T2R2 東京科学大学 リサーチリポジトリ
Science Tokyo Research Repository

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題	超弾性体三次元角柱の不安定振動挙動に関する実験的研究
著者	中川尚大, 丸山勇祐, 長尾悠生, 田村哲郎, 佐藤大樹, 河合英徳, 呉嘉瑞
出典	日本流体力学会年会2020, , , 252
発行日	2020, 9

Powered by T2R2 (Science Tokyo Research Repository)

超弾性体三次元角柱の不安定振動挙動に関する実験的研究

Experimental study on unstable oscillation of 3D hyper-elastic square cylinder

○ 中川　尚大，前田建設，茨城県取手市寺田 5270, E-mail: nakagawa.na@jcity.maeda.co.jp
丸山　勇祐，前田建設，茨城県取手市寺田 5270, E-mail: maruyama.y@jcity.maeda.co.jp
長尾　悠生，前田建設，茨城県取手市寺田 5270, E-mail: nagao.yu@jcity.maeda.co.jp
田村　哲郎，東工大，神奈川県横浜市緑区長津田町 4259, E-mail: tamura.t.ab@m.titech.ac.jp
佐藤　大樹，東工大，神奈川県横浜市緑区長津田町 4259, E-mail: sato.d.aa@m.titech.ac.jp
河合　英徳，東工大，神奈川県横浜市緑区長津田町 4259, E-mail: kawai.h.ac@m.titech.ac.jp
呉　嘉瑞，研究当時　東工大，神奈川県横浜市緑区長津田町 4259, E-mail:

Naohiro Nakagawa, Maeda Corpration, 5270, Terada, Toride-shi, Ibaraki
Yusuke Maruyama, Maeda Corpration, 5270, Terada, Toride-shi, Ibaraki
Yuki Nagao, Maeda Corpration, 5270, Terada, Toride-shi, Ibaraki
Tetsuro Tamura, Tokyo Institute of Technology, 4259 Nagatsuta-cho, Midori-ku, Yokohama, Kanagawa
Daiki Sato, Tokyo Institute of Technology, 4259 Nagatsuta-cho, Midori-ku, Yokohama, Kanagawa
Kawai Hidenori, Tokyo Institute of Technology, 4259 Nagatsuta-cho, Midori-ku, Yokohama, Kanagawa
Kazui Go, Tokyo Institute of Technology, 4259 Nagatsuta-cho, Midori-ku, Yokohama, Kanagawa

１．はじめに

将来の市街地においては，建築技術の発展に基づく構造形式の多様化に伴い，超々高層建築物や大空間建築物（ドームなど）のような大変形が可能な柔性構造物が求められる可能性がある。また，近年の気候変動により，さらに強度を増した台風が日本列島に襲来する可能性があり，極めて高風速の強風に対して壊れない構造物を提案し，都市や建築物の強風防災を実現していく必要がある。超弾性体を利用した大変形が可能な柔性構造物は，変形によるエネルギー吸収が期待され，強風が収束した後には原型への完全復帰が可能であることから，巨大台風に対する構造破壊を避けることで防災 BCP への有効利用や，重要インフラ（通信・送電鉄塔）にも活用できると考えられる。建築分野での耐風設計の検討は，これまで剛な建物モデルを用いて風洞実験や数値流体解析により得られた荷重に基づき行われてきたが，今後は，大変形までを扱える風洞実験や数値流体解析手法の確立が必要である。

本研究では，超々高層建築物や大空間建築物，送電鉄塔などの超弾性体となり得る構造物の耐風設計方法の確立を目的として，風洞実験及び数値流体解析にて研究を行なっている。本論文では，その基礎研究として超弾性体建築物としてスポンジ模型を用いた 3 次元角柱での振動実験を行ない，超弾性体の振動挙動を計測した結果を報告する。

２．風洞実験の概要

本実験では，スポンジ模型の振動特性を把握する自由振動実験と，空力特性を把握するための空力振動実験を行なった。

２．１　風洞装置の概要及び計測方法について

実験は前田建設工業(株)ICI 総合センター所有のエッフェル型吹出式境界層風洞で行なった。測定断面は幅 3m×高さ 2m，風路は 25m である。

本実験では，一様流での実験を行なうので，測定部分に幅 1.8m ×奥行 2.0m の端板を床から約 0.3m の高さに設置した。実験模型の風方向および風直交方向振動は，実験模型の側面および風下面から約 0.6m 離れた位置に設置したレーザー変位計により計測した。実験模型は曲げ形に近い形で変形するので，レーザー変位

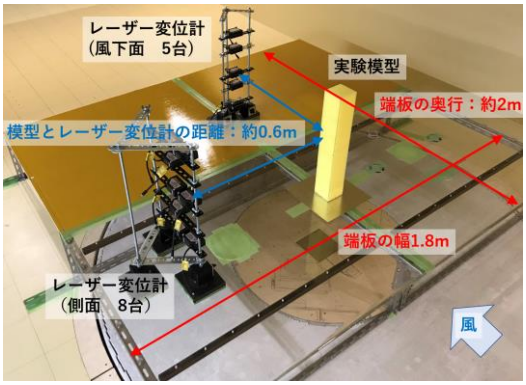
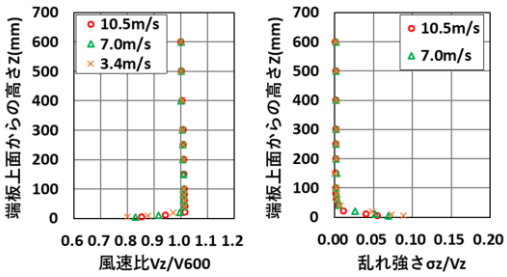
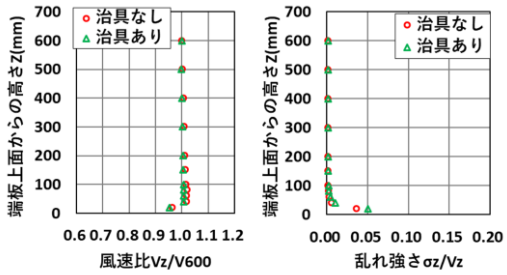


Fig.1 計測機器の設置状況



a）風速依存性の確認



b）治具の有無による影響

Fig.2 実験気流

計を高さ方向に複数台設置し，変形の性状を計測できるようにした。また，風速が上がると模型が風下側に倒れていくことから，レーザー変位計の位置を随時変更できるように設置治具を工夫した。計測機器の設置状況を Fig.1 に示す。なお，設置用治具による実験気流への影響を小さくするために細い部材を用いたが，この設置治具が風により揺れないことを事前に確認した。

２．２　実験気流について

本実験では，風洞床に端板を設置し，一様流を再現した。端板の先端を曲面にすることで先端での流れの剥離が起こらないように工夫した。模型設置位置での平均近風速及び乱れ強さの鉛直分布を確認した結果を Fig.2 a)に示す。平均風速及び乱れ強さともに，一様流の状態を作成できていることがわかる。端板上端から 20mm 以下では分布ができているが，実験模型の高さは 480mm なのでその影響はほとんどないと考える。また，風速 3 段階について計測を行なったが，いずれも同等の結果となっており，風速依存性については確認されなかった。

端板上にレーザー変位計と設置治具を設置したので，これらによる気流分布への影響を確認した。その結果も Fig.2 b)に示しており，レーザー変位計と設置治具の影響はほとんどないと考えられる。

２．３　実験模型と測定点について

実験模型は，超弾性体構造物に近い変形となる材料として，軟質ウレタンフォームおよび硬質ウレタンフォームにて製作した。実験模型の形状は超高層建築物を想定し，アスペクト比 6 の四角柱とした。その大きさは幅 B80mm×奥行 D80×高さ H480mm である。実験模型は曲げモードに近い形で変形すると予想されたので，レーザー変位計を高さ方向に複数台設置した。また，捩れ振動が起こることも推測されたので，側面には 2 列レーザー変位計を設置した。測定点の配置を Fig.3 に示す。側面に 8 箇所，背面に 5 箇所の計 13 箇所に配置した。

３．自由振動実験

３．１　目的および実験方法

自由振動実験は各実験模型の固有振動数・減衰定数を把握し，その振動特性の違いを確認するために実施した。実験は，初期変位を与えた後に瞬時に開放することで自由振動を与え，その挙動を模型幅の中央をターゲットとしている No9～No13 のレーザー変位計で計測した。サンプリングは 1000Hz で行ない、200Hz のローパスフィルターを通した。

３．２　自由振動実験結果

各模型の時刻歴波形を Fig.4 に示す。各測定点位置での最大値は同時に発生していることが確認できた。

各模型の時刻歴波形から式（1），式（2）により固有周期 T および減衰定数 h を算出した。ここでは，振幅依存性が懸念されたことから，振幅ごとの固有周期および減衰定数の変化を確認した。振幅と固有周期の関係を Fig.5，振幅と減衰定数の関係を Fig.6 に示す。

1 次振動モードの固有振動数は，自由振動時の振幅によらずほぼ一定となっていることから，振幅の影響をほとんど受けないことが確認できた。一方，減衰定数は振幅の影響が大きく，振幅依存性があると考えられる。振幅が 20mm 以下の場合，バラツキが生じて減衰を評価するのが難しいが，Fig.6 より全体のバランスを考慮して，軟質ウレタンフォームでは 8.5%，硬質ウレタンフォームでは 10%として減衰定数を評価した。

$$T = t_{i+1} - t_i \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (1)$$

t_i　：各周期における最大変位が発生する時刻。

$$h \approx \ln\left(\frac{y_i}{y_{i+n}}\right) \Big/ (2\pi \cdot n) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (2)$$

y_i　：時刻 t_i における振幅。
y_{i+n}　：時刻 t_{i+n} における振幅。
n　：周期の個数（本報では $n=1$ とする）。

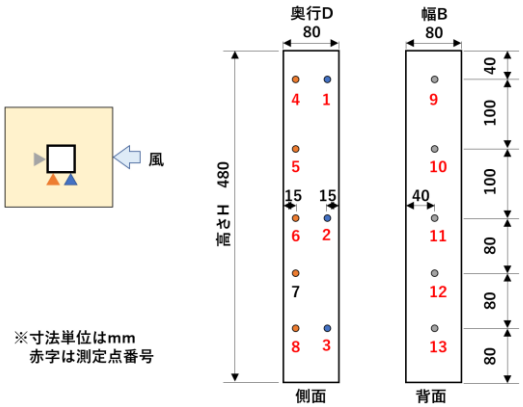


Fig. 3　実験模型および測定点位置

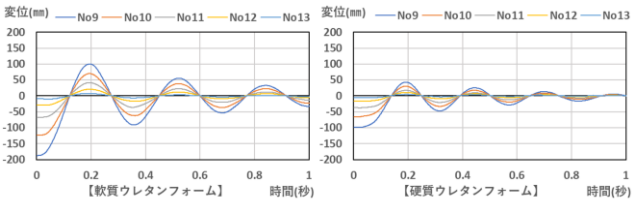


Fig. 4　各模型の時刻歴波形

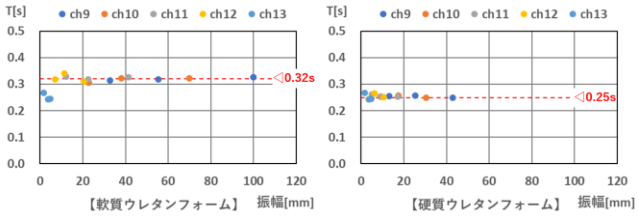


Fig. 5　振幅と固有周期の関係

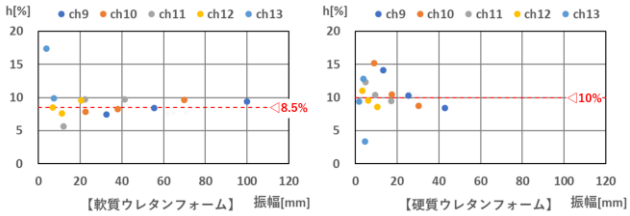


Fig. 6　振幅と減衰の関係

３．３　質量減衰パラメータ

風の応答を評価する上での指標となる質量減衰パラメータ δ の算出結果を Table.1 に示す。なお，本実験で用いた模型は弾性模型で曲げモードになると推測されるが，ここでは仮にロッキングモードとして質量減衰パラメータを算出した。

軟質ウレタンフォームと硬質ウレタンフォームでは密度(質量)が大きく異なるため，質量減衰パラメータ δ が大きく異なる。一般的な高層建築物は δ＝0.5～1.0 程度となるので，軟質ウレタンフォームの δ はやや小さく，硬質ウレタンフォームの δ はやや大きい値である。また，剛体のロッキング振動で行なう振動実験とは模型密度（質量比）や減衰定数が大きく異なるので，空力振動による応答の性状，現象が異なったものになる可能性がある。

４．空力振動実験

４．１　目的および実験方法

空力振動実験は風速を徐々に上昇させ，風方向および風直交方向の振動変位の計測を行なった。サンプリング周波数は自由振動実験と同様に 1000Hz とし，200Hz のローパスフィルターを通した。サンプル数は 1 波を 8192 個とし，5 回のアンサンブル平均ができるように 5 波分の 40960 個の計測を行なった。風速の上昇に伴い風下側に模型が変形するので，それに合わせて側面のレーザー変位計の位置を随時移動させた。

４．２　空力振動実験結果

各模型の風速応答曲線を Fig.7 に示す。変位は標準偏差 σ_{rms} を模型高さ H で基準化した変位 σ_{rms}/H，風速については固有振動数 n と幅 B で基準化した風速 V/nB として示した。

軟質ウレタンフォームでは V/nB＝10 付近で，硬質ウレタンフォームでは V/nB＝12 付近でピークを迎える。軟質ウレタンフォームの方が質量減衰パラメータが小さく，かつ剛性が低いことから応答変位が大きくなる。

４．３　既往文献との比較

弾性模型での空力振動実験は研究例が少ないので，本論文では剛模型を用いたロッキング振動による空力振動実験結果と比較することとした。

佐藤氏により報告された実験結果[1]と比較する。この論文では，バルサ模型を用いたロッキング振動の実験を行ない，質量減衰パラメータが異なる場合の風速応答曲線が報告されている。模型の大きさは異なるが，アスペクト比は本実験と同じである。佐藤氏による風速応答曲線に本実験結果（No1）を重ね書きした結果を Fig.8 に示す。軟質ウレタンフォームの風速応答曲線は，佐藤氏の実験より質量減衰パラメータが小さいことから，応答変位が大きく出ている。また，V/nB＝10 付近でピークを迎える傾向は同様であるが，参考文献（1）では V/nB＝10 以降の応答は急激に小さくなるのに対し，軟質ウレタンフォームでは緩やかに応答が小さくなっている。質量比や減衰が大きく異なっていることが要因として考えられ，弾性模型特有の現象が現れている可能性がある。硬質ウレタンフォームの風速応答曲線は，同程度の質量減衰パラメータ（δ＝1.60）と比較すると応答変位がかなり大きく，δ＝0.80 と同程度の値を示す。また，ピークの風速がやや高風速側となる。ピーク後の応答の変化は，軟質ウレタンフォームほどではないが，緩やかに応答が下がっていることがわかる。

天野氏により報告された Fig.9 に示す風速応答曲線[2]では，アスペクト比 5 での実験結果ではあるが，δ＝0.5 以下の場合にギャロッピングが発生することが報告されている。本実験の軟質ウレタンフォームは δ＝0.37 なのでギャロッピングの条件に該当しているが，そのような応答は確認されなかった。これは，振動が大きくなると模型の変形が大きくなり，高さ方向に一様な渦が形成されなくなったためであると推測される。

模型	質量 (g)	密度 (kg/m³)	固有周期 (s)	減衰 (%)	質量減衰パラメータ
軟質ウレタンフォーム	48.5	15.8	0.32	8.5	0.37
硬質ウレタンフォーム	150.8	49.1	0.25	10	1.34

Table.1　実験模型の物性

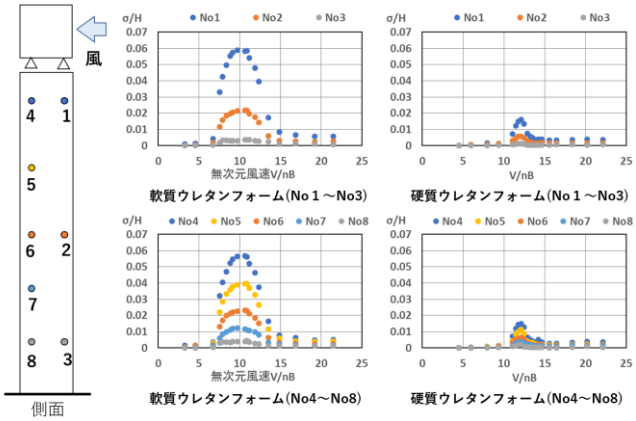


Fig. 7　風速応答曲線

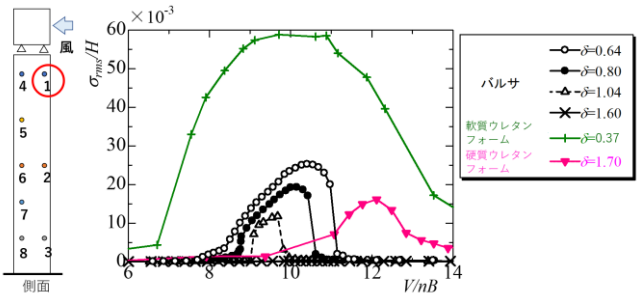


Fig. 8　参考文献（1）の風速応答曲線と本実験結果の比較

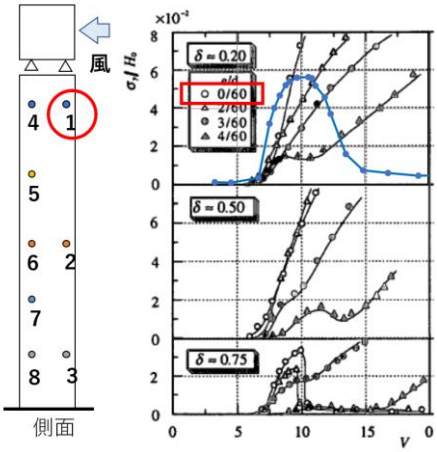


Fig. 9　参考文献（2）の風速応答曲線と本実験結果の比較

５．まとめ

本論文では，超弾性体建築物としてスポンジ模型を用いた 3 次元角柱で自由振動実験及び一様流での空力振動実験を行ない，超弾性体の振動挙動について計測結果を報告した。

⑴ 模型の材料は軟質および硬質ウレタンフォームとし，実験模型は超高層建築物を想定したアスペクト比 6 の四角柱とした。
⑵ 自由振動実験の結果より，これらの模型の減衰定数は 10%程度の大きい値となるが，質量比が小さいため，質量減衰パラメータとしては一般的な高層建築物に近い値となる。
⑶ 空力振動実験の結果より，風速 V/nB＝10～12 で応答のピークが確認された。ロッキングによる空力振動実験の場合には，ピークとなる風速 V/nB＝10 以降で応答は急激に小さくなるが，超弾性模型の場合には緩やかに応答が小さくなっていくことが確認された。
⑷ 軟質ウレタンフォームの模型は質量減衰パラメータ δ が 0.32 で，参考文献（2）のギャロッピングの条件に該当するが，本実験結果ではギャロッピングに相当する応答は確認されなかった。

超弾性模型での振動実験を実施した結果，剛模型でのロッキング振動実験とは異なる現象が確認された。これは振動モードや質量減衰パラメータ（減衰定数，質量比）などの違いによると思われる。今後，パラメータの異なる超弾性模型について実験を行ない，超弾性構造物の振動挙動を明らかにする。

参考文献

(1) 佐藤大樹，笠井和彦，田村哲郎，"高層建物の制振を対象とした風洞実験装置の開発および風応答に関する基礎的研究―粘性・粘弾性ダンパーを有する高層建築物の一様流中における風洞実験― "，日本建築学会構造系論文集 第 609 号，pp.65-73，2006.
(2) 天野輝久，“一様流中における三次元正四角柱の渦励振およびギャロッピングに及ぼす隅欠き・隅切りの効果,” 日本建築学会構造系論文集第 478 号, pp.63-69, 1995.