

常時微動計測及び固有値解析に基づく鋼構造大規模工場建屋の振動特性の推定

Estimation of the Vibration Characteristics of the Steel Structure Large-scale Factory Building
Based on Microtremor Measurement and Eigenvalue Analysis大規模工場 振動特性 工場建屋
常時微動 固有値解析 振動モード

正会員	○吉田 圭佑*	YOSHIDA Keisuke
正会員	杉山 拓真*	SUGIYAMA Takuma
正会員	飛田 潤**	TOBITA Jun
正会員	護 雅史***	MORI Masafumi
正会員	福和 伸夫****	FUKUWA Nobuo

1. 背景と目的

本研究で扱う工場建屋は、平面規模の大きい鋼構造のラーメン構造だが、梁はトラスである。このような建物は現行基準で設計されることは少ないが、現在も生産活動が行われている。工場を対象とした振動計測の事例は少なく、大規模工場の解析例はない。そこで本研究では、3棟の工場建屋を対象に常時微動計測を実施し振動特性を解明した上で、1棟の建屋で3次元立体フレームモデルを構築し比較を行うことで解析モデルの構築にあたって留意する点について明らかにする。

2. 対象建物の概要

対象建物は異なる敷地のA、B、Cの3工場で、ここでは計測ケースの多いA工場を主に扱う。図1、2にA工場の建物概要を示す。対象建屋は1970年に竣工された。鋼構造の鋸屋根をもつ平屋である。東西240m、南北140m、柱スパンは梁間方向に20m、桁行方向に10mで、エキスピアンションジョイントではなく一体の構造である。東西方向に大梁トラスがあり、南北方向に小屋組みがあるため、東西方向が梁間方向、南北方向が桁行方向と考える。梁間方向の外側構面には間柱が取り付けられている。柱と間柱は桁行方向を強軸としたH型鋼である。トラスの下弦材は山形鋼

の2丁合せ、束材は4丁合せを使用している。軒高5.5m、最高部高さ8.9mで、高さ4.4mに点検用の歩廊がある。建屋の質量は設備機器、小屋組みや屋根材のある上部に集中している。B、C工場建屋はそれぞれ1969年、1968年に竣工された1辺数百mの平屋である。C工場は増築がくり返されている。柱スパンはB工場20m、C工場は10m、12m、20m、24mが混用されている。軒高はB工場6m、C工場10mである。

3. 対象建物の概要

3種類ある計測配置を図1及び図2に、常時微動計測の内容を表1に示す。観測点は地盤上の1点、4本の柱の上下にそれぞれ1点ずつの計9点で動コイル型微動計を1台ずつ設置している。なお、観測対象とする柱は表1に示した解説する目的に合わせて変更している。計測配置①では梁間方向と桁行方向の一体性、計測配置②では壁面の振動特性、計測配置③では大梁中央部の振動特性の把握を目的とした。B-8等の表記は柱を表し、A~Gは桁行、5、8は梁間の柱番

表2 固有振動数(Hz)と減衰定数

	1次	2次	3次
A工場	梁間 1.4(h=1.5~1.6%)	2.9	
	桁行 1.7(h=1.8~3.2%)		
B工場	梁間 1.5(h=1.5~2.1%)	2.0	2.6
	桁行 1.3(h=2.0~3.2%)	1.6	2.4
C工場	梁間 1.7(h=1.7~2.7%)	2.0	2.1
	桁行 1.6(h=1.9~2.3%)	2.0	2.4

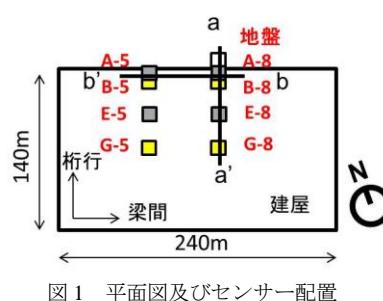


図1 平面図及びセンサー配置

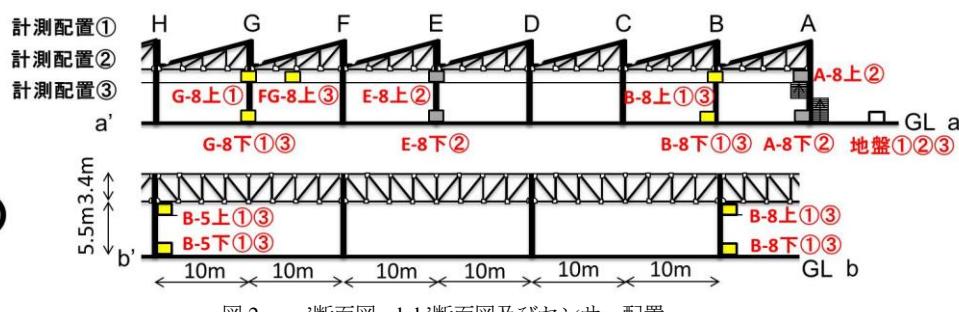


図2 a-a'断面図、b-b'断面図及びセンサー配置

* 名古屋大学大学院環境学研究科・大学院生

** 名古屋大学災害対策室・教授・工博

*** 名古屋大学減災連携研究センター・准教授・博士(工学)

****名古屋大学減災連携研究センター・教授・工博

Grad. Student, Grad. School of Environmental Studies, Nagoya Univ.

Prof., Disaster Management Office, Nagoya Univ., Dr. Eng.

Designated. Prof., Disaster Mitigation Research Center, Nagoya Univ., Dr. Eng.

Prof., Disaster Mitigation Research Center, Nagoya Univ., Dr. Eng.

号を示す。B-8 柱の柱脚の観測点を B-8 下、B-8 柱の柱頭(梁下弦材位置)の観測点を B-8 上と略記する。

4. 常時微動計測に基づく振動特性の分析

4.1. 固有振動数と減衰定数

地盤、B-8 下と B-8 上の速度フーリエスペクトルを成分ごとに図 3 に示す。アンサンブル平均区間は 40.96 秒に設定し、重ね合わせデータ数は 43 個である。B-8 上に着目し、他の柱 3 点のスペクトルと共に通する振動数は梁間

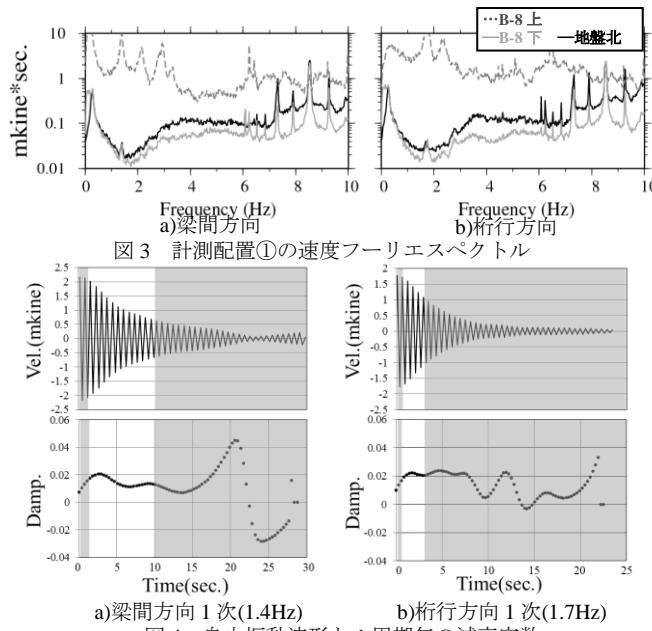


図 3 計測配置①の速度フーリエスペクトル

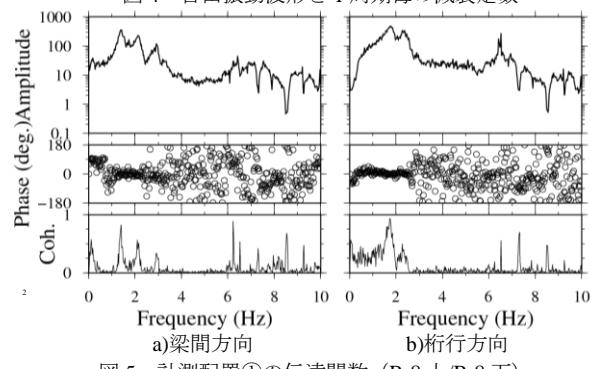


図 4 自由振動波形と1周期毎の減衰定数

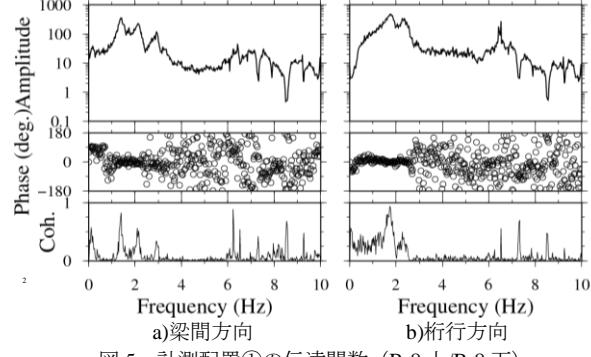


図 5 計測配置①の伝達関数 (B-8 上/B-8 下)

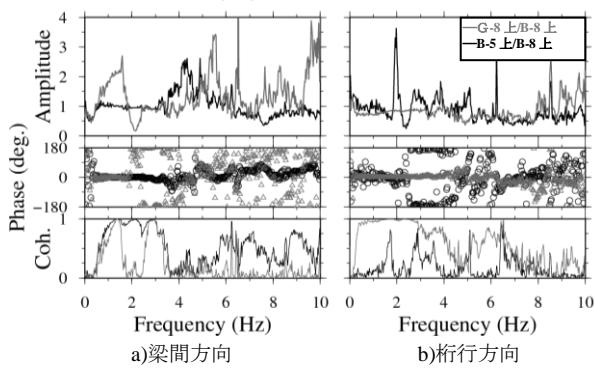


図 6 計測配置①の伝達関数

方向 1.4Hz、2.9Hz で桁行方向 1.7Hz であった。これらは建屋の固有振動数であり、梁間 1.4Hz、桁行 1.7Hz は 1 次固有振動数である。

図 4 に G-8 上の波形に梁間・桁行方向 1 次の固有振動数でバンドパスフィルタを施した上で RD 法を適用し得られた自由振動波形と 1 周期毎の減衰定数を示す。梁間方向 1 次は 1~10 秒、桁行方向は 0.5~3 秒の間で平均し減衰定数を推定する。表 2 に B、C 工場も含めた固有振動数と 1 次モードの減衰定数を示す。いずれの工場でも 1 次固有振動数の減衰定数は 1.5~3% 程度である。また、推定した減衰定数は観測点により最大で 1.4% 程度の幅がある。

4.2. 柱脚と上部構造の振動の相関

図 5 に B-8 上/B-8 下の伝達関数を示す。コヒーレンス

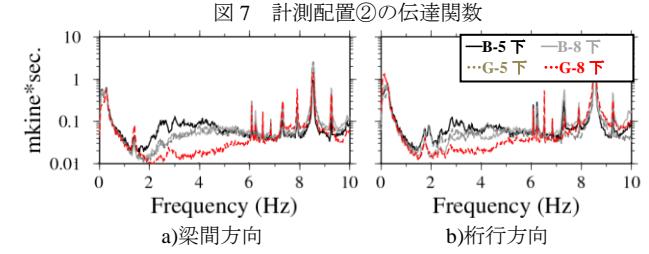
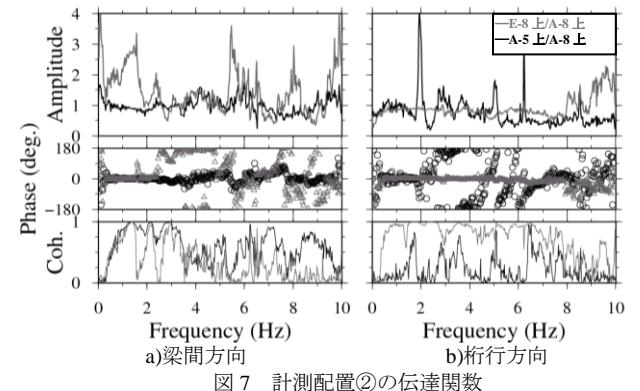


図 8 計測配置①柱脚の速度フーリエスペクトル

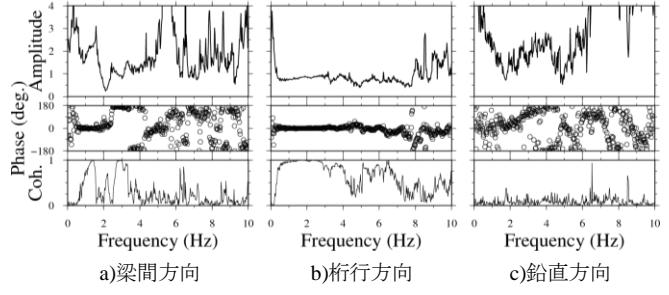
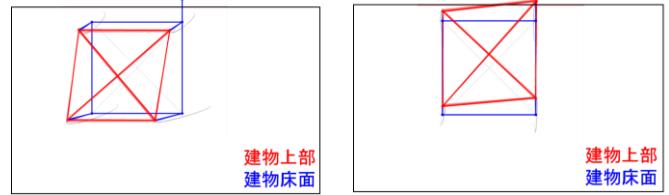


図 9 計測配置③の伝達関数 (FG-8 上/B-8 上)



建物上部
建物床面

建物上部
建物床面

を見ると、広い振動数域で小さい値を示している。計測時は強風であったことも影響して、當時微動においては上部のみが大きく応答し、柱脚部の振動との相関が低いと考えられる。

4.3. 建屋の振動の一体性

図6にB-5上/B-8上、G-8上/B-8上の伝達関数を示す。梁間方向の2点を計算したB-5上/B-8上に着目すると図6a)では固有振動数付近で、振幅倍率は1に近く、位相差0°、コヒーレンスの値は大きい。図6b)ではコヒーレンスの値が小さい。梁につながれた方向では同振幅・同位相である。その面外方向では相関が小さい。桁行方向の2点を計算したG-8上/B-8上でも同様の傾向が見られる。以上の結果から屋根面の一体性は保たれておらず、上部構造を1質点のモデルでは表現できないと考えられる。

次に、壁面の振幅について考察する。図7に計測配置②のA-5上/A-8上、E-8上/A-8上の伝達関数を示す。図6と比較すると、梁間方向1~3Hzで振幅倍率はより大きい値となっており、壁面のA-8上の振幅が小さいためと考えられる。壁面と内部の柱は同じ振動数でピークが見られ、壁面の振幅は内部の柱に比べ小さくなっている。

4.4. 地盤からの入力の一様性

図8に柱脚4点のフーリエスペクトルを示す。梁間方向では1.4Hz、桁行方向では1.7Hzでの卓越が共通している。B-5下、G-5下の桁行方向のみ1.9Hzで卓越が見られる。柱脚は独立基礎で床は土間コンクリートであり、スパンが大きいこともあって床面の一体性は低い。従って、解析時も各柱への入力を同一とみなせない可能性がある。

4.5. 梁の面外・上下振動

計測配置③では、計測配置①で柱列Gの上部に設置した微動計を柱Fと柱Gの中間に設置した。図9に桁行方向に離れたFG-8上/B-8上の伝達関数を示す。図6のG-8上/B-8上と比較すると振幅倍率の値は梁間方向では0.3Hzで8倍程度、5.8Hz付近で4倍程度、鉛直方向では0.3Hz付近で6倍程度、3.4Hz付近で5倍程度の振幅倍率となっている。以上から、梁の中央部では柱梁接合部の数倍の振幅となることがあり、吊り下げ設備機器等の設計にあたって留意すべきである。

4.6. モード形状

図10に計測配置1より得られた梁間、桁行方向1次のアニメーションによる可視化ツール¹⁾を用いて描画した立体振動挙動とその軌跡を示す。表示倍率は200倍である。建物上部の振幅が大きいため、建物床面に変化がないように見える。梁間方向1次ではB-5、8上の外側構面に対して、G-5、8上の内側構面の振幅が大きく、屋根

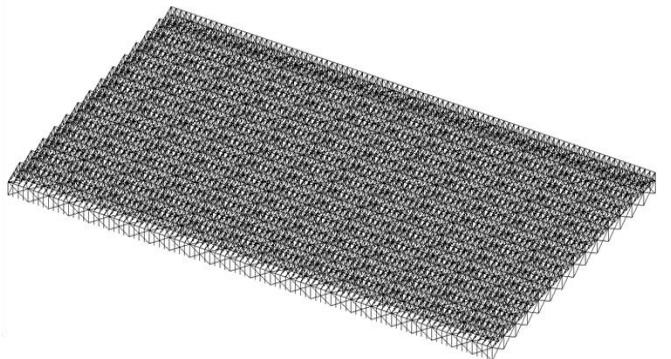


図11 解析モデルの3Dモデル図



図12 解析モデルの断面図

表3 部材寸法

柱	H-298×299×9×14
上弦材(梁間方向)	H-100×100×6×8
上弦材(桁行方向)	H-150×75×7×7
束材	4L-65×65×6
下弦材	2L-65×65×6
水平プレース	□-70×70×3.2
間柱	H-150×75×7×8

面では面内変形を伴った振動性状が見られる。また、建物上部4点で結ばれた正方形の構面は変形している。軌道は時計周りの回転をしているが、計測を行った時間内で回転方向は変化することを確認している。桁行方向1次も内側構面の振幅が小さく、回転方向が時間により変化する。

5. 解析との比較

計測を行った3棟のうちA工場を3次元立体フレームに置換し計測で得られた振動特性との比較を行う。解析モデルは間柱と外壁の剛性を考慮することの有無により3種類使用する。

5.1. 解析モデルの概要

図11に間柱と外壁の剛性を考慮した解析モデル、図12に解析モデルの東西、南北方向の断面図を内側構面と間柱・外壁のある外側構面を、表3に各部材の寸法を示す。柱の2次モードは高振動数にあるため柱の中間に節点は設けない。節点数は19478~19842、要素数は38407~38895である。地盤ばねの剛性を推定すると構造物の剛性に比べて大きいため、柱脚固定とした。各接合部はトラス構造ではあるが、微動計測結果と比較すること、

応力の出力を実現することから剛接合とした。外壁に使用される厚さ 15mm の木毛セメント板の剛性を考慮するため、文献 2)よりせん断剛性を求めた。A 工場では設備機器が多数設置されていたが、解析モデルの荷重は部材の質量のみである。

5.2. 固有値解析結果と計測結果の振動特性の比較

図 13 に間柱と外壁の剛性を考慮した解析モデルの 1~3 次の振動モード図を、表 4 に計測結果と解析で得られた固有振動数、固有振動数の比と弓形変形成分の比を示す。図 13a)、c) では、各振動方向の断面図も合わせて示す。計測に合わせて梁間方向 1 次の弓形変形成分の比は B-8 上/G-8 上、桁行方向 1 次では G-5 上/G-8 上の振幅比とする。固有値解析から得られた固有振動数は、梁間方向 1 次 1.64Hz、ねじれ 2.39Hz、桁行方向 1 次 2.47Hz である。各方向 1 次は柱の曲げ変形による並進であり、屋根の面内変形が伴い弓形の変形となっている。計測結果からも面内変形の振動性状は捉えられている。梁間・桁行方向 1 次は、計測結果と比較すると高振動数である。ねじれは計測結果からは得られなかった。

間柱外壁なしでは固有振動数比が大きく H 型鋼柱の断面二次モーメントの比によるものと考えられる。間柱を考慮すると強軸が向いている桁行方向の固有振動数が大きくなる。さらに外壁を考慮し外側構面の剛性が大きくなると、長辺である梁間方向の固有振動数が大きくなり、固有振動数比は小さくなるが、計測結果よりは大きい。弓形変形成分の比は計測の方がより大きい値となっている。微動時では内側構面と外側構面の剛性の差は今回の解析モデルより大きいと考えられる。

6. まとめ

大規模工場建屋の振動特性を常時微動計測により考察し、変形性状を捉えることができる 3 次元立体フレームモデルを構築した。一次固有振動数は 1.4~1.7Hz 程度であること、並進に面内変形が伴い床面に対して屋根は大きく増幅されるため建屋の一体性が保たれていないこと、大スパンで独立基礎のため地盤からの入力は一様でないこと、梁中央部の増幅が大きいことなど、地震応答評価に当たって、留意すべき点が明らかになった。

計測した工場は設備機器が多数設置されており、解析モデルより長周期である。柱と間柱の剛性評価のみでは面内変形の振動性状を適切に表現できない可能性がある。解析結果は固有振動数比が大きく、面内変形は小さい応答に留まっている。内側構面と外側構面の剛性の差が大きくなれば弓形変形成分の比が大きくなり、計測結果と近づく。外側構面と内側構面の剛性の差はより大きいと推測される。

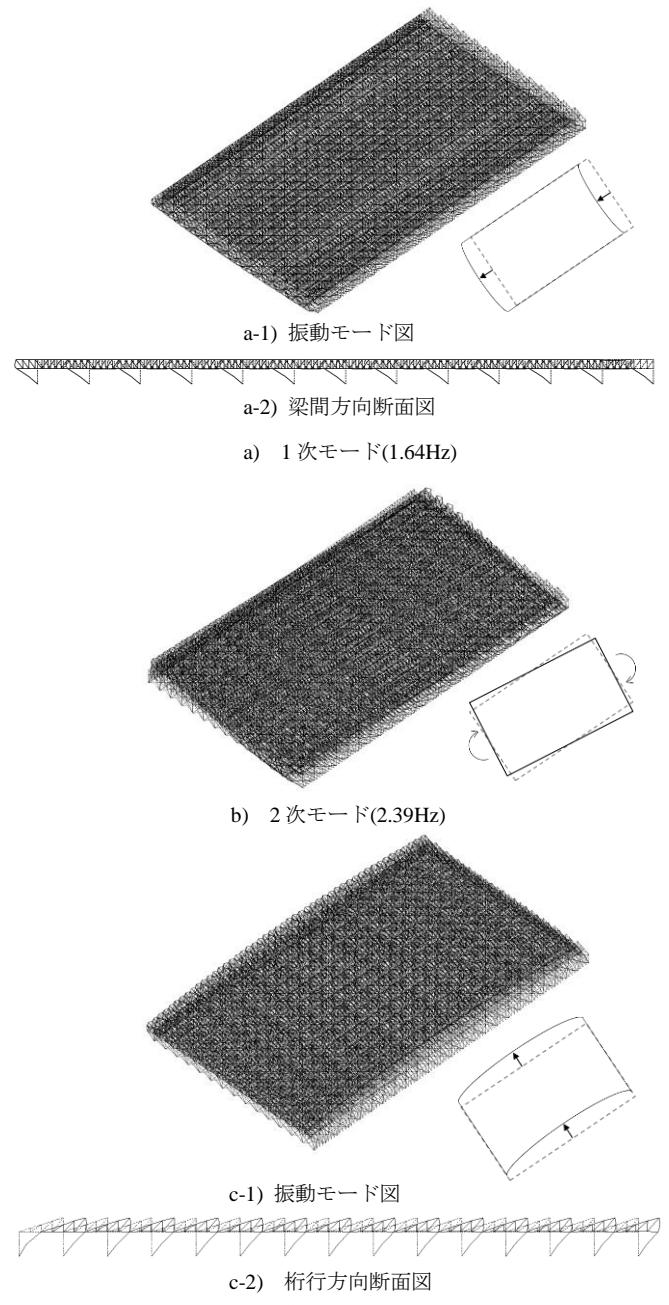


図 13 振動モード図

表 4 計測と解析で得られた固有振動数

	梁間方向1次		桁行方向1次		fy/fx
	fx(Hz)	弓型変形成分の比	fy(Hz)	弓型変形成分の比	
計測	1.4	2.09	1.7	1.61	1.2
間柱外壁なし	1.5	1.05	2.4	1.04	1.6
間柱	1.5	1.04	2.5	1.04	1.6
間柱+外壁	1.6	1.09	2.5	1.05	1.5

参考文献

- 1) 廣野衣美、牧原信一郎、福和伸夫、飛田潤、護雅史、小島宏章：多点多成分振動観測記録の効果的な分析を支援する動画アプリケーションの開発、日本建築学会技術報告集、第 14 卷、第 28 号、pp.423-428、2008.10
- 2) 杉本健一、三井信宏、神谷文夫：各種面材を張った軸組構法の壁の面内せん断性能、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造 III、pp.319-320、2001.9