

常時微動を用いた被災建物のせん断波伝播速度測定

Inter - Story Shear - Wave Velocity Measurement of a Damaged Building Using Microtremor Records

張曉亮[†], 正木和明^{††}, 王欣^{††}

Xiaoliang ZHANG, Kazuaki MASAKI, Xin WANG

Abstract After disastrous earthquakes, estimating building damage levels objectively and quantitatively is very necessary and important for making decisions of buildings to be continuously used, repaired or demolished. The decline of natural frequency of buildings can be used to estimate the damage condition of the whole building quantitatively. However, in order to scrutiny building damage of inner stories, the deliberation on natural frequency is not enough. Therefore, in this paper, a method to estimate shear-wave velocity traveling within stories from microtremor records is presented. Using the presented method, shear-wave velocity traveling with in damaged 9-story and 14-story SRC residential building are extracted, based on which damage condition of this building is evaluated.

1. はじめに

1.1 研究の背景

東北地方太平洋沖地震においては地震動による建造物の全壊被害は比較的少ないが、中・小被害および軽微被害が多く見られる¹⁾。しかしながら、これらの被害判定法は外観を目視することによりなされている。構造的な損傷があるかどうかは外観によらず物理的な測定によらなければならない。

地震発生後可能な限り早期に建築建造物の健全性や損傷度等を客観的かつ定量的に評価し、継続使用の可否、耐震補強の必要性を判断することは、早期の復旧・復興活動を行うに当たり極めて重要である。応急危険度判断士による被災建物の評価は最も早急に実施される有効な方法である。この方法のように建物損傷度を「目視による観察」から判定する方法があるが、この方法は外部から見た被災

状況による判定であるため、小規模の民家や中低層の建物の被災度判定には有効であるが、大規模・構造が複雑な高層建物については最も重要な構造部材内部の損傷度を判定することは難しい。建物の常時微動記録から建造物の固有振動数を測定し、その低下から建造物全体の損傷度を評価する方法は定量的取扱いが可能である点で優れている。しかしながら、被災建物の耐震改修・耐震補強を実施するに当たっては、建物各階の部材の損傷度を評価する必要がある。前述の手法では各階ごとの損傷度を評価することはできない。した建物各階、各部所における残存耐震性能を適切に評価できる手法の確立が望まれる。

1.2 従来の研究と課題

建物損傷度判定を物理的に行う方法として常時微動を用いる方法がある。

従来の常時微動測定による卓越周期の測定は、建物基礎(1F)と屋上に地震計を設置し、同時観測を行う。そのスペクトル比から建物の固有周期を決定する。固有周期 $T(s)$ と建物高さ $H(m)$ からせん断波速度 $V_s(m/s)$ は $4H/T$ で算出される。せん断波速度はせん断剛性率の2乗根に比例する。

[†] 愛知工業大学大学院 建設システム工学専攻 (豊田市)

^{††} 愛知工業大学地域防災研究センター (豊田市)

^{†††} 愛知工業大学 工学部 都市環境学科 (豊田市)

したがって固有周期が被災後延びることはその建物が損傷を受けたことを示している。永野他(2011)によれば²⁾、関東地方30Fビルの卓越周期は1.0秒から1.5秒へと延びた。このような例は多く報告されている。

しかしながら、このような従来の方法では、建物全体の損傷度は評価できるが、各階ごとの損傷は評価できない、各階の層間を伝播するせん断波速度が測定できれば、剛性率を算出できるので、各階ごとの損傷度を評価することができる。したがって、各階の層間のせん断波速度を測定する方法の確立が望まれている。

1.3 研究の目的

- 1) 被災地のSRC造集合住宅の被災状況を常時微動観測判定する方法を試みる。
- 2) 建物各階で常時微動の比較観測を行い、逆重畳法を用いて、各階の層間せん断波速度を評価する。
- 3) 被災した階の層間速度と健全な階の層間速度の比較検討を行う。

1.4 研究の方法

本論文では Snieder & Şafak (2006) が提案した逆重畳法 (deconvolution method)³⁾ を常時微動記録に応用して、東北地方太平洋沖地震で被災したSRC造集合住宅を対象とし、建物の各層間を伝播するせん断波速度の変化により被災建物の各階の被害状況を評価する。逆重畳法は従来の方法と比較すると、a: 基礎と地盤の相互作用の影響がないこと、上部構造のみの特性を反映すること、およびb: せん断波は各モードで同じ速度で伝播するのでモードにかかわらず広い周波数範囲(本論文では1~50Hz)で解析すればよいこと、の二つのメリットがある。逆重畳法の理論および物理的意味の証明は既に提案者たち示しているが、常時微動記録によりいつでも、どの建物でも、各階の損傷程度を評価できる方法を提案している。研究のフローチャートを図1に示す。

被災した建物の各階と屋上で同時観測された常時微動記録

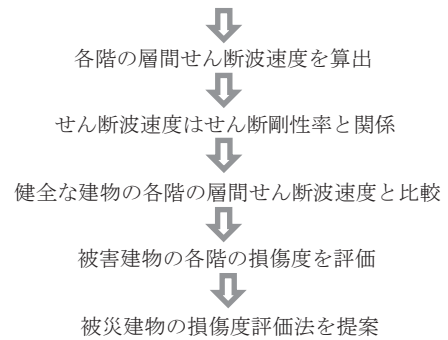


図1 研究のフローチャート

2. 被災建物常時微動の観測概要

2.1 観測建物の被害状況

観測した建物は鉄骨鉄筋コンクリート造(SRC)の二つの被災建物、郡山市桑野ネオハイツ集合住宅9階建と仙台市高砂サニーハイツ集合住宅B棟14階建である。この二つの建物の被害状況は、被災建物危険度判定士により「危険」と判定されたため、解体工事をすることに決まった。観測した時、住民たちは既に引っ越していた。そして、仙台市高砂サニーハイツ集合住宅B棟を観測した時、隣のA棟の解体工事はすでに始まっていた。各階の詳細な被害状況については現地調査時に撮影した写真1と写真2に示す。



写真1 郡山市桑野ネオハイツ集合住宅(9階建)



写真2 仙台市高砂サニーハイツ集合住宅B棟(14階建)

2.2 観測方法

2.2.1 観測機器



写真3 常時微動観測システム

写真3に観測システムを示す。東京測振株式会社で製造された高感度速度計と記録装置から構成されている。

2.2.2 観測方法

逆重畳法を用いて建物の各層間を伝播するせん断波速度を求めるために、建物の各階と屋上における同時観測を次の手順で実施した。

1) 郡山市桑野ネオハイツ集合住宅9階建：常時微動観測を2011年11月9日～11日の三日間で実施した。水平2成分の高感度速度計2セットのうち、1セット(速度計①)を屋上に固定設置し、もう1セット(速度計②)を各階に移動させて、全部で8回移動した。屋上と各階において3時間常時微動を同時観測した。観測現場状況を写真4に示す。



写真4 郡山市桑野ネオハイツ集合住宅観測現場状況

2) 仙台市高砂サニーハイツ集合住宅B棟14階建：常時微動観測を2012年3月8日に実施した。水平2成分の高感度速度計3セットのうち、1セット(速度計①)を14Fに固定設置し(工事中のため屋上に設置できなかった)、もう2セット(速度計②と③)を各階に移動させて、1セット(速度計②)を7F、もう1セット(速度計③)1Fに設置し、同時観測した。その後、2セット(速度計②と③)を一緒に移動して観測した。全部で7回移動した、各階において50分間常時微動を同時観測した。観測現場状況を写真5に示す。

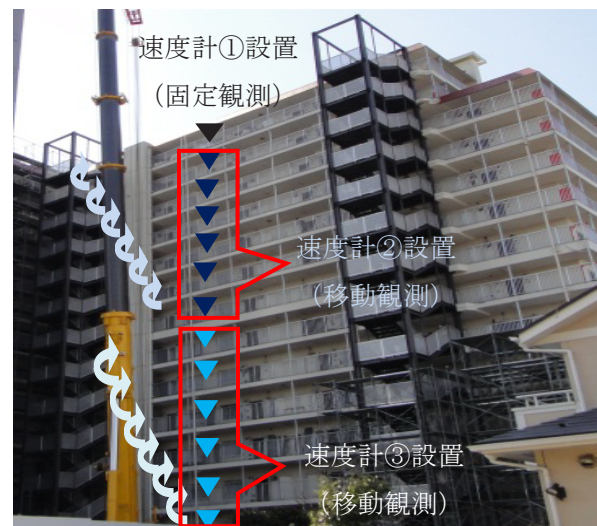


写真5 仙台市高砂サニーハイツ集合住宅観測現場状況

3. 逆重畳法を用いたせん断波速度を求める解析法

3.1 建物内におけるせん断波の伝播

建物の応答は周波数領域においては各振動モードの組み合わせで表され、時間領域においては波長が異なる上昇

波と下降波の足し合わせで表される⁴⁾。建物内を伝播するせん断波のイメージを図 2 に示す。建物基礎から上部構造に入射した上昇波は各階を伝播し屋上に至る。屋上で反射した後下降波となり建物基礎へと戻る。時間領域における上部構造の地震応答は、これらの上昇波と下降波の和として表現できる^{4),5)}。伝播するせん断波は各階で反射と透過を繰り返すが、各層間を伝播する速度には影響しない。また、せん断波速度は各層間のせん断剛性と質量のみに依存し、入射波特性、基礎形式、埋め込み効果、地盤との相互作用、建物高さに依存しない。

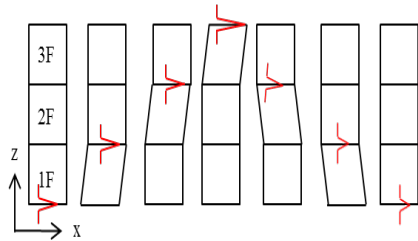


図 2 1 階から入射し各階を伝播するせん断波 (赤いパルス) のイメージ

3.2 逆重畳法とその物理的意味

Snieder & Şafak (2006) は、地盤調査法の一つである地震波探査で用いられる interferometry 理論に基づき、建物の各階を地盤の層構造と見なし、建物の内部を伝わるせん断波の伝播時間を抽出する方法、即ち逆重畳法 (deconvolution method) を提案した。

逆重畳 (deconvolution) は畳み込み (convolution) の逆演算である。周波数領域における高さ z の i 階記録 $u_i(z, \omega)$ を建物屋上の記録 $u_T(z=H, \omega)$ で逆重畳して得られる i 階の逆重畳波 (deconvolution wave) $T_i(z, \omega)$ は式(1)で表される。式(1)は逆重畳法の基本式である。

$$T_i(z, \omega) = \frac{u_i(z, \omega)}{u_T(z=H, \omega)} \tag{1}$$

ここに、 H は建物の代表高さである。式(1)は逆重畳法の理論式である。式(1)の分母が 0 の場合を避けるために、逆重畳法の計算は式(1)の代わりに、式(2)を用いる。

$$T_i(z, \omega) = \frac{u_i(z, \omega) \cdot u_T^*(z=H, \omega)}{|u_T(z=H, \omega)|^2 + \epsilon} \tag{2}$$

ここに、 $u_T^*(z=H, \omega)$ と $u_T(z=H, \omega)$ は共役である。 ϵ は文献 1) を参考にして、 $|u_T(z=H, \omega)|$ の 10% とする。

$$u_i(z, \omega) = \sum_{n=0}^{\infty} S(\omega) R^n(\omega) \left\{ e^{jk(2nH+z)} e^{-\gamma|k|(2nH+z)} + e^{jk[2n+1H-z]} e^{-\gamma|k|[2(n+1)H-z]} \right\} \tag{3}$$

ここに、 $S(\omega)$ は入射波、 $R(\omega)$ は基礎の反射係数、 γ は減衰定数、 n は基礎で反射いた回数、 k は波数、 j は虚数単位である。

逆重畳波の物理的意味を明確にするため、周波数領域における i 階の波形、式(3)を式(1)に代入して共通因子を除去すると式(4a)が得られる。

$$T_i(z, \omega) = \frac{1}{2} \left[e^{i\omega(z-H)/c} e^{-\gamma|\omega|(z-H)/c} + e^{i\omega(H-z)/c} e^{-\gamma|\omega|(H-z)/c} \right] \tag{4a}$$

式(4a)により、逆重畳波は入射波 $S(\omega)$ と基礎の反射係数 $R(\omega)$ とに関係しないことが分かる。周波数領域の逆重畳波、式(4b)が得られる。

$$T_i(z, t) = \frac{1}{2\pi} \int T_i(z, \omega) e^{i\omega t} d\omega = \frac{1}{4\pi} \left[\int e^{i\omega(z-H)/c} e^{-\gamma|\omega|(z-H)/c} e^{i\omega t} d\omega + \int e^{i\omega(H-z)/c} e^{-\gamma|\omega|(H-z)/c} e^{i\omega t} d\omega \right] \tag{4b}$$

式(4b)により、 i 階の逆重畳波は減衰する一つの上昇波 (第一項) と一つ下降波 (第二項) の和であることが分かる。逆重畳波の概念図を図 3 に示す。図中上昇波と下降波の振幅変化は減衰項 $e^{-\gamma|\omega|(z-H)/c}$ と $e^{-\gamma|\omega|(H-z)/c}$ に関係する。図 3 に示すように i 階における逆重畳波の上昇波と下降波に対応する時間を $t_{u,i}$ と $t_{d,i}$ で表す。 i 階と $i+1$ 階の間を伝わるせん断波の伝播時間は $[(t_{u,i+1} - t_{u,i}) + (t_{d,i} - t_{d,i+1})]/2$ で求められる。

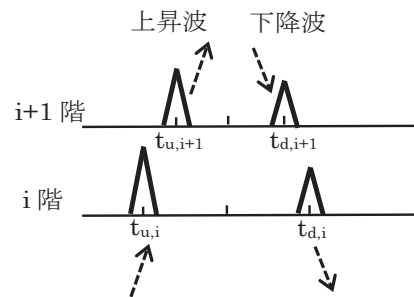


図 3 逆重畳波の概念図

3.3 逆重畳法を用いた建物の層間せん断波速度解析

同時観測した中間階および屋上の常時微動記録を用いて求めた逆重畳波を図 3 に示す。 i 階の逆重畳波の上昇波と下降波の波形のピークに対応する時間(それぞれ $t_{u,i}$ と $t_{d,i}$)を図中に示す。 i 階と $i+1$ 階の間を伝播するせん断波

の伝播時間($t_{u,i+1} - t_{u,i}$)および下降波の伝播時間($t_{d,i} - t_{d,i+1}$)の平均値として伝播時間を決める。i 階と i+1 階 (i→i+1) の間のせん断波速度 $V_{S_{i \rightarrow i+1}}$ は式(5)により求められる。

$$V_{S_{i \rightarrow i+1}} = \frac{2h_{i \rightarrow i+1}}{(t_{u,i+1} - t_{u,i}) + (t_{d,i} - t_{d,i+1})} \quad (5)$$

ここに、 $h_{i \rightarrow i+1}$ は i 階床から i+1 階床までの高さである。式(5)により求められる $V_{S_{i \rightarrow i+1}}$ の精度は

$t_{u,i}$, $t_{u,i+1}$, $t_{d,i}$, $t_{d,i+1}$ の誤差からの誤差移転の影響を受ける。上昇波と下降波に対する時間の読み取り誤差は $[-\Delta t, \Delta t]$ の範囲である。ここで Δt は $1/f_s$ である。せん断波速度の標準偏差はせん断伝播時間の誤差範囲 $[-\Delta t, \Delta t]$ を考慮して、ランダムを用いて決める。計算手順は以下に示す。

- ① 1 階から入射する波形 $u_1(t)$ をサンプリングレート f_s 、継続時間 L のランダムとして作成する。
- ② 1 階から i 階までのせん断波伝播時間の観測値 t_i は $[(t_{u,i+1} - t_{u,i}) + (t_{d,i} - t_{d,i+1})]/2$ によって決める。i 階の波形は $u_1[t - (t_i + \varepsilon\Delta t)] \times a(t_i + \varepsilon\Delta t)$ によって作成する。ここに、 $\varepsilon\Delta t$ は t_i の誤差を表し、 ε は $[-1, 1]$ の範囲の乱数である。ここで $a(t)$ は減衰関数である。
- ③ 各階の逆重畳波を計算し、上昇波と下降波に対応する時間を用いて、式(5)により層間せん断波速度を計算する。
- ④ ステップ①～③をN回で繰り返し計算して、上昇波(下降波)に対応する時間の標準偏差 δ_t と δ_{V_S} がおよそ一定となる結果得られた。

4. 被災建物のせん断波伝播速度測定解析結果

図 4, 5 に示す各階の上昇波と下降波に対応する時間を用い、式(5)により求めた各層間のせん断波速度分布図 6, 7 に示す。

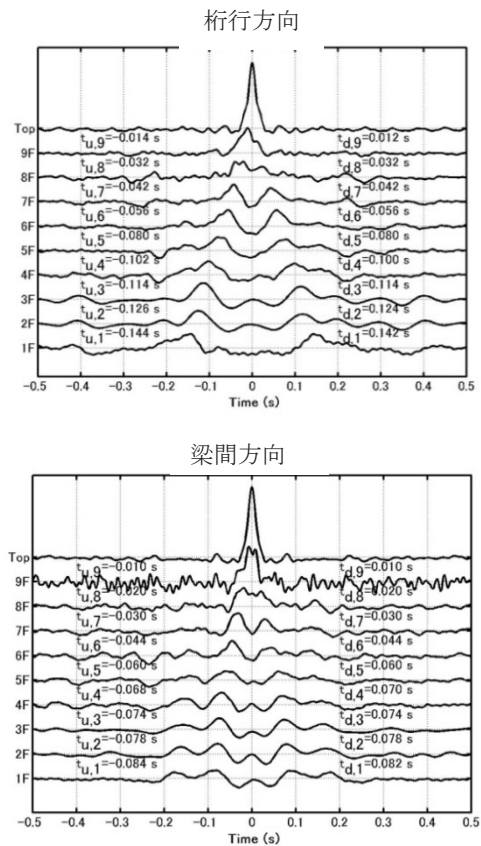


図 4 郡山市桑野ネオハイツの桁行方向(上)と梁間方向(下)における常時微動記録を用いて求めた各階の逆重畳波

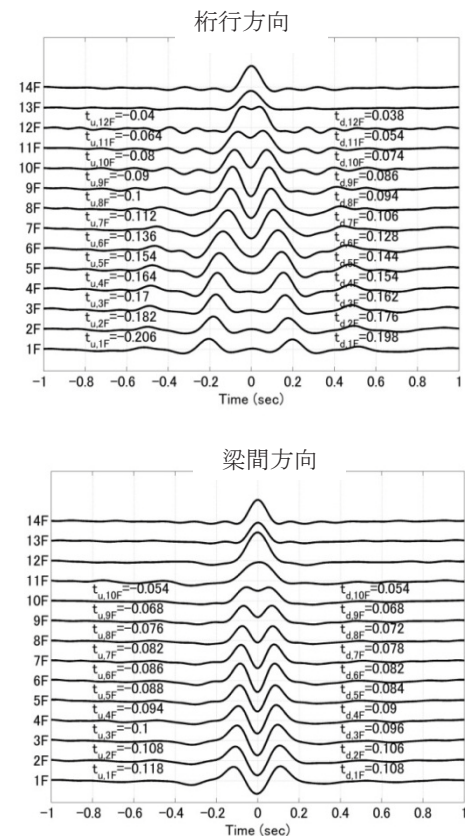


図 5 仙台市高砂サニーハイツB棟の桁行方向(上)と梁間方向(下)における常時微動記録を用いて求めた各階の逆重畳波

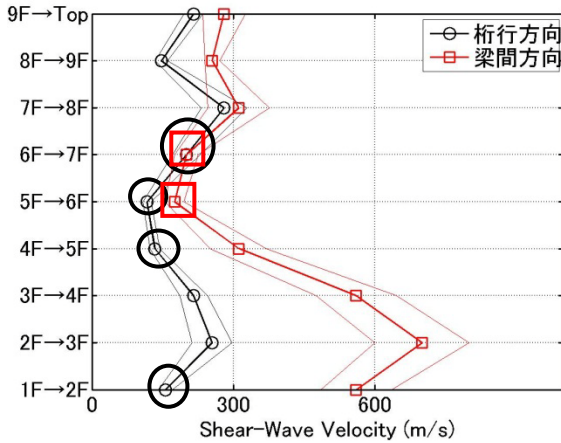


図 6 常時微動記録を用いて求めた郡山市桑野ネオオハイツの各層間のせん断波速度分布

一般には、階数が増加するにしたがい、剛性率を低下させる設計がとられているので、せん断波速度を遅くなる傾向が予想される。図 6 により桁行方向の各階のせん断速度（黒い○）はすべて 300m/s 以下であり、階数の増加に伴いせん断波速度が遅くなる傾向は見られない、1F→2F, 4F→5F, 5F→6F, 6F→7F のあたりで低下している傾向が見られる。梁間方向のせん断波速度（赤い□）は階数の増加に伴って遅くなる傾向がみられるが、5F→6F および 6F→7F のせん断波速度が著しく遅くなる傾向も見られる、この傾向は桁行方向と一致する。

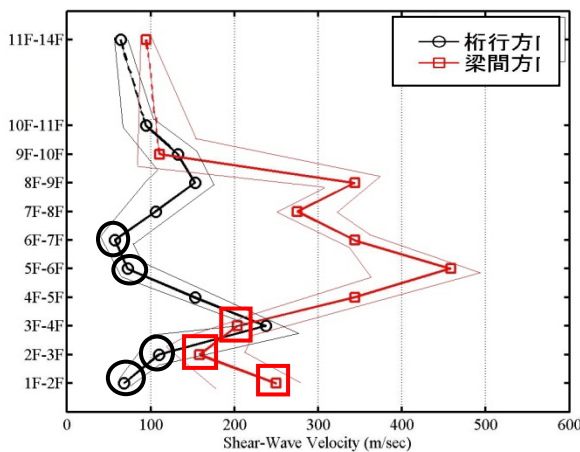


図 7 常時微動記録を用いて求めた仙台市高砂サニーハイツ B 棟の各層間のせん断波速度分布

図 7 により桁行方向の各階のせん断速度（黒い○）はすべて 300m/s 以下であり、階数の増加に伴いせん断波速度が遅くなる傾向は見られない、むしろ 5F→6F, 6F→7F の

速度低下が見られる。また、1F→2F, 2F→3F は著しく低下している。梁間方向のせん断波速度（赤い□）は階数の増加に伴って遅くなる傾向がみられるが、1F→2F, 2F→3F および 3F→4F のせん断波速度が著しく遅くなる傾向が見られる、この低下は桁行方向と一致している。

5. 多質点モデルを用いた建物のせん断波速度解析

均質かつ等方性の弾性体を伝播するせん断波速度 β は $\beta = \sqrt{G/\rho}$ （ここで G はせん断剛性率、 ρ は密度である）で示されるが、実際の構造物には空間が存在し、構造部材も多様であり、均質とは言えない。また構造部材の分布は方向により異なっており、等方的ではない。したがって、 $\beta = \sqrt{G/\rho}$ の関係は構造物には適用できない。本研究では常時微動記録から求めた逆重畳波により抽出されたせん断波速度は 1 次元（桁行また梁間方向）の上部構造の特性であり、構造物の層間せん断剛性率 G_k とせん断波速度 V_{s_k} (k は層番号を表す) の関係を究明するために、3次元の空間と材質の分布を考えない、多質点モデルを用いて検討する。

5.1 解析対象多質点モデル

王他⁷⁾は、 G_k と V_{s_k} の関係式を質量 $M_1=M$ 、せん断剛性 $G_1=G$ の 1 質点モデルではなく、各階の質量と剛性率が等しい 6 自由度の多質点モデル ($M_k=M, G_k=G, k=1\sim 6$ は層番号を用いて入力を $f_s=1000\text{Hz}$ の δ 関数と仮定して応答を計算し、求めた応答をから逆重畳波を求めた。多質点モデルと解析に用いるパラメータを図 8 に示す。

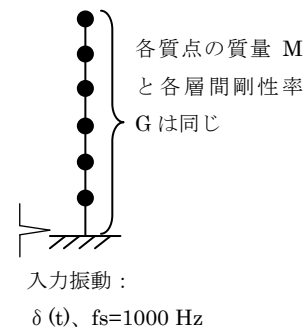


図 8 多質点モデル

図 9 において□印、△印および○印は M_k を 2000 kg, 4000 kg, 6000 kg と仮定し、せん断剛性率 G_k を $1 \times 10^7 \text{ N/m}$ から $10 \times 10^7 \text{ N/m}$ に変化させて求めた層間せん断波伝播時間 t の分布である。点線、破線と実線はそれぞれ□印、△印お

よび○印により求めた近似曲線であり、 R^2 は決定係数、 a は0.71である。

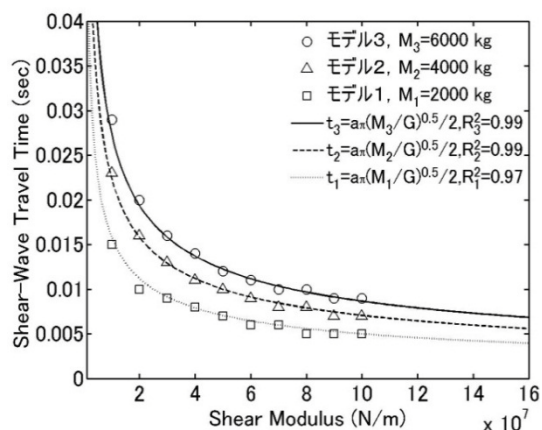


図9 せん断剛性率Gとせん断波伝播時間の関係

王他⁷⁾はk層せん断波速度 V_{S_k} は式(10)で表現できることを示した。

$$V_{S_k} = \frac{h_k}{t_k} = \frac{2h_k}{a\pi} \sqrt{\frac{G_k}{M_k}} = \frac{2h_k}{0.71\pi} \sqrt{\frac{G_k}{M_k}} \quad (6)$$

ここで、 h_k はk層の高さである。

図10は質量 M_k を2000kg, 4000kg, 6000kgと仮定した時のせん断剛性率 G_k とせん断波速度 V_s の関係を示している。

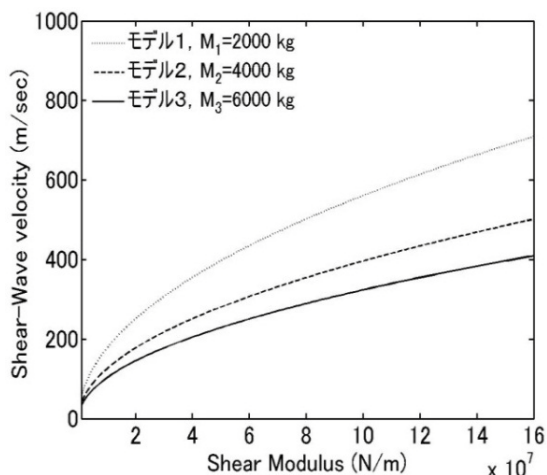


図10 せん断剛性率Gとせん断波層間伝播速度 V_s の関係

5.2 建物構造モデルのせん断波速度

式(6)より、観測した被災建物と同じ構造(SRC造)の15階建集合住宅の構造図⁸⁾から層間せん断波速度を推定する。設計例建物モデルの立面図および平面図を図11に示す。

各階の質量 M 、層間高さ h せん断剛性率 G を表1に示す。各層の質量 M 、層間高さ h および階間せん断剛性率 G を式(6)に代入して求めた層間せん断波速度分布を図12に示す。図12に示すように建物モデルの層間せん断波速度は桁行

方向と梁間方向共に、階数の増加にともなうてなめらかなる傾向が見られる。また、桁行方向のせん断波速度は梁間方向より小さいことが分かる。

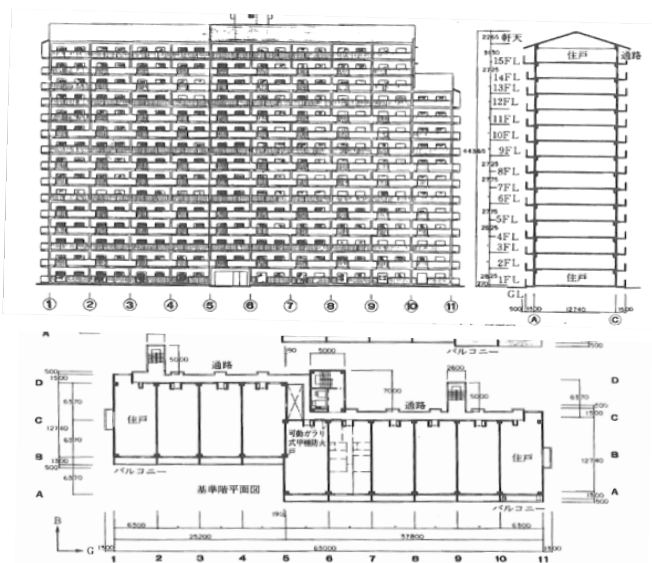


図11 計算例建物モデルの立面図および平面図

表1 計算に用いたパラメータ

階数	質量 M(kt)	層間高さ h(m)	せん断剛性率 G(N/m) × 10 ⁹	
			桁行方向	梁間方向
1F	1.09	2.83	14.50	66.53
2F	1.09	2.83	11.79	55.97
3F	1.08	2.83	10.73	46.54
4F	1.07	2.83	9.87	39.55
5F	1.05	2.73	9.08	33.35
6F	1.04	2.73	8.47	29.23
7F	1.04	2.73	8.10	25.88
8F	1.00	2.73	7.40	22.18
9F	0.96	2.73	6.83	19.85
10F	0.98	2.73	6.53	17.71
11F	0.97	2.73	5.90	15.50
12F	0.97	2.73	5.75	13.37
13F	0.89	2.73	5.36	11.00
14F	0.92	2.73	4.91	8.72
15F	1.00	3.20	4.17	5.88

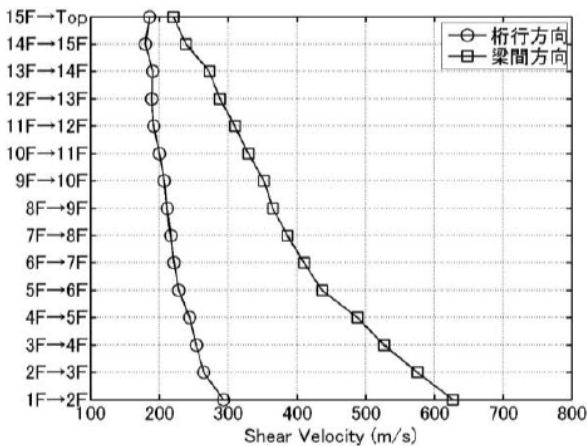


図 12 計算例建物モデルの各階間せん断波速度の分布

6. 観測した建物と計算例建物モデルの層間せん断波速度の比較

常時微動観測を実施した郡山市桑野ネオハイツ集合住宅9階建SRC造建物（建物Aと呼ぶ）と仙台市高砂サニーハイツ集合住宅B棟14階建（建物Bと呼ぶ）は、新耐震基準で設計した建物であるが、今回の地震では継続使用できない程度の被害を受けたことは非常に稀な事例である。本研究で行った現地調査では、建物の周辺では小被害を受けた高層集合住宅がいくつか散見されるが、中程度以上の被害を受けた建物は見られなかった。したがって、建物の被害状況を正確に評価し、被災原因を追究することは非常に重要である。建物の被災前の地震記録も常時微動観測記録も存在せず、また建物の設計図は今の段階で入手できていない。このため本研究では建物の被害状況を測定した層間せん断波速度と5.2節で求めた計算例建物モデル（建物R）の層間せん断波速度との比較により評価する。建物A、Bと建物Rの層間せん断波速度の分布を図13に示す。

図13により層間せん断波速度は桁行方向と梁間方向共に建物A、Bは建物Rより遅い傾向が見られる。その理由の一つとして、建物A,Bが被害を受けたためと考えられるが、被災建物に比べて、元々建物Rの速度が大きいとも考えられる。したがって、どちらの影響かは評価しにくい。ここでは、健全な建物Rでは速度の変化が滑らかであるのに対し、被災建物では、速度が層間によって変化することに注目する。図13を見ると、建物Aの桁行方向の層間せん断波速度が速いのは2F→3Fおよび7F→8Fで、約300 m/sである。これ以外は200 m/s以下になった。層間せん断波

速度が遅いのは4F→5Fおよび5F→6Fで、100 m/s以下になった。梁間方向における建物Aの層間せん断波速度は階数の増加とともに遅くなる傾向が見られるが、1F→2Fの層間せん断波速度は2F→3Fの速度より遅い。この原因は1階の柱に被害が生じたためと考えられる。建物Bの桁行方向の層間せん断波速度が速いのは3F→4Fで約300 m/sである。これ以外は200 m/s以下になった。層間せん断波速度が遅いのは1F→2F、5F→6Fおよび6F→7Fで、100 m/s以下になった。また、梁間方向で層間せん断波速度が顕著に小さいのは1F→2F、2F→3Fおよび3F→4Fである。桁行方向と梁間方向の階間速度は顕著に遅い傾向が見られた。これらの傾向は建物がこれらの階で被害を受けたためと考えられる。

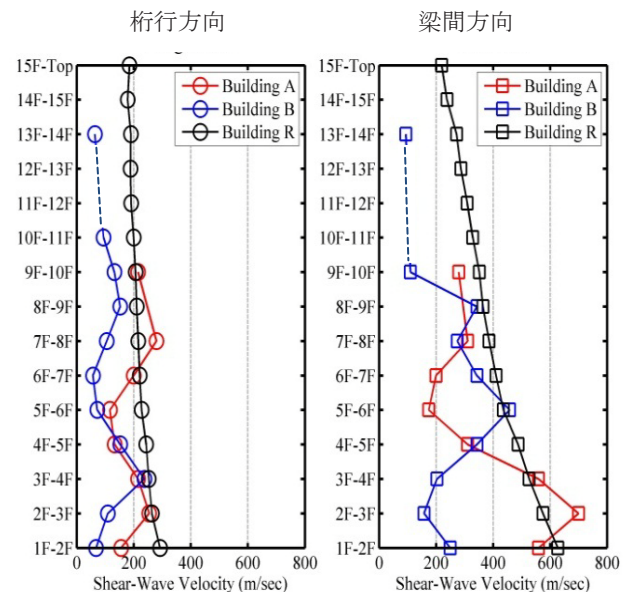


図13 被災建物A、Bと計算例建物Rの各層間せん断波速度の分布（建物Aの9F→10Fの速度は8F→10Fの平均速度を示す。建物Bの13F→14Fの速度は11F→14Fの平均速度を示す。）

7. 結論

本論文では逆重畳法を用いて常時微動記録から建物の各層間を伝播するせん断波速度を求め損傷度を判定する方法を試みた。まず東北地方太平洋沖地震において被災したSRC造集合住宅（建物A、B）の層間せん断波速度を測定した。一方、建物Rについて構造図から多質点系モデルを作成し、王他⁷⁾の手法を用いて層間せん断波速度をシミュレーションにより算した。建物Rを無被害建物と想定し、被災建物A、Bと比較した。

無被害建物 R の層間せん断波速度は上層階に向ってなめらかに減少することがわかった。これに対し、被災建物 A, B では各階において層間せん断は速度が異なることがわかった。

建物 A、B の桁行方向の層間せん断波速度は全体的に 300 m/s 以下になることおよび層間せん断波速度は 200 m/s 以下になることが分かった。梁間方向における層間せん断波速度は系統的に階数の増大と共に遅くなる傾向が見られるが、特に遅い階間では層間せん断波速度が 200 m/s 以下になることが分かった。被災建物における、層間せん断波速度の低下は被災によりせん断剛性率が低下したためと考えられる。このことから、被災建物 A、B は桁行方向と梁間方向と共に、せん断波速度が遅い階において被害が大きいと考えられる。

以上をまとめる。

- 1) 被災地の SRC 造集合住宅の被災状況を常時微動観測で判定を試みた。
- 2) 建物各階で常時微動の比較観測を行い、逆重畳法を用いて、各階の層間せん断波速度を評価した。
- 3) 被災した建物の層間せん断波速度は健全な建物の層間せん断波速度と比べて、桁行方向と梁間方向共に顕著に遅くなる傾向が見られた。この原因は建物の層間で被害が生じたためと考えられる。
- 4) 層間せん断波速度 V_s と層間剛性率 G の関係は

$$V_s = \frac{2h}{0.71\pi} \sqrt{\frac{G}{M}} \text{ で表される。}$$

参考文献

- 1) 社団法人高層住宅管理業協会：東日本大震災被災状況調査報告，2011.4
- 2) 永野 正行，肥田 剛典，田沼 毅彦，渡辺 一弘：2011 年東北地方太平洋沖地震時の強震記録に基づく超高層集合住宅特性評価，日本地震工学会大会—2011 梗概集， pp.67-69, 2011.
- 3) Snieder, R., and Şafak, E.: Extracting the building response using interferometry: theory and applications to the Millikan Library in Pasadena, California, Bull. Seismol. Soc. Am. 96, no. 2, pp. 586-598, 2006.4
- 4) Kanai, K.: Some new problems of seismic vibrations of a structure, Proceedings of the Third World Conference on Earthquake Engineering, Auckland and Wellington, New Zealand, II-260 – II-275, 22 January – 1 February 1965.
- 5) Todorovska, M. I.: Seismic Interferometry of a soil-structure interaction model with coupled horizontal and rocking response, Bull. Seismol. Soc. Am. 99, no. 2A, pp. 611-625, 2009.4
- 6) 中国建築工業出版社：建築構造耐震設計，2002・8
- 7) 王 欣，正木 和明，入倉 孝次郎：逆重畳法に基づく常時微動観測記録を用いた建物内を伝わるせん断波速度の測定，2011
- 8) 社団法人鋼材倶楽部：鉄骨鉄筋コンクリート構造設計例集，1987・5.

(受理 平成 25 年 3 月 19 日)