

7. 常時微動観測により東北地方太平洋沖地震における被災集合住宅のせん断波伝播速度の測定

王 欣

1. はじめに

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。また、関東地方、中部地方および関西地方においては長周期地震動の影響により、高層・超高層建造物では継続時間の長い応答が発生し、部材に損傷が生じた恐れがある。高層住宅管理業協会が行った全国の会員社に対して実施した東日本大震災における被災状況調査アンケートによれば、85,798 棟の高層住宅の内、大破 0 棟、中破 61 棟 (0.07%)、小破 1,070 棟 (1.247%)、軽微・損傷なし 84,667 棟 (98.682%) であった¹⁾が、会員外の住宅、また住宅でない高層建造物も考慮すると、さらに被害は増える可能性がある。地震発生後、可能な限り早期に建物の損傷度を測定し、建物倒壊の危険性、建物内への侵入の可否、建物の継続使用の可能性に関する判定結果を市民に伝えることは、市民の安全を確保する上で重要である。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物固有振動数を求め、その低下から建物全体の損傷度を評価する方法は定量的取り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。被災した建物の各階、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。本論文では、逆重畳法 (Snieder and Şafak, 2006)²⁾ を応用して開発した常時微動記録から建物の各階間を伝播するせん断波速度を測定する手法を提案する。東北地方太平洋沖地震で被災した 9 階建 SRC 造集合住宅を対象とし、建物各階に地震計を設置して観測した常時微動記録を用いて提案した手法により層間せん断波速度を測定する。また、せん断波速度分布と建物各階の被災度との関係を追究する。

2. 観測建物の被害状況と観測概要

観測した建物は写真 1 に示す鉄骨鉄筋コンクリート造 (SRC) 9 階建て、新耐震基準で設計された 1991 年竣工の集合住宅 (本文では建物 QM と呼ぶ) である。この建物の被害状況は、文献³⁾⁻⁵⁾によれば、1 階の隅柱と連層壁脚部で鉄筋の座屈およびコンクリートの圧縮破壊が見られ、桁行方向の非構造外壁コンクリートに大きなせん断ひび割れが発生しており、玄関ドアが面外に変形して開閉不能なところもあった。外観から、北立面 (桁行方向) では 1 階から 4 階までの方立壁に大きなせん断破壊が発生し、コンクリートが剥落して鉄筋が露出している状況が見られる。南立面 (桁行方向) では顕著な被害は見られないが、5 階まで非構造外壁にはせん断ひび割れが見られる。東立面 (梁間方向) では 3 階まで非構造壁にはコンクリートにせん断被害が見られる。西立面 (梁間方向) では壁には大きい被害は見られないが、隅柱 (北西方向) が鉄筋の座屈およびコンクリートの圧縮破壊のような構造被害が見られる。建物 QM は判定士により「危険」と判定されたため、写真 1 を撮影した時点では住民たちは既に引っ越していた。また、2011 年 11 月に建物 QM の常時微動観測を実施した時に被害が大きい北立面の各階の被害状況を詳しく調査した。写真 2 により、階数の増加と共に、被害が小さくなるのが分かった。9 階の壁には肉眼で見える程度の軽微なひび割れが見られる。8 階の壁には比較的大きいひび割れが生じている。7 階の壁には大きなひび割れがあり、タイルとコンクリートの剥落が多数見られる。6 階の壁はひび割れが激しく、コンクリートが剥落して鉄筋が露出している。4 階と 5 階の壁には激しい 'X' 字形のせん断ひび割れが数多くで見られ、鉄が曲がり、内部のコンクリートも崩れ落ちている。3 階と 2 階の壁はコンクリートが広い

範囲で剥落して、内部の鉄筋網が露出している。1階の玄関中心部にある柱の脚部で鉄筋が座屈し、壁にはコンクリートの剥落および鉄筋の曲がりも見られる。



写真1 常時微動を観測した9階建SRC造集合住宅（建物QM）；撮影時間：2011年4月

建物QMの常時微動観測を2011年11月9日～11日の三日間で実施した。逆重畳法を用いて建物の各階間を伝播するせん断波速度を求めるためには、建物の各階と屋上における同時観測記録が必要となる。水平2成分の2台の地震計（高感度速度計）のうち、1台を屋上に固定設置し、もう1台を各階に移動させ、屋上と各階において3時間の常時微動を同時観測した。各層間の高さが約3m、せん断波速度は100 m/s～500 m/sと予想されることから伝播時間は、0.03 s～0.006 sとなる。この時間差を測定するために、サンプリングレートfsは記録器の最高サンプリングレート（fs=500 Hz）に設定して観測を実施した。

3. 層間せん断波速度解析結果

同時観測した建物QMの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1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は上昇波の伝播時間 $(t_{u,i+1} - t_{u,i})$ および下降波の伝播時間 $(t_{d,i} - t_{d,i+1})$ の平均値として決める。i階とi+1階（ $i \rightarrow i+1$ ）の間のせん断波速度 $V_{S_{i \rightarrow i+1}}$ は式(1)により求められる。

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

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(4)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 $1/fs$ である。せん断波速度の標準偏差はせん断波伝播時間の誤差範囲 $[-\Delta t, \Delta t]$

, Δt] を考慮して、ランダム波を用いて決める。建物 QM の層間せん断波速度分布を図 2 に示す。図 2 により桁行方向の各層のせん断波速度 (○印) はすべて 300 m/s 以下であり、階数の増加にともないせん断波速度が遅くなる傾向は見られない。梁間方向のせん断波速度 (□印) は階数の増加にともなって遅くなる傾向が見られるが、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。

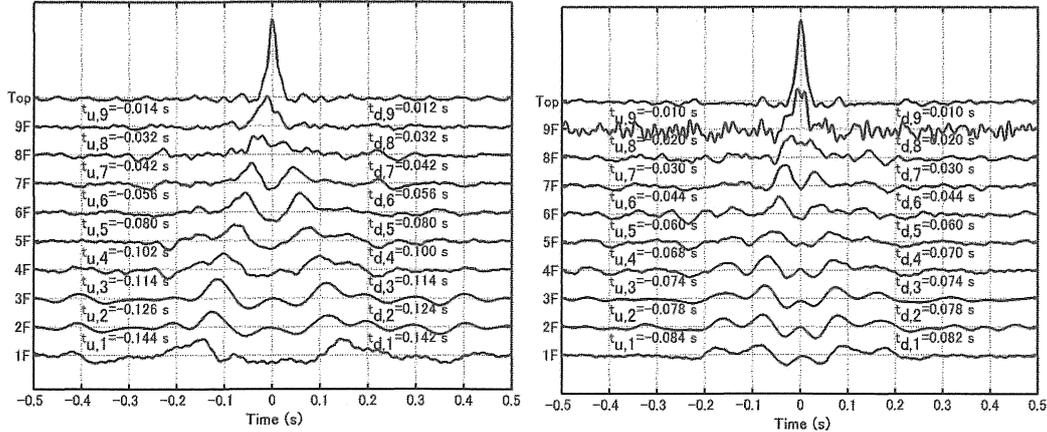


図 1 建物 QM の桁行方向 (左) と梁間方向 (右) における常時微動記録を用いて求めた各階の逆重畳波； $t_{u,i}$ と $t_{d,i}$ は上昇波と下降波に対応する時間を示す

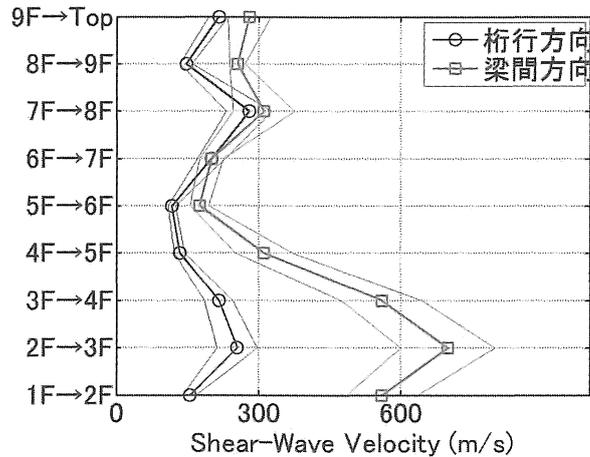


図 2 建物 QM の常時微動記録を用いて求めた各層間のせん断波速度分布

4. G と Vs の関係

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 (記録方向) の上部構造の特性であり、構造物の層間せん断剛性率 G とせん断波速度 V_s 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。 G を変化させて求めた層間せん断波の伝播時間 t の変化を図 3 に示す。層間せん断剛性率 G とせん断波速度 t の関係を式 (2) に、 G と V_s の関係を式 (3) に示す。式 (3) を用いて計算例建物 EGB⁶⁾ の層間せん断波分布を求めて、図 4 に建物 QM の層間せん断波分布とも示す。

$$t = 0.71 \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{M}{G}} \quad (2)$$

$$V_s = \frac{H}{t} = \frac{2H}{0.71\pi} \sqrt{\frac{G}{M}} \quad (3)$$

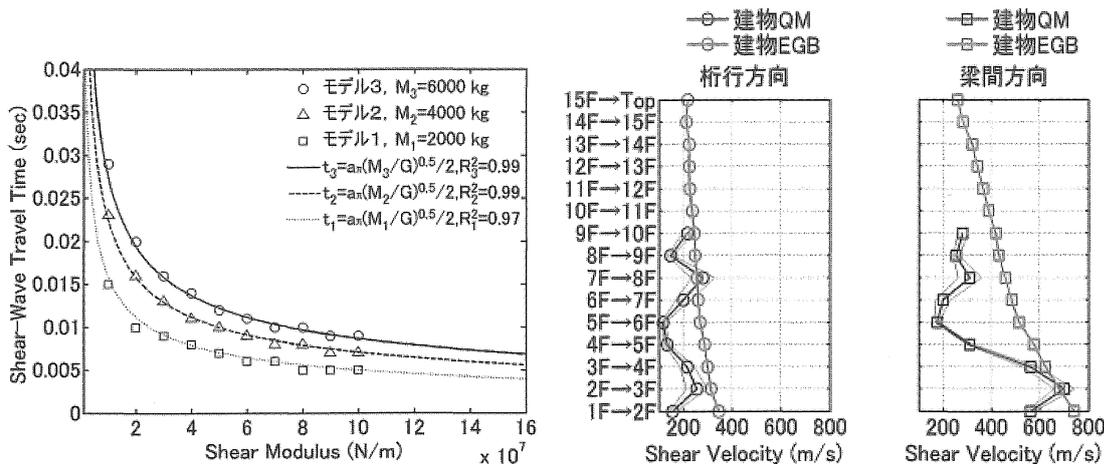


図3 Gを変化させて求めた層間せん断波伝播時間 t 図4 建物QMと建物EGBの層間せん断波速度の分布

5. まとめ

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る手法を提案した上で、この手法により東北地方太平洋沖地震において被災した9階建SRC造集合住宅（建物QM）の層間せん断波速度を測定した。建物QM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1F→2F、4F→5F、5F→6F、8F→9Fの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、1F→2F、4F→5F、5F→6Fおよび6F→7Fのせん断波速度は遅く、特に5F→6Fと6F→7Fの層間せん断波速度が200 m/s以下になることが分かった。したがって、被災建物QMは桁行方向と梁間方向と共に、1F→2F、4F→5F、5F→6Fおよび6F→7Fにおいて被害が大きかった。

東北太平洋沖地震における高層建物全壊の事例は少ないが、大破・中破・小破・軽微被害の事例は多く見られる。全壊の建物については目視により損傷状況を判定することが容易であるが、大破、中破、小破、軽微被害の場合に目視により判定することは誤判する可能性が高い。被災建物QMは地震前の常時微動或は地震動記録がないために、地震前後の各層のせん断波速度の低下を定量的に評価することができなかったが、地震前後の常時微動記録が得られている場合には提案した手法を用いて建物の各層の損傷状況を定量的に評価することが可能であることを示した。提案した手法は被災建物の損傷度の評価だけでなく、建物の健全度や耐震性能等の評価や、せん断波速度の経年変化を測定することによる建物のヘルスマonitoringへ応用することも可能である。

謝辞

被災建物QMの常時微動観測に当たっては、所有者、自治会理事、管理人の皆様にご協力をいただきました。ここに記して謝意を表します。

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) 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
- 3) 薛松濤：RC造建築物の被害状況、建築技術、No.740、pp.109-117、2011・9.
- 4) 国土交通省国土技術政策総合研究所、独立行政法人建築研究所：平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震調査研究（速報）（東日本大震災）、国総研資料第636号、建築研究所資料第132号、2011・5.
- 5) 日本建築学会：2011年東北地方太平洋沖地震災害調査速報、2011・7.
- 6) 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.