

階上解体に伴う環境振動の予測技術

小島 宏 章 高野 真一郎

Evaluation of Environmental Vibration by Upper-Floor Demolition Works

Hiroaki Kojima Shinichiro Takano

Abstract

Upper-floor demolition method is often adopted in urban areas. In order to demolish a building from upper floors, demolition machines are installed on top of the building. Vibration of construction equipment itself is not so large that it would affect surrounding buildings. However, upper-floor demolition works shake the building being demolished; this vibration is transmitted to the surrounding buildings and it may resonate. In this case, large horizontal vibration that reaches sensible vibration occurs in top of the surround buildings. In order to predict these environmental vibrations, it is important to estimate dynamic loads of demolition machines. In this study, we conducted vibration measurements in demolishing building and adjacent buildings. Moreover, we propose a method that estimates dynamic loads of upper-floor demolition works.

概 要

都市域での建て替え需要の高まりと共に、解体工事の件数も増加し、振動関連の障害事例が増加しつつある。建物が密集した市街地における解体工事では、解体する建物の上に重機を載せて上層階から順次作業を進める階上解体工法が採用される場合が多い。階上解体工法では、解体重機による振動が周辺建物に直接伝わる影響よりも、解体重機による振動が解体建物全体を振動させ、その振動が地盤を介して周辺建物との共振をもたらし影響の方が大きい。これにより、周辺建物の上層階では、体感レベルに達する水平成分の振動が発生し、居住者が船酔いのような感覚に襲われることがある。このような環境振動を適切に予測するためには、重機が解体建物に及ぼす力(加振力)の設定が重要となる。そこで本論では、階上解体工事に伴って発生する振動を測定し、実測記録を解析的に再現するための加振力の推定方法を示すと共に、検証した事例を報告する。

1. はじめに

近年、高度成長期に建設された建物の建て替え需要の高まりから、都市域での解体工事が増加している。これに伴い、解体建物の周辺住民からの工事振動に対する苦情件数も増加傾向にある。中でも、周辺建物の上層階で体感レベルに達する水平成分の振動が発生して、「船酔い」のような感覚を生じた事例が多く報告されている。このような問題を回避・解決するためには、振動の予測解析技術の確立が望まれている。

建物が林立し、敷地に余裕のない都市域では、建物の周辺に解体重機を設置することは難しい。そのため、建物の上部に解体重機を載せ、上層階から順次解体が進める「階上解体工法」が多く採用されている。この工法により発生する振動は、Fig. 1 に示す順序で周辺建物の上層階に伝わる。①解体建物の上部での重機作業により水平振動が発生し、解体建物全体を振動させ、②解体建物の基礎に水平振動が伝わる。③地盤を介して、周辺建物に振動が伝播する。④周辺建物の基礎での水平振動が、⑤周辺建物全体を振動させる。この振動の周期と周辺建物の固有振動数が一致すると、共振現象により周辺建物の上層階で水平成分の振動が大幅に増幅し、体感レベルに達する水平振動が発生する。

本論文では、階上解体に伴って発生する工事振動が周

辺建物に及ぼす影響を適切に予測するために、解体建物と周辺建物で振動測定を行った。また、実測記録を解析的に再現するために、解体建物の上部に加える加振力の推定方法を示すと共に、実測記録との比較により、その妥当性を検証する。

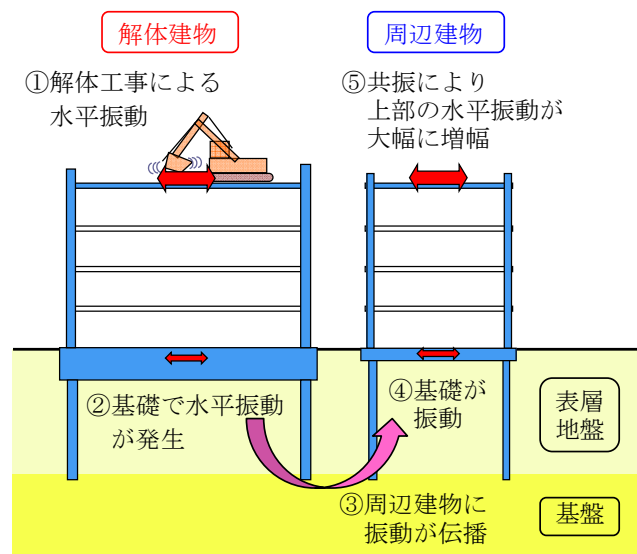


Fig. 1 階上解体工事の振動伝播メカニズム
Vibration Propagation Mechanism
of Upper-Floor Demolition Work

2. 数値解析の概要

2.1 地盤ばねと建物モデル

筆者らは、既に地盤を伝わる環境振動予測システム「ゆれみる[®]」を開発しており¹⁾、生産機器や設備機器などが地盤を介して周辺の精密機器に及ぼす影響や、工事機械の振動が周辺地盤に及ぼす影響などの検討を数多く行っている(例えば^{2), 3)}。「ゆれみる[®]」では、3次元薄層要素法と3次元有限要素法を、容積法を用いた動的サブストラクチャ法により結合した方法により、地盤と基礎の連成地盤ばねを算定している。

Fig. 1 に示した隣接する2棟の建物の解析モデル図を Fig. 2 に示す。上部構造は、剛基礎を有する質点系でモデル化する。それぞれの基礎部分は、埋込み部分を剛体として、杭基礎を考慮した動的な地盤ばねで支持させる。また、基礎間も連成地盤ばねで結合させる。

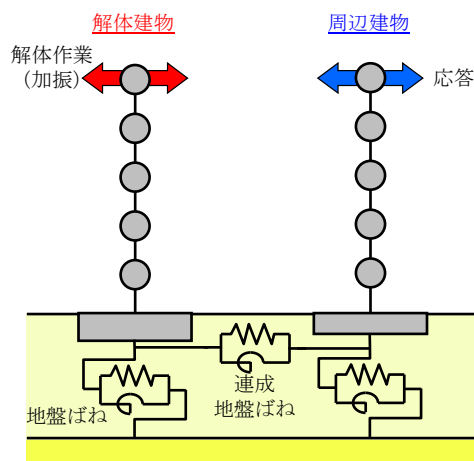


Fig. 2 隣接建物間相互作用を考慮した解析モデル
Analysis Model of Adjacent Building

2.2 加振力の推定方法

階上解体工事に伴って発生する振動の振動源は、解体建物の頂部での重機作業だが、この作業による加振力を直接測定することはできない。そこで、解体建物と隣接建物での同時振動測定と、次に示す手順の周波数応答解析によって、加振力を推定し、その妥当性を検証する。

- 1) 振動測定により、2棟の建物の固有振動数と応答特性を把握する。
- 2) 2棟の建物基礎及び基礎間の動的な地盤ばねを2.1節で説明した方法により算定する。
- 3) 解体建物と周辺建物のそれぞれに対して、建屋を質点系モデルでモデル化する。質量は、図面調査に基づいて設定する。剛性は、実測記録から推定した固有振動数と対応するように設定する。
- 4) 解体状況に合わせて解体建物の質点を減らした上部構造モデルを作成し、解体建物の最上階に正弦波の定常単位加振力を作用させて、解体建物と隣接建物の周波数応答を算出する。
- 5) 解体建物の実測記録と解析結果をピークホールドスペクトルで比較し、卓越振動数における加速度の値が一致する加振力を推定する。
- 6) 推定した加振力を用いて、周波数応答解析を行い、実測記録と比較する。

3. 適用事例 1

3.1 対象建物及び振動測定の概要

ペンシルビルに隣接する規模の大きな建物の解体工事振動を対象として、工事振動の影響を検討する。

解体建物は、SRC造6階建てで基準階平面が40m×60m、19.7mの深い埋込み基礎と杭を有する建物である。隣接建物は、RC造8階建てで基準階平面が11m×44mの杭基礎建物である。2棟の建物の基礎間距離は4mである。対象建物の概略図を Fig. 3 に示し、基礎部分の概略図を Fig.

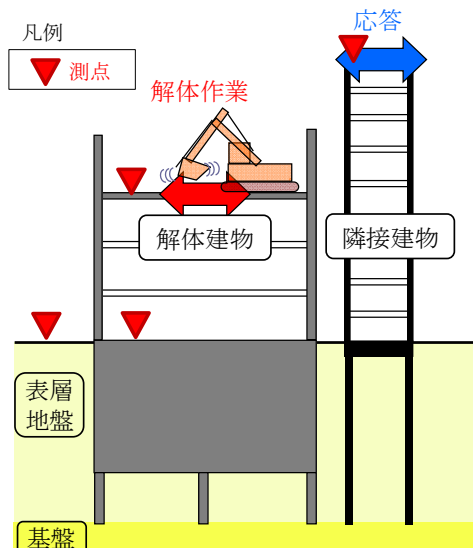


Fig. 3 Case1の建物状況と振動測定の概略図
Building Condition and Vibration Measurement (Case1)

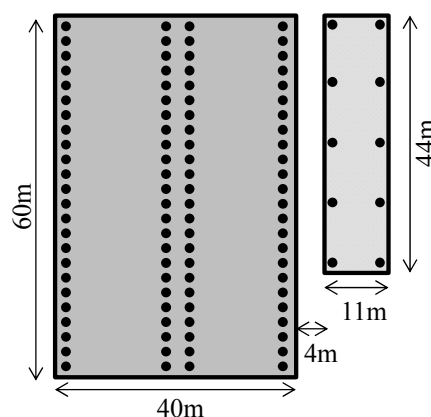


Fig. 4 基礎部分の概略図 (平面図)
Outline of Foundation (Plan)

4 に示す。階上解体工事は、0.7m³クラスの重機3台で進められた。

振動測定は、解体建物の状況が異なる4ケースで行い、それぞれのケースで解体工事振動と、作業をしていない時間帯の暗振動を測定した。Table 1 に振動測定時の工事状況と測点を示し、Fig. 3 にCase1の建物状況と振動測定位置の概略図を示す。Table 1 に示した測点では、水平・上下3成分の加速度を収録した。

3.2 解体建物と隣接建物の固有振動数

Case1における2棟の建物の上部と1階での暗振動の実測記録から、算出したフーリエスペクトル比をFig. 5 に示す。Fig. 5 より、解体建物と隣接建物の固有振動数が2.3~2.6Hzで近接していることが分かる。

階上解体工事が進んだ Case2~Case4 についても同様

Table 1 測定ケース
Case of Vibration Measurements

測定ケース	工事状況	測点	
		解体建物	隣接建物
Case1	4F壁の解体	4F, 1F	頂部
Case2	4F床の解体	3F, 1F	—
Case3	3F床の解体	3F, 1F, 地盤	—
Case4	2F床の解体	2F, 1F, 地盤	—

Table 2 固有振動数の一覧
List of Natural Frequency

測定ケース	固有振動数(Hz)	
	短辺方向	長辺方向
解体建物	Case1	2.5, 2.6
	Case2	3.1, 3.3
	Case3	3.8, 3.9
	Case4	5.8, 7.2
隣接建物	Case1	2.3, 2.4

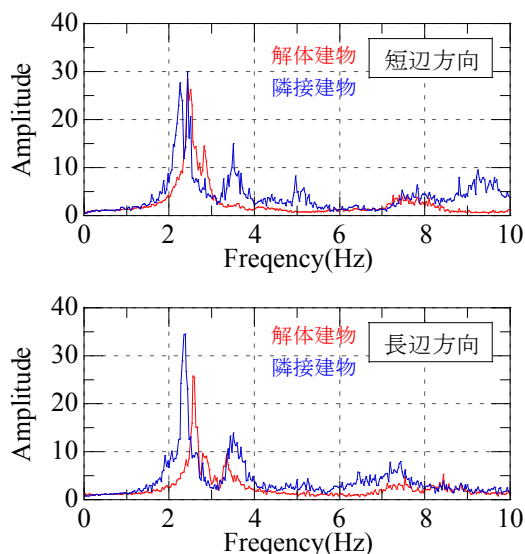


Fig. 5 Case1のフーリエスペクトル比
Fourier spectrum ratio (Case1)

の方法でフーリエスペクトル比を算出し、固有振動数を推定した結果を Table 2 に示す。Table 2 より、解体建物は解体工事の進展により、階数が減少し、固有振動数が高くなっていることが分かる。

3.3 解体建物と隣接建物の応答

階上解体工事に伴って発生する振動の影響を把握するために、Case1における作業時と暗振動の建物上部での応答記録に対して1/3オクターブバンド分析を行った。この結果と日本建築学会の居住性能評価曲線⁴⁾を重ね描いた図を Fig. 6 に示す。

Fig. 6 より、暗振動は、解体建物と隣接建物の両方でH-10を大きく下回る応答値であるが、2棟の建物の固有振動数に近い2.5Hzに卓越が見られる。

これに対し解体作業時は、重機の振動により建物の固有振動数の振動が励起され、解体建物の上部では、短辺方向も長辺方向もH-90前後まで増幅している。この振動の影響により、隣接建物の上部では短辺方向でH-70、長辺方向でH-30に達する振動が発生している。

3.4 数値解析モデル

数値解析は、振動実測に合わせた4ケース (Table 3) とし、短辺方向を対象とする。簡易な解析モデルとするために、次のようにモデル化する。解体建物の基礎は、深い埋込みを有する杭基礎のため、杭基礎の影響は少ないと仮定して、埋込み部分のみを剛基礎として考慮し、杭は省略する。隣接建物の基礎は、浅い埋込みの杭基礎のため、杭のみを考慮する。上部構造は各階質量、剛性とも等しい質点系モデルとし、質量は図面調査に基づいて設定し、剛性は Table 2のCase1の固有振動数を目標として設定する。但し、最上階の質点と剛性は、解体工事状況に合わせて Table 3 に示す値とする。建物モデルの設定値をTable 4 に示す。地盤モデルは、PS検層結果に基づいて設定する (Fig. 7)。

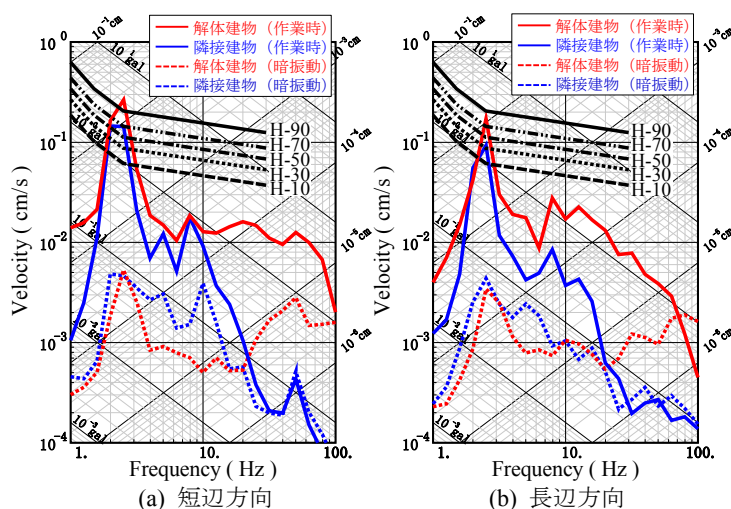


Fig. 6 Case1の作業時と暗振動の比較
Comparison of Ambient Vibration and Work Vibration

3.5 加振力の推定

2棟の建物の短辺方向の振動に影響を及ぼす解体工事の加振力を推定する。

振動測定は、解体建物の4階解体時 (Case1) に同階と、隣接建物の頂部にて行っている。この記録のピークホールドスペクトルを Fig. 8 (a) に示す。

階上解体工事による加振力を推定するために、まず、数値解析モデルの解体建物の最上階 (解体階) に、水平方向の正弦波の単位定常加振力を作用させ、解体建物の応答を周波数応答解析により算出する。次に、解析結果と実測記録とが等しくなるように加振力を調整する。本論では、実測記録の卓越振動数 (2.4Hz) における加速度が等しくなるように、加振力を調整した。

3.6 解析結果と実測記録の比較

前節で推定した加振力を、Table 3 に示す全ての解析ケースに作用させて解体建物と隣接建物の上部の応答加速度を算定した。Fig.8 (a) ~ (d) に解析と実測のピークホールドスペクトルを示す。各図は、実測記録を実線で示し、解析結果を実線で示している。

Fig. 8 (a) より、解体建物の応答特性は、解析と実測で良く対応していることが分かる。また、隣接建物においても、2.3Hz付近の卓越を含む応答特性が、解析と実測で良く対応している。これらの結果より、解体建物に作用させた加振力の設定は妥当であったと考えられる。

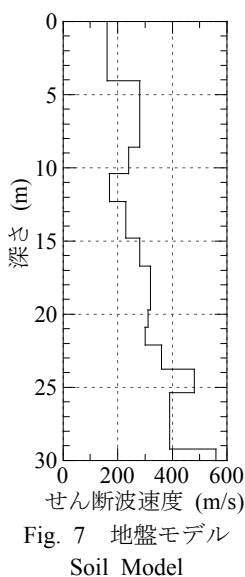


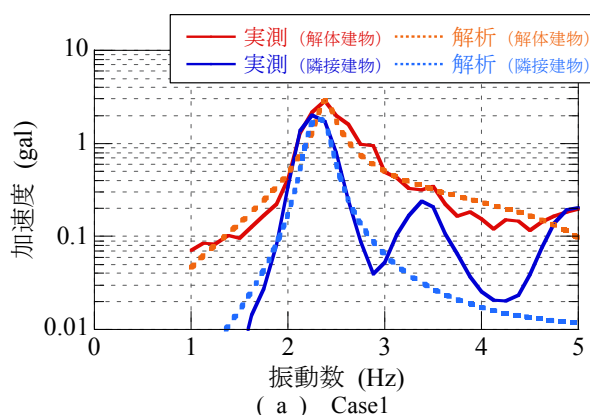
Fig. 7 地盤モデル
Soil Model

Table 3 解析ケース
Case of Numerical Analysis

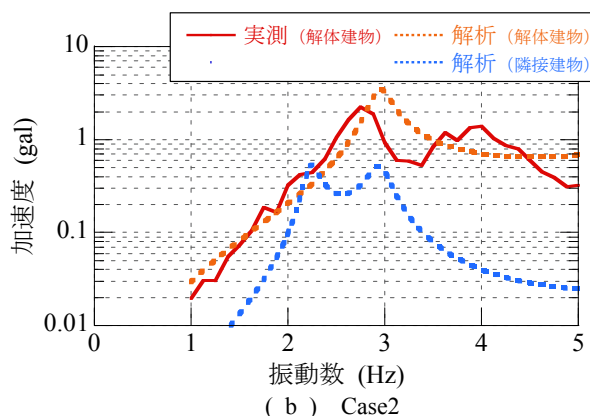
解析ケース	工事状況	解体階の質量と剛性
Case1	4F壁の解体	4F: 2,600ton 3,000,000kN/m
Case2	4F床の解体	4F: 700ton 1,000,000kN/m
Case3	3F床の解体	3F: 2,600ton 3,000,000kN/m
Case4	2F床の解体	2F: 2,600ton 3,000,000kN/m

Table 4 建物モデル
Building Model

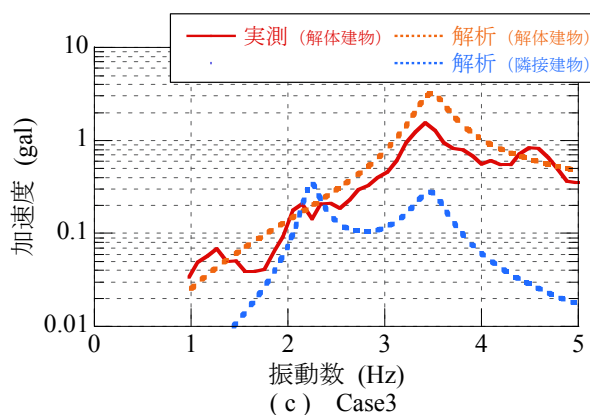
	解体建物	隣接建物
階数	4~2	8
平面形状	40m×60m	11m×44m
階高(m)	4.5	3
各階質量(ton)	2,600	450
基礎質量(ton)	15,600	900
各階剛性(kN/m)	3,000,000	6,300,000
減衰(%)	3	3
基礎形式	埋込み基礎 (深さ19.7m)	杭基礎 (φ800×18本、 長さ31m)



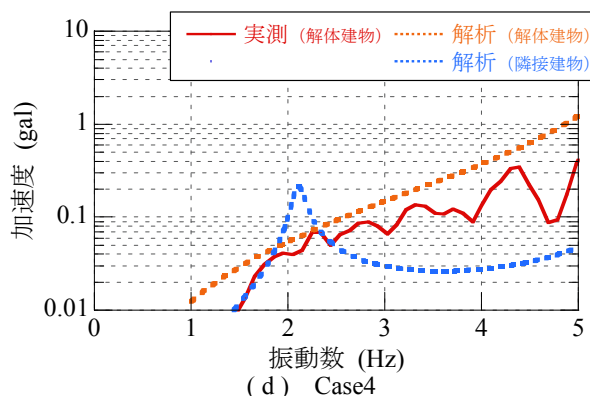
(a) Case1



(b) Case2



(c) Case3



(d) Case4

Fig. 8 解析結果と実測記録の比較
Comparison of the analysis and the measurement

同様の方法で他の解析ケースも計算した結果、解体建物の応答は、解析の振幅値がやや大きな値を示すが、他の解析ケース (Fig. 8 (b) ~ Fig. 8 (d)) においても、解析と実測が概ね対応している。解体工事が進展するにつれて、解体建物の固有振動数が高くなる傾向もよく捉えられている。隣接建物の応答は、解体工事が進むにつれて影響が小さくなり、固有振動数における振幅値も小さくなる事が分かる。

4. 適用事例 2

4.1 対象建物及び振動測定の概要

前章で行った検討を、ほぼ同規模の建物が隣接する状況に適用して、加振力の推定を行う。

解体建物は、SRC造11階建てで基準階平面が14.6m×33.5mの杭基礎の建物である。隣接建物は、SRC造8階建てで基準階平面が11.5m×22mの杭基礎建物である。2棟の建物の基礎間距離は4.5mである。対象建物の概略図を Fig. 9、基礎部分の概略図を Fig. 10に示す。建物モデルの設定値をTable 5 に示す。地盤モデルは、PS検層結果に基づいて設定する (Fig. 11)。階上解体工事は、0.7m³クラスの重機3台で進められた。

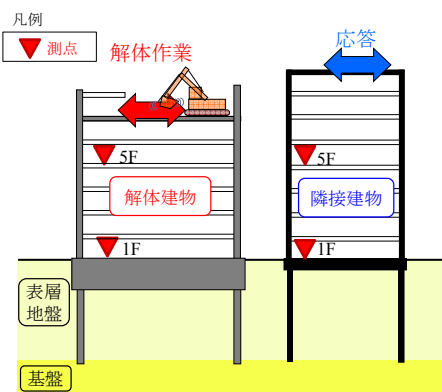


Fig. 9 建物状況と振動測定の概略図
Building Condition and Vibration Measurement

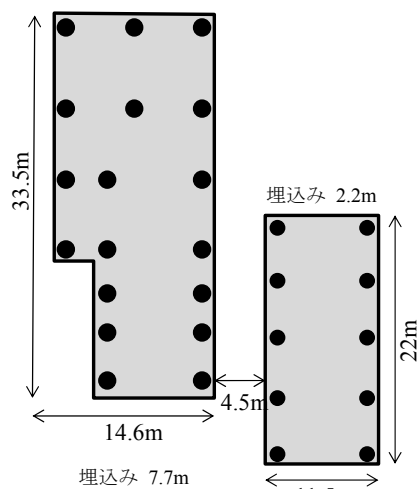


Fig. 10 基礎部分の概略図 (平面図)
Outline of Foundation (Plan)

4.2 解体建物と隣接建物の応答

振動測定は、解体状況が異なる複数ケースで行ったが、隣接建物の上部での応答が大きかったケースの1/3オクターブバンド周波数分析結果を Fig. 12 に示す。

Fig. 12 より、2棟の建物の卓越振動数付近の2.5Hzの振動が大きく励起されていることが分かる。短辺方向は、解体建物の上部でH-90を超える振動が発生し、この影響で隣接建物の上部でもH-70程度の振動が発生していることが分かる。

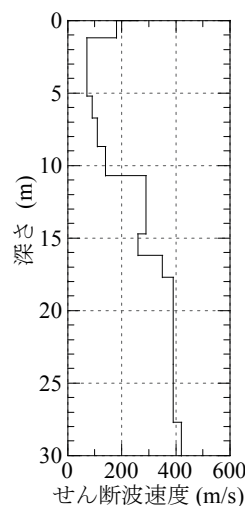


Fig. 11 地盤モデル
Soil Model

4.3 加振力の推定

実測記録と数値解析との比較により階上解体工事の加振力を推定した結果、短辺方向と長辺方向に作用する加振力は同程度であった。

また、推定した加振力の値は、3章での検討結果とも同程度であった。

Table 5 建物モデル
Building Model

	解体建物	隣接建物
階数	11	8
平均階高(m)	3.2	3.5
平面形状	14.6m×33.5m (一部切り欠きあり)	11.5m×22m
各階質量(ton)	465	216
基礎質量(ton)	1,395	431
減衰(%)	3	3
基礎形式	杭基礎 (φ1300~1500 ×44本、長さ27.7m)	杭基礎 (φ1600×10本、 長さ27.7m)

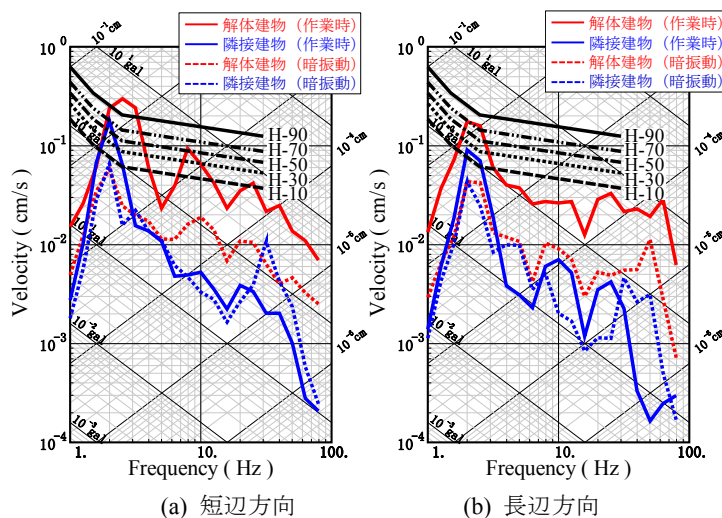


Fig. 12 作業時と暗振動の比較
Comparison of Ambient Vibration and Work Vibration

5. まとめ

階上解体に伴って発生する工事振動が周辺建物に及ぼす影響を適切に予測するために、解体建物と周辺建物を対象として振動測定と数値解析を行った。得られた結果を以下に示す。

- 1) 階上解体の重機作業により、解体建物の固有振動数の振動が励起される。
- 2) 解体建物と隣接建物の固有振動数が近接すると、階上解体工事の影響が大きくなり、隣接建物の上部で体感レベルに達する振動が発生する。
- 3) 階上解体工事の加振力の推定方法を提案し、実測記録と比較した。その結果、数値解析により実現象を概ね再現可能であることを示し、提案手法の妥当性を示した。

本論での結果より、階上解体による解体工事の振動予測が可能となった。今後も適用事例を増やすことにより、予測精度の向上とノウハウの蓄積を行う予定である。

謝辞

振動測定を実施するにあたり、関係諸氏に多大な御協力と御配慮を賜りました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 高野真一郎，若松邦夫：地盤を伝わる環境振動技術－地盤を伝わる環境振動予測システム「ゆれみる[®]」，大林組技術研究所報，No.69，2005.12
- 2) 高野真一郎，若松邦夫：地盤を伝わる環境振動予測システム「ゆれみる[®]」の新機能－防振地中壁による振動抑制効果の検討－，大林組技術研究所報，No.68，2004.12
- 3) 高野真一郎，佐々木文夫：建物の解体工事振動が隣接建物に及ぼす影響，日本建築学会大会学術講演会（環境工学I），pp.403-404，2010.9
- 4) 日本建築学会：建築物の振動に関する居住性能評価指針同解説，2004