

鉄骨造超高層建物の風揺れ特性に関する検討

森下 真行^{*1}・齊藤 芳人^{*1}・龍神 弘明^{*1}・丸山 勇祐^{*1}

A Study on the Characteristics of the Wind-Induced Vibration of the Super-High-Rise Steel Structure Building

Tadayuki MORISHITA, Yoshihito SAITO, Hiroaki RYUJIN, Yusuke MARUYAMA

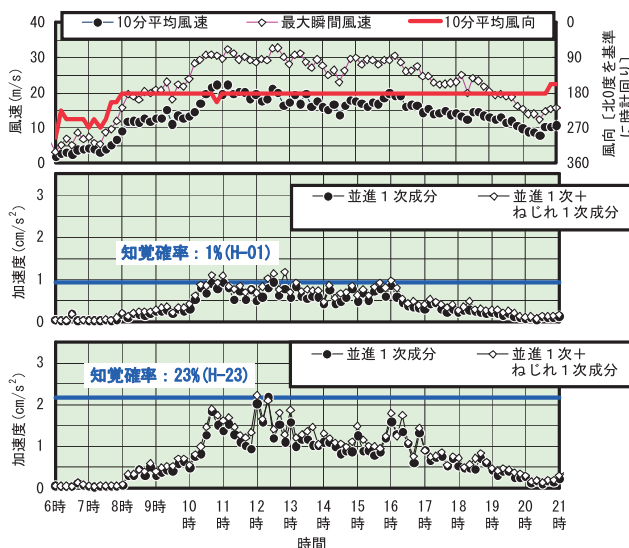


図-1 風速と最大応答加速度推定値との関係

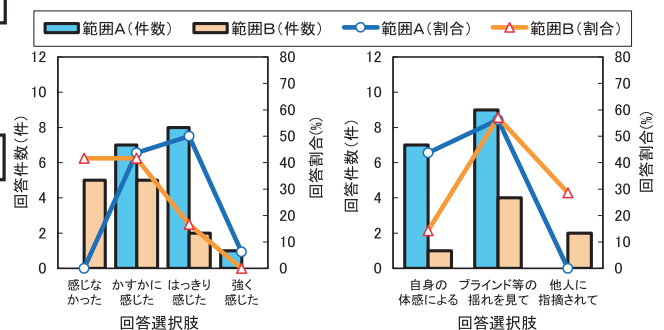


図-2 振動体感アンケート結果

研究の目的

再現期間が比較的短い日常的な風による建物の水平振動は、居住性能の観点で非常に重要な問題である。また、昨今の居住性能に関する要求レベルの高まりを受け、建物設計段階で風揺れに関する十分な検討が必要不可欠となりつつある。本報では、実建物での実測結果から強風時の建物動特性を把握するとともに、強風時における実測結果、振動体感アンケート結果および居住性能評価予測結果を基に、建物の風揺れに関する居住性能評価について検討した結果について報告する。

技術の説明

検討対象建物は、東京都に建つ地上 23 階建（建物高さ 100m）の鉄骨造事務所ビルであり、平面的に対称で概ね整形な形状をしているが、平面角に隅欠部がある点に特徴を有する。本建物での実測結果（水平振動および風向風速）、振動体感アンケート結果および居住性能評価予測結果を基に、建物の風揺れに関する居住性能について検討した。

主な結論

- ・ 10 分間平均風速と最大応答加速度との関係より、建物長辺面に風が吹きつける北あるいは南よりの風向時に建物短辺方向（風方向）の揺れが顕著となることが確認された。
- ・ 実測より求めた居住性能評価結果と振動体感アンケート結果とはやや整合性に欠けるものであった。このことから、視覚効果やねじれ振動の影響を無視できない可能性のあることが指摘された。
- ・ 居住性能評価に関して、実測結果と予測結果とを比較した結果、風方向の揺れに関しては良い対応を示すが、風直交方向の揺れに関しては、本建物に存在する隅欠部の影響により安全側の評価ではあるが、その差は大きいことが確認された。

*1 本店 技術研究所 先端技術研究グループ

鉄骨造超高層建物の風揺れ特性に関する検討

森 下 真 行^{*1}齊 藤 芳 人^{*1}龍 神 弘 明^{*1}丸 山 勇 祐^{*1}

要 旨

昨今，建物設計段階で風揺れに関する十分な検討が必要不可欠となりつつある．そこで，鉄骨造超高層建物での実測結果から強風時の建物振動特性を把握するとともに，強風時における実測結果，振動体感アンケート結果および居住性能評価予測結果を基に，建物の風揺れに関する居住性能について検討した．

以下に得られた結果を示す．

- (1) 10 分間平均風速と最大応答加速度との関係より，建物長辺面に風が吹きつける北あるいは南よりの風向時に建物短辺方向（風方向）の揺れが顕著となることが確認された．
- (2) 実測より求めた居住性能評価結果と振動体感アンケート結果とはやや整合性に欠けるものであった．このことから，視覚効果やねじれ振動の影響を無視できない可能性のあることが指摘された．
- (3) 居住性能評価に関して実測結果と予測結果とを比較した結果，風方向の揺れに関しては良い対応を示すが，風直交方向の揺れに関しては，本建物に存在する隅欠部の影響により安全側の評価ではあるが，その差は大きいことが確認された．

キーワード 鉄骨造超高層建物／風揺れ／居住性能／振動調査／振動体感アンケート

目 次

- | | |
|--------------|---------------|
| 1. はじめに | 5. 居住性能評価予測結果 |
| 2. 検討対象建物概要 | 6. まとめ |
| 3. 実測調査 | 7. おわりに |
| 4. 振動体感アンケート | |

A STUDY ON THE CHARACTERISTICS OF THE WIND-INDUCED VIBRATION
OF THE SUPER-HIGH-RISE STEEL STRUCTURE BUILDING

Tadayuki MORISHITA
Hiroaki RYUJIN

Yoshihito SAITO
Yusuke MARUYAMA

Synopsis:

Sufficient study on the wind-induced vibration is becoming imperative recently. Estimation on the characteristics of the wind-induced vibration of a super-high-rise steel structure building was carried out from the actual measurement, and the habitability performance related to the wind-induced vibration was studied based on the measurement and the questionnaire survey.

The followings are summarized as the results.

- (1) The vibration in the short side direction of building was remarkable when south/north wind.
- (2) The visual effect and twisting vibration cannot be disregarded.
- (3) The conformity between measurement and estimation of habitability performance was well on the vibration in wind direction, but it in cross wind direction was poor.

1. はじめに

再現期間が比較的短い日常的な風による建物の水平振動は、居住性能の観点で非常に重要な問題である。また、昨今の居住性能に関する要求レベルの高まりを受け、建物設計段階で風揺れに関する十分な検討が必要不可欠となりつつある。このような背景のもと、風揺れの居住性能に関する性能設計体系¹⁾²⁾が確立されてきており、また実測調査および振動体感アンケートに基づいた研究^{例えば3)}も精力的に行われている。

著者らは、2011年5月より鉄骨造超高層建物において風応答観測を実施しており、観測期間中に台風以外の強風時での振動体感アンケートを実施する機会を得た。台風以外の強風時の風揺れを選定した理由は、台風時のアンケートでは風揺れを強く意識された状態での回答となり、日常的な揺れに対する感覚を基にした振動体感アンケート結果を得ることは困難であると推測されたためである。本報では、実建物での実測結果から強風時の建物振動特性を把握するとともに、強風時における実測結果、振動体感アンケート結果および居住性能評価予測結果を基に、建物の風揺れに関する居住性能評価¹⁾について検討した結果について報告する。

2. 検討対象建物概要

検討対象とした建物は、東京都に建つ1994年竣工の地上23階建（建物高さ100m）の鉄骨造事務所ビルである。図-1に検討対象建物の平面概念図を、振動計測位置とともに示す。本建物は平面的に対称で概ね整形な形状をしているが、平面角に隅欠部がある点に特徴を有する建物である。また、本建物の23階には、台風時や中小地震時の居住性能改善を目的とした制振装置が設置されている。本報では建物単体での風揺れ特性を把握することを目的とするため、制振装置稼動時（すなわち、制振装置による居住性能の改善効果）の記録は除外している。同様に、地震時の記録も制振装置稼動の有無によらず除外した。

3. 実測調査

3.1 実測調査概要

本建物では、23階にて水平2成分に対する振動計測（図-1中の振動計測位置P1）を、屋上階にて風向風速の連続計測を実施している。本報で検討対象とした記録は、23階での振動計測期間に対応した2011年5月1日～8月7日、9月23日～2012年5月29日、2013年1月1日～4月30日までの期間（延450日間）とした。図-2に検討対象期間中に当該建屋屋上で得られた10分間平均風速記録を示す。ここで、10分間平均風速は1日間での最大値をその日の代表値としてプロットしており、前述の通り制振装置稼動時および地震時の記録は除外している。10分間平均風速で20m/sを越える日が10日前後含まれている。これら実測記録の分析を通じて、風向風速と建物の最大応答加速度との関係を把握することを目的とする。

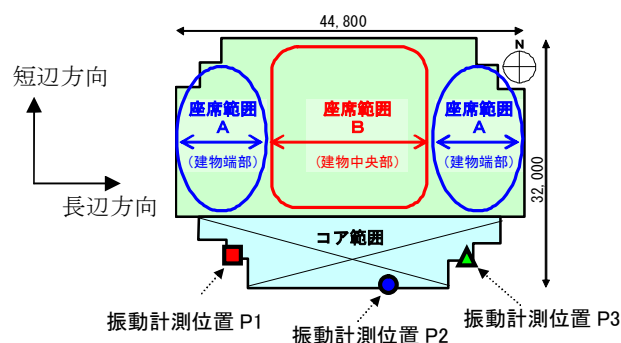


図-1 建物平面概念図

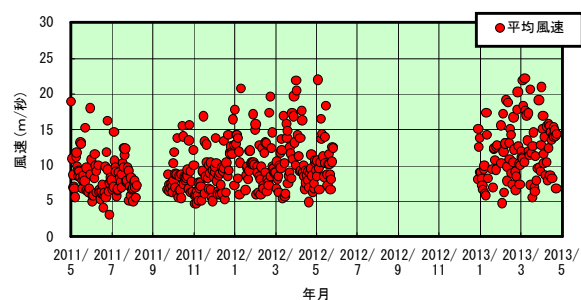
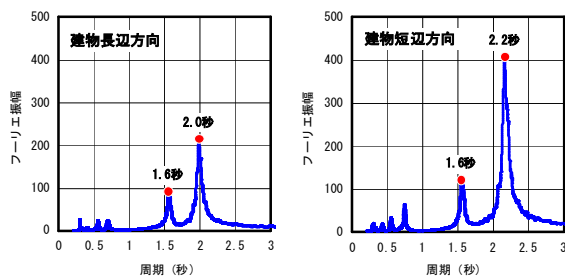


図-2 検討対象期間中の10分間平均風速
（1日間の最大値）

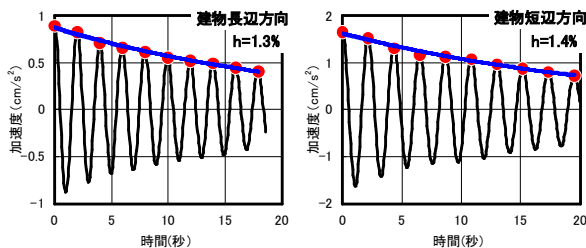
建物高さ方向での振動分布（モード形状）を把握するため、複数階での同時振動計測を23階での連続計測実施期間中に実施した。なお、長辺方向に対する振動計測は振動計測位置P1での8階、17階および23階の全3層、短辺方向は振動計測位置P2にて8階、10～17階および23階の全10層とした。計測当日の本建物屋上での10分間平均風速記録は最大で22m/sであり、南よりの風が支配的であることを確認している。建物高さ方向での振動分布を把握することにより、23階での振動記録のみから任意階での振動を、簡便的ではあるが予測することが可能となる。振動計測位置P3は同P1とともにねじれ中心を推定する際にのみ使用した測点である。

3.2 建物の振動特性推定結果

図-3に強風時の振動計測位置Aでの観測記録の周波数分析結果の一例を示す。これより、建物長辺方向での並進1次の固有周期は約2.0秒、短辺方向での並進1次の固有周期は約2.2秒、ねじれ1次の固有周期は約1.6秒である。また、強風時に最も卓越するのは長辺方向ならびに短辺方向ともに並進1次の振動成分であり、次いでねじれ1次の振動成分が卓越することが確認できる。並進振動、ねじれ振動ともに2次周期成分以降はそれほど顕著ではないことも確認できる。図-4に並進1次の振動成分に関する減衰定数推定結果を示す。減衰定数の推定は、固有周期の推定に用いた記録に対してRD法⁸⁾を適用して求めた。長辺方向並進1次の振動成分における減衰定数は約1.3%、同じく短辺方向は約1.4%と推定された。



(a) 建物長辺方向 (b) 建物短辺方向
図-3 強風時の振動記録 (P1) の周波数分析結果



(a) 建物長辺方向 (b) 建物短辺方向
図-4 強風時の振動記録 (P1) より求めた
並進 1 次振動成分の減衰定数

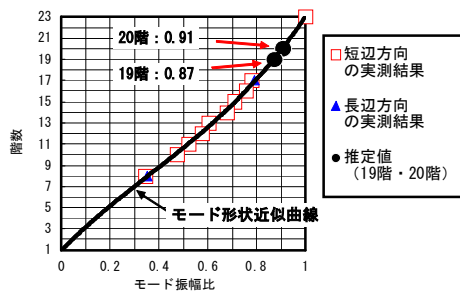
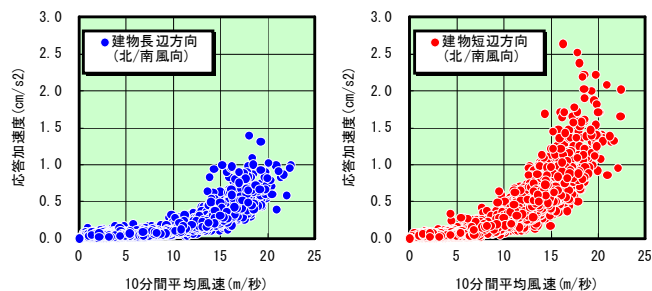


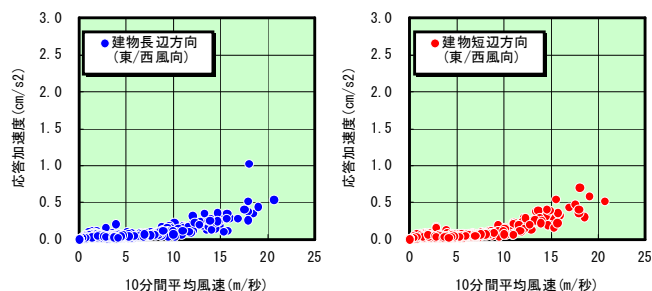
図-5 短辺方向並進 1 次成分のモード形状推定結果

複数階での同時振動計測結果より、短辺方向の並進 1 次モードの振動形状を推定する。ここでは、23 階での振動記録に対する各階の応答振幅比を求め、得られた振幅比に対して最小二乗法を適用してモード形状の近似曲線を推定する方法を採用した。なお、本報では簡易推定として、近似式に 3 次スプライン曲線を採用している。

図-5 に建物短辺方向の並進 1 次振動成分のモード形状推定結果を示す。これより 23 階に対する応答振幅比は振動体感アンケートを実施した 19 階で約 0.87、20 階で約 0.91 と求まり、その平均値は 0.89 となる。この差が居住性能評価結果に与える影響は非常に小さいことから、本報では両階の平均値 (0.89) を 23 階計測結果に掛け合わせて求めた加速度を簡便的に 19 階ならびに 20 階の応答加速度推定値とした。なお、同時計測点数の少ない建物長辺方向の振動分布形状に関しては、短辺方向で推定されたモード形状と長辺方向の計測点での実測結果とが概ね一致することが確認できる。よって、長辺方向のモード形状は短辺方向で推定されたモード形状で代用することとした。



(a) 建物長辺方向 (b) 建物短辺方向
図-6 10 分間平均風速と最大応答加速度との関係
(北あるいは南よりの風の場合)



(a) 建物長辺方向 (b) 建物短辺方向
図-7 10 分間平均風速と最大応答加速度との関係
(東あるいは西よりの風の場合)

3.3 風速と建物応答加速度との関係

図-6 および図-7 に 10 分間平均風速と 10 分間での 23 階における最大応答加速度との関係を示す。ここに、10 分間平均風速は北あるいは南よりの風向の場合および東あるいは西よりの風向の場合に分けて示し、最大応答加速度は各建屋方向での並進 1 次の振動成分を周波数帯域でのバンドパスフィルター処理により抽出しその最大値でプロットした。また、ここで採用した記録は 10 分間平均風速が 1 度でも 15m/s 以上を記録した日の全記録を対象としている。北あるいは南よりの風向の場合は、10 分間平均風速が大きくなるとともに最大応答加速度が指数関数的に増加していく傾向が明確に確認できる。その増加傾向は風直交方向 (建物長辺方向) の振動でも確認できるが、同風速の場合は風方向 (建物短辺方向) の振動でより大きな応答を示すことが把握できる。東あるいは西よりの風の場合、10 分間平均風速の増加に伴う最大加速度の増加傾向は北あるいは南よりの風向の場合に比較して非常に小さく、また、同じ風速での最大応答加速度自体も建物の方向によらず (風方向と風直交方向とで) 概ね同等の値を示している。なお、東あるいは西よりの風向時の記録数は北あるいは南よりの風向時の記録数に比較して相対的に少ないため直接的な比較はできないものの、全体的な傾向から、居住性能の主たる検討方向は建物の長辺面に吹きつける風向 (北あるいは南よりの風) であるといえる。

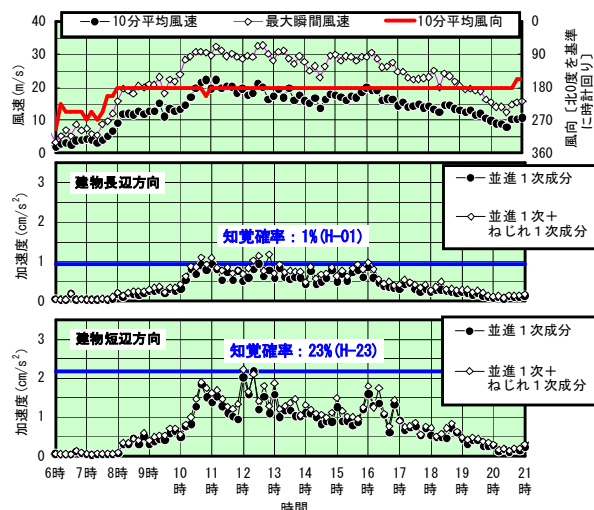


図-8 風向風速と19階・20階における最大応答加速度推定値との関係

4. 振動体感アンケート

4.1 アンケート実施概要

振動体感アンケートは、19階および20階執務者を対象に、2013年3月13日に発生した強風時の建物水平振動に対して実施した。表-1に居住性能に関するアンケート内容を示す。質問内容は、①揺れを感じた程度、②揺れに対する不快感、③揺れに対する不安感、④揺れに対する気持ち悪さ、⑤揺れの気付き要因（何により風揺れに気付いたか）、⑥居住性能評価（今回の風揺れが事務所用途として許されるか否か）の6設問とし、質問②以降の回答は質問①での有感回答者のみを対象としている。建屋の最大応答加速度と振動体感アンケート結果との対比により、水平振動に関する居住性能評価結果の妥当性を検証することを目的とする。

4.2 アンケート実施日の実測結果

図-8に振動体感アンケートの対象とした2013年3月13日に観測された建物頂部風向風速と建物の最大応答加速度推定値との関係を時系列で示す。比較的風速の大きな10時～17時の間は南よりの風が支配的であり、10分間平均風速の最大は約22m/sであることが確認できる。また、19階ならびに20階での最大応答加速度は先に推定した並進1次の振動モード形状を用いて得られた応答加速度推定値を採用し、ねじれ振動の有無で表示した。これより、最大応答加速度は風速とともに大きくなることが確認でき、10分間平均風速が約22m/s時の居住性能評価は長辺方向でH-01、短辺方向でH-23（約2.2 cm/s²）と評価できる。なお、建物の方向別に評価されたねじれ振動を含む最大応答加速度は、ねじれ振動を含まない場合に比較して若干ではあるが大きな値を示す傾向が見られるものの、居住性能評価を大きく悪化させる性質のものではないことが確認できる。

表-1 居住性能に関するアンケート内容

質問番号	質問内容	回答選択肢			
		a	b	c	d
①	揺れを感じた程度	感じなかった	かすかに感じた	はっきり感じた	強く感じた
②	揺れに対する不快感	不快でなかった	少し不快であった	すごく不快であった	
③	揺れに対する不安感	不安でなかった	少し不安であった	すごく不安であった	
④	揺れに対する気持ち悪さ	気持ち悪くなかった	少し気持ち悪かった	すごく気持ち悪かった	
⑤	揺れの気付き要因	体感振動により気付いた	ブラインド等の揺れを見て気付いた	他人に指摘されて気付いた	
⑥	居住性能評価	許される	許されない	どちらともいえない	

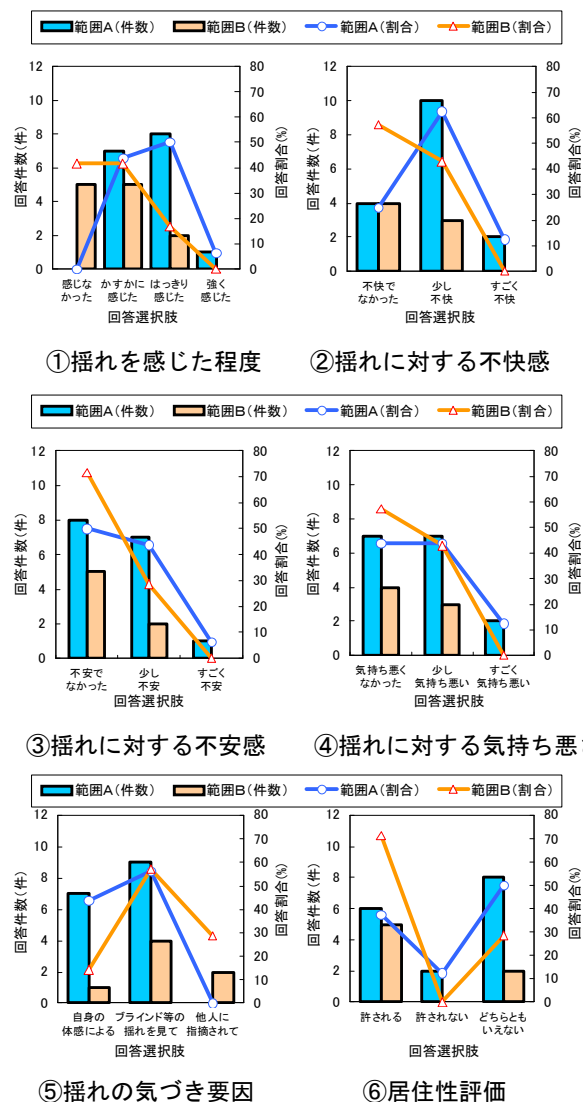


図-9 アンケート結果

4.3 アンケート結果

図-9にアンケート結果を示す。アンケートの有効回答数は全28件（19階15件、20階13件）であった。なお、19階と20階の応答加速度推定結果に顕著な差は認められなかったことから、アンケート結果についても両階をまとめて集計することとした。また、ねじれの影響を把握しておくため、図-1に示す2区分の座席範囲（建物端部をA：回答総数16件、中央部をB：回答総数12件）に分けて検討を実施した。

質問①揺れを感じた程度では、座席範囲Aではすべての人（16 人/16 人中）が揺れを感じているのに対して、座席範囲Bで揺れを感じた人数は約半数（7 人/12 人中）との回答であった。座席範囲Aでの結果からは比較的大きな居住性能評価値を示す可能性のあることが推測でき、振動計測結果をもとに求めた居住性能評価結果（H-23）とはやや整合性に欠けるものと考えられる。なお、質問②以降の回答総数は、質問①での有感回答数に一致し、座席位置Aで16人、同Bで7人となる。

質問②揺れに対する不快感、質問③揺れに対する不安感、質問④揺れに対する気持ち悪さでは、座席範囲Aでやや悪化する傾向はあるものの、全体的な回答割合の分布傾向は座席位置に拠らず概ね同様となる。

質問⑤揺れの気付き要因では、ブラインド等の揺れを見て風揺れに気付いた人の割合が、両座席範囲ともに半数以上の回答率となった。この結果は、ブラインド等の揺れを見るといった視覚効果の影響により振動の体感閾値が下がる可能性のあることを示すものである。このことは、実建物における振動体感の実地調査を基に室内物品の揺れによる視覚効果の影響について指摘された既往の知見⁹⁾とも整合する結果である。ここで、ブラインドの振動について検討を行う。振り子（ブラインド）の揺れ周期は等価振り子長さにのみ依存することが知られている。当該ブラインドの吊り長さは約1mであり、ブラインド先端に質量が集中した状態を仮定した場合の等価振り子周期は約2秒と求まる。これは、建物の並進1次周期に近接しており、これがブラインドを揺らす要因であると推測される。そこで、実際にブラインドの揺れ周期を確認したところ個体差はあるものの概ね2.1~2.2秒の間に位置しており、建物の短辺方向の1次周期とほぼ一致することが判明した。よって、ブラインドの揺れはブラインドの揺れ周期と建物周期との近接による共振現象であることが確認できた。なお、座席範囲Aでは体感により風揺れに気付いた人の割合も比較的大きい。振動体感アンケート結果からは、座席範囲Aの揺れは座席範囲Bの揺れよりも大きいと解釈できる。この要因としてねじれ振動の影響が考えられるため、ねじれ振動の平面分布を推定する。推定は剛床仮定を前提に、振動計測点P1およびP3での記録より推定したねじれ中心から同心円状に分布すると設定した。図-10にねじれ振動の平面分布推定結果を、測点P1における最大値とともに示す。ねじれ振動の振動方向は同心円の接線方向となり、各座席位置で振動方向が異なる。また、その大きさはねじれ中心からの距離に比例して大きくなる傾向を示すなど、並進振動とは大きく異なる特性を持つ。座席位置Aは座席位置Bよりもねじれ中心から離れているため、ねじれ振動はより大きくなるものの、その値（約0.6 cm/s²）は並進振動の振幅値（約2.2 cm/s²）と比較すると小さい。既往の知見⁷⁾によれば、視覚効果に加えねじれ振動の影響が無視できない可能性のあることが指摘されている。執務者は、

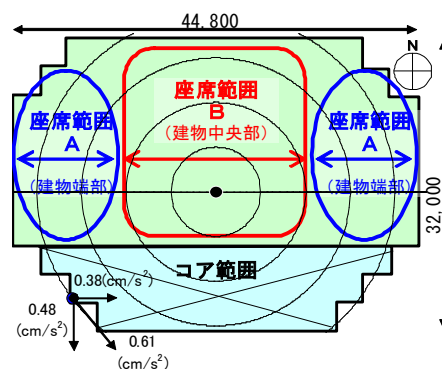


図-10 ねじれ振動の平面分布推定結果

振幅は異なるが比較的振動数が近接しており、また座席位置によっては揺れ方向が必ずしも一致しない並進振動とねじれ振動を同時に体感することとなる。ねじれ振動が発生する場合、執務者は複雑な平面挙動を受けていると考えられ、居住性能に与える影響については引き続き検討を行う予定である。

最後に、質問⑥居住性能評価では、許されるとの回答が座席範囲Bでは7人中5人であったが、座席範囲Aでは、許されるとの回答は16人中6人であり、どちらともいえないとの回答が16人中8人と半数を占める結果となった。ここからも、座席位置Aでの体感振動が相対的に悪くなる現象が確認できた。

5. 居住性能評価予測結果

5.1 居住性能評価の概要

ここでは、居住性能評価¹⁾予測結果の妥当性を実測結果との比較により検証する。表-2に水平振動に関する居住性能評価予測条件を示す。応答予測は参考文献9)による方法を採用した。予測条件として、建物平面形状は矩形、建物振動特性は実測結果の分析により得られた値を、風向は実測結果を参考に南よりの風（建物長辺面に吹きつける風向）とした。また評価階を屋上とするため、23階での実測結果により居住性能評価を行った。

5.2 居住性能評価結果の検証

表-3に居住性能評価予測結果を示す。風方向（建物短辺方向）の最大応答加速度は、予測値ならびに実測値とも2.4 cm/s²程度と概ね一致し、居住性能評価結果も予測結果H-30、実測結果H-29と良く対応する結果となった。風直交方向（建物長辺方向）の最大応答加速度は、予測結果が約3 cm/s²、実測結果が約1 cm/s²となり、予測結果が実測結果の約3倍安全側の評価となる結果であった。その結果、居住性能評価結果も予測結果H-55に対して実測結果H-02と差の生じる結果となった。このような差が生じる要因として、建物平面角の隅欠部による影響が挙げられる。風方向の揺れは、主に風の乱れにより風方向の揺れが励起される現象が顕著となる。この場合、隅欠部の影響は比較的小さく、実測結果と予測結果は良く対

応したと考えられる。風直交方向の揺れは、予測では矩形平面を前提としているため平面角部からの離れにより発生した渦が変動力となり、風直交方向の振動が励起される現象が発生する。本建物の場合、隅欠部の影響により平面角部からの離れが抑えられた結果、風直交方向（建物長辺方向）の揺れは矩形平面を前提とした予測結果に対して約 1/3 に低減されたと推測される。以上のことより本建物では、風方向の水平振動に関する予測では参考文献 9)による手法を用いることで精度良い居住性能評価が可能であるが、風直交方向の水平振動に関しては 3 倍程度の安全率で居住性能評価が予測されとの結論を得た。居住性能に関する検討が必要不可欠となりつつある現状において、居住性能評価の予測精度は建設コストに直結する問題でもあり、引き続き、居住性能の実態把握ならびに予測精度の改善検討を実施する予定である。

6. まとめ

昨今、建物設計段階で風揺れに関する十分な検討が必要不可欠となりつつある。そこで、鉄骨造超高層建物での実測結果から強風時の建物振動特性を把握するとともに、強風時における執務者へのアンケート結果を基に、建物の風揺れに関する居住性能評価について検討した。

以下に得られた結果を示す。

- (1)建物での実測結果の分析より、10 分間平均風速と最大応答加速度との関係を風向別に検討した結果、建物長辺面に風が吹きつける北あるいは南よりの風向時に建物短辺方向（風方向）の揺れが顕著となることが確認された。
- (2)強風時の実測結果より求めた居住性能評価結果は、振動体感アンケートによる結果とはやや整合性に欠けるものであった。この要因として、視覚効果やねじれ振動の影響を受けている可能性のあることが指摘された。
- (3)建物長辺面に風が吹きつける南よりの風に対する居住性能評価予測結果と実測結果とを比較した結果、風方向（建物短辺方向）の揺れは両者で良い対応を示すことが確認された。風直交方向（建物長辺方向）の揺れは、本建物に存在する隅欠部の影響により安全側の評価ではあるが、両者の差は大きいことが確認された。

7. 終わりに

本検討により、視覚効果およびねじれ振動の影響ならびに居住性能評価予測の妥当性について言及することができた。視覚効果やねじれ振動は環境悪化に直接作用する可能性が指摘されており、居住性能予測精度を向上させるうえで考慮すべき重要な要素であると考えられる。今後、居住性能評価の精度向上の一環として、隅欠部の定量的評価法の検討にとどまらず、視覚効果やねじれ振動についても基礎データの蓄積を図る予定である。

表-2 水平振動に関する居住性能評価予測条件

設定項目			設定値
建物寸法		長辺方向長さ	44.8m
		短辺方向長さ	32.0m
		建物高さ	100m
建物振動特性	固有周期	長辺方向	2.0秒
		短辺方向	2.2秒
	減衰定数	長辺方向	1.3%
		短辺方向	1.4%
外力	再現期間 1 年の風速値		22m/s
	風向		南風
評価	評価階		23階

表-3 水平振動に関する居住性能評価

振動方向	分類	最大応答加速度 (cm/s ²)	居住性能評価結果
長辺方向	予測結果	3.22	H-55
	実測結果	1.06	H-02
短辺方向	予測結果	2.48	H-30
	実測結果	2.44	H-29

謝辞：アンケート調査に協力いただいた皆様には、深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 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，2004.5.
- 2) 日本建築学会：環境振動性能評価ハンドブック，2010.10.
- 3) 野田千津子，石川孝重：視覚が水平振動感覚に及ぼす影響に関する研究：日本建築学会計画系論文集，第 525 号，pp15-20，1999.11.
- 4) 川名清三，久田嘉章：台風 0115 号による高層建築物の風振動観測と振動体感アンケート調査，日本建築学会大会学術講演梗概集，2002，20092.
- 5) 川名清三，久田嘉章：高層建築物の風振動観測と振動体感の実地調査，日本建築学会大会学術講演梗概集，2003，20088.
- 6) 小泉達也，奥田浩文：風揺れ実測記録に基づく超高層建物の居住性能ランク，日本建築学会大会学術講演梗概集，2012，40165.
- 7) 新藤智，後藤剛史，伊藤渚：超高層建築物を前提とした動的窓外景観を伴う場合の振動知覚に関する実験研究（その 1，2），日本建築学会大会学術講演梗概集，2006，40103-40104.
- 8) 田村幸雄，佐々木淳，塚越治夫：R D法による構造物のランダム振動時の減衰評価，日本建築学会構造系論文報告集，第 454 号，pp29-38，1993.12.
- 9) 日本建築学会：建築物荷重指針・同解説（2004），2004.