

Hybrid Mass Driver (HMD) の実用化に関する研究 (その3)

鳥取県西部地震における「AVICS-2」の制振効果とビル揺れアンケート調査結果

奥田 浩文 蔭山 満 関松 太郎
野畑 有秀 田中 清和

Practical Development of Hybrid Mass Driver (Part 3)

Performance Verification of "AVICS-2" through Questionnaire Survey on Quake-induced Vibration during the Tottoriken-Seibu Earthquake

Hirofumi Okuda Mitsuru Kageyama Matsutaro Seki
Arihide Nobata Kiyokazu Tanaka

Abstract

This paper describes the performance of "AVICS-2", a Hybrid Mass Driver (HMD) installed in a high-rise building; under quake-induced vibration during the Tottoriken-Seibu Earthquake. This Earthquake; occurred on October 6, 2000, and caused large resonant vibration in a large number of high-rise buildings in the Tokyo Metropolitan area. A questionnaire survey was carried out to verify the vibration control effect of the HMD installed in Shinagawa Inter City Building A. The results of this survey were compared with those obtained from the same questionnaire surveyed carried out for another high-rise building, Shinagawa Inter City Building B, which is of similar scale but without structural control equipment. The following results were obtained. 1) Structural vibration of Shinagawa Inter City Building A was reduced to about 30% by the HMD. 2) A large majority of the people who were in Building B felt uneasiness during the quake, while a large majority in Building A did not. This was apparently due to the vibration reduction effect of the HMD.

概 要

平成12年10月6日に発生した鳥取県西部地震における東京都内の気象庁震度階は1程度であったが、遠方地震特有の長周期成分が支配的な地震動を受けた都内の超高層建物では、共振現象により大きな揺れを励起したケースも見受けられた。この地震に対する当社開発のハイブリッド型制振装置「AVICS-2」の有効性(制振効果)を検証するために、「AVICS-2」が設置されている建物と、それに隣接し且つ同規模の建物を対象に、揺れに関する大規模なアンケート調査を実施した。その結果、次のことが明らかになった。1)「AVICS-2」は建物の揺れを最大値で1/3に低減し、優れた制振効果を示した。2)「AVICS-2」を設置した建物では揺れによる不快感を感じた人はほとんどいなかったが、制振装置を設置していない隣の建物では中層から上部で執務する多くの人が恐怖を感じた。

1. はじめに

平成12年10月6日13時30分に発生した鳥取県西部地震(マグニチュード7.3)における東京都内は震度1程度であったにもかかわらず、一部の超高層建物では大きな揺れが観測された。

筆者らは、中小地震や強風による建物の揺れを効率的に抑制し、結果、居住性能を向上させるハイブリッド型制振装置「AVICS-2」を開発しており、1998年に品川インターシティA棟に適用^{1),2)}している。本装置の有効性は観測記録等を通じて既に確認^{1),2)}されているが、その際に、装置を設置する主目的である居住性能を評価する一つの目安が居住性能評価指針³⁾となる。

しかし、機械的な観測値と人の感覚との関係、あるいは建物の揺れが居住者におよぼす影響等については、それらの比較データが少ないことなどの理由から、同指針³⁾内にも陽な形で示されていないのが現状であり、今後の研

究課題となっている。そこで、上述の比較データの蓄積を主目的として、鳥取県西部地震時に比較的大きな揺れであった品川インターシティ内で、「AVICS-2」が設置されているA棟と、それに隣接し且つ同規模の建物であるB棟を対象にビル揺れに関するアンケート調査を実施した。

本論では、まず今回の地震によって東京の超高層建物が大きく揺れた理由を考察し、次に当該地震における「AVICS-2」の有用性を報告する。更にアンケート調査により得られた応答加速度と体感との関係に着目して、それと同指針³⁾とを比較した結果について報告する。

2. 東京の超高層建物が大きく揺れた理由

東京の超高層建物が遠方地震の際に大きく揺れた事例は今回の地震が始めてではなく、兵庫県南部地震の際にも起こっている。Fig.1は鳥取県西部地震時と兵庫県南部地震時に、沖積層(有明:東京都)と岩盤(川奈:静岡県)で

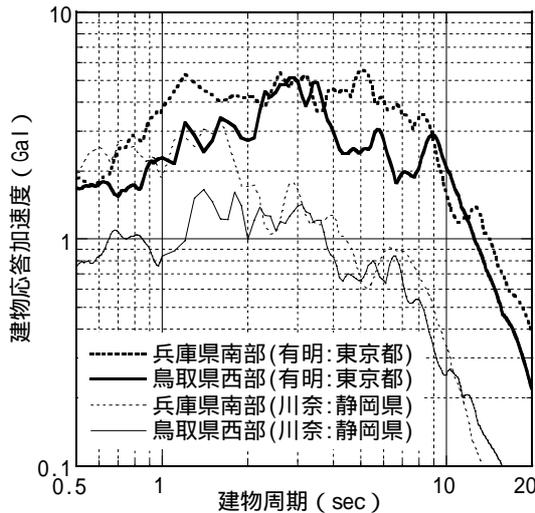


Fig.1 兵庫県南部地震と鳥取県西部地震における関東地方での揺れの違い

Comparison of Quake-induced Vibration of Hyogoken-Nanbu Earthquake and Tottoriken-Seibu Earthquake

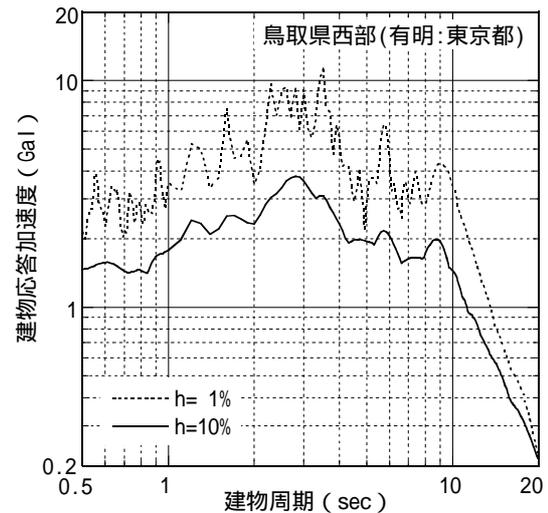


Fig.2 鳥取県西部地震における関東地方でのエネルギー吸収機構の差による揺れの違い

Difference of Quake-induced Vibration by Energy Absorption Mechanism

観測された応答スペクトル(減衰定数5%を設定)を比較した結果であり、同図はこのことを示している。東京の超高層建物が遠方地震によって大きく揺れた理由として以下の三点が挙げられる。すなわち、第一に、東京は厚い堆積層の上にあり、地震の長周期波が増幅される特性があること、第二に、地震規模が大きい場合、震源では多くの長周期成分が発生するが、その成分は距離減衰が小さいため遠くまで伝搬されること、第三に、超高層建物自体が長周期であり地震動のそれと共振することなどである。

有明で観測された鳥取県西部地震記録を用いて、建物の減衰定数を1%と10%としたそれぞれの応答スペクトルをFig.2に示す。一般に、今回の地震による東京の揺れ程度では、当該地域の建物は弾性挙動をし、それが有する減衰能力も小さい。よって、一般的な建物は、同図の破線で表す減衰定数1%の結果とみなせる。この場合、スペクトルの形状から、建物の揺れは建物個々の周期によって大きく変動することが分かる。また、地震や建物サイトによっても異なることになる。したがって、今回の地震で比較的揺れの小さかった超高層建物も、次の地震でも同様に小さな揺れにおさまるとい保証はない。

一方、同図の実線で表す減衰定数10%のスペクトルは、破線で表す同1%のスペクトルと比較して、相対的に滑らかで、且つ建物周期に対して偶然性によらず小さな揺れとなる。このことは、建物自体に地震エネルギー吸収能力がある場合、安定して建物の揺れを抑えることが可能となることを意味する。このエネルギー吸収能力を建物に付与する方法が「AVICS-2」などの制振技術である。

3. 建物と制振システムの概要

品川インターシティ(用途: オフィスビル)の全景をPhoto 1に示す。「AVICS-2」を設置した建物が図中のA棟で



Photo 1 品川インターシティの外観
Location of Shinagawa Inter City

Table 1 固有周期と減衰定数(非制振時)
Natural Period and Viscous Damping

		A棟	B棟
設計値	固有周期	4.32sec	4.37sec
	減衰定数	2.00%	2.00%
実測値	固有周期	3.87sec	—
	減衰定数	0.65%	—

あり、A棟と共に比較の対象としてアンケート調査を実施した建物がB棟である。両建物の短辺方向1次の固有周期と減衰定数をTable 1に示す。Photo 1, Table 1は、アンケート調査を実施した二つの建物は隣接し、且つそれぞれの特性(Table 1中の設計値)は非常に似通っていることを示す。よって、地震時の入力と同じで、もしA棟に制振装置がない場合には、両建物はほぼ同程度の揺れを励起すると考えられる。

A棟に設置した制振システムの基本構成をFig.3に示す。同図の四角印は、制振装置本体の設置位置を、丸印は、建物制御用センサーの位置を表している。また、A棟・装置設置階の詳細をFig.4に示す。

本システム設置の主目的は、日常風(再現期間1年)による建物水平方向の揺れを居住性能評価指針³⁾のランク

以内におさめ,居住性能を改善することにある。この仕様を満足させるため, Fig.3, Fig.4に示すように,制御用センサー配置と制振装置本体を設置階平面の両端に配置することによって,建物短辺方向1次と2次,長辺方向1次,およびねじれ方向1次の振動を抑制する多モード制御を行っている。なお,これらの制御用センサーとして,サーボ方式の加速度センサーを用いている。

A棟・32階に設置された制振装置本体の概要をFig.5に示す。装置本体は,ハイブリッド型制振装置として構成される。すなわち,建物の基本周期と同調して水平2方向に駆動するパッシブ型制振装置(TMD部)の上に,ACサーボモータとボールねじを用いてアクティブマスをもつ1方向のみに駆動させるアクティブ型制振装置(AMD部)を搭載した形の装置である。したがって,本装置は,建物長辺方向にはパッシブ型のTMDとして,短辺方向およびねじれ方向には,パッシブ方式とアクティブ方式を併用したハイブリッド型の装置として構成される。なお,装置本体の諸元,特長等は参考文献1),2)を参照されたい。

4. 制振効果の概要

4.1 建物応答

鳥取県西部地震時の,建物センサー設置位置におけるA棟・短辺方向の加速度波形をFig.6に示す。同図の各図共,実線は制振装置が作動した時の観測値を,破線は比較のために行った非制振時の解析値をそれぞれ表している。なお,同図・各図の解析値は,装置調整時に実測した当該建物の動特性を基に作成した解析モデル^{1),2)}に,今回観測された1階の加速度を入力した時の結果である。これらの結果から,「AVICS-2」の効果によりセンサー設置階の最大の揺れが約1/3に,そのRMS値が約1/4にそれぞれ低減されていることが分かる。

Fig.7は, Fig.6中の32階・加速度波形(制振時と非制振時)を振動数成分で表したものである。同図・左図から,非制振時の建物応答は,とりわけ短辺1次成分が卓越していることが分かる。それに対して,同図・右図の制振時では,短辺2次の成分も含めた二つのモードがよく抑えられており,「AVICS-2」が設計通りの機能を果たしていることが確認できる。

比較的揺れの大きかったA棟・短辺方向に着目した,最大応答加速度の高さ方向(階数)分布をFig.8に示す。同図には建物短辺1次(3.87秒の場合)を対象とした,居住性能評価指針³⁾に記載されている水平振動に対する評価基準を併記している。同図中の解析値は,上述の通り,装置調整時に実測した当該建物の動特性を基に作成した解析モデル^{1),2)}を用いた場合の結果であり,センサー設置階以外の各値は,同調整時に得られた1次モード分布から推定したものである。同図の結果から, Fig.6の結果と同様に,「AVICS-2」により建物各階の揺れの最大値を約1/3に,そのRMS値を約1/4にそれぞれ低減していることが確認できる。また,同図中,印で表す制振時の観測値と,印で表す制振時の解析値を比較すると,ほぼ同等の制振効果

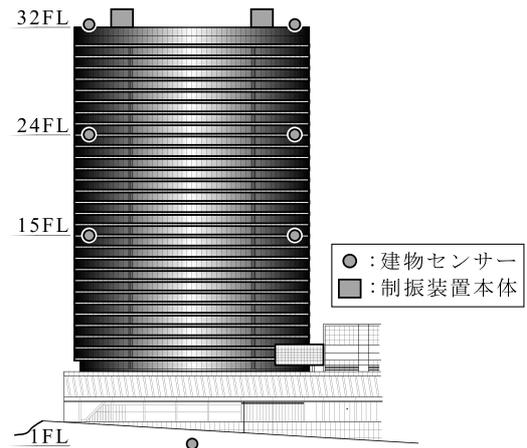


Fig.3 制振装置本体・建物センサーの配置
Arrangement of Device and Sensor

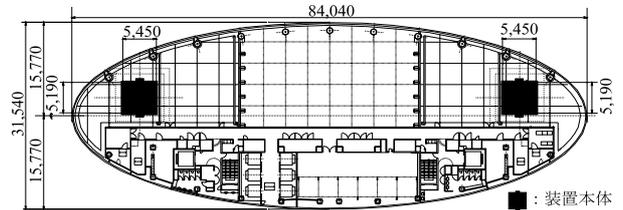


Fig.4 装置本体設置階の平面
32nd Floor Planes

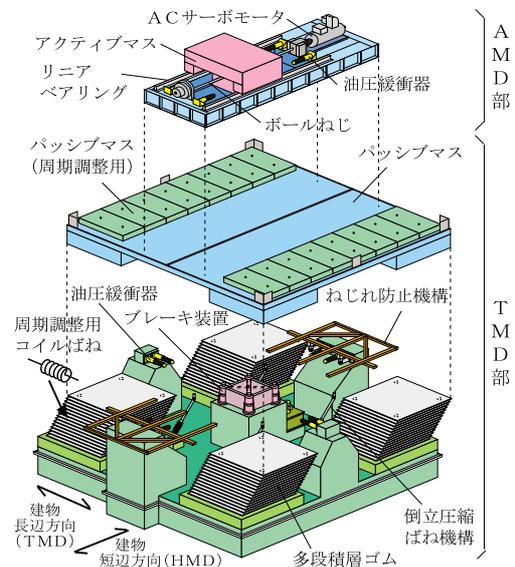


Fig.5 ハイブリッド型制振装置「AVICS-2」の概要
Outline of Composition of "AVICS-2"

となっており,当該建物の揺れは1次モードが卓越していることが分かる。

3章で示す通り,A棟に制振装置がない場合の特性と,B棟の特性は近似しているため,B棟の揺れは,A棟非制振時(Fig.8中,印)とみなすことができる。したがって,A棟制振時とB棟(A棟非制振時)の揺れを比較すると,居住性能評価レベル³⁾でランク(H-2)以内に相当する階は,

A棟では27階から下の階、B棟では12階から下の階となる。また、同評価レベルでランク(H-4)以上に相当する階は、A棟にはみられず、B棟(A棟非制振時)では20階から上の階となる。

4.2 居住性能評価

一般に、建物の居住性能を評価する一つの目安として居住性能評価指針³⁾を適用する場合が多い。本来、同指針を用いた居住性能評価は、強風等によって建物に生ずる、建物基本周期での水平加速度応答を基に決定される。このことから、風による通常の高層建物の振動は、概して1次固有振動数成分が卓越して現れると考えられる。このことを根拠として、ここでは当該地震に対する同指針の適用を試みる。なぜなら、2章および4.1節で示す通り、今回の地震における品川インターシティ(A棟およびB棟)の揺れは、長周期成分が卓越した地震動によって1次モードが支配的であったためである。

当該地震における品川インターシティA棟32階の居住性能の評価結果をFig.9に示す。なお、当該建物の用途はオフィスビルであるため、居住性能評価に際しては、同図中の「事務所」が評価区分となる。同図から、評価対象が地震ではあるが、居住性能上、3章で示す当初設定した設置目的であるランク(H-3)以内を十分満足していることが分かる。

5. ビル揺れに関するアンケート調査結果

5.1 アンケート調査の概要

アンケート調査は、「AVICS-2」が設置されている品川インターシティA棟と、それに隣接し且つほぼ同等の特性を有する建物である同B棟の執務者・計825名を対象として実施した。得られた回答の内、地震時に当該建物に在席していなかった、等の回答は集計結果からは除外している。よって、全回答者数から除外分を差し引いた有効回答者数は、両建物で計742名(A棟359名、B棟383名)である。なお、調査の項目は、性別、年代、揺れの感じ方(感じない・少し・はっきり・強く・不快・不安の6段階)、その時の回答者の状態、建物の揺れ方(ゆっくりか小刻みか、1方向の揺れか2方向の揺れか)、などの7項目とした。

アンケート調査の対象階数と有効回答者数の関係を表した結果をFig.10に示す。同図(a)がA棟の場合を表し、

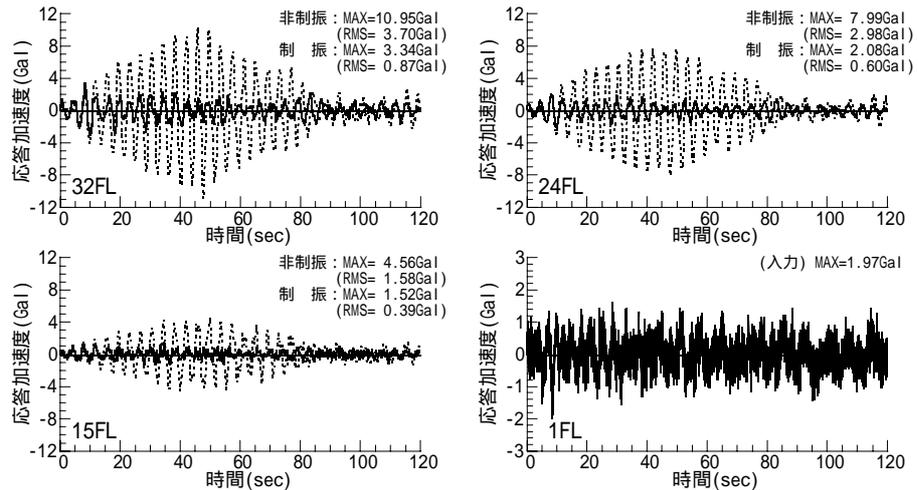


Fig.6 時刻歴応答波形 (A棟・短辺方向)
Time Response under Earthquake

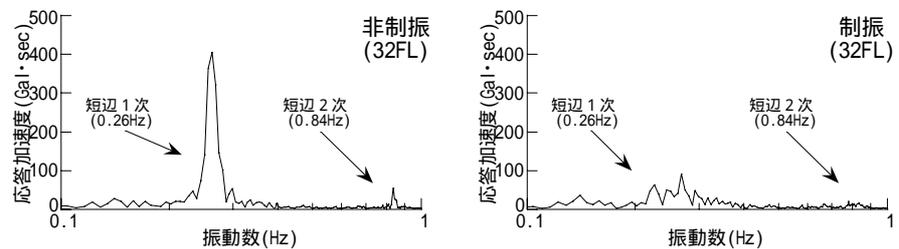


Fig.7 A棟・32階応答加速度のフーリエスペクトル
Fourier Spectrum of 32nd Floor Acceleration

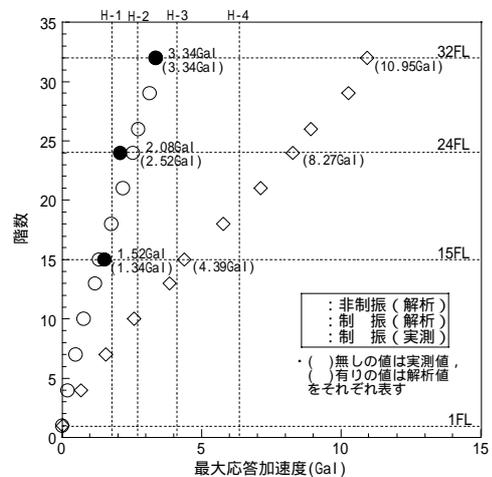


Fig.8 最大加速度分布
Distribution of Maximum Acceleration

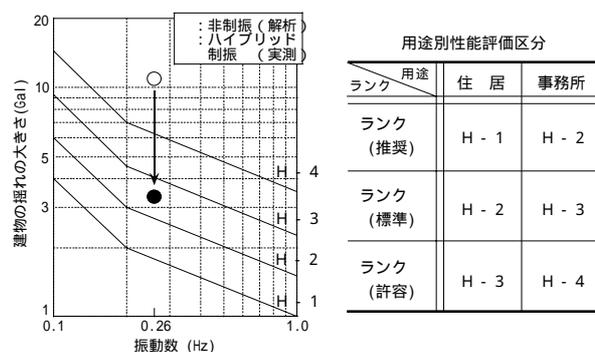
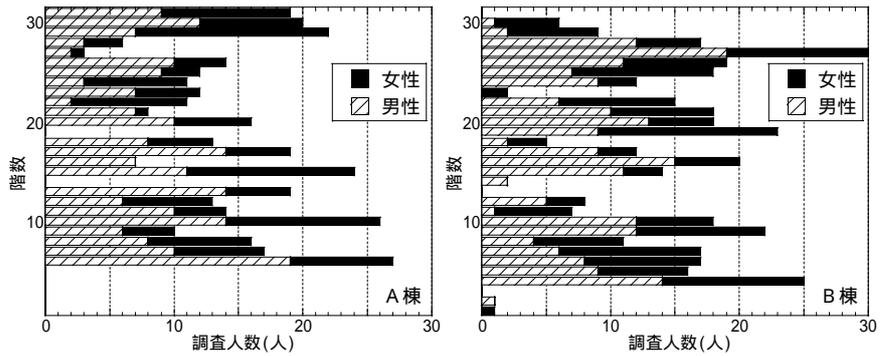


Fig.9 居住性能評価
Habitability to Building Vibration

同図(b)がB棟のそれを表す。1階当たりの平均有効回答者数(有効回答数/有効回答が得られた階の総数)は、A棟で約15名/階、B棟で約14名/階である。また、有効回答者に占める男女の比率は、A棟では男性57.9%、女性42.1%であり、B棟では男性54.8%、女性45.2%であった。



(a) 「A棟」の場合 (b) 「B棟」の場合

Fig.10 調査人数分布
Distribution of surveyed Number

5.2 アンケート調査の結果

5.1節で示す調査項目の内、揺れの感じ方に着目した場合の結果をFig.11に示す。本報で用いる揺れの感じ方とは、揺れを、「感じない・少し感じた・はっきり感じた・強く感じた・不快に感じた・不安になる」という6段階の選択肢を指し、同図は、各回答者が選択した結果を表している。同図(a)がA棟の結果を、同図(b)がB棟のそれをそれぞれ表している。同図の各図共、縦軸は回答者が執務していた当該階を、横軸は各階ごとの有効回答者の割合を表している。ここで用いている有効回答者の割合とは、上述の全選択肢を対象とした有効回答者数に対する各選択肢ごとの有効回答者数の比率を意味している。また、揺れを感じた場合(揺れを「感じない」以外)の同図・各図は、当該選択肢より揺れのグレードが高い回答を全て含めた累積分布の形で表現している。したがって、揺れを「感じない」場合と、揺れを「少し」以上感じた場合の回答数の和が、当該建物および当該階の有効回答者数と一致する。なお、これらの各図には、4.2節で示す建物短辺1次を対象とした、居住性能評価のランクも併記している。

これらの各図から、まず、最小知覚閾(約1.0Gal)に相当する両建物・6階以下を除いて、揺れを「感じない」とする回答を比較すると、その割合は、A棟が70%程度であるのに対し、B棟では40%程度と少ないことが分かる。また、今回の地震における両建物の揺れは、1次モードが支配的であったため、結果、上層階ほど揺れが大きくなると考えられるが、この傾向はB棟の揺れを「感じない」場合の図において顕著に現れている。逆に、下層階になるほど揺れを「感じない」とする回答が多くなるB棟に比較して、「AVICS-2」を設置しているA棟では、揺れを「感じない」とする回答が各階に満遍なく存在することも併せて確認できる。更に、揺れが大きいと考えられる両建物の上層階を比較すると、B棟では「不快」あるいは「不安」と感じた回答が100%となる階も存在するが、A棟では「AVICS-2」の効果によって、同様の回答が最大でも20%と非常に少ないことが分かる。

次に、揺れの感じ方と、同図中に併記した居住性能評価指針³⁾の評価ランクとを比較する。まず、同指針におけるランク (H-2)とは、居住性能維持の観点から、クリアすることがより好ましいと判断される推奨値として位置付けられている。このランク 以内に相当する階は、A棟では27階から下の階、B棟では12階から下の階となる。ランク 以内に相当する階の回答は、両建物共、90%以上が

揺れを「感じない」あるいは揺れを「少し」感じるとなっている。よって、この結果は、上述の推奨値とほぼ同等の傾向を示していると考えられる。また、同様に、ランク (H-4)とは、可能な限りこの範囲を超えないよう努力すべき目標値として位置付けられている。このランク 以上に相当する階は、B棟の20階から上の階となる。ランク 以上に相当する階の回答では、とりわけ「不快」あるいは「不安」に感じるとする回答が顕著になっている。この結果は、上述の目標値とほぼ同等の傾向を示していると考えられる。

6. まとめ

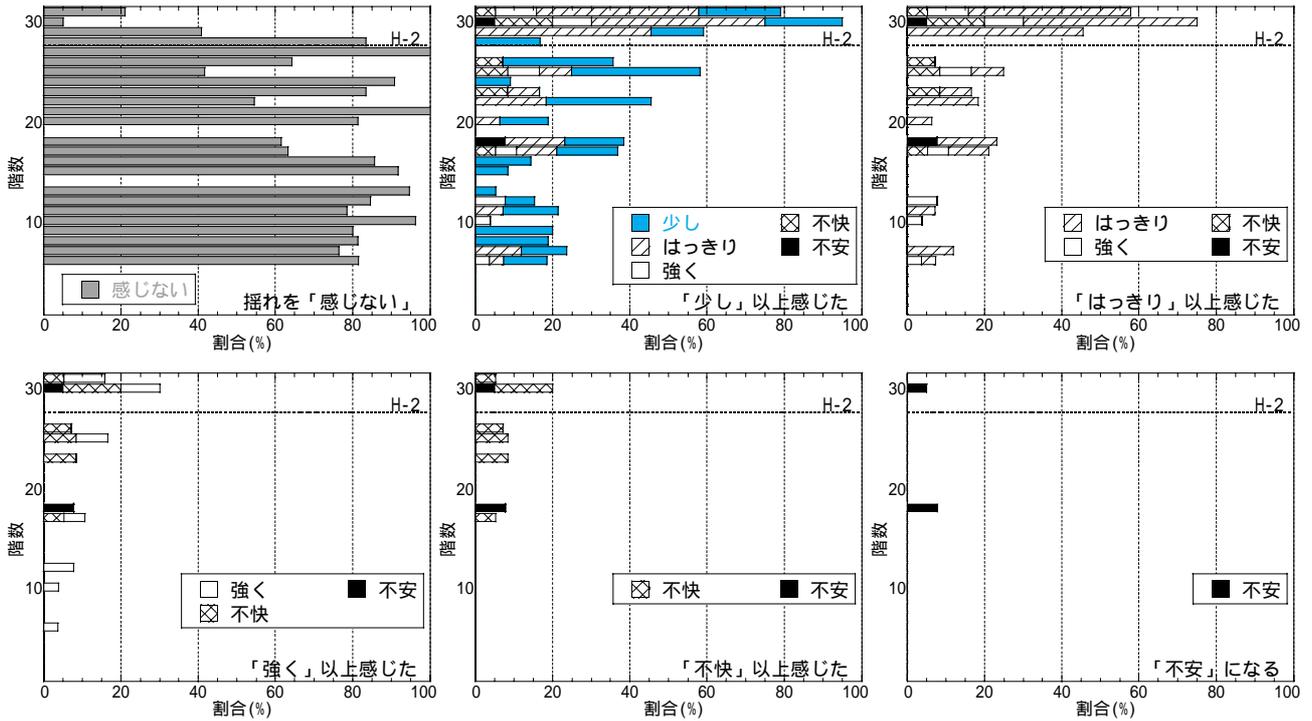
以上の結果をまとめると、以下の五点に集約される。

- 1) 遠方地震により東京の超高層建物が大きく揺れる現象は、鳥取県西部地震が特別な事例ではない。
- 2) 船酔い現象等を伴う長周期の揺れを抑制し居住性を向上させるためには、「AVICS-2」に代表される制振技術が不可欠である。
- 3) 「AVICS-2」の有効性は観測記録等を通じて既に確認されているが、当該地震においても当初の設置目的を十分満足する制振効果が得られた。
- 4) A棟とB棟を対象としたアンケート調査の結果から、人体感覚の上からも「AVICS-2」の有効性が確認された。
- 5) アンケート調査から得られた応答加速度と体感との関係を居住性能評価指針の体感レベル(ランク)と照合した結果、同指針の評価とほぼ同様の傾向となることがわかった。

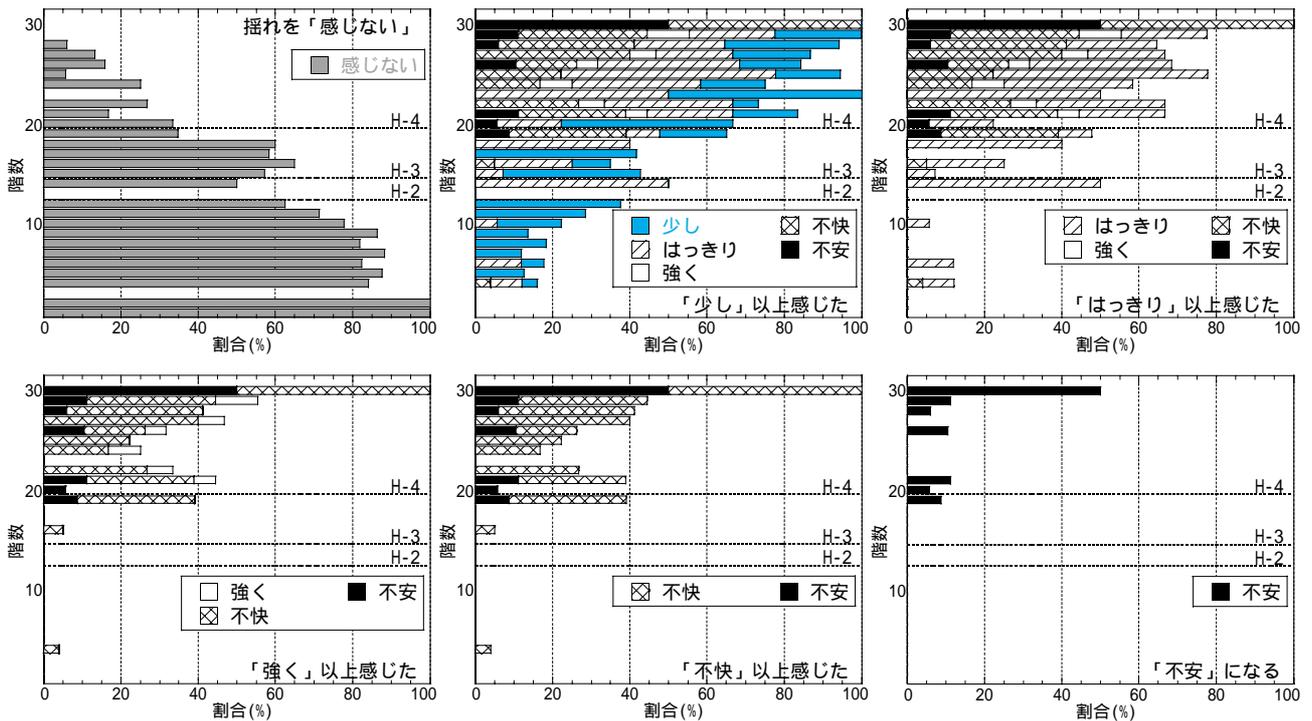
今後も、アンケート調査や観測装置による実データの収集を通じて、「AVICS-2」の有効性を高い確度で裏付けていく予定である。

謝辞

アンケート調査にご協力頂いた品川インターシティ A棟および同 B棟内の多くの執務者の方々に深く感謝致します。また、品川インターシティマネジメント(株)をはじめ、各社窓口部署の方々にはアンケート用紙の取りまとめをして頂きました。ここに記して謝意を表します。



(a) 「A棟」の結果



(b) 「B棟」の結果

Fig.11 揺れに対するアンケート調査結果
Result of Questionnaire Survey on Quake-induced Vibration

参考文献

- 1) 蔭山満, 奥田浩文, 稲葉学, 中村充, 小林秀雄: ハイブリッド型動吸振器の開発とその実機適用に関する研究(その1)~(その4), 日本建築学会学術講演梗概集 B-2 構造, pp.811 ~ 818, (2000.9)
- 2) 奥田浩文, 蔭山満: Hybrid MassDriver(HMD)の実用化に関する研究(その2), 大林組技術研究所報, No.62, pp.49 ~ 56, (2001.1)
- 3) 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, (1991.4)