

振動実測と解析に基づく S 造及び SRC 造 10 階建て建物の振動特性評価 ESTIMATION OF DYNAMIC PROPERTIES OF 10-STORY STEEL AND SRC BUILDINGS BASED ON EXPERIMENTAL AND ANALYTICAL STUDY

小島宏章¹, 岡田純一², 福和伸夫³, 飛田潤⁴

¹ 名古屋大学大学院環境学研究科, 大学院生 修士 (工学)

日本学術振興会特別研究員

Hiroaki Kojima, Grad. Sch. of Environmental Studies, Nagoya University, hiroaki@sharaku.nuac.nagoya-u.ac.jp
Research Fellow of the Japan Society for the Promotion of Science

² 竹中工務店 修士 (工学)

Jun'ichi Okada, Takenaka Corporation, okada.junichi@takenaka.co.jp

³ 名古屋大学大学院環境学研究科, 教授 工博

Nobuo Fukuwa, Grad. Sch. of Environmental Studies, Nagoya University, fukuwa@sharaku.nuac.nagoya-u.ac.jp

⁴ 名古屋大学工学部社会環境工学科, 助教授 工博

Jun Tobita, Dept. of Civil Eng. and Arch., Sch. of Eng., Nagoya University, tobita@sharaku.nuac.nagoya-u.ac.jp

SUMMARY

Dynamic properties of a steel building and a SRC building were examined by microtremor test and earthquake response observation. A steel building shows special earthquake response properties caused by close natural frequencies. Comparison of observation data with 3-D frame model analysis, natural frequencies of a steel building are almost identical. Otherwise in case of a SRC building, analytical value is lower observed results. Therefore, we estimate stiffness due to the existence of non-structural elements (side wall and spandrell wall) by FEM analysis. A frame with side wall or spandrell wall is two times as stiff as pure frame.

キーワード : 常時微動計測, 強震観測, 近接固有値, FEM 解析

Key words : Microtremor test, Earthquake response observation, Close natural frequencies, FEM analysis

1 はじめに

中低層建物の実際の振動性状は, 建物と地盤との動的相互作用, 平面形状の不整形性, 二次部材の影響などにより非常に複雑な場合が多いが, これらの要素は一般に直接的なモデル化が困難である。耐震設計法構築時の基礎資料作りやシミュレーション解析に中低層建物の複雑な振動性状を反映させるためには, 様々な影響因子に着目して詳細に実測記録を分析した上で, 構造解析と比較することが有効である。しかし, 高層建物などの重要構造物に比べ, 存在比率の高い一般的な中低層建物に関する研究は十分とはいえない。特に, 高密度な観測記録を用いた中低層建物の振動特性の詳細な分析は少ない。

著者らは既報¹⁾で構造種別, 構造形式, 基礎形式の異なる2棟の10階建て建物を対象として建設段階毎に高密度常

時微動計測を行い, 建物と地盤との動的相互作用の影響度合いが2棟で大きく異なることを示し, その原因として上部構造形式, 杭種別, 平面形状, 建物重量にともなう慣性力の相違が影響している可能性を指摘した。また, 既報²⁾でSRC造10階建て建物を対象として, 平面増築前後での振動特性の変化を詳細に検討し, 立体振動挙動が増築前後で変化することを示した。同時に, 設計モデルと観測記録との固有振動数の乖離, 床の面内変形, 基礎の面外変形の存在を示し, 設計時に一般的に行われている剛床仮定が成り立たないことを指摘した。

本論では, 構造種別, 構造形式の異なる2棟の10階建て建物を対象として, 実測と解析の両面から2棟の応答性状の特徴を示す。また, 実測記録と解析結果を比較することで, その差異の原因について検討する。さらに, 実測記録と解析結果の差異の原因として, 開口を有する壁の剛性評

価に関して FEM 解析により検討する。

2 対象建物及び計測概要

対象建物は名古屋大学東山キャンパス内に立地する2棟の10階建て建物であり、S造のIB電子情報館（以下、S造建物）とSRC造の工学研究科新1号館（以下、SRC造建物）である。Table 1に両棟の建物概要を示す。S造建物は純ラーメン構造で、耐震壁は全く存在せず、外壁はPCカーテンウォールである。基礎には杭長42mの場所打ちコンクリート杭が採用されている。Fig. 1にS造建物の基準階平面の概略図を示す。SRC造建物は壁付きラーメン構造で、桁行方向に耐震壁が多く配置されている。外壁はPCカーテンウォールであり、そのすぐ内側には腰壁・袖壁を有するフレームが配置されている。詳細図をFig. 3に示す。このフレームに取り付け壁は、開口の大きさから耐震設計上は耐震壁とはみなされず、その剛性は考慮されないことが

Table 1 Outline of Buildings		
	S造建物	SRC造建物
骨組形式	ラーメン構造	壁付きラーメン構造
階数	地上10階，地下1階	地上10階，一部地下1階
軒高	41.1m	39.3m
面積（基準階）	821m ²	1,057m ²
（1階）	821m ²	1,404m ²
基礎形式	杭基礎	杭基礎
杭種別・杭長	場所打ち杭 42m	PHC杭 45m
杭径	1,200～1,400φ， （掘底部：1,700～2,400φ）	600φ
基礎底面深さ	GL-7.5m	GL-2.3m，一部GL-7.8m

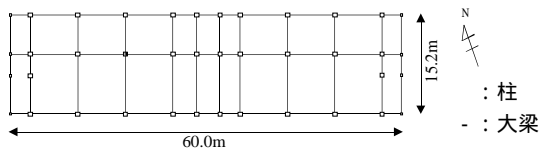


Fig.1 Key Plan of a Steel Building

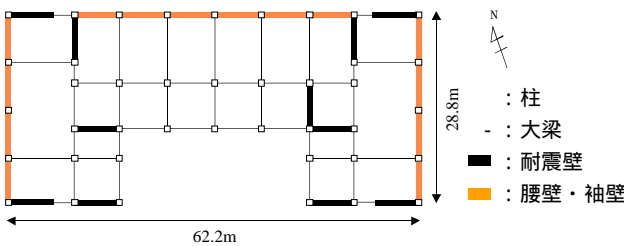


Fig.2 Key Plan of a SRC Building

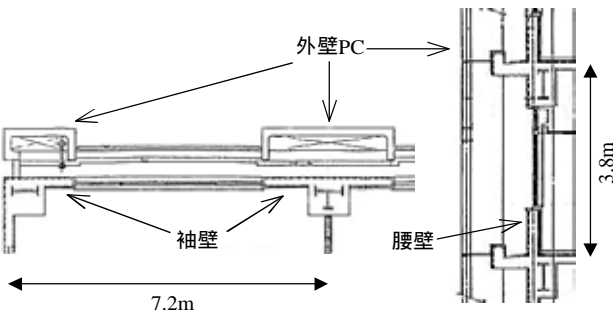


Fig.3 Details of Side Wall & Spandrel Wall (SRC Building)

一般的である。基礎には杭長45mのPHC杭が採用されている。Fig. 2にSRC造建物の基準階平面の概略図と壁を有するフレームの配置を示す。

常時微動計測は、S造建物では、竣工直後に32成分の高密度同時計測を行い、積載荷重の影響を分析するため竣工半年後に12成分の同時計測を行った。竣工直後の計測時は強風であった。SRC造建物では、46成分の高密度同時計測を行った。Fig. 4にセンサー配置を示す。いずれの計測も、固有周期1秒の動コイル型微動計を用いて、変位成分を200Hzサンプリングで約30分間収録した。記録の分析は人や交通振動等のノイズ部分を除いた上で、S造建物では81.92秒の約20波の記録を用い、SRC造建物では20.48秒の約70波の記録を用いてアンサンブル平均してフーリエスペクトルと伝達関数（Hv推定）を求めている。

強震観測は、S造建物ではFig. 5（a）に示すように、建物の増幅特性に加えて、ねじれ、ロッキングを観測できるように9成分にセンサーを配置している。SRC造建物では、竣工時は地盤と建物の増幅特性のみが観測できるセンサー配置であったが、その後、センサーを追加、移動して、ねじれ、ロッキングも観測できる配置となっている²⁾。Fig. 5（b）にSRC造建物の2002年4月現在のセンサー配置を示す。いずれの強震観測も、サーボ型加速度計を用いて100Hzサンプリングでデータの収録を行っている。現在までに、S造建物では14地震、SRC造建物では現状の建物形状となった後に21地震の記録が得られている。本論ではこれら全ての記録を用いて検討を行った。

3 実測記録に基づく建物振動性状の相違

常時微動記録と複数の地震記録を用いて建物振動性状の相違を検討する。本論では実測値と解析値を比較するために、基礎固定系を想定した固有振動数を求める。

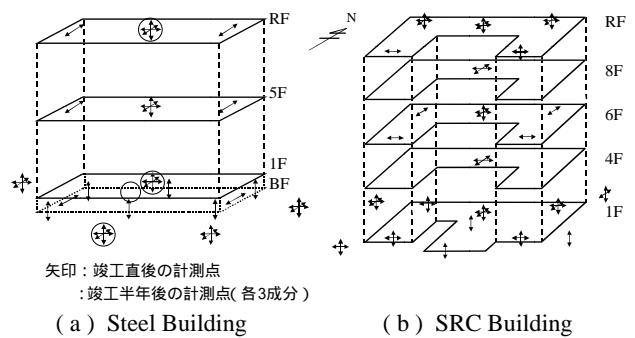


Fig. 4 Observation Points for Microtremor

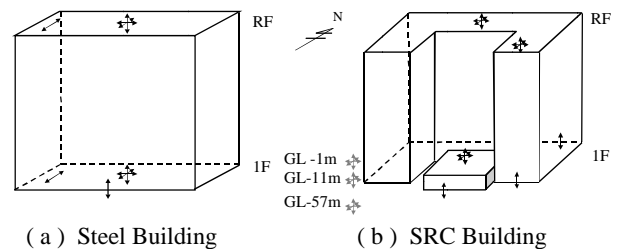


Fig. 5 Observation Points for Earthquake

常時微動記録では、スウェイとロッキングを拘束した基礎固定系の伝達関数（ $RF/(1F+H\theta)$ 、 H は等価高さ、 θ は1Fでのロッキング角）より並進成分の固有振動数を求めた。ねじれ成分は、RF両端と1F両端の張間方向成分を用いて、両端の差のフーリエスペクトルを求め、RFと1Fの比より固有振動数を求めた。地震記録では、線形多モードモデルを用いて、直交成分も含む1Fの水平2成分を入力、RFの1成分を出力としたフィッティングを行い、パラメータを推定した³⁾。SRC造建物ではねじれモードの分離が可能であったが、S造建物では張間と桁行の固有振動数が近いいため、ねじれモードの分離は良好に行えなかった。このため、フィッティングは入力、出力とも1成分として行った。S造建物のねじれの固有振動数は、RF端部と中央の張間方向成分の差のフーリエスペクトルより求めた。

Fig. 6, 7に常時微動記録と地震記録から得られた固有振動数と屋上最大加速度の関係を示す。図中には後述する解析値も合わせて示す。Fig.6の常時微動（強風）のみがやや高めの値を示しているが、これは竣工直後で積載荷重が少なかったことが影響していると考えられる。S造建物とSRC造建物の固有振動数を比較すると、S造建物では張間、桁行、ねじれの各成分が近接していることが分かる。既報¹⁾にて減衰定数の推定を行い、S造建物は1%以下、SRC造建物は2～3%の結果を得ている。

近接した固有振動数と低減衰が地震応答性状に及ぼす影響を検討する。Fig. 8, 9に長周期成分を多く含む地震（2001.6.1、震源：静岡県中部、Mj 4.8、震源深さ40km）の応答加速度波形とフーリエスペクトル比を示す。応答加速度波形の濃線は1F、薄線はRFの記録を意味する。フーリ

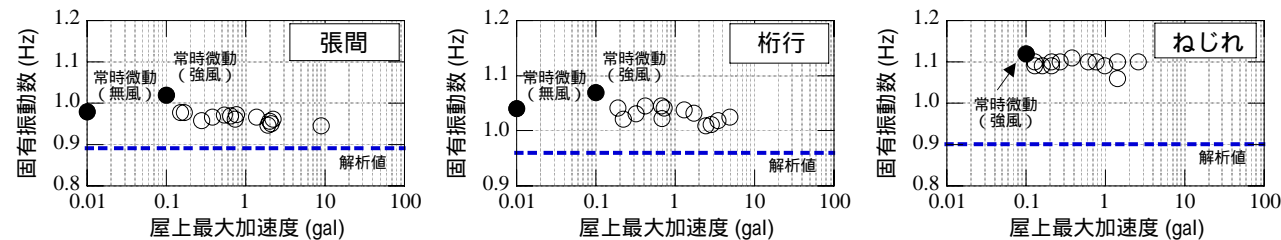


Fig. 6 Relation between Natural Frequency and Acceleration of Roof (Steel Building)

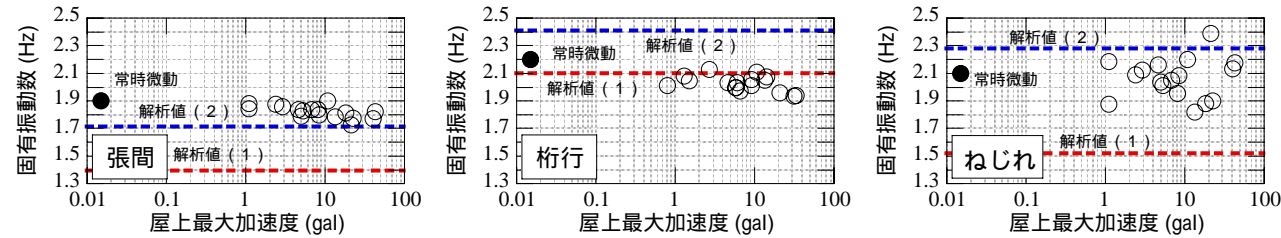


Fig. 7 Relation between Natural Frequency and Acceleration of Roof (SRC Building)

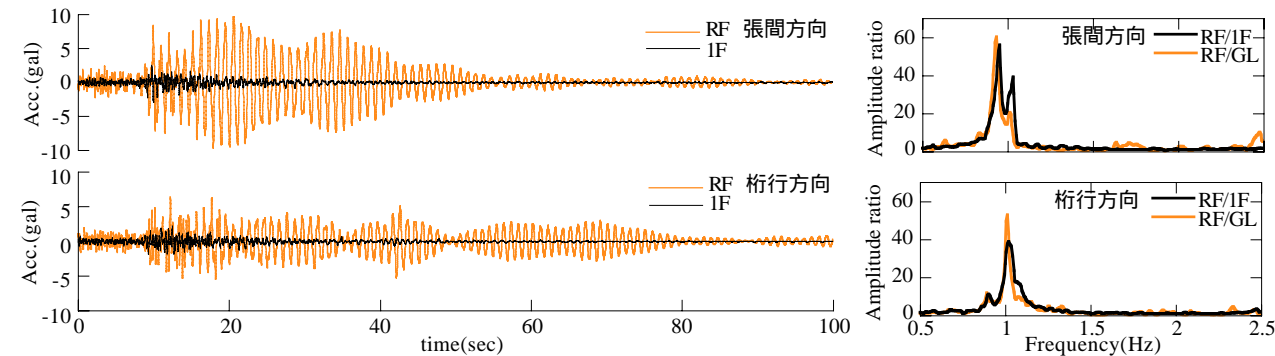


Fig. 8 Earthquake Response of Steel Building (Left :Acceleration Wave, Right : Fourier Spectrum ratio)

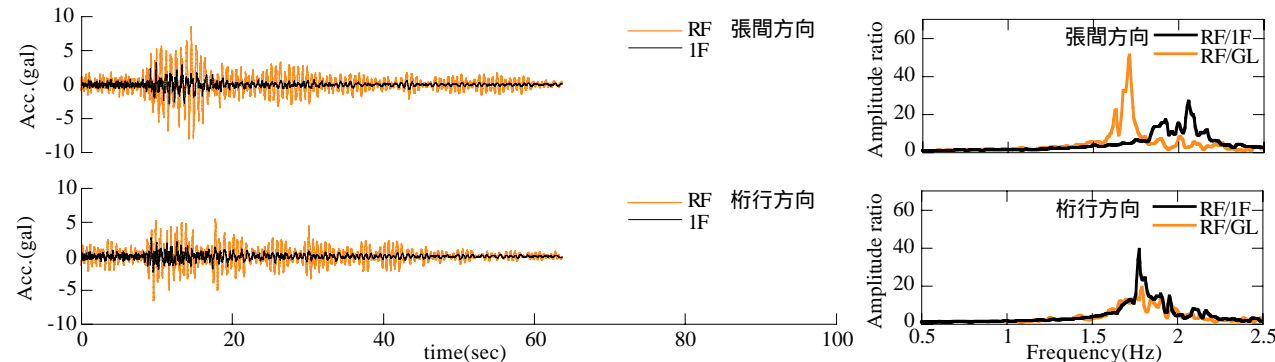


Fig. 9 Earthquake Response of SRC Building (Left :Acceleration Wave, Right : Fourier Spectrum ratio)

エスペクトル比の濃線はスウェイのみ固定した基礎固定系 (RF/1F), 薄線は地盤 - 建物連成系 (RF/GL) を意味する。S造建物は低減衰で固有振動数が近接しているため, 後続波の部分で大きく共振しながら, 張間と桁行でエネルギーのやりとりをして, うなりが生じている。フーリエスペクトル比の張間方向にも桁行方向の固有振動数の影響が大きく出ていることが分かる。それに対し, SRC造建物はFig. 8, 9のスペクトル比から分かるように, S造建物に比べ減衰が大きく, 固有振動数が張間と桁行で離れているため, 継続時間が短く, うなりもほとんど生じていない。また, Fig. 9に示した張間方向の2つのスペクトル比 (RF/1FとRF/GL) の固有振動数に顕著な差が認められ, 相互作用の影響を受けていることが分かる。

近接固有値の問題や建物と地盤との動的相互作用は, いずれも建物の減衰推定に大きな影響を及ぼすため, 今後さらに検討が必要である。

4 実測と解析の比較

S造建物とSRC造建物の柱, 梁, 耐震壁を線材置換した3次元立体フレームモデルを作成して, 固有値解析を行った。解析にあたって 水平剛床, 1階床を固定, 梁に及ぼすスラブの曲げ剛性効果を考慮, 耐震設計時に考慮した構造部材のみ剛性を考慮, の各条件を用いた。

S造建物の振動解析より得られる固有振動数を, Fig. 6に示し, Fig. 10に張間方向の並進モード図を示す。図中の実線は基準位置, 破線は各階モード形を意味する。Fig. 6より, S造建物の並進成分において解析値と実測値の差は1割程度である。微動や小地震時はサッシや間仕切り等の剛性も効いているとすれば, 解析と実測はほぼ対応していると思われる。また, 水平2方向とねじれの固有振動数が近接しており, Fig. 10のモード図にねじれが若干含まれている様子も解析で再現されている。しかし, 解析と実測で,

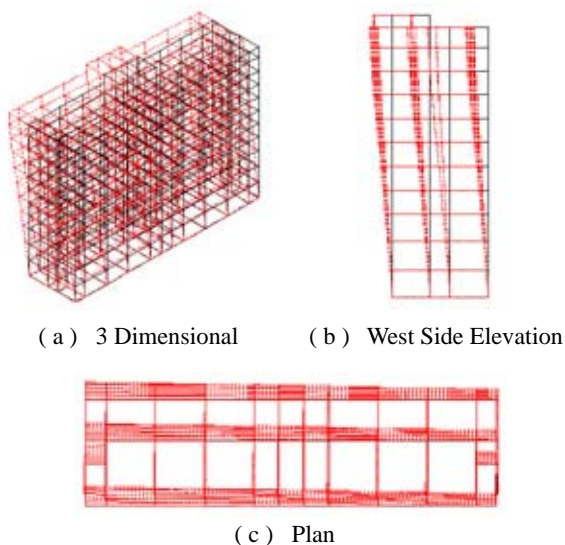


Fig. 10 1st. Transverse Modal Shape of Steel Building

桁行方向とねじれのモードの順序が入れ替わっており, ねじれの固有振動数の解析値は, 実測値に比べ2割程度低くなっている。これは, 解析において, 外壁PCの剛性を評価していないため, ねじれの固有振動数が低めに評価されていると考えられる。

SRC造建物の振動解析より得られる固有振動数を, Fig. 7に解析値 (1) として示し, Fig. 11に張間方向の並進モード図を示す。Fig. 7中の解析値 (2) については後述する。Fig. 7より, SRC造建物の解析値 (1) は, 張間, ねじれ成分では実測値より3~4割程度低い値を示しているが, 桁行方向は実測値と比較的近い値となっている。これは桁行方向に耐震壁が多く配置されているため, 張間, ねじれ成分よりも固有振動数が高く評価されたためと考えられる。Fig. 11のモード図を見ると, 張間方向の並進モードにねじれモードが含まれていることが分かるが, これは既報²⁾で示されているように, 実現象にも認められる。

SRC造建物の張間とねじれ成分で生じた実測と解析の固有振動数の差について検討する。構造解析における重量は, 構造躯体は躯体重量から, 積載重量は使用目的と面積から算出しているため, 実構造物とほぼ対応していると考えられる。したがって, 固有振動数に生じた差は, 構造解析における剛性評価の影響が大きいと考えられる。この原因として, 以下のことが挙げられる。

- (1) フレーム内に取り付く壁 (腰壁, 袖壁) の剛性
- (2) フレーム外の壁 (雑壁) の剛性
- (3) 配管, 窓などの構造部材以外の剛性

SRC造建物では (1) が解析値と実測値との差に大きく影響を及ぼしていると考えられるため, 次節にてフレーム内に取り付く壁の剛性を検討する。

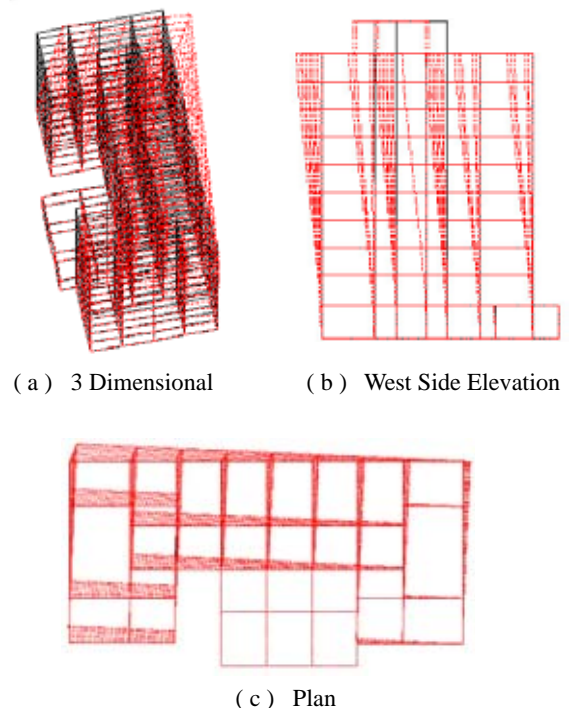


Fig. 11 1st. Transverse Modal Shape of SRC Building

5 壁の剛性評価

4節で行ったSRC造建物の構造解析では、剛性を構造部材のみしか考慮していないが、2次部材の剛性も大きく影響していると考えられる。Fig. 2に示したように、SRC造建物の外周部にはフレーム内に腰壁・袖壁を有しているフレームが多く存在する。これらの壁は開口が大きいことから設計上は耐震壁とみなせない上、柱梁のサイズに比べ壁厚が十分薄いため一般的に剛性は無視されている。

本節では、このフレーム内に取り付く壁の剛性寄与度をFEM解析を用いて検討する。解析はFig. 12に示すようにフレームのみ、耐震壁、腰壁、袖壁、腰壁と袖壁、それぞれにスリットを有するモデルを用いる。これらのモデルは実際のSRC造建物表現しており、材料はコンクリート（ヤング係数： $2.1 \times 10^5 \text{N/m}^2$ 、ポアソン比：0.18、自重は考慮しない）とし、スパンは7,200mm、高さは3,800mm、柱サイズは850×900mm、梁サイズは900×500mm、壁厚は実際の構造物と同じ腰壁・袖壁150mmと耐震壁350mmの2通りとした。支持条件は柱脚をピン支持、柱頭をローラ支持とした。連層フレームを想定して、柱頭と柱脚の回転を上下にあるフレームの柱が拘束する効果を表す回転ばねを、等価な鉛直ばねとして柱頭と柱脚の端部に設けた。

上記モデルの上梁に左から静的な水平外力を加え、その変形量から等価な剛性を算出し比較する。Fig. 12に応力図を、Table 2に変形量と純フレームに対する剛性倍率を示す。Fig. 12より、腰壁、袖壁が剛性に大きく寄与していることが分かる。また、スリットがある場合はフレームモデルと同様の応力状態になることが分かる。Table 2より、壁厚150mmの腰壁と袖壁を有するモデルでは、フレームモデルの約4倍の剛性を持っていることが分かる。この剛性がSRC造建物の固有振動数の、実測値と解析値の差の大きな原因になっていると考えられる。一般に、これらの壁は柱梁のサイズに比べ十分に薄ければ、その剛性は無視されている。しかし、壁厚150mmで腰壁あるいは袖壁のみの場合でもフレームモデルの約2倍の剛性を有している。

以上より、弾性範囲内においては、剛性評価の点で壁厚によるモデル化の判断は必ずしも適切ではないことが分かる。それに対し、スリットを有するモデルでは、フレーム

モデルと同程度の剛性となっており、剛性評価という点ではスリットを適切に施せば壁の効果は無視できることが分かる。

SRC造建物に設けられている壁厚150mmの腰壁・袖壁モデルと等価な剛性を持つ無開口の壁厚をFEM解析を用いて求めると35mmとなる。この35mmの薄い壁をSRC造建物の構造解析モデルの外周部にある腰壁・袖壁付きフレームに加えて再度解析を行った。得られた固有振動数をFig. 7に解析値（2）としてプロットする。いずれの固有振動数も上昇し、張間とねじれについては、薄い壁を入れる前の解析値（1）に比べ、解析値（2）の方が実測値に近くなっている。

以上より、SRC造建物の外周部のフレームにおける袖壁・腰壁等の剛性評価は、並進成分の剛性評価だけではなく、ねじれ成分の剛性評価にとっても重要であることが分かる。

6 開口による壁の剛性低下

耐震設計等における耐震壁の開口による剛性低下の取り扱い、開口の大きさから開口周比を算出し、 $1 - (\text{開口周比})$ を剛性低下率とする方法が用いられている。本節では、耐震壁の開口による剛性低下率を、FEM解析を用いて壁厚、フレームサイズ、開口タイプをパラメータとして検討する。FEM解析に用いるモデルは一般的なRC低層事務所を想定して、スパンは7,000mm、高さは3,300mm、柱サイズは600×600mm、梁サイズは700×400mmとした。

壁厚が剛性低下に与える影響を検討するために、Fig. 13の中央開口タイプを用いて、壁厚を100, 200, 300, 400mmと変化させる。Fig. 14に開口周比と剛性低下率の関係を、

Table 2 Ratio of Stiffness

	モデル名	フレーム	腰壁 + 袖壁	耐震壁	腰壁	袖壁
壁厚 150mm	剛性倍率	1.00	3.85	10.62	1.98	1.89
(スリット入り)	剛性倍率			1.03	1.01	1.01
壁厚 350mm	剛性倍率	1.00	5.67	18.39	2.52	2.33
(スリット入り)	剛性倍率			1.04	1.02	1.02

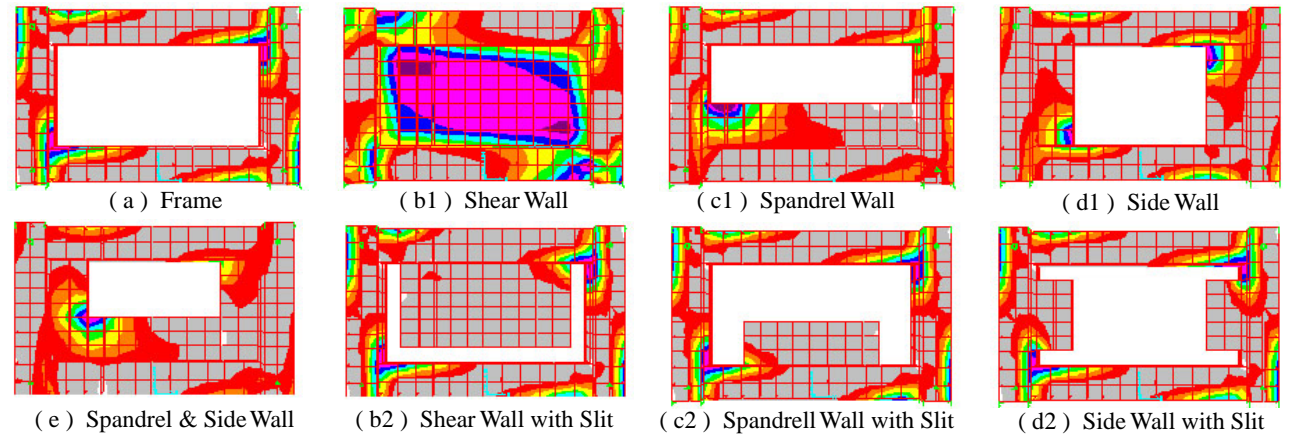


Fig. 12 Wall Types and Stress Contours

1 - (開口周比)とあわせて示す。但し、耐震壁の剛性低下率は(1)式より求めている。

$$\text{剛性低下率} = \frac{(\text{対象モデルの剛性}) - (\text{フレームモデルの剛性})}{(\text{耐震壁モデルの剛性}) - (\text{フレームモデルの剛性})} \quad (1)$$

また、Fig. 14には、フレームサイズが剛性低下に及ぼす影響を検討するために、前節で用いたSRC造建物を想定したモデル(壁厚150mm)もあわせて示す。Fig. 14より、解析値は開口周比0.3程度までは、1 - (開口周比)より剛性を若干高めに評価している。しかし、剛性低下率は壁厚、フレームサイズの影響をほとんど受けていない。

次に、開口タイプが剛性低下に与える影響を検討するために、Fig. 13に示した3つの開口タイプを用いる。中央開口タイプは上下の梁の中央に開口を配置し、縦横方向に開口を順次広げていく。縦開口タイプは上下の梁に開口が達するようにし、横方向へ開口を順次広げていき、横開口タイプは左右の柱に開口が達するようにし、縦方向に開口を順次広げていく。

Fig. 14に開口周比と剛性低下率の関係を示す。図中には1 - (開口周比)もあわせて示す。中央開口タイプと縦開口タイプの解析値は、開口周比0.3程度までは1 - (開口周比)より、剛性を若干高めに評価している。しかし、横開口タイプの減少傾向は他の2タイプとは異なり、剛性が小さい。これはFig. 13の応力図から、横開口タイプで壁の応力状態が曲げ型となり、他の2タイプのせん断型とは異なることが原因と考えられる。以上の結果より、開口による

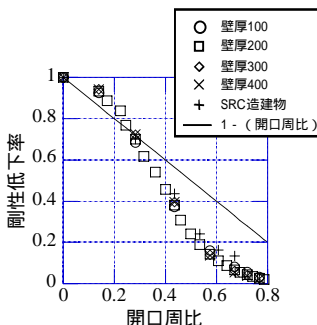


Fig. 14 Relation between Stiffness Reduction Ratio and Wall Thickness, Frame Size

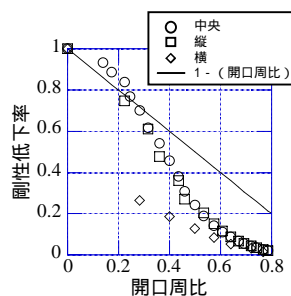


Fig. 15 Relation between Stiffness Reduction Ratio and Opening Type

剛性低下率は開口タイプによって異なる評価をする必要があると思われる。

7 まとめ

構造種別、構造形式の異なる2棟の10階建て建物を対象として、実測と解析の両面から2棟の振動性状の違い、実測値と解析値の差とその原因、及び壁の剛性評価を検討した。得られた結果を以下に記す。

固有振動数が張間と桁行で近接し、且つ低減衰の建物では、地震応答にうなりが顕著に認められた。この現象は減衰評価に大きく影響するため、今後検討が必要である。

非構造部材の少ないS造建物は、固有振動数の解析値と実測値はほぼ一致したが、非構造部材の多いSRC造建物では解析値と実測値で3～4割程度差が生じていた。

の原因を解明するために、腰壁や袖壁を有するフレームの剛性を検討し、腰壁や袖壁の存在により純フレームの約2倍の剛性を有することを示した。

腰壁と袖壁の剛性を考慮して再度SRC造建物の構造解析を行うと、固有振動数は実測値に近づいた。これにより腰壁・袖壁のモデル化の重要性がうかがえる。

開口タイプによる壁の剛性低下をFEMにより解析したところ、一般に良く用いられる1 - (開口周比)とはかなり傾向が異なっていた。また、壁厚、フレームサイズによる差は小さいが、開口の開け方による変化が大きいことが分かった。

参考文献

- 1) 小島宏章, 福和伸夫, 飛田潤: 常時微動計測・強震観測に基づく動的相互作用効果の階数依存性に関する研究 - S造及びSRC造10階建物の建設段階毎の動特性の変化 -, 構造工学論文集, Vol. 48B, pp.453 - 460, 2002.3
- 2) 岡田純一, 福和伸夫, 飛田潤: 観測記録に基づくSRC造10階建物の平面増築による振動特性の変化, 構造工学論文集, Vol. 48B, pp.437 - 444, 2002.3
- 3) Tobita, J.: Evaluation of Nonstationary Damping Characteristic of Structures under Earthquake Excitations, J. Wind Eng. and Industrial Aerodynamics, Vol. 59, pp.283-298, 1996

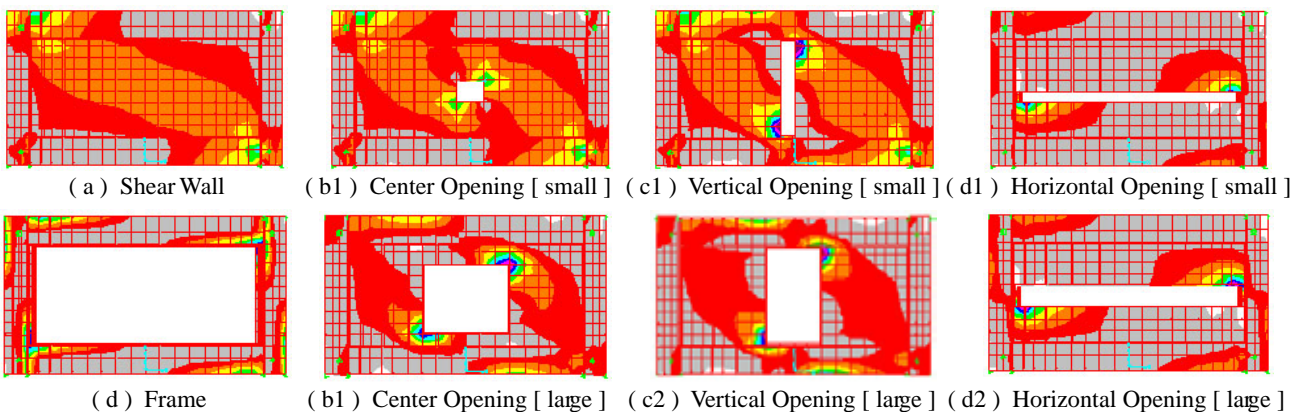


Fig. 13 Opening Types and Stress Contours