東海大学紀要工学部
Vol.48, No.1, 2008, pp.101-108

修復されたコンクリート造円筒殻の振動特性と耐力およびひび割れ形態との相関関係

真下　和彦[*1]　川崎　健二郎[*2]　田中　正史[*3]

Interrelations between Vibratory Characteristics and Both Strength and Cracking Pattern of Retrofitted Concrete Cylindrical Shells

by

Kazuhiko MASHITA [*1], Kenjiro KAWASAKI [*2] and Masafumi TANAKA [*3]

(Received on March. 19, 2008 and accepted on July. 9, 2008)

Abstract

The main purpose of this study is to investigate, mainly experimentally, the interrelations between the vibratory characteristics and both strength and cracking pattern of retrofitted concrete cylindrical shells, three kinds of reinforcement of which were steel wires, mixed-in carbon fiber chips and mixed-in vinylon fiber chips. Three kinds of retrofits to the damaged shells were adopted in this paper. These are precut retrofit, filler retrofit and sheeting retrofit. The precut retrofit was defined as the method worked to cut the region adjacent to the damaged boundary to be smoothed in order to avoid the stress concentration. The filler retrofit was defined as the method made by filling the region with the non-contracted mortar after applying by the precut retrofit. The sheeting retrofit was defined as the method worked on the surface of the region covered with the carbon fiber sheets after applying by the filler retrofit. Before and after the loading experiment by one-point concentrated load, vibratory tests by an impact hammer and an oscillatory machine were conducted. Vibratory tests were applied on two kinds of boundaries, which were free body and pin-support. The concrete was artificially damaged before it was evaluated by a loading experiment and the retrofit applied to the damaged shells was realized by the three kinds of retrofitting methods described above. In the loading experimental study, a static point load was applied perpendicularly onto the retrofitted cylindrical shell specimens until the cracking pattern was obtained by applying the maximum force. The interrelations between vibratory characteristics distilled from retrofitted model before and after the loading experiment were derived. The strength and vibratory characteristics of the retrofitted concrete shells are discussed on the basis of the results of the experiment with the before and after vibratory tests.

Keywords: Concrete Shell, Carbon Fiber Sheet, Strength, Vibratory Characteristics

1．序論

これまで鉄筋コンクリートシェル構造は，数多くの著名な作品が世界中で設計施工され，数十年を経過した構造物が現存している[1)]．鉄筋コンクリートシェル構造は通常の多目的空間としての機能ばかりでなく，自然災害時の避難施設としても有効に活用できる可能性を秘めている．近年地球温暖化に伴い，様々な種類の自然災害に遭遇する機会が増加し，安全で耐久性のある避難施設の充実化がその重要性を一層増しているものと考えられる．このような状況下において，鉄筋コンクリートシェル構造物の経年変化，部分的損傷などに対する安全設計を目指すと共に，今後の鉄筋および新素材を使用した補強コンクリート造の安全性を念頭に置いて，補強コンクリートシェル構造の修復方法および修復後の耐力を検討する必要性に迫られている．鉄筋コンクリートシェル構造の耐力は幾多の実験的研究に基づく検証がなされてきたが[2)]，コンクリートシェル構造に関して新素材を用いた補強は，Domingo らによる鋼繊維補強コンクリート造シェル[3)]，Schlaich によるガラス繊維補強コンクリート造シェル[4)]，筆者等による炭素短繊維補強コンクリート造シェルや複合炭素繊維補強コンクリート造シェルに関する若干の報告がなされているにすぎない[5,6)]．一方，構造物の振動特性に関する実験的研究は，ラーメン構造を除いても[7)]，鉄骨系の空間構造に関しては幾多の研究報告がなされている[8,9)]．しかし，鉄筋コンクリートシェル構造および補強コンクリートシェル構造に関する報告は数少ない[10,11)]．以上を踏まえて，本研究の主目的は，鉄筋，炭素短繊維およびビニロン短繊維の 3 種の補強を対象として，修復されたコンクリート造円筒殻の振動特性と耐力およびひび割れ形態との相関関係を明らかにすることである．筆者らは既往の研究において[12)]，補強コンクリート造円筒殻の耐力，ひび割れ形態および振動特性を対象とした基

＊１　工学部建築学科　教授・工博
＊２　理工学研究科総合理工学専攻博士課程
＊３　工学研究科建築学専攻博士課程前期

礎的研究を報告したが，本研究においては，新たにビニロン短繊維補強を加えて，鉄筋補強および炭素短繊維補強とともにより精密な検討を行った．文献 12 と比較して実験精度を向上させた点は，異種補強材料間における水セメント比の統一化，オムニミキサーの使用による材質の均質化，曲げ加工の少ない平織り金網の使用および修復領域の多様化，修復位置と形状の高精度化などである．本研究においては，3 種の修復方法によるシェルの耐力を検討した．これらは，P (Precut Retrofit) 法(Type P), F (Filler Retrofit) 法(Type F)および S (Sheeting Retrofit) 法(Type S)である．P 法は，損傷部の応力集中を避けるために損傷部の境界に隣接した領域を円滑に除去して仕上げる方法として定義した．F 法は，P 法を適用した後で，無収縮モルタルを当該領域に充填して仕上げる方法として定義した．S 法は，F 法を適用した後に，シェル面を炭素繊維シートで覆って仕上げる方法として定義した．

静的載荷実験の前後に，自由振動実験を実施した．静的載荷実験の境界条件は，アーチのスラストを拘束する 4 点ピン支持とした．荷重条件は，シェル中央部の 1 点載荷とした．載荷実験は，コンクリート造シェルが，集中荷重による最大耐力を経験した状態で終了した．

一方，自由振動実験は，自由境界と 4 点ピン支持の 2 種に関して行った．この自由振動実験は，インパクト・ハンマ加振により行った．また 4 点ピン支持における自由振動実験は起振器による加振を併せて行った．

人工的な損傷に対する修復を施した小型実験供試体を作製し，一連の自由振動実験および集中荷重による載荷実験を行って，シェルの振動特性と耐力およびひび割れ形態との相関関係を検討した．なお，コンクリート造の表記としては，文献 11 で略記した，RC 造(鉄筋コンクリート造)，FC 造(炭素短繊維補強コンクリート造)，RC-S 造(炭素繊維シート補強による鉄筋コンクリート造) および FC-S 造(炭素短繊維補強と炭素繊維シート補強を同時に施した複合炭素繊維補強コンクリート造)に加え，新たに VC (Vinylon Fiber Chip Reinforced Concrete: ビニロン短繊維補強コンクリート) 造および VC-S (Vinylon Fiber Chip Reinforced Concrete with Carbon Fiber Sheets: 炭素繊維シート補強によるビニロン短繊維補強コンクリート)造の 2 種を検討に加えた．上記 3 種の修復は RC-S, FC-S, VC-S 造を対象とはしていない．なお，FC・FC-S・VC・VC-S 造においては鉄筋による補強を行っていない．

2. 実験概要

3 種の修復に対するコンクリート造シェルの耐力およびひび割れ形態に対する振動特性変化の傾向を究明するため，Table 1 に示した通りの 5 段階の手順で実験を遂行した．

これらは，(1)自由境界における自由振動実験(A_f)，(2)4 点ピン支持における自由振動実験(A_p)，(3)4 点ピン支持におけるシェル中央部 1 点集中荷重による載荷実験(B_p)，(4)4 点ピン支持における載荷実験後の自由振動実験(C_p)および(5)自由境界における載荷実験後の自由振動実験(C_f)，の 5 段階である．自由振動実験の(1)，(2)，(4)および(5)において，インパクト・ハンマ加振による振動実験を行った．自由振動実験(2)および(4)において，起振器による振動実験を行い，伝達関数に大きな差異がないことを確認した．

Table 1 Vibratory and Loading Experiments

Sign	Boundary	Experiment	Time
A_f	Free	Vibration	Before B_p
A_p	Pin	Vibration	Before B_p
B_p	Pin	Load	
C_p	Pin	Vibration	After B_p
C_f	Free	Vibration	After B_p

上述の通り，自由振動実験(A_f)前に，外乱により小領域に生じた損傷が発生した場合を想定し，損傷部の修復に対して修復 P 法，F 法，S 法の 3 種の初期構造状態を設定している．各修復は荷重載荷前の状態で行っており，4 点支持されたとき自重に対して修復部分が無応力となっている．これらの 3 つの修復を設定した供試体を作製するとともに，健全な状態の RC・RC-S・FC・FC-S・VC・VC-S 造の供試体を作製して，集中荷重による載荷実験(B_p)を行い最大耐力およびひび割れ形態と振動特性との相関性を検討した．本研究で用いた供試体名は 5 文字で構成され，第 1 文字 R，F および V は，それぞれ RC・RC-S 造，FC・FC-S 造および VC・VC-S 造を示した．第 2 文字 P，F および S は，それぞれ，Type P，Type F および Type S を示した．第 3 文字 a，b および n は，それぞれ修復部の長辺方向を示し，水平投影面における母線方向，指導線方向および健全な供試体を示した．ここで，健全な供試体は損傷および修復のない供試体を示す．第 4 文字 a，b および n は，それぞれ修復幅 4mm，20mm および健全な供試体を示した．第 5 文字 0 および 1 は，上記の第 1 文字目から 4 文字で定義した各供試体について 1 体目および 2 体目の識別番号を示す．なお，RPnn0 や RSnn0 などの供試体名において，第 3 および第 4 文字が n の場合は健全な供試体を示す．自由振動実験および載荷実験で使用した供試体寸法は，Fig.1 に示した通り，水平投影面で一辺 500mm の正方形，ライズ・スパン比 1/5，設計板厚 8mm とした．全 72 体の供試体を Table 2 に示した．損傷に対する修復部は，Fig.1(b)に示した通り幅を 4mm および 20mm，長さを水平投影面におけるシェル・スパンの 1/8(62.5mm)とした．修復の長辺方向として，シェル頂部中央の縁から中心に向かう修復および脚部中央の縁から中心に向かう修復の 2 種類を設定した．なお，同図(a)の修復の長辺方向は母線方向の場合を示している．5 文字の供試体名の同表にコンクリートの材料諸元，およびシェル面 289 点での実測値より得た施工板厚の平均値を示した．炭素繊

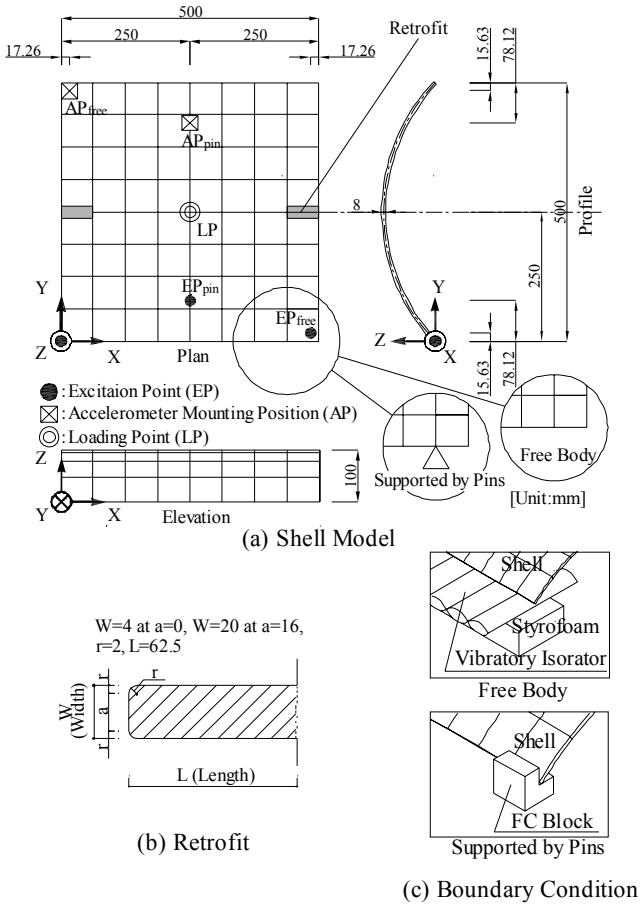


Fig.1 Shell Models

Table 2 Material Properties And Shell Thickness

Name	E [GPa]	F_c [MPa]	F_t [MPa]	ν	Ave. [mm]	Name	E [GPa]	F_c [MPa]	F_t [MPa]	ν	Ave. [mm]
RPnn0	23.8	50.1	3.15	0.226	9.7	RPnn1	22.1	47.5	3.11	0.196	9.7
RPaa0	22.4	48.9	2.82	0.240	10.4	RPaa1	22.4	48.9	2.82	0.240	10.4
RPab0	22.3	51.2	3.18	0.240	10.2	RPab1	22.3	51.2	3.18	0.240	9.9
RPba0	23.5	49.0	2.76	0.251	10.2	RPba1	23.5	49.0	2.76	0.251	10.7
RPbb0	22.4	48.9	2.82	0.240	10.2	RPbb1	20.6	45.6	2.91	0.242	10.2
RFaa0	23.5	49.0	2.76	0.251	10.8	RFaa1	23.5	49.0	2.76	0.251	10.5
RFab0	22.1	47.5	3.11	0.196	10.0	RFab1	22.1	47.5	3.11	0.196	10.5
RFba0	23.1	52.3	3.87	0.248	10.1	RFba1	23.1	52.3	3.87	0.248	10.9
RFbb0	20.6	45.6	2.91	0.242	9.8	RFbb1	22.3	51.2	3.18	0.240	10.9
RSnn0	22.1	47.5	3.11	0.196	9.7	RSnn1	22.1	47.5	3.11	0.196	9.4
RSaa0	22.4	48.9	2.82	0.240	10.7	RSaa1	22.4	48.9	2.82	0.240	10.7
RSab0	22.3	51.2	3.18	0.240	10.0	RSab1	22.3	51.2	3.18	0.240	11.0
RSba0	23.1	52.3	3.87	0.248	10.1	RSba1	23.1	52.3	3.87	0.248	10.5
RSbb0	20.6	45.6	2.91	0.242	9.7	RSbb1	22.3	51.2	3.18	0.240	10.3
FPnn0	22.8	49.2	2.83	0.229	10.5	FPnn1	23.7	56.9	4.23	0.207	10.3
FPaa0	23.7	56.9	4.23	0.207	10.5	FPaa1	20.5	45.0	4.12	0.246	10.4
FPab0	17.9	48.8	4.91	0.244	9.7	FPab1	18.6	44.5	4.75	0.231	10.0
FPba0	19.8	40.8	3.60	0.231	9.8	FPba1	19.8	40.8	3.60	0.231	9.9
FPbb0	17.9	48.8	4.91	0.244	10.0	FPbb1	17.9	48.8	4.91	0.244	8.9
FFaa0	22.8	49.2	2.83	0.229	10.2	FFaa1	22.8	49.2	2.83	0.229	10.2
FFab0	18.6	44.5	4.75	0.231	10.3	FFab1	18.6	44.5	4.75	0.231	10.4
FFba0	22.6	48.9	2.76	0.226	9.8	FFba1	22.6	48.9	2.76	0.226	10.1
FFbb0	18.3	40.8	4.10	0.237	10.3	FFbb1	18.3	40.8	4.10	0.237	9.9
FSnn0	18.6	44.5	4.75	0.231	10.3	FSnn1	18.6	44.5	4.75	0.231	10.1
FSaa0	20.5	45.0	4.12	0.246	9.9	FSaa1	20.5	45.0	4.12	0.246	10.3
FSab0	17.9	48.8	4.91	0.244	10.1	FSab1	17.9	48.8	4.91	0.244	10.3
FSba0	19.8	40.8	3.60	0.231	10.4	FSba1	19.8	40.8	3.60	0.231	10.1
FSbb0	18.3	40.8	4.10	0.237	10.5	FSbb1	18.3	40.8	4.10	0.237	9.9
VPnn0	23.7	56.6	3.30	0.226	10.1	VPnn1	19.1	50.1	4.00	0.225	9.4
VPaa0	20.2	55.1	3.00	0.230	10.1	VPaa1	20.2	55.1	3.00	0.230	10.3
VPab0	18.7	47.5	4.20	0.232	10.4	VPab1	18.0	45.9	3.02	0.234	10.0
VFaa0	20.2	55.1	3.00	0.230	10.8	VFaa1	18.7	47.5	4.20	0.232	10.5
VFab0	23.7	56.6	3.30	0.226	11.0	VFab1	20.2	55.1	3.00	0.230	10.3
VSnn0	18.0	45.9	3.02	0.234	9.8	VSnn1	18.0	45.9	3.02	0.234	10.4
VSaa0	23.7	56.6	3.30	0.226	10.2	VSaa1	23.7	56.6	3.30	0.226	11.1
VSab0	18.7	47.5	4.20	0.232	10.5	VSab1	18.7	47.5	4.20	0.232	10.6

E: Young's Modulus,
F_c: Ultimate Compressive Strength,
F_t: Ultimate Tensile Strength,
ν: Poisson's Ratio,
Ave.: Average Thickness of Shell

維シート(Table 3(a))は，エポキシ系樹脂を塗布し，シェル両面の全領域に貼り付けた．シェル面内の配筋は，1.1mm の鉄筋(E=203GPa，F_y=368MPa)を縦横10mm 間隔に編みこんだ織金網(Woven Wire Cloth JIS G 3555)の平織りを，母線方向および指導線方向に平行に配置し，単配筋とした．コンクリートの調合は，Table 4 に示した通り，セメント対骨材の重量比を，RC・RC-S 造で 1 対 2，FC・FC-S・VC・VC-S 造で 1 対 1.5 とし，水セメント比を，RC・RC-S 造，FC・FC-S 造，VC・VC-S 造ともに 47%とした．FC・FC-S・VC・VC-S 造のいずれにおいてもセメント重量比に対して，短繊維 2.0%を統一して混入した．VC・VC-S 造には，高性能 AE 減水剤 0.75%を混入した．短繊維は，FC・FC-S 造で炭素短繊維(Table 3(b))を，VC・VC-S 造でビニロン短繊維(Table 3(c))を用いた．

修復部には，修復用無収縮グラウト材(E=29.5GPa，F_c=67.5MPa，F_t=3.82MPa)を充填した．実験 A_p，B_p および C_p における支点は，長さ 62.5mm(母線長さの 1/8)の FC 造支承部をシェル端部の母線方向に配置し，均しモルタルを注入した．

2.1 自由振動実験

振動実験の境界条件は自由境界および 4 点ピン支持を対象とした．自由境界は，振動特性に関する基礎的資料を得る為，支持拘束の影響を除去して検証を行った．加振方法は，インパクト・ハンマ加振を採用し，特に 4 点ピン支持においては起振器による加振を用いて伝達関数に差異がないことを確認した．以上の実験より，シェルの基本固有振動数並びに減衰定数を求めた．自由振動実験で適用した自由境界および 4 点ピン支持の加振位置および計測位置を Fig.1(a)に示した．図中の AP_{free} および AP_{pin} は，自由境界およびピン支持の加速度計による計測位置を示す．図中の EP_{free} および EP_{pin} は，自由境界およびピン支持の加振位置を示す．境界条件の詳細は以下の通りである(Fig.1(c))．自由境界において，供試体を防振材 (50mm 厚のエアーマット) 上に設置した．ここで，エアーマットによる支持は厳密な意味での自由境界ではないが，供試体と比べ著しく剛性が異なり，極めて自由境界に近いものと考えら

Table 3(a) Carbon Fiber Sheet

Type	Fiber Diameter [μm]	Tensile Strength [GPa]	Modulus of Tensile Elasticity [GPa]	Elongation [%]	Density [N/mm^3]
TR3110MS	17.0	1.12	71.6	1.5	1.03×10^{-5}

Table 3(b) Carbon Fiber Chip

Type	Fiber Length [mm]	Fiber Diameter [μm]	Tensile Strength [GPa]	Modulus of Tensile Elasticity [GPa]	Elongation [%]	Density [N/mm^3]
K661	18.0	17.0	1.77	180.0	1.0	1.90×10^{-5}

Table 3(c)Vinylon Fiber Chip

Type	Fiber Length [mm]	Fiber Diameter [μm]	Tensile Strength [GPa]	Modulus of Tensile Elasticity [GPa]	Elongation [%]	Density [N/mm^3]
2000T6 -AB	6.0	26.0	1.51	34.3	5.0	1.27×10^{-5}

Table 4 Ratio of Concrete Admixture

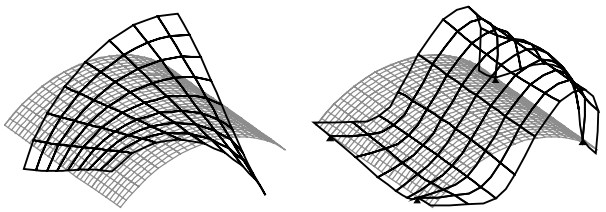
Concrete	C/S [%]	W/C [%]	Cement to Reinforcement [%]	Reinforcement
RC	50	47	1.19 (P_t)	Steel Wire
FC	67	47	2	Carbon Fiber
VC	67	47	2	Vinylon Fiber

れる．4 点ピン支持において，供試体脚部の 4 箇所に FC 造コンクリート製支承を配し，空隙に均しモルタルを充填した．ここで，自由境界および 4 点ピン支持の各振動モードを確認するため，汎用構造解析コード(Nastran)を用いて，供試体 FPnn0 の自由振動解析を行い，基本振動数 f_n および固有モード形状(Fig.2)を確認した．これより，自由境界においては，捩れモードが卓越し，4 点ピン支持においては，円形指導線の反転による逆対称モードが卓越することを確認した．これらのモードは全供試体で共通している．以上より，加振位置および計測位置はモード形状の変形の顕著な位置に設置した．すなわち，Fig.1(a)に示すように自由境界において隅角部近傍，4 点ピン支持において円筒殻裾部の直線母線方向における中央部とした．実験 A_f による FPnn0 の基本固有振動数 f_{bf}(84.2Hz)より，振動数比 0.91(=f_{nf}/f_{bf})を確認した．さらに，実験 A_p による FPnn0 の基本固有振動数 f_{bp} (125.5Hz)より，振動数比 1.18(=f_{np}/f_{bp})を確認した．なお，自由境界条件において，フリーボディ(Free Body)として固有値解析を行い，剛体運動を全て取り除いた上で振動数を求めた．自由振動実験より加速度応答波形を計測し，FFT 解析器を用いて，解析(サンプリング周波数 640Hz，標本数 4096，周波数分解能 156.25mHz，平均数 5 回の線形平均，長方形の窓関数)を行った．これに基づき，伝達関数を求め [13]，基本固有振動数を特定した．

さらに，実験に対して半値幅法を用いて損失係数 η を求め，減衰定数 $h(=\eta/2)$を特定した [7]．

2.2 載荷実験

載荷実験図を Fig.3 に示した．境界条件は前節で言及したような円筒殻端部 4 点ピン支持とし，スラストを拘束した上で，中央部 1 点集中荷重による載荷実験を行い最大耐力およびひび割れ形態を確認した．荷重載荷は，ボルト(JIS B 1180- M12) の先端にナット(JIS B 1181- M12) を嵌め込み，最大耐力に至るまで載荷を行った．Table 5 には耐力比 E_0 を示した．ここで耐力比 E_0 は，RC・RC-S 造



(a) Free Body　　(b) Supported by Pins

Fig. 2 1st Mode by Numerical Analysis

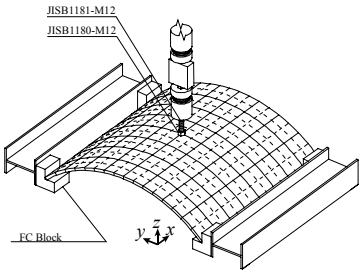


Fig. 3 Loading Experiment System

において RPnn0 の耐力(2.14 kN)，FC・FC-S 造において FPnn0 の耐力(1.66 kN)，VC・VC-S 造において VPnn0 の耐力(2.73 kN) に対する各供試体の耐力の比を示している．なお，同表の VPaa1 の耐力は計測器の不具合により測定不能となったが，振動特性は確認されている．耐力比 E_0 は，後述の振動特性変化との相関関係を示すために使用される．

3. 結果および考察

修復されたコンクリート造シェルの耐力およびひび割れ形態を振動特性と関連づけて考察するため，本研究で行った一連の 5 段階からなる実験結果の有効性を検証した．ここで，振動特性を検証する際に，以下の 2 ケースの供試体は対象外とした．第 1 ケースは，実験 B_p で供試体が割裂により二個以上に分離した場合であり，モデル VPaa1 が該当する．第 2 ケースは，実験 C_f で支点を除去する際に不具合が生じ整合性のある計測が困難となった場合であり，RPbb1，FPab1，FPbb0，FFba1 が該当し，自由境界でのみ対象外とした．

3.1 ひび割れ形態と振動特性

最初に，載荷実験前後の基本固有振動数，減衰定数，振動指標 r_f(=-1+ f_a /f_b，Frequency Parameter)および減衰指標 r_h(=-1+h_a/h_b，Damping Parameter)を求め，自由境界および 4 点ピン支持において Table 6 に示した．ここで，f_b と f_a は載荷実験前と後の固有振動数，h_b と h_a は載荷実験前と後の減衰定数を示した．なお，表中の C_P はひび割れパターン(1,2,2A: 詳細は後述の Fig.4,5)を示す．同表の「－」の表示は前述の振動計測不能のため対象外とした項目である．同表より，自由境界においては，文献 12 と同様に振動数が減少し，減衰定数が増加している傾向を確認した．これは，ひび割れ発生により，ひび割れ相互の摩擦による減衰の増加およびひび割れによる剛性の減少が示されたものと考えられる．一方，ピン支持においては，境界部における逸散減衰および支持点の若干の曲げ剛性などの影響により自由境界と比較して振動特性変化の傾向は明確ではない．この相関性が顕著でない理由として以下のことが考えられる．まず，ピン支持は，「2.1 自由振動実験」で述べたように支承部を均しモルタルによって若干の曲げ剛性を伴ったピン支持としてい

Table 5 Strength Ratio to Type “R・F・V-Pnn0”

Name	E_0	Name	E_0	Name	E_0	Name	E_0	Name	E_0	Name	E_0
RPnn0	**1.00**	RPnn1	0.93	**FPnn0**	**1.00**	FPnn1	2.10	**VPnn0**	**1.00**	VPnn1	0.70
RPaa0	1.06	RPaa1	1.18	FPaa0	0.81	FPaa1	1.47	VPaa0	0.68	VPaa1	−
RPab0	0.92	RPab1	1.24	FPab0	0.90	FPab1	1.37	VPab0	0.69	VPab1	0.69
RPba0	1.01	RPba1	0.96	FPba0	0.81	FPba1	1.03	−	−	−	−
RPbb0	0.91	RPbb1	0.78	FPbb0	0.91	FPbb1	0.77	−	−	−	−
RFaa0	1.06	RFaa1	1.13	FFaa0	0.91	FFaa1	1.54	VFaa0	0.77	VFaa1	0.73
RFab0	0.89	RFab1	0.94	FFab0	1.02	FFab1	1.22	VFab0	0.93	VFab1	0.94
RFba0	1.11	RFba1	1.28	FFba0	0.86	FFba1	0.81	−	−	−	−
RFbb0	0.94	RFbb1	0.70	FFbb0	1.03	FFbb1	1.48	−	−	−	−
RSnn0	1.20	RSnn1	1.26	FSnn0	2.42	FSnn1	1.87	VSnn0	1.31	VSnn1	1.52
RSaa0	1.63	RSaa1	1.85	FSaa0	2.39	FSaa1	2.43	VSaa0	1.42	VSaa1	1.79
RSab0	1.54	RSab1	1.74	FSab0	2.42	FSab1	2.27	VSab0	1.57	VSab1	1.64
RSba0	1.71	RSba1	2.12	FSba0	2.32	FSba1	2.57	−	−	−	−
RSbb0	1.41	RSbb1	1.61	FSbb0	2.40	FSbb1	2.30	−	−	−	−

る．このことから，載荷実験時の耐力差より支承部に残存する曲げ剛性は供試体毎に差異が生じるものと考えられる．

本研究では、自由境界において得られた減衰定数および固有振動数の各変化に基づく振動特性の相関をひび割れ形態で分類し傾向を検証した．ひび割れ形態は荷重条件および拘束条件ならびに構造種別により，多様な変化を示すことがこれまでの実験結果から示されている[2]．今回対象とした荷重条件および拘束条件すなわち，中央 1 点集中荷重ならびに端部 4 点ピン支持において構造種別 RC・RC-S 造，FC・FC-S 造および VC・VC-S 造に分けてパターン 1 と 2 を区別して，その認識図を以下のように設定した(Fig.4(a，b))．パターン 1 は，本研究で確認された一般的なひび割れ形態であり，パターン 2 は，パターン 1 にある方向のひび割れが加わったパターンとして定義した．ある方向のひび割れとは，RC・RC-S 造において上面頂部母線方向のひび割れ，FC・FC-S・VC・VC-S 造において上面頂部母線方向にシェル面の縁から縁まで到達するひび割れである．同図には適用パターン毎の実際のひび割れを例として 1 つ示した．Fig.5 に各コンクリート材料別のひび割れパターンと対応して、自由境界から得られた減衰指標と振動指標との相関図を示した．同図(a)の RC・RC-S 造に注目すると，パターン 1(実線)で回帰直線の寄与率 65%，パターン 2(破線)で寄与率 84%を得た．このことより，頂部母線方向のひび割れを有する供試体はそれ以外の供試体と比較して，減衰定数の変化が顕著でないことを確認した．同図(b)の FC・FC-S 造において，パターン 1(実線)で寄与率 72%，パターン 2(破線)で寄与率 87%を得た．同図(c)の VC・VC-S 造において，パターン 1 の振動特性変化は乏しく相関性を確認することはできないが，パターン 2(破線)で 51%の寄与率が得られている．ここで，ビニロン短繊維補強コンクリートの供試体で最も大きな減衰定数変化を見せた VPnn1 は，板厚がビニロン短繊維補強コンクリートの中で最も薄く，全供試体の平均板厚 10.2mm に対して 8.4%減であるため，この VPnn1 を除いた寄与率を求めると，同図(c)の Pattern 2A となり、寄与率 85%の高い相関性が示された．

上述の VPnn1 を除外した理由をより詳細に説明するため，Fig.6 に VPnn1 と平均的な板厚(10.1mm)の VPnn0 の板厚分布図とシェル両面のひび割れ図を示した．VPnn1 は板厚が薄いことおよび多数のひび割れ発生を確認した．

これら FC・FC-S・VC・VC-S 造は共通のひび割れ形態分類により高い相関性示すことから，短繊維補強コンクリート造円筒殻のひび割れ形態が振動特性に与える影響は，炭素繊維，ビニロン繊維とも類似することが示された．以上より，集中荷重を受ける端部 4 点ピン支持の屋根型円筒殻において，RC・RC-S 造，FC・FC-S 造および VC・VC-S 造の最大耐力を経験した供試体のひび割れパターン毎の減衰指標と振動指標の間に高い相関性があることを明らかにした．

3.2 耐力と振動特性

修復 P 法，F 法および S 法の各供試体の耐力比と振動特性変化との相関関係を検討した．一般に固有振動数は剛性と比例しているが，コンクリートシェル構造の剛性と耐力は相関性が高いため[6]，固有振動数と耐力の相関性を検討することは有意であると考えられる．最初に，耐力と振動指標の関係を Fig.7(a-f)において，コンクリート材料毎に自由境界とピン支持に分けて図示した．図中の丸印(○)は Type P を，バツ印(×)は Type F を，四角印(□)は Type S を示す．まず，Type S の振動数の変化が他の Type と比較し顕著に減少していることより，Type S について耐力比との相関性を明確に示すことは困難である．Type F については，耐力比と振動指標の間に明確な特徴を見出すことが困難である．その理由は，載荷実験終了時に修復領域の境界が分離し，個別に振動を起こし，その結果，安定した固有振動数の変化が得られないことによると考えられる．

上記を考慮して，Type P のみを対象として検討を行う．同図(a，b)の RC 造供試体に着目すると，自由境界において 44%，ピン支持において 40%の寄与率が得られ，文献 12 に比べ若干相関は低いものの耐力と振動指標の間に相関が認められた．同図(c，d)の FC 造供試体に着目すると，自由境界において 46%，ピン支持において 72%の寄与率が得られた．この比較的高い寄与率は，載荷実験後のピン支持に

Table 6 Vibratory Characteristics

Name	Before Loading				After Loading				Free		Pins		C_p
	Free		Pin		Free		Pin						
	f_b	h_b	f_b	h_b	f_a	h_a	f_a	h_a	r_f	r_h	r_f	r_h	
RPnn0	84	0.7	115	1.0	73	2.3	126	1.7	-13.3	245.9	9.1	65.0	1
RPnn1	81	0.8	127	1.9	73	1.7	120	1.8	-9.5	120.9	-5.8	-4.1	1
RPaa0	82	1.1	129	1.4	70	3.5	109	3.7	-15.0	204.0	-15.7	163.2	2
RPaa1	79	2.1	124	1.6	70	1.5	109	1.5	-12.0	-29.6	-12.3	-4.2	2
RPab0	84	1.3	129	2.2	78	1.4	110	1.3	-6.2	6.6	-14.8	-41.3	2
RPab1	83	1.3	121	1.0	72	1.4	96	2.4	-12.5	6.1	-20.8	128.9	2
RPba0	81	1.0	114	2.3	72	4.3	108	1.8	-11.4	340.1	-5.4	-22.3	1
RPba1	81	1.0	122	0.9	78	1.0	117	1.3	-3.9	4.0	-3.8	41.1	1
RPbb0	81	1.0	107	2.2	74	1.7	114	1.8	-8.3	74.5	6.1	-18.3	1
RPbb1	83	1.2	113	1.3	–	–	119	2.6	–	–	5.4	94.7	-
RFaa0	90	1.4	137	0.8	85	6.4	123	1.2	-5.6	356.8	-10.5	51.6	2
RFaa1	82	1.2	111	1.0	67	2.4	98	4.4	-17.8	112.8	-11.8	345.4	2
RFab0	86	1.4	115	2.0	76	2.3	106	2.6	-11.2	65.1	-7.2	33.8	2
RFab1	87	0.8	113	1.5	78	1.5	93	2.0	-10.8	86.8	-17.9	32.9	1
RFba0	85	1.6	115	2.3	66	4.8	101	1.7	-22.8	204.8	-12.3	-26.2	2
RFba1	92	1.4	139	1.8	77	2.9	127	1.9	-16.9	98.3	-8.2	5.6	2
RFbb0	83	0.8	113	1.7	65	2.4	108	1.2	-21.9	220.2	-4.8	-28.5	2
RFbb1	94	0.7	100	2.3	68	5.4	121	2.0	-28.2	718.2	21.3	-11.9	1
RSnn0	83	1.0	121	1.4	83	1.3	128	1.7	0.2	27.0	6.0	21.3	1
RSnn1	77	1.4	122	3.1	78	2.3	120	1.7	0.8	63.0	-1.3	-45.1	1
RSaa0	87	1.4	117	1.8	87	1.1	117	1.8	0.4	-25.3	-0.5	0.5	1
RSaa1	87	1.6	139	2.8	87	1.3	131	1.4	0.2	-16.8	-5.7	-49.1	1
RSab0	84	1.1	123	2.6	82	1.9	128	2.0	-2.6	71.1	3.4	-22.2	1
RSab1	91	1.3	144	1.7	90	1.5	144	1.6	-1.9	15.5	-0.1	-9.3	1
RSba0	88	1.4	145	1.7	86	0.8	146	1.7	-1.8	-42.7	0.4	-0.4	1
RSba1	92	1.5	138	1.3	90	1.0	129	1.5	-1.4	-38.0	-6.1	11.2	1
RSbb0	77	1.6	111	2.5	76	1.2	110	1.8	-1.2	-24.1	-1.3	-29.7	1
RSbb1	82	0.9	130	1.3	82	1.4	131	1.3	0.4	66.0	0.1	-4.7	1
FPnn0	84	1.3	126	0.8	86	0.9	124	0.8	2.6	-30.4	-0.9	0.9	1
FPnn1	90	0.7	125	1.6	85	1.7	132	1.2	-5.9	139.1	5.6	-24.3	1
FPaa0	90	0.5	121	1.3	87	0.9	121	1.1	-3.6	72.9	4.1	-13.6	2
FPaa1	83	0.7	109	5.4	71	4.0	138	2.0	-14.5	501.7	25.9	-63.4	2
FPab0	74	1.1	139	1.2	76	2.8	134	1.2	2.5	163.3	-3.6	-1.2	1
FPab1	71	1.5	115	1.3	71	3.0	126	2.1	-1.1	95.0	9.8	63.0	-
FPba0	74	1.4	119	1.3	68	3.5	112	1.8	-8.4	152.0	-5.8	39.7	1
FPba1	75	1.8	147	1.3	75	2.0	144	1.4	0.0	11.8	-2.4	6.8	1
FPbb0	81	1.6	123	1.5	–	–	113	1.3	–	–	-7.8	-10.4	-
FPbb1	65	2.7	110	1.5	65	2.9	106	1.5	0.5	8.6	-3.1	3.2	2
FFaa0	81	1.0	120	1.6	78	1.2	117	1.7	-4.4	25.6	-2.3	10.9	2
FFaa1	84	1.2	102	2.4	83	1.2	122	1.6	-1.1	1.1	19.9	-30.1	2
FFab0	82	1.8	132	1.4	78	1.5	119	1.2	-4.6	-17.3	-9.6	-12.5	1
FFab1	82	1.5	116	1.3	77	1.6	134	1.3	-5.9	6.3	15.7	0.1	2
FFba0	79	1.0	108	2.0	61	4.1	130	1.4	-22.5	313.1	21.2	-26.7	1
FFba1	80	1.5	124	1.8	–	–	110	2.2	–	–	-10.9	19.9	-
FFbb0	84	1.0	139	2.4	70	4.5	118	1.5	-17.1	338.5	-15.0	-38.4	1
FFbb1	77	0.9	107	1.4	74	3.0	111	1.8	-3.7	223.0	3.7	26.9	1
FSnn0	81	1.0	126	1.0	81	2.1	123	1.5	-1.2	122.6	-2.2	47.0	2
FSnn1	81	1.6	121	2.8	80	1.7	119	2.4	-0.6	6.9	-1.5	-15.0	1
FSaa0	81	1.4	138	1.3	81	1.3	128	1.3	0.6	-7.7	-7.1	2.8	1
FSaa1	83	1.3	129	1.5	83	1.2	115	3.1	0.2	-7.3	-11.1	111.0	1
FSab0	84	1.5	144	1.3	85	1.3	139	1.8	1.7	-14.0	-3.5	38.1	1
FSab1	82	1.2	118	2.7	84	2.4	117	3.9	2.1	95.9	-0.7	46.0	1
FSba0	86	0.9	149	1.4	86	1.3	144	1.1	0.7	39.0	-3.0	-19.8	1
FSba1	87	1.5	118	1.4	86	1.5	112	1.9	-0.7	-5.2	-4.8	35.0	1
FSbb0	86	1.6	133	1.2	86	1.2	132	1.6	0.7	-28.3	-0.5	35.6	2
FSbb1	85	1.6	102	1.2	85	1.2	106	1.6	0.0	-23.5	3.2	27.2	1
VPnn0	90	1.0	118	1.5	90	1.5	125	2.6	-0.5	42.4	5.4	69.1	2A
VPnn1	76	0.8	125	1.4	76	3.5	111	1.7	0.2	324.1	-11.1	22.7	2
VPaa0	82	2.2	126	1.5	80	1.8	93	2.6	-3.4	-19.0	-26.2	75.1	2A
VPaa1	83	2.3	131	1.3	–	–	–	–	–	–	–	–	-
VPab0	79	0.9	133	2.5	80	2.0	130	1.3	1.6	129.70	-1.9	-47.9	2A
VPab1	75	2.6	134	2.3	73	2.8	119	2.4	-1.9	6.0	-11.5	7.2	2A
VFaa0	90	1.1	123	1.3	89	1.1	128	2.3	-0.5	-7.2	3.7	74.6	2A
VFaa1	86	2.1	117	0.9	82	1.1	114	1.6	-4.4	-50.0	-2.4	81.3	1
VFab0	93	1.0	122	1.9	91	1.6	106	2.2	-1.5	60.8	-13.5	19.7	2A
VFab1	83	0.9	120	6.6	83	1.4	125	2.1	-0.6	50.9	3.5	-67.8	2A
VSnn0	83	1.9	128	1.5	84	0.9	123	1.8	1.1	-50.6	-3.7	21.1	2A
VSnn1	80	1.9	122	4.4	79	2.0	115	2.2	-1.6	6.9	-5.9	-50.7	1
VSaa0	85	1.2	155	1.6	85	0.9	136	1.6	0.5	-23.5	-12.0	-1.0	2A
VSaa1	95	2.0	129	1.5	93	1.2	137	2.6	-2.3	-40.3	6.4	69.1	1
VSab0	84	1.8	128	2.0	84	1.0	119	2.7	0.2	-42.2	-7.1	33.7	1
VSab1	87	1.7	139	4.2	87	1.2	116	2.3	0.0	-31.6	-16.4	-45.1	1

Note) f_b[Hz]:Fundamental Frequency before Loading Experiment,
f_a[Hz]:Fundamental Frequency after Loading Experiment,
h_b[%]:Damping Factor before Loading Experiment,
h_a[%]:Damping Factor after Loading Experiment,
r_f[%]:Frequency Parameter, rh [%]:Damping Parameter,
C_p:Cracking Pattern (1, 2 and 2A Described Below in Fig.4 and 5)

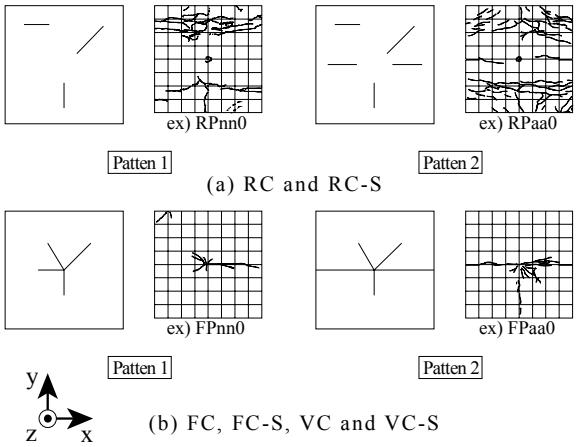


Fig. 4 Cracking pattern

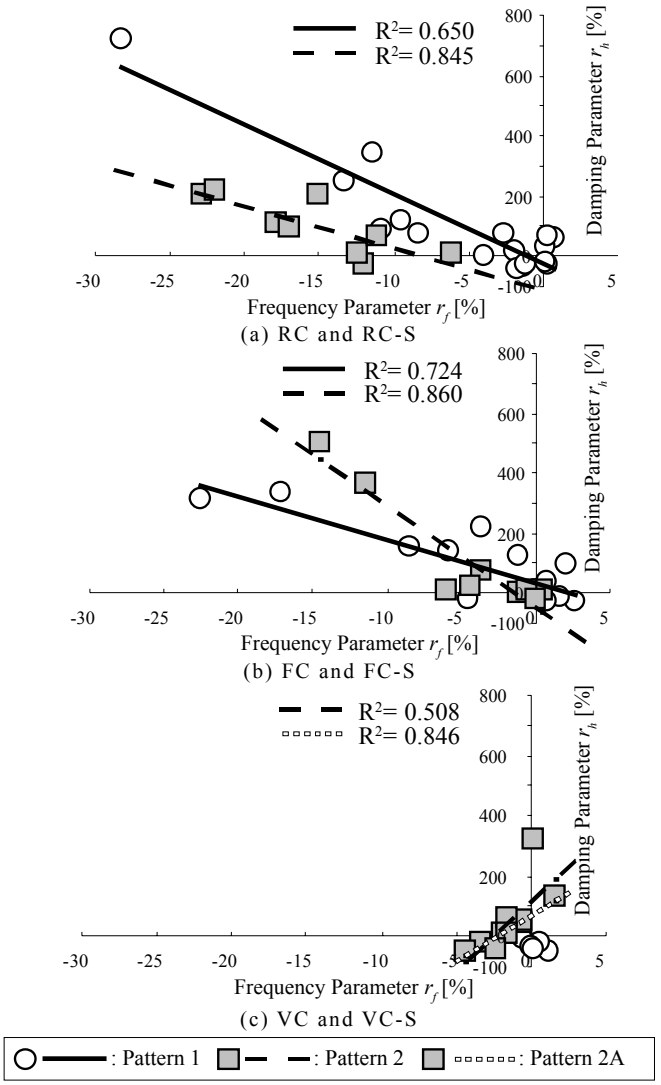


Fig.5 Damping Parameter vs. Frequency Parameter

おける残存する剛性の影響を考慮すると，若干低減して評価すべきと考えられる．また，高い耐力比を示した供試体ほど振動指標が増加する傾向が，同図(b)RC 造におけるピン支持の傾向とは逆である．この理由は，FC 造のひび割れ形態がシェル面を縦断して発生しやすい傾向にあることに起因しているものと考えられる．同図(e，f)の VC 造供試体に着目すると，自由境界において 54%，ピン支持において 85%の寄与率が得られた．これより，VC 造の Type P は耐力の相互の差が殆どないことから自由境界，ピン支持ともに耐力と振動指標との相関性が乏しいことを確認した．

次に，耐力と減衰指標の関係を Fig.8(a-f)におい

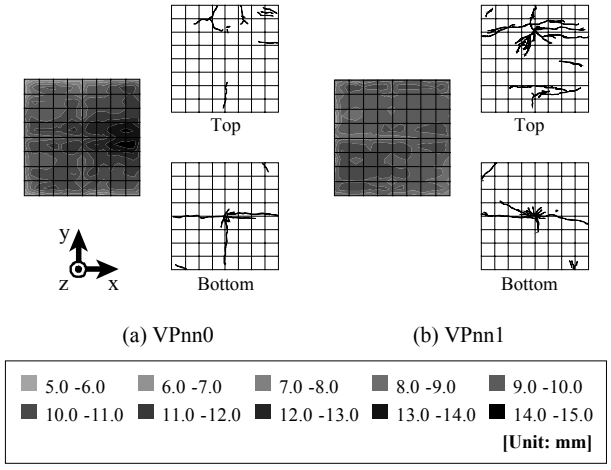


Fig.6 Thickness Fluctuation and Cracking Pattern

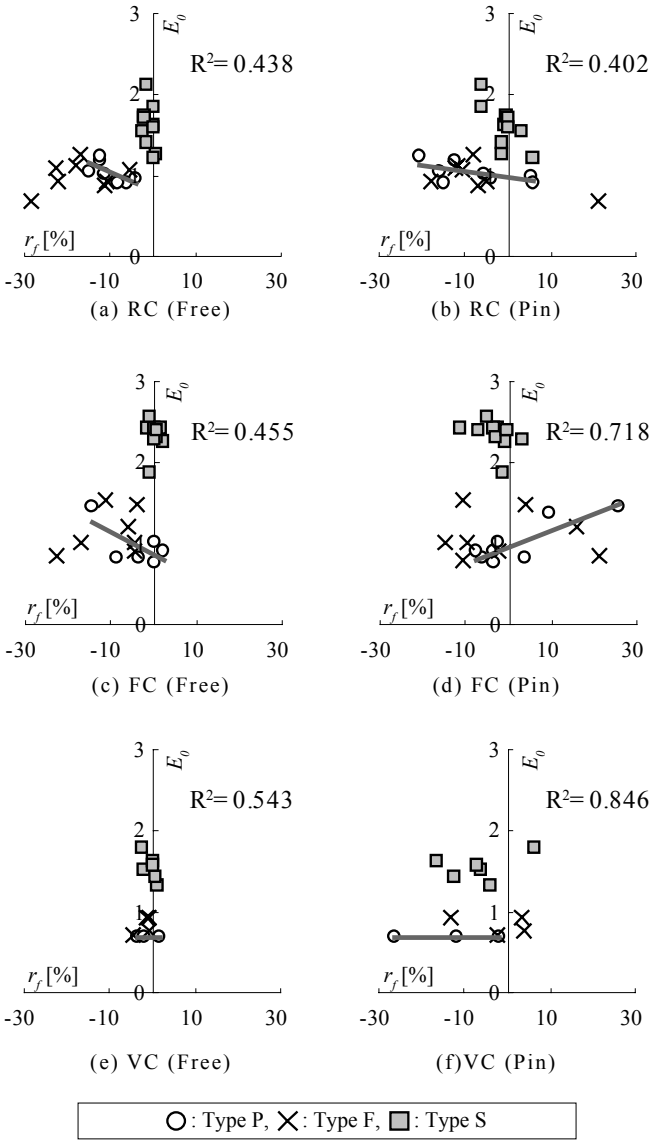


Fig.7 Strength Ratio vs. Frequency Parameter

て，コンクリート材料毎に自由境界とピン支持に分けて図示した．振動指標における Type S と Type F の場合と同様な理由により，Type P のみを対象とし

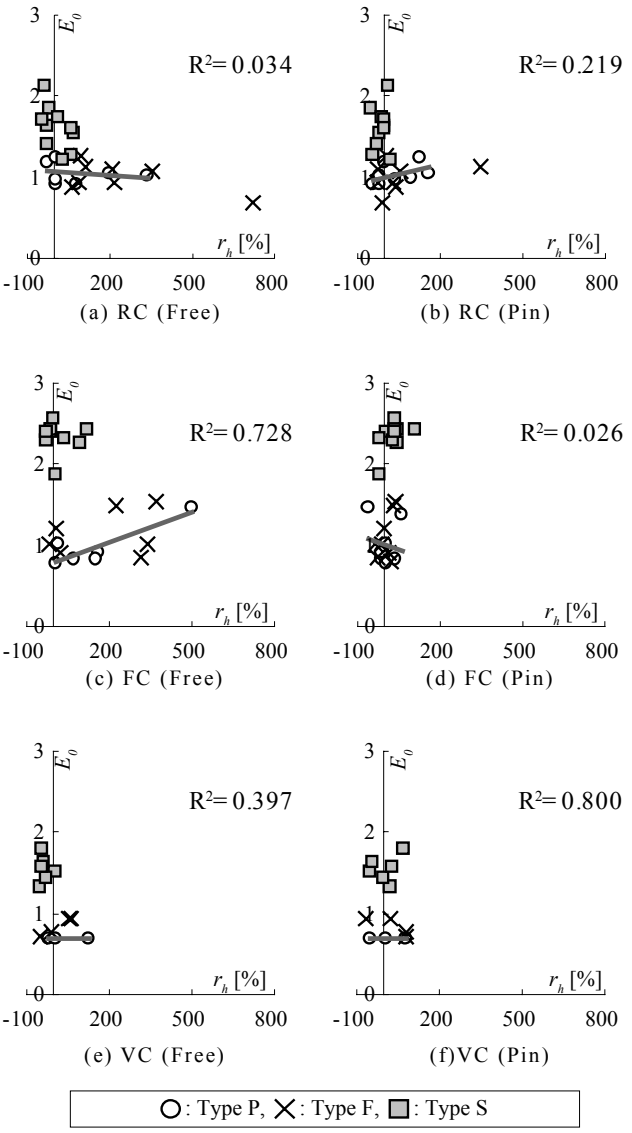


Fig.8 Strength Ratio vs. Damping Parameter

て検討を行う．同図(a，b，c，d)の RC 造供試体および FC 造のピン支持に着目すると，相関性は低い結果を確認した．文献 12 において，減衰指標は振動指標と比べて寄与率が低下する傾向を示したが，RC 造の自由境界において相関性が確認されている．一方，本研究においては RC 造のピン支持および FC 造の自由境界において相関性が確認されている．これまでの研究を総合的に判断すると，支持条件と減衰指標の間の統一的な相関性は確認されていないが，今後，供試体の数を増やすことにより精度の良い相関性が得られると期待される．同図(e，f)の VC 造供試体に着目すると，自由境界において 40%，ピン支持において 80%の寄与率が得られた．これより，減衰指標において振動指標と同様に VC 造の Type P は耐力の相互の差が殆ど確認されないことから自由境界，ピン支持ともに耐力と減衰指標との相関性が乏しいことを確認した．

4. 結論

修復されたコンクリート造円筒殻の振動特性と耐力およびひび割れ形態との相関関係を検討した結果以下の結論を得た.

1) 最大耐力を経験したひび割れ形態の認識図を作成し，分類することにより振動指標と減衰指標との相関性を確認した．これより，標準的なひび割れを示す認識パターン 1 およびパターン 1 に加えてある方向のひび割れを示すパターン 2 ともに RC・RC-S 造において 6 割以上, FC・FC-S 造において 7 割以上の寄与率を得た．VC・VC-S 造においては，FC・FC-S 造と同様の分類が有効であり，パターン 2 で 5 割以上の寄与率を確認した.
2) 修復 P, F および S の各タイプの耐力比と振動指標との相関関係を検討した結果，修復 P について，RC・FC 造は 4 割以上の寄与率が得られた.
3) 修復 P, F および S の各タイプの耐力比と減衰指標との相関関係を検討した結果，相互の関係が乏しいことを確認した.

参考文献

1) 斎藤公男：空間構造物語，彰国社，2003.3
2) 國枝治郎，加藤史郎，高山誠，半谷裕彦，真下和彦，皆川洋一，山田聖志：「鉄筋コンクリートシェル耐荷力実験資料集」，日本建築学会，連続体構造小委員会，1993.3
3) A. Domingo et al., Design of a Thin Shell Steel Fiber Reinforced Concrete Hyper Roof, Proc. IASS 1999, Madrid, VolumeI, A171-A179, 1999
4) A. Holgate, The Art of Structural Engineering, -The Work of Jorg Schlaich and his Team-, Edition Axel Menges, pp.48-55, 1997
5) 真下和彦，小林剛：点荷重を受ける開口部付き炭素短繊維補強コンクリート造円筒殻の耐力，日本建築学会構造系論文集，第 539 号，pp.79～86，2001.1
6) 川崎健二郎，真下和彦：集中荷重を受ける複合炭素繊維補強コンクリート造円筒殻の耐力，日本建築学会構造系論文集, 第 592 号, pp.105～112, 2005.6
7) 日本建築学会：建築物の減衰, pp.89～96, 2000.10
8) 西田明美，川口健一：ラチス構造物の波動伝播特性に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文集，第 597 号，pp.69～76，2005.11
9) 新宮清志，田仲敏丈，平塚聖敏，川島孝幸，青木義男，中澤泰典：鉄骨円錐形シェルの減衰に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東)，B1，構造 I，20341，pp.681～682，2006.9
10) 武藤厚，加藤友和，糠谷真理，平墳義正：鉄筋コンクリート造空間構造の振動特性に関する評価の試み－既存アリーナにおける振動測定と数値解析による振動特性の分析例―，日本建築学会構造系論文集，第 592 号，pp.113～119，2005.6
11) 川崎健二郎，真下和彦：複合炭素繊維補強コンクリート造円筒殻の耐力，破壊形態および振動特性　－集中荷重による破壊実験に対する検討－, 日本建築学会構造系論文集, 第 609 号, pp.113～120，2006.11
12) 川崎健二郎，真下和彦：修復された補強コンクリート造円筒殻の耐力，ひび割れ形態と振動特性, 日本建築学会構造系論文集, 第 628 号, 2008.6
13) 長松昭男：モード解析入門，コロナ社，pp.66～68，1993.7