T2R2 東京工業大学リサーチリポジトリ
Tokyo Tech Research Repository

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	風洞実験を踏まえた超弾性三次元角柱の振動特性の把握のための基礎的検討 その 1 自由振動実験および風洞実験結果の再評価
Title(English)	Basic study to obtain the vibration characteristics of 3D hyperelastic square cylinder based on the wind tunnel test Part1 Free vibration test and revaluation of the result of wind tunnel test
著者(和文)	山口雄大, 佐藤大樹, 中川尚大, 丸山勇祐, 田村哲郎
Authors(English)	Yudai Yamaguchi, Daiki Sato, Naohiro Nakagawa, Yusuke Maruyama, Tetsuro Tamura
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, Ⅰ, , pp. 293-296
Citation(English)	, Ⅰ, , pp. 293-296
発行日 / Pub. date	2021, 3

Powered by T2R2 (Tokyo Institute Research Repository)

2020年度日本建築学会
関東支部研究報告集Ⅰ
2021年3月

風洞実験を踏まえた超弾性三次元角柱の振動特性の把握のための基礎的検討

その１　自由振動実験および風洞実験結果の再評価

構造ー振動

正会員 ○ 山口雄大*1　　正会員　佐藤大樹*2
〃　中川尚大*3　　〃　丸山勇祐*3
〃　田村哲郎*4

超弾性体　自由振動実験　固有振動数
減衰定数　質量減衰パラメータ

1.　緒言

超高層建物を想定した空力振動実験では，ロッキング振動模型を用いた手法が古くから用いられており，河井ら[1)]や天野[2)]をはじめとした多くの研究者により実施されてきた．また，数質点の弾性模型を用いた空力振動実験例も存在し，ロッキング振動模型では分からない高次モードの影響や曲げと捩れの相互作用による影響などが調べられている[3)-5)]．一方で，現在，400m 弱の高さとなる超々高層タワーの建設が予定されているなど[6)]，大都市では構造物のさらなる超高層化が進められている．この傾向が今後も続くと，将来的には，超々高層の構造物を，大変形を許容し得るような柔性構造物として検討するような場面が出てくることも想定される．その場合，従来の手法ではなく，大変形まで扱うことができる連続体の振動モデルを用いた新たな空力振動特性の評価手法が必要となることが考えられる．

このような背景から，本研究では，超弾性三次元角柱を用いた空力振動実験とその応答評価に取り組んでおり，ウレタンフォームで作成した正四角柱模型の風洞実験に関して報告している[7)]．超弾性角柱は，従来の実験モデルとは特徴が異なることから，空力振動実験の評価をより適切に行うためには，超弾性材料の性質や連続体としての振動特性をより詳細に調べていく必要がある．本報では，その第一段階として，自由振動実験と連続体振動理論，弾性 FEM 解析から，文献 7)で用いられている超弾性角柱の固有振動数や減衰定数の分析を試みる．本報その 1 では，自由振動実験とその結果に基づく文献 7)の風洞実験結果の再評価に関して，本報その 2 では連続体振動理論と FEM を用いた固有値解析についてそれぞれ報告する．

2.　自由振動実験

本章では，超弾性三次元角柱の自由振動実験の詳細と，自由振動波形を用いた曲げ振動の固有振動数と減衰定数の評価について述べる．なお，本報その 1 では捩れ振動は扱わないため，以降，曲げ振動という言葉を省略し，単に固有振動数，減衰定数と表現する．

2.1　実験模型の概要

本報で扱う 2 つの実験模型の諸元を Table1 に示す．模型は，文献 7)と同じものである．本報では，軟質ウレタンフォームの模型を 116Y，硬質ウレタンフォームの模型を 116B と呼んで区別することにする．なお，表中の固有振動数 f_1，減衰定数 h_1，質量減衰パラメータ δ[8)]は文献 7)で用いられている値で，空力振動実験の前に実施した自由振動実験（以降，事前実験）の結果から決定されたものである．詳細は文献 7)を参照されたい．

Fig.1 に模型と装置の概略図を示す．模型は連続体の振動挙動を示すことから，図に示すように複数の測定点を設けている．なお，事前実験では，x 方向に自由振動させて見附面の 5 点の測定点（図中の Ch.09～Ch.13）で応答を測定しているが，本実験では y 方向に自由振動させ，奥行面の 8 点の測定点（図中の Ch.01～Ch.08）で自由振動波形を測定する．さらに，今回は面外変形の確認のため，Ch.09～Ch.13 の測定点にもレーザ変位計を設置し，x 方向の変位の測定も行う．また，模型の底部はアルミ板に接着することで固定端とし，そのアルミ板をさらに厚さ 4 mm の合板に接着することで剛な基礎を作成した．実験は，基礎の合板の四辺を強力なテープで台に固定し，模型に大振幅を与えても台が動かず，基礎の浮き上がりも発生しないことを確認してから実施した．

2.2　実験手順

事前実験では，減衰定数のばらつきが確認されている．今回はそれを踏まえた検討のため，実験のサンプル数を大幅に増やすこととした．事前実験では，各模型で 1 回ずつの自由振動実験結果から評価を行っていたが，今回は各模型で 80 回ずつ自由振動実験を実施し，80 波分のデータを用いて固有振動数と減衰定数を評価する．なお，

Basic study to obtain the vibration characteristics of 3D hyper-elastic square cylinder based on the wind tunnel test
Part1 Free vibration test and revaluation of the result of wind tunnel test

YAMAGUCHI Yudai, SATO Daiki, NAKAGAWA Naohiro, MARUYAMA Yusuke, TAMURA Tetsuro

模型の自由振動は，模型を指で弾くことで与える．測定変位のサンプリング周波数は 1000 Hz とし，自由振動が消滅するまで測定を行う．

2.3　固有振動数と減衰定数の算出方法

Fig.2 に，本実験で実際に得られた波形の一例を示す．Fig.2(a)は自由振動開始直後の Ch.01 から Ch.03 における測定結果で，ほぼ 1 次モードのみの波形となっている．この自由振動波形における時刻 t_i でのピーク値を y_i，その一周期後の時刻 t_{i+1} でのピーク値を y_{i+1} とするとき，次式(1)，(2)で計算される値を，それぞれ 1 次の固有振動数 f_1 と減衰定数 h_1 の実験値として評価する．

$$f_1 = t_{i+1} - t_i \,, \quad h_1 \approx \ln\left(\frac{y_i}{y_{i+1}}\right) \Big/ 2\pi \qquad (1),\ (2)$$

Fig.2(b)は，Fig.2 (a)の時間経過後の波形で，黄色の実線は自由振動方向と直交する Ch.09 の応答を表している．この図から，自由振幅がある程度まで減衰すると，面外応答が自由振動応答に影響を及ぼしていることが確認できる．これを考慮し，本実験では 1.5 mm の下限値を設けたうえで自由振動波形のピークを読み取ることとした．

2.4　実験結果から得られた固有振動数と減衰定数

Fig.3 に，Ch.01 から Ch.08 の各測定点で測定された 80 波分の自由振動波形から得られた固有振動数と減衰定数の値を，波形のピーク値（式(2)における y_i）の大きさごとにプロットした図を示す．Fig.3(b)から，116Y，116B ともに，特に振幅が小さい範囲で減衰定数の値のばらつきが非常に大きいことが見て取れ，この傾向は事前実験と一致する．なお，事前実験では，全体のばらつきの傾向からおおよその固有振動数と減衰定数の値を一意に評価していたが，本実験では詳細に傾向を評価するため，116Y と 116B のそれぞれで振幅の区分を設けて統計処理を実施した．Table2 は，その結果をまとめたものである．116Y と 116B の各表の左側に示す振幅区分は，文献 7)の空力振動実験の結果を基に設定したものである．なお，表中の赤色で示す部分は，風速と風直交方向応答の関係図におけるピークの値，すなわち，模型の風直交方向の振動（Ch.01 と Ch.04 の応答変位）が最も大きくなった風速下（以降，共振風速）で観測された時刻歴応答の標準偏差の値が含まれる区分であることを示す．一方で，黄色で示す部分は，前述の標準偏差の値にピークファクタを乗じた値，すなわち，空力振動実験時の応答の最大値が含まれる区分であることを示す．また，表中の Avg.の値は，振幅区分ごとの固有振動数と減衰定数のアンサンブル平均値であり，Fig.3 の図中にも水色の実線で示している．また，表中の C.V.は，各振幅区分におけるプロットの標準偏差を平均値で除すことで求めた変動係数であり，平均値からのプロットのばらつきの程度を定量的に評価した値である．以下，Fig.3 と Table2 を用いて結果の考察を行う．

Table1 Specifications of the experimental models

Name of model	116Y	116B
Material	Soft Urethane	Hard Urethane
Breadth B [m]	0.08	0.08
Depth D [m]	0.08	0.08
Height H [m]	0.48	0.48
Density ρ [kg/m^3]	15.8	49.1
Natural frequency f_1 [Hz]*	3.4	4.0
Damping ratio h_1*	0.085	0.100
Mass-damping parameter δ**	0.37	1.34

*Values based on the free vibration tests in Reference 7)
**Values based on the assumption of locking mode

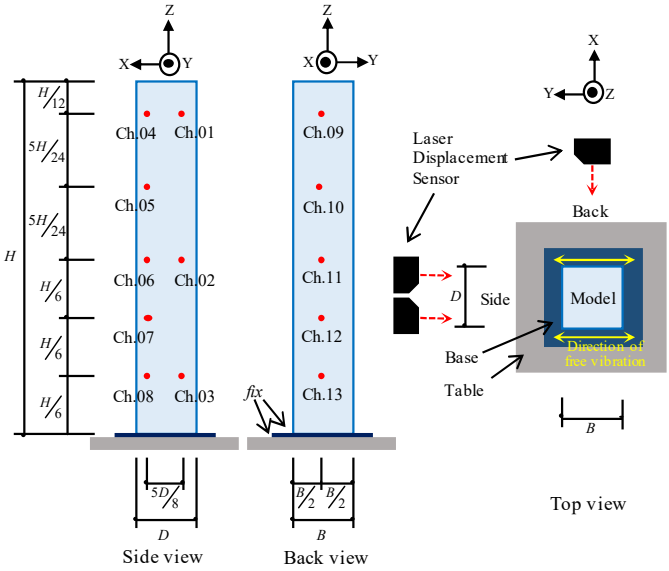
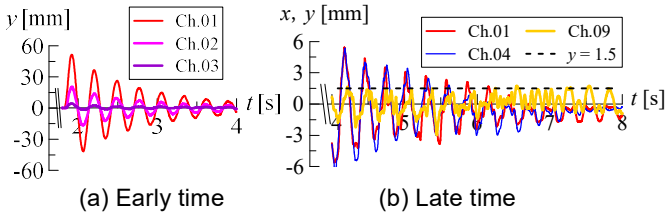


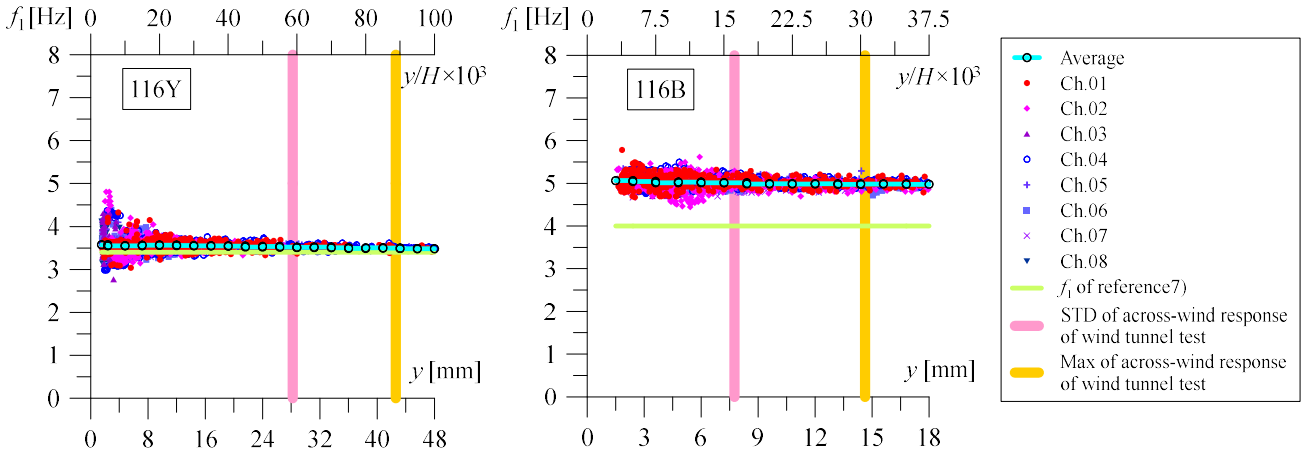
Fig.1 Experimental apparatus



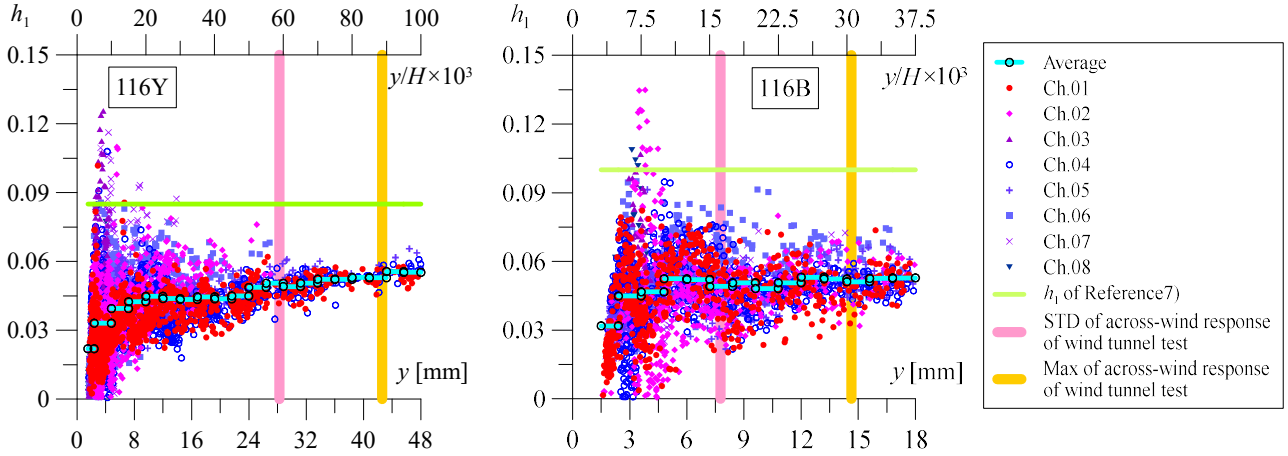
(a) Early time　　(b) Late time

Fig.2 Free vibration waveform of 116Y

まず，固有振動数に着目する．116Y と 116B ともに，振幅が大きい領域では小さい領域に比べて固有振動数の平均値が僅かに低く，小さな軟化型非線形の傾向が現れていることが確認できる．また，Fig.3 からは，振幅が小さい範囲で固有振動数のプロットがややばらついているのが見て取れるが，変動係数は最大でも 5 %程度となっており，数値で見るとほぼばらつきはないと言える．また，Table1 や Fig.3(a)に緑色の実線で示すように，事前実験での固有振動数の評価値は，116Y が 3.4Hz，116B が 4.0 Hz であるが，本実験では，どちらの模型においても全ての振幅区分で事前実験よりも大きな値となっている．特に 116B では，事前実験と約 1.0 Hz の差が生じている．そこで，空力振動実験時の振動数応答との比較を行ってみる．



(a) Natural frequency



(b) Damping ratio

Fig.3 Plots of natural frequency and damping ratio derived from free vibration wave

Table2 Summary of statistical results for each amplitude range

116Y						**116B**					
y [mm]	f_1		h_1		δ	y [mm]	f_1		h_1		δ
	Avg.[Hz]	C.V.	Avg.	C.V.			Avg.[Hz]	C.V.	Avg.	C.V.	
$y < 2.4$	3.57	5.46%	0.022	75.92%	0.071	$y < 2.4$	5.06	2.34%	0.032	39.86%	0.319
$2.4 \leqq y < 4.8$	3.55	4.77%	0.033	59.46%	0.106	$2.4 \leqq y < 3.6$	5.04	2.51%	0.045	44.50%	0.450
$4.8 \leqq y < 7.2$	3.55	3.94%	0.039	36.08%	0.127	$3.6 \leqq y < 4.8$	5.01	2.91%	0.047	41.75%	0.468
$7.2 \leqq y < 9.6$	3.56	3.33%	0.042	28.69%	0.136	$4.8 \leqq y < 6.0$	5.03	3.47%	0.052	28.15%	0.525
$9.6 \leqq y < 12.0$	3.57	3.01%	0.045	24.31%	0.144	$6.0 \leqq y < 7.2$	5.01	2.20%	0.052	22.59%	0.522
$12.0 \leqq y < 14.4$	3.56	2.40%	0.044	26.20%	0.141	$7.2 \leqq y < 8.4$	5.01	2.03%	0.049	26.15%	0.491
$14.4 \leqq y < 16.8$	3.55	2.07%	0.043	18.66%	0.140	$8.4 \leqq y < 9.6$	4.99	1.98%	0.051	22.66%	0.508
$16.8 \leqq y < 19.2$	3.55	2.03%	0.045	17.03%	0.143	$9.6 \leqq y < 10.8$	4.99	1.53%	0.048	22.21%	0.482
$19.2 \leqq y < 21.6$	3.54	1.66%	0.044	18.98%	0.140	$10.8 \leqq y < 12.0$	4.99	1.78%	0.051	16.97%	0.508
$21.6 \leqq y < 24.0$	3.52	1.80%	0.045	11.73%	0.144	$12.0 \leqq y < 13.2$	4.99	1.72%	0.053	15.89%	0.532
$24.0 \leqq y < 26.4$	3.53	1.97%	0.049	14.09%	0.157	$13.2 \leqq y < 14.4$	4.97	1.51%	0.052	17.48%	0.525
$26.4 \leqq y < 28.8$	3.52	1.70%	0.051	13.41%	0.162	$14.4 \leqq y < 15.6$	4.99	1.76%	0.051	14.72%	0.512
$28.8 \leqq y < 31.2$	3.51	1.31%	0.049	8.18%	0.158	$15.6 \leqq y < 16.8$	4.99	1.41%	0.053	14.09%	0.527
$31.2 \leqq y < 33.6$	3.52	1.43%	0.051	8.12%	0.163	$16.8 \leqq y < 18.0$	4.98	1.47%	0.053	9.35%	0.529
$33.6 \leqq y < 36.0$	3.51	1.12%	0.052	7.03%	0.168						
$36.0 \leqq y < 38.4$	3.49	1.10%	0.052	6.97%	0.168						
$38.4 \leqq y < 40.8$	3.50	1.05%	0.053	2.73%	0.171						
$40.8 \leqq y < 43.2$	3.50	1.41%	0.053	6.15%	0.170						
$43.2 \leqq y < 45.6$	3.49	0.84%	0.056	4.75%	0.179						
$40.8 \leqq y < 43.2$	3.48	0.91%	0.055	7.38%	0.178						

*Red letter indicate that is the zone including the maximum value of standard deviation of wind tunnel test.

*Orange letter indicate that is the zone including the maximum amplitude (= Standard deviation × Peak factor) of the wind tunnel test.

*Values of δ are derived from assumption of 1st bending mode.

Fig.4 に，空力振動実験から得られた各模型の共振風速下での風直交方向（Ch.01 と Ch.04）の応答のパワースペクトル密度（PSD）を示す．116Y の場合，PSD から得られるピーク振動数が 3.54 Hz であるのに対し，Table2 の赤字の区分（共振風速下での応答振幅の標準偏差が含まれる区分）における固有振動数の平均値は 3.52 Hz であり，事前実験での評価値 3.4 Hz と比較した場合よりも差が小さい．116B も同様に，PSD のピークが 4.88 Hz であるのに対し，Table2 から得られる平均値は 5.01 Hz となっており，事前実験の評価値 4.0 Hz と比較した場合よりも差が小さいことが分かる．よって，本実験は，事前実験よりも精度よく固有振動数を評価できていると考えられる．

次に，減衰定数に着目する．減衰定数はばらつきが大きく，116Y では変動係数が最大で約 76 %となっている．この原因としては，波形のピークが面外変形やノイズの影響を受けて変動したことなどが考えられるが，明確な理由は不明である．振幅区分ごとに求めた平均値に着目すると，116Y，116B ともに，振幅の増加に伴って減衰定数が大きくなる傾向が確認でき，これは超弾性材料の特性に起因しているものと推察される．また，事前実験での減衰定数の評価値は，116Y が 0.085，116B が 0.100 であるのに対し，本実験で求めた平均値は，どちらの模型も事前実験の半分程度の値となっている．この原因として，評価に用いた波形のピーク振幅の違いが考えられる．文献 7) より，事前実験で減衰定数の算出を行った際に用いた波形のピーク振幅は，116Y が最大で約 100mm，116B が最大で約 40mm で，本実験の約 2 倍であることが分かる．前述した減衰定数の振幅依存の傾向を踏まえると，このことが事前実験で得られた減衰定数の値が本実験より大きいことの要因の 1 つと考えられる．

2.5 質量減衰パラメータを用いた評価

Table2 に示す δ の値は，本実験の減衰定数の評価値と，本報その 2 で示す曲げ 1 次モードの理論式を用いて振幅区分ごとに算出した質量減衰パラメータである．また，Fig.5 に，風速と応答（Ch.01 と Ch.04 の応答の標準偏差）の関係と，風速ごとの δ の変動を表した図を示す．緑色の点線が Table2 に基づく δ で，橙色の破線が事前実験での δ である．なお，グラフの横軸 V_r は，実験風速を見附幅 B と固有振動数 f_1（Table2 の赤字の値を採用した）で除した無次元風速を表す．本実験の評価では，風速応答の増加に伴って δ の値も増加し，116Y では約 0.07～0.18，116B では約 0.32～0.53 の範囲で δ が変動する結果となった．なお，本報で得られた δ の値の範囲は，既往のロッキング振動模型と比べてやや小さいか同程度であると言える [2),9)]．そこで，比較のため，Fig.5 の 116B の図中にロッキング振動模型を用いた佐藤らの実験結果 [9)] を示した．佐藤らの模型のアスペクト比は本実験と同じ 6 であり，δ の値は，黒色のプロットのものが 116B の共振風速時の δ の評価値 0.491 よりやや大きい 0.64 で，茶色のプロットのものが 0.88 である．これらを比較すると，共振風速はほぼ一致しているが，116B のピーク振幅は，δ が 2 倍近く大きいロッキング振動模型と同程度の大きさであることが分かる．この差異は，超弾性体の δ の値の内訳，すなわち密度と減衰定数の大きさの比率が従来の模型と大きく異なることが起因しているものと考えられる．この結果を踏まえつつ，今後は，超弾性角柱の空力振動特性の評価手法とその妥当性について慎重に検討していく．

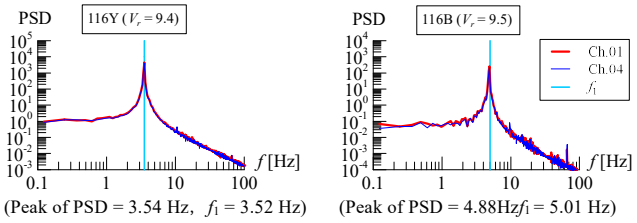


Fig.4 Power spectral density of across-wind response under resonant wind speed

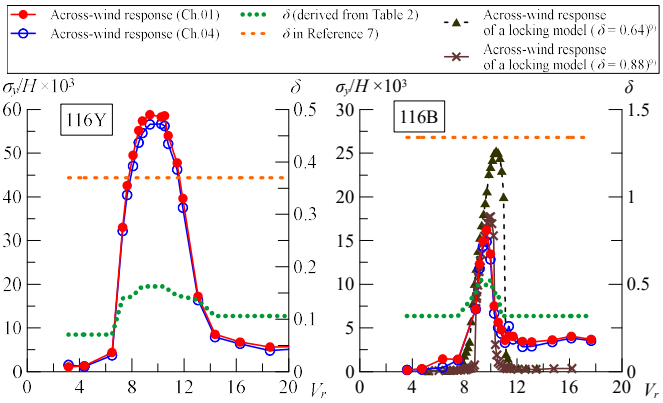


Fig.5 Across-wind response and value of δ

3. 結言

本報その 1 では，2 種類の超弾性三次元角柱模型の自由振動実験を行い，振幅区分を設けて固有振動数と減衰定数を評価した．その結果，固有振動数は僅かな軟化型非線形性を含んでいたが概ね一定で，空力振動実験と整合性の取れる評価値が得られた．減衰定数は大きなばらつきを有する結果となり，振幅依存の傾向も確認された．また，減衰定数の評価値と曲げ振動モードから質量減衰パラメータを導出して既往のロッキング振動模型の風洞実験結果との比較を行い，評価の妥当性について検証した．

（謝辞および参考文献は，その 2 にまとめて示す．）

*1 東京工業大学 環境・社会理工学院 大学院生
Graduate Student, School of Environment and Society, Tokyo Institute of Technology*1
*2 東京工業大学 未来産業技術研究所 准教授・博士（工学）
Associate Prof., FIRST, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng. *2
*3 前田建設工業（株） ICI 総合センター
ICI Center, Maeda Corporation*3
*4 東京工業大学 工博
Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.*4