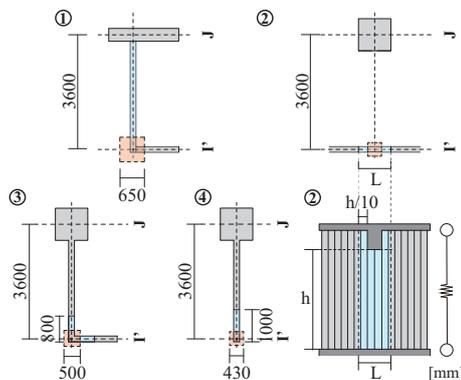
階数	11 通り	
	開孔低減率	Q_{su}/Q_{mu}
RF	0.74	0.84
8	0.69	0.80
7	1.00	1.13
6	0.62	0.70
5	0.73	0.96
4	0.61	0.80
3	0.47	0.69
2	0.62	0.88



図一 7 モデル化平面図 (直交壁あり)



図一 8 モデル化平面図 (直交壁なし)

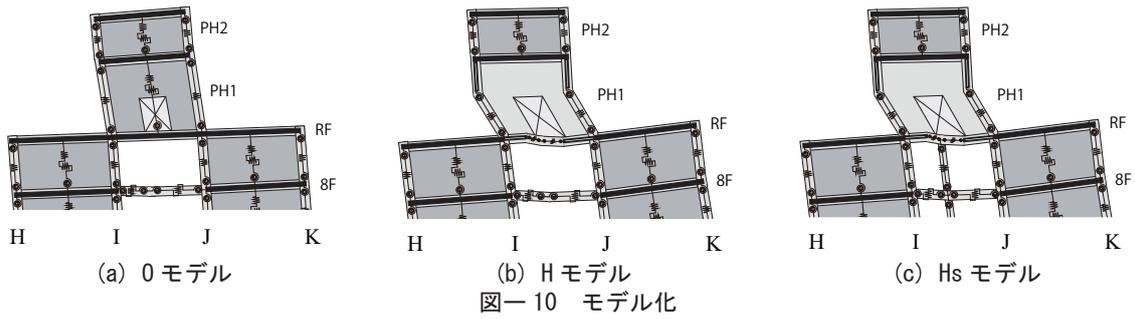


図一 9 仮想柱置換方法

$$S_d = \left(\sum_{i=1}^N m_i \cdot \delta_i^2 \right) / \left(\sum_{i=1}^N m_i \cdot \delta_i \right) \quad (2)$$

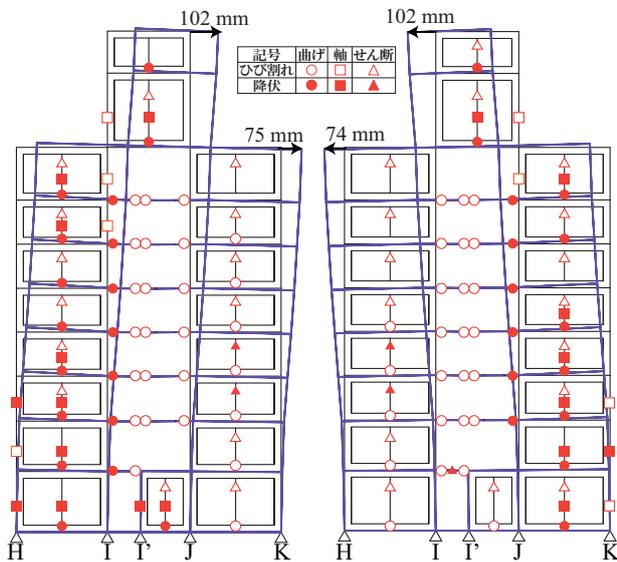
表変形角を求め、各モデルの代表荷重-代表変形角関係を図一 11 に示す。

解析終了時の代表荷重も同程度となっており、正、負の両方向載荷時において、4 つのモデルの結果がほぼ重なっている。これは、モデル化の違いや直交壁の有無が建物全体の復元力特性に影響していないことを示している。この時のモデル O の変形状態 (正・負載荷) を図一 12 に示す。境界梁のせん断ひび割れより、各階の耐震壁のせん断ひび

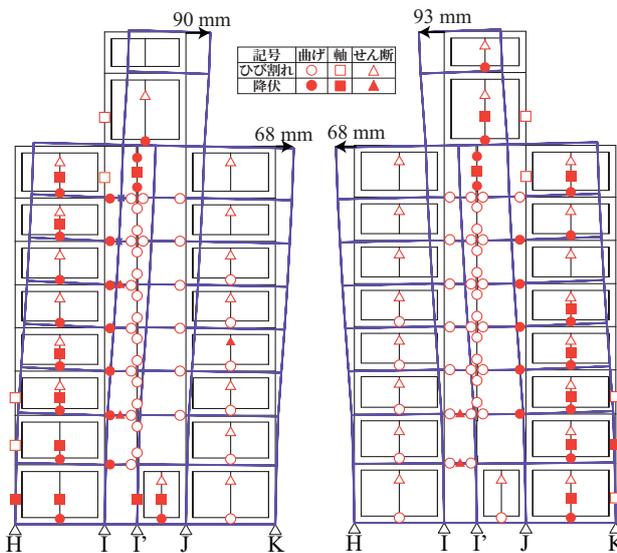


表一 2 解析モデル

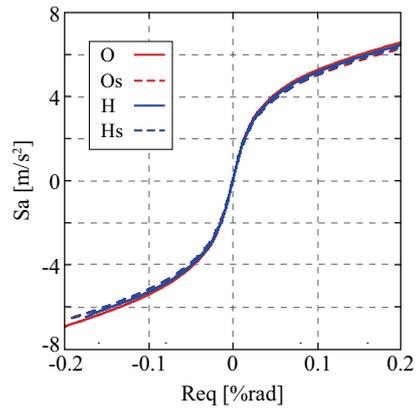
O	直交壁なし RF 階の梁剛
Os	直交壁あり RF 階の梁剛
H	直交壁なし RF 階の梁 曲げせん断バネ置換
Hs	直交壁あり RF 階の梁 曲げせん断バネ置換



(a) 0・正載荷 (b) 0・負載荷
図一 12 モデル 0 の 11 通りの変形図



(a) 0s・正載荷 (b) 0s・負載荷
図一 13 モデル 0s の 11 通りの変形図



図一 11 代表荷重一代表変形角

割れが先行し、両方向の載荷で3、4階の耐震壁がせん断降伏に至った。この時のベースシア係数は0.45程度であり、耐震診断結果0.65より少し低い値をとっている。

モデルOsの変形状態(正・負載荷)を図一13に示す。正載荷時は直交壁を考慮したことにより3階、6階の梁にせん断降伏が生じたが、耐震壁のせん断降伏も同時に発生していることが確認できる。

H, Hsについて同様の解析を行った結果を図一14, 15に示す。RFのI-J間梁が剛梁でなくなったことにより、H-I間とJ-K間が連動して変形する量が軽減され、モデルOに見られた3、4階の破壊状況はせん断ひび割れに留まる結果となった。両方向の載荷においても、耐震壁のせん断破壊よりも梁のせん断破壊が先行し、すべての耐震壁はひび割れで留まっていることから、実被害と概ね一致するような解析結果が得られたと考えられる。また、両モデルでペントハウス側柱部分でせん断降伏、曲げ降伏が生じており、実被害状況とも対応している。RFのI-J間梁のヒンジ生成により曲げ降伏している点については実被害と異なる結果であるため、モデル化に際し更なる検討が必要である。

モデルHの正載荷においては、一般階の短スパン梁はせん断ひび割れ発生前までとなっており、負載荷時には、短スパン梁のせん断降伏が2階に生じた。一方、モデルHsの正載荷時は3階部分、負載荷時は5、7階以外の階にせん断降伏が確認できる。以上より、直交壁を考慮することで、短スパン梁への変形集中を確認することができた。

モデルO, H, Hsの両方向載荷時のI-J間モーメントを

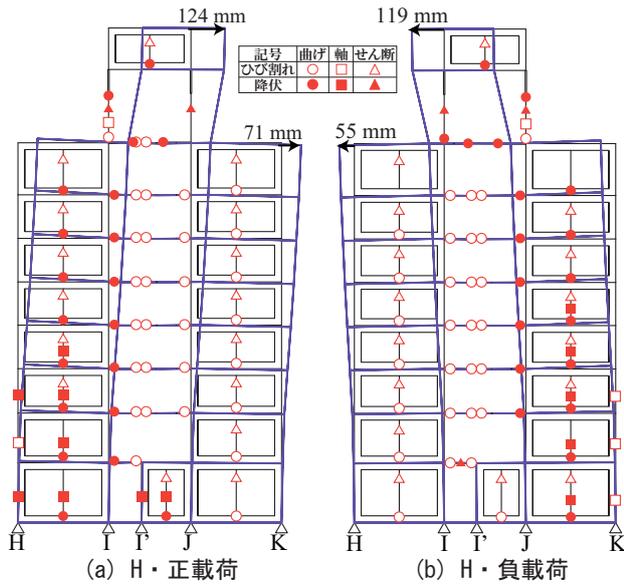


図-14 モデルHの11通りの変形図

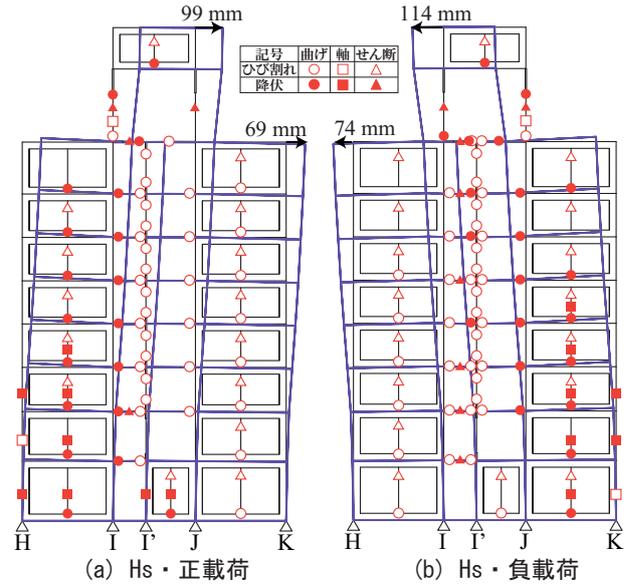


図-15 モデルHsの11通りの変形図

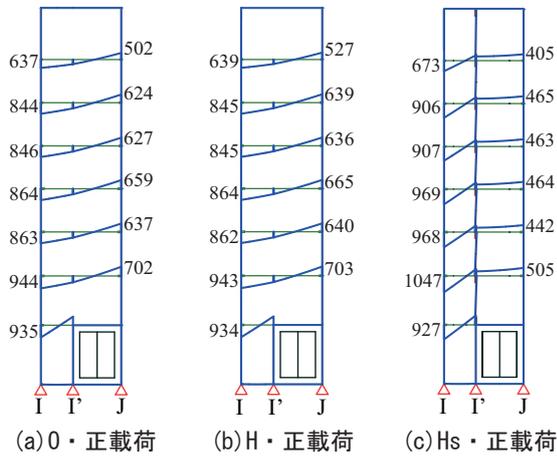


図-16 梁の曲げモーメント図 (単位 kN.m)

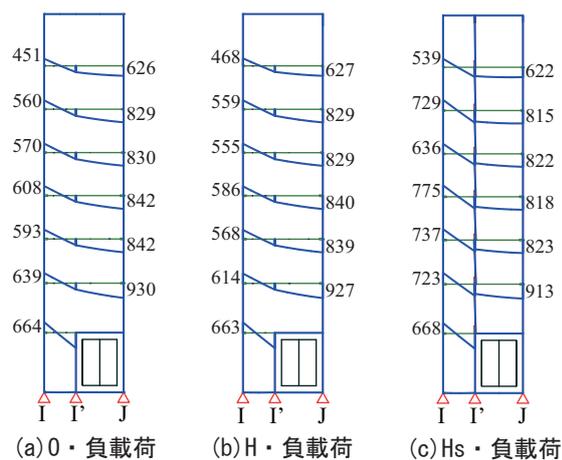


図-17 梁の曲げモーメント図 (単位 kN.m)

それぞれ図-16, 17に示す。左右の数値はそれぞれ、I-I' 梁左端のモーメント値、I'-J 梁右端モーメント値を示している。OとH、HsのI-I' 梁左端モーメント値を比較すると、直交壁を考慮することでモーメント値が最大1.3倍増加している。一方で、I'-J 梁右端モーメント値は、同程度の結果

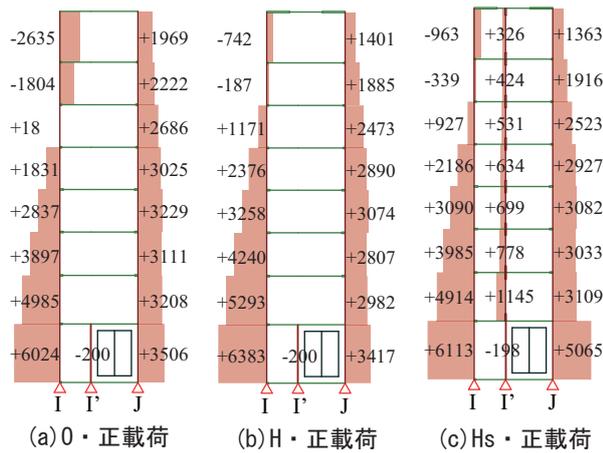
となっている。このことから、直交壁の取り付けが短スパン梁のせん断力を増大させる結果となり、境界梁の被害に影響を及ぼしていることがわかる。

図-18, 19にモデルO, H, Hsの両方向載荷時の軸力図を示す。I' 構面では、正負両載荷時に圧縮力が生じており、また、正載荷時はI' 構面の7, 8階、負載荷時はJ 構面の7, 8階に引張軸力が作用している。このようにI' 構面で軸力を負担することにより、短スパン梁が直交壁に拘束され、変形が集中したと考えられる。

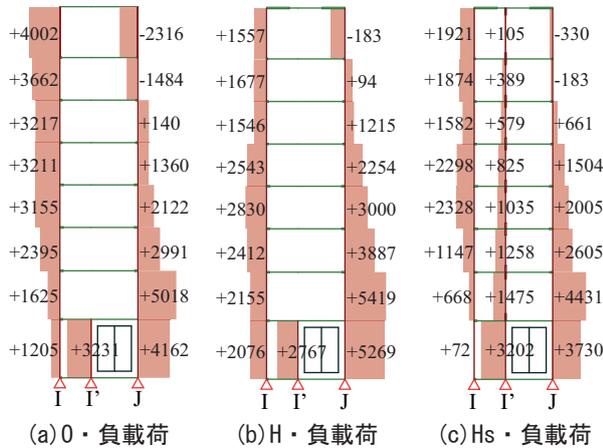
建物の代表変位が5cm程度となる時の、各モデルのせん断力をせん断降伏強度で除した結果を図-20に示す。モデルO(実線)とOs(点線)を赤線で、モデルH(実線)とHs(点線)を青線で示している。

負載荷時はモデルOs, Hsのせん断力余裕度がモデルO, Hの余裕度を上回っており、直交壁を考慮することで、短スパン梁に作用するせん断力が高くなることがわかる。正載荷時は、OとHの結果がほぼ重なっており、Osの結果がHsをわずかに上回っている。しかし、モデルOsは実被害と対応しない耐震壁のせん断破壊が生じているため、実被害状況と一致するのはモデルHsの結果である。解析結果より、正載荷時はHsとO,Hの間に3程度の差が見られ、負載荷時はHsとO,Hとの間に1.8倍程度の差が見られた。また、境界梁に与える影響は、5, 7階以外の梁がせん断破壊した負載荷の方が大きい。

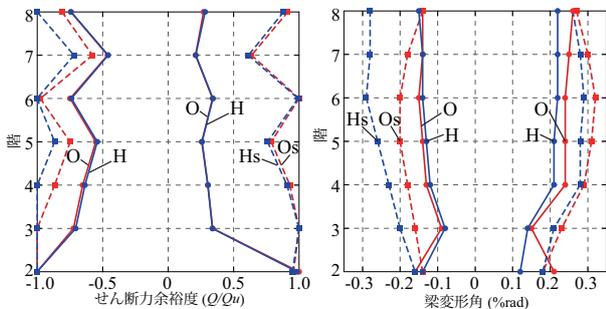
図-20の変形時における各モデルの短スパン梁変形角を階ごとに図-21に示す。梁変形角は、図-22に示すようにスパン中央部の鉛直変位 δ を梁のクリアスパンLで除したものとする。モデルHsの変形角は0.3%rad程度まで増加し、建物の代表変形角0.2%radを上回っている。これより、建物全体の変形に対し、短スパン境界梁に極端に



図一 18 軸力図 (単位 kN)

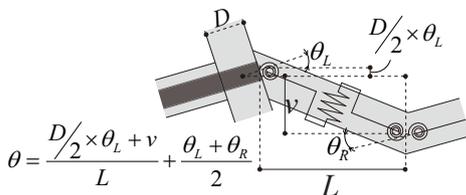


図一 19 軸力図 (単位 kN)



図一 20 梁せん断力

図一 21 梁変形角



図一 22 梁変形角の定義

大きな変形が生じたといえる。負載荷時は、モデル Hs の梁変形角が他のモデルを大きく上回っていることが確認できる。正載荷時は耐震壁にせん断降伏が生じているモデル Os の梁変形角が最大となっているものの、直交壁を考慮したモデル Os と Hs の変形角が他のモデルを上回っていることが確認できる。これらの解析結果は図一 6 で示した梁の

被害状況とも一致する。

以上より、図一 11 の代表荷重変位関係に示したように、建物の変形量が同程度であるため、境界梁における破壊の有無が保有水平耐力、荷重変形関係 (耐震性能) に影響を及ぼしていないことが考えられる。よって、直交壁の影響は耐震性能の確保よりも、境界梁の破壊が生じやすく、継続使用が困難になる問題があると考えられる。

8. 結論

- (1) 2011 年東北地方太平洋沖地震による当該建物の被害は、短スパン境界梁でせん断破壊が顕著であり、柱および耐震壁の被害は軽微であった。
- (2) 構面外の非構造壁が境界梁を上下方向に拘束することで、短スパン梁のみにせん断破壊が集中する一方、長スパン梁には顕著な被害が生じないといった実被害と対応するような解析結果が得られた。
- (3) 構面外の非構造壁の影響は、境界梁の破壊が生じやすいという建物の継続使用に関わる問題であり、建物全体としての保有水平耐力、荷重変形関係 (耐震性能) 自体には、ほぼ影響がないことが確認できた
- (4) 当該建物のように、境界梁が構面外の非構造壁によって二分化されるような主架構においては、構面外の非構造壁を考慮した補強計画の検討が必要となる場合もあると考えられる。また、境界梁に孔を開けることは避ける方が望ましい。

参考文献

- (1) 日本建築防災協会：震災建築物の被災度区分判定基準および復旧技術指針，2001.9
- (2) 長屋 敦士，高橋 之，市之瀬 敏勝，高橋 香奈子，Hamood Al-washali，前田 匡樹：東日本大震災による東北大学工学部建物の被害 (その 2)，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造 IV，pp.5-8，2012.9.
- (3) 国土交通省住宅局建築指導課ほか：2007 年度版建築物の構造関係技術基準解説書，全国官報販売協同組合，2007.8
- (4) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説，2010.2
- (5) 加藤 裕子，堀田 和敬，高橋 之，市之瀬 敏勝，鈴木 一希，前田 匡樹：東日本大震災による境界梁付き連層耐震壁架構の被害と分析，日本建築学会東海支部研究報告集 No.52，pp.321-324，2014.2.
- (6) (株) ユニオンシステム，Super Build/SS3(Ver.1.1.1.33)，2014
- (7) 倉本 洋，秋田 知芳：多層壁フレーム建築物の等価 1 自由度系縮約と高次モード応答せん断力の評価，日本建築学会構造系論文集，No.605，pp.79-86，2006.7.