

繊維混入鉄筋コンクリート造円筒殻の修復耐力

井上 嘉之^{*1} 佐伯 正夫^{*1} 滝原 伸弥^{*1} 田中 正史^{*2} 真下 和彦^{*3}

Retrofitted Strength of Mixed-In Fiber and Steel Reinforced Concrete Cylindrical Shells

by

Yoshiyuki INOUE^{*1}, Masao SAEKI^{*1}, Shinya TAKIHARA^{*1}, Masafumi TANAKA^{*2}
and Kazuhiko MASHITA^{*3}

(Received on August 31, 2010 and accepted on January 17, 2011)

Abstract

Concerning with the conventional steel reinforced concrete shell, some serious problems such as, carbonation in concrete with joints or cracks, low strength against tensile force, etc. have been shown. However newly innovated materials for reinforcement on a concrete shell in order to be able to improve the above problems occurred recently. These are glass fiber chips, carbon fiber chips, carbon fiber sheets, etc. Up to now, the retrofitted strength of concrete shells focusing on both mixed-in fiber and steel reinforcements has hardly been reported and evaluated. In this paper, newly focusing on both mixed-in fiber and steel reinforcements, the retrofitted strength of reinforced concrete cylindrical shells was investigated, both experimentally and numerically. This paper treats the case of shell structure damaged only within a local region. Three kinds of retrofits consisting of precut retrofit, filler retrofit and sheeting retrofit to the damaged shells were adopted. An experimental study was conducted on small-scale models under a one-point concentrated load. Furthermore a numerical study was conducted by material and geometrical nonlinear FEM analysis considering fluctuations of the shell thickness. The retrofitted strength of mixed-in fiber and steel reinforced concrete shells was discussed based on the results of experiments and numerical analyses.

Keywords: Retrofitted strength, Concrete shell, Mixed-in fiber

1. 序論

本研究の主目的は、繊維混入鉄筋コンクリート造円筒殻を対象として、シェル耐力に修復が及ぼす影響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、補強コンクリート造円筒殻の耐力およびその修復耐力に関して、研究報告を行ってきた^{1,2,3)}。補強材料としては、鉄筋、炭素短繊維、ビニロン短繊維などを対象とし、修復方法としては、修復 P・F・S による耐力の報告を行ってきた⁴⁾。以上の研究より、従来の鉄筋コンクリート(以後、本論では RC と略記する)造および炭素短繊維補強コンクリート(以後、本論では CC と略記する)造において、上記の修復効果を明らかにした。しかしながら、上記の RC 造円筒殻の研究においては、板厚の薄いシェルを想定して、鉄筋を単層配筋としており、面外の曲げ応力に対する抵抗に乏しいことが懸念される。一方、炭素短繊維もしくはビニロン短繊維などを混入した補強コンクリート造円筒殻の研

究においては、非弾性領域の脆弱性が懸念される。

以上を考慮し、本研究においては、単層配筋状態のコンクリート引張強度を改善することを意図して、板厚の薄い RC 造円筒殻に繊維を混入し、新規に、繊維混入鉄筋コンクリート(以後、本論では F-RC と略記する)造円筒殻を提案し、この F-RC 造円筒殻の耐力に修復が及ぼす影響を究明する。なお、混入する繊維は、炭素短繊維とした。これまで、F-RC 造に関する報告は、梁を対象とした鹿毛らによる⁵⁾、曲げ特性を取り扱った研究を除くと殆どなされておらず、シェル構造に至っては全く報告されていない。

以上より、本研究では、F-RC 造円筒殻を対象として、シェル中央部への 1 点集中荷重による載荷実験を行い、更にこれに対応する非線形数値解析を行い、両者の結果を比較して、修復耐力を明らかにする。

2. 実験の概要

F-RC 造円筒殻の修復耐力を検討するため、小型実験供試体を作製した後、静的載荷実験を行った。

供試体寸法は Fig.1 に示す通り、水平投影面において一辺 500mm の正方形であり、設計板厚を 8mm(= T_0)、ラ

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

イズ・スパン比を 1/5 と設定した。これは曲率半径 362.5mm, 全開角 87.1° に相当する。載荷荷重は, 油圧式万能試験機(UH-1000kN)を用いて, シェル面中央部への 1 点集中荷重とした。支持方法はアーチの水平スラストを拘束するため, 4 点からなる対辺支持とした。この修復部は, 供試体毎に 2 箇所設け, 水平投影面においてスパン中央を通る線上の両端に配置した。

本実験で使用した炭素短繊維, 鉄筋, 無収縮モルタルおよび炭素繊維シートの材料諸元をそれぞれ Table 1(a-d)に示した。コンクリートの調合は, セメント対骨材(最大粒径 1.2mm)の重量比を 1 対 1.5, 水セメント比を 47%とした。炭素短繊維は, コンクリートとの富調合を避けるため, セメント重量に対して 0.5%を混入した。

供試体名の文字構成, コンクリートの材料諸元, 施工板厚における平均値および標準偏差値を Table 2 に示す。損傷および修復の無い供試体を健全な供試体と定義し, シートの有無により, 無しを N, 有りを R で示す。

本研究における修復は, 修復 P(Precut Retrofit), 修復 F(Filler Retrofit)および修復 S(Sheeting Retrofit)の 3 種である。修復 P は, 損傷部の応力集中を避けるため, 当該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。この修復部の寸法は, 水平投影面において X 方向 62.5mm, Y 方向 125mm と設定した。修復部の隅角部は, 応力集中を避けるために, 半径 2mm の曲面加工を施した。修復 F は, 修復 P の適用後, 当該領域に無収縮モルタルを充填して仕上げる方法として定義した。修復 S は, 修復 F の適用後, シェル上下面の全領域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。これらの修復を施した時のシェル耐力を修復耐力と定義した。また, 上記の修復を施した際に, 修復部内に鉄筋が有り無しの場合を設定し, シェル耐力に及ぼす影響を検討に加えた。鉄筋有りを設定した理由は, 以下の通りである。修復部のコンクリートにひび割れ等の損傷が発生した後, 当該領域の鉄筋は健全な状態で保持され, 損傷を受けたコンクリートのみを除去する場合, もしくは, 当該領域に配筋された鉄筋も損傷を受け, これらの鉄筋を溶接などの手段を用いて, 再配筋した上で, 修復作業に着手する場合を想定しているためである。鉄筋無しに設定した理由は, 上記の鉄筋有りの場合との比較を行う

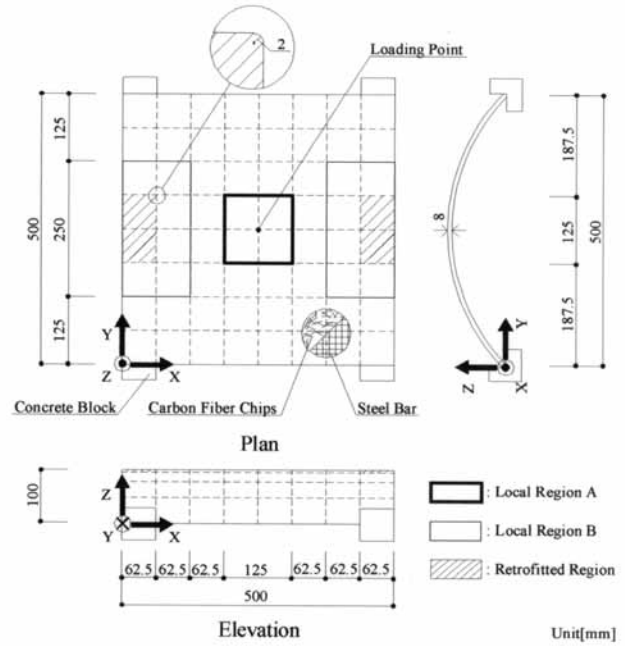


Fig.1 Shell Model

Table 1 Material Property
(a) Carbon Fiber Chip

Type	Fiber Length [mm]	Fiber Diameter [μ m]	Tensile Strength [GPa]	Modulus of Tensile Elasticity [GPa]	Elongation [%]	Density [N/mm^3]
K661	18	17	1.77	180	1.0	1.90×10^{-5}

(b) Steel Bar

Steel Diameter [μ m]	Modulus of Tensile Elasticity [GPa]	Tensile Strength [MPa]
1.1	203	368

(c) Shrinkage-Compensating Mortar

Young's Modulus [GPa]	Compressive Strength [MPa]	Tensile Strength [MPa]	ν
29.5	67.5	3.82	0.230

(d) Carbon Fiber Sheets

Type	Fiber Diameter [μ m]	Tensile Strength [GPa]	Modulus of Tensile Elasticity [GPa]	Elongation [%]	Density [N/mm^3]
TR3110MS	17	1.12	71.6	1.5	1.03×10^{-5}

Table 2 Material Property of Concrete and Shell Thickness

Specimen	First Capital	Second Capital	Material Property of Concrete				Shell Thickness[mm]						
	Retrofit State N : None R : Sheet Reinforced P : Precut Retrofit F : Filler Retrofit S : Sheet Reinforced	Steel Reinforcement at Retrofitted Region 0 : None 1 : Steel	E [GPa]	F _c [MPa]	F _t [MPa]	ν	Average			Standard Deviation			
							Global		Local		Global		Local
							T _{aG}	T _{sA}	T _{sB}	T _{sG}	T _{sA}	T _{sB}	
N	N	-	21.2	44.1	3.1	0.222	11.1	12.7	11.9	1.7	1.1	1.9	
R	R	-	24.4	42.5	3.3	0.236	10.9	11.8	11.1	1.6	0.4	1.7	
P0	P	0	25.3	39.5	2.7	0.219	11.0	12.0	11.7	1.5	0.7	1.3	
P1	P	1	24.0	48.3	3.0	0.240	10.3	11.8	11.0	1.5	1.0	1.5	
F0	F	0	20.9	47.5	2.8	0.205	12.0	12.2	12.2	1.6	0.5	1.6	
F1	F	1	24.4	42.5	3.3	0.236	10.1	11.0	10.4	1.3	0.5	1.9	
S0	S	0	25.3	39.5	2.7	0.219	11.7	11.9	11.8	1.6	0.4	1.6	
S1	S	1	22.7	39.5	2.9	0.239	11.1	11.9	11.9	1.4	0.7	1.2	
Average			23.0	43.9	3.0	0.225	11.0	12.0	11.5	1.6	0.7	1.6	
Standard Deviation			1.8	3.6	0.2	0.014	0.6	0.5	0.6	0.1	0.3	0.3	

Note) E: Young's Modulus, F_c: Ultimate Compressive Strength, F_t: Ultimate Tensile Strength, ν : Poisson's Ratio
T_{ij} (i=a, s, j=G, A, B), where the a and s show the Average and the Standard Deviation and the G, A and B show Global, Local A and B Regions

ためである。

修復部を作製するに当たり、型枠作製においてコンクリート打設を行う前に、型枠の当該部分に対して、両面接着布テープを用いてスタイロフォームを貼り付けた。

実験供試体の修復改善効果を比較検討する上でシェル耐力に影響を与える領域を設定する。まず、シェル全面における領域を全面領域と定義する。次に載荷点を中心としたシェル全面の 1/16 領域および修復部を含むシェル全面の 1/8 領域を限定領域 A および限定領域 B と定義する。以上の領域を Fig.1 に図示した。

3. 数値解析の概要

3.1 非線形有限要素解析

本研究において、F-RC 造円筒殻の耐力を理論的に検討するため、材料および幾何学的非線形有限要素解析を使用した。変位関数として、双 2 次 Lagrange 型を採用し、板厚方向に 10 層分割を行った 9 節点アイソパラメトリック系積層シェル要素を用いた。

本研究で使用した数値解析における材料構成則を Fig.2(a-d) に示した。同図(a)にコンクリートの応力-ひずみ関係を示し、同図(b)にコンクリートの降伏曲面を示す。同図(c)および(d)に、それぞれ鉄筋および炭素繊維シートの応力-ひずみ関係を示した。また、圧縮挙動はコンクリートの終局圧縮ひずみを 0.003 と設定し、この値を超えた場合に圧縮破壊と判定した。鉄筋のモデル化においては、応力-ひずみ関係にバイリニア型を採用した。

解析モデルの要素分割は、水平投影面において X 方向に 8 分割および Y 方向に 8 分割の合計 64 要素に分割した。炭素繊維シートのモデル化は、文献(6)に基づき、X・Y 方向で剛性を分離させ、各繊維方向の軸剛性を考慮した数値モデルを採用した。

3.2 計算の概要

本研究では施工板厚および材料特性の変化を考慮して 3 種の数値解を設定した。これらは、数値解 S、数値解 D および数値解 A である。数値解 S (Solution S) は、供試体のコンクリートの材料定数を一定値 ($E = 20 \text{ GPa}$, $F_c = 45 \text{ MPa}$, $F_t = 3 \text{ MPa}$, $\nu = 0.200$) に、板厚を設計シェル板厚 T_0 に設定した解である。数値解 D (Solution D) は、各供試体の施工シェル板厚の実測値を有限要素の各節点に反映させた板厚および各供試体の材料試験結果と対応した材料諸元を採用した解である。数値解 A (Solution A) は、各供試体の施工シェル板厚の実測値の平均を有限要素の各節点に反映させた板厚および各供試体の材料試験結果と対応した材料諸元を採用した解である。なお、数値解析で用いたモデル名は、実験で用いたものと同一名とした。

4. 結果および考察

4.1 実験による耐力

実験より得た耐力 (P_{exp}) に関して、RC 造および CC 造に対して F-RC 造を比較し検討する。そのため、後述「4.2 耐力比補正による面内力の有効性に関する検討」の結果

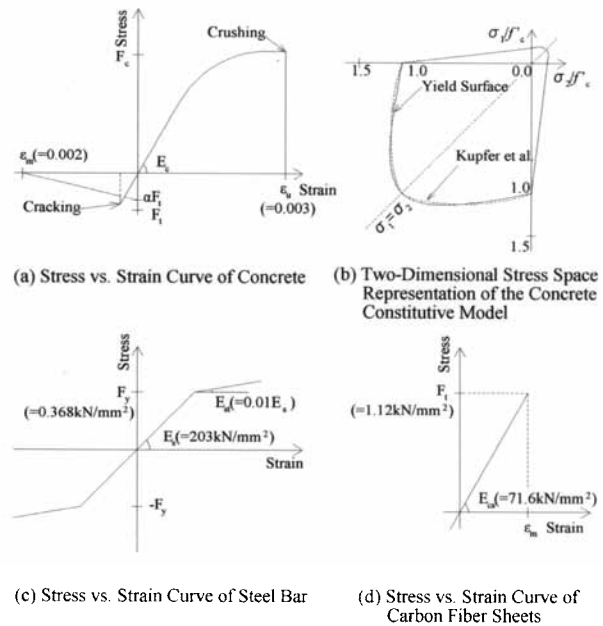


Fig.2 Constitutive Model

を考慮し、板厚の線形補正に基づく結果を示した。線形補正としては、全面板厚、限定板厚 A および B を対象として、検討を行った。これらの F-RC 造の各耐力 (P_u) から、RC 造 (文献 1) もしくは CC 造 (文献 4) の耐力 (P_{u0}) を差し引いた各値 $P_d = P_u - P_{u0}$ と上述の対応する P_{u0} との比として、耐力増大パラメータ r_{cr} を定義し、Table 3(a-c) に示した。同表(a)は、本実験における耐力および板厚比補正による耐力を示した。同表(b)は、文献(1)と(4)における実験耐力および同表(a)と対応した線形補正の結果を示した。同表内の供試体名は、文献(1)および文献(4)に対応して、供試体名を拡張子とし、それらのコンクリートの補強材料の相違に対応して表示する。これらは、RC と CC である。以上にに基づき耐力増大パラメータ r_{cr} を求め同表(c)に示した。同表(c)内の r_{cr} の添え字 (G1, LA1, LB1) は、板厚の区別 (全面板厚, 限定板厚 A, 限定板厚 B) に対応した値である。

最初に、健全な供試体の耐力を検討する。同表(c)より、F-RC 造による r_{cr} は、シート無しの場合において、RC 造と比較して 12% 増から 15% 増、CC 造と比較して 86% 増から 91% 増が示され、シート有りの場合において、RC 造と比較して 11% 減から 6% 減、CC 造と比較して 28% 減から 4% 増がそれぞれ示された。ここで、シート有りの RC 造および CC 造との比較において耐力の減少を示した理由は、F-RC 造の全面板厚と限定領域 B の板厚の標準偏差値が大きく、施工板厚の不均一性が起因しているものと考えられる。以上より、本研究のシート有りにおいては、RC 造および CC 造の耐力と比較して、F-RC 造の場合の優位性が認められない。しかしながら、F-RC 造の r_{cr} は、シート無しの場合に、RC 造と比較して 1 割程度、CC 造と比較して 8 割以上が、それぞれ示された。

次に、修復 P・F・S の供試体の耐力を検討する。同表(c)より、修復 P に関して、F-RC 造による r_{cr} は、RC 造と比較して 42% 増から 47% 増、CC 造と比較して 66% 増から 70% 増が示された。修復 F に関して、F-RC 造による耐力の増大は、RC 造と比較して 4% 減から 1% 増、CC

Table 3 (a) Experimental Strength Adjusted by Shell Thickness with 1st Order in this Paper

Specimen	P _{exp} [kN]	Pu1		
		P _{G1} [kN]	P _{LA1} [kN]	P _{LB1} [kN]
N	3.25	2.34	2.05	2.18
R	3.74	2.74	2.54	2.70
P0	2.99	2.17	1.99	2.04
P1	3.02	2.35	2.05	2.20
F0	3.15	2.10	2.07	2.07
F1	3.28	2.60	2.39	2.53
S0	3.59	2.45	2.41	2.43
S1	3.70	2.67	2.49	2.49

Note) P_{exp}: Experimental Strength, T_{ij} (i=a, j=G, A, B), where the a shows the Average and the G, A and B show Global, Local A and B Regions

Table 3 (b) Experimental Strength Adjusted by Shell Thickness with 1st Order in Ref. (1) and (4)

Specimen	P _{exp} [kN]	Pu0			Shell Thickness[mm]					
		P _{G1} [kN]	P _{LA1} [kN]	P _{LB1} [kN]	Average			Standard Deviation		
					Global	Local		Global	Local	
				T _{aG}	T _{aA}	T _{aB}	T _{sG}	T _{sA}	T _{sB}	
RC. N	2.67	2.05	1.83	1.91	10.4	11.7	11.2	1.7	0.8	1.8
CC. N	1.61	1.23	1.10	1.16	10.5	11.7	11.1	1.4	0.8	1.1
RC. R	4.06	3.01	2.85	2.87	10.8	11.4	11.3	1.4	0.6	1.0
CC. R	3.46	2.77	3.50	2.59	10.0	7.9	10.7	1.3	0.5	0.9
RC. P0	1.87	1.51	1.36	1.44	9.9	11.0	10.4	1.5	0.8	1.4
CC. P0	1.55	1.28	1.20	1.22	9.7	10.3	10.2	1.6	0.8	1.0
RC. F0	2.64	2.20	2.07	2.05	9.6	10.2	10.3	1.6	0.7	1.2
CC. F0	1.55	1.28	1.22	1.20	9.7	10.2	10.3	1.6	0.8	1.0
RC. S0	3.45	2.51	2.28	2.38	11.0	12.1	11.6	1.6	0.9	1.4
CC. S0	5.02	3.82	3.65	3.62	10.5	11.0	11.1	1.3	0.6	0.9

Note) P_{exp}: Experimental Strength, T_{ij} (i=a, j=G, A, B), where the a shows the Average and the G, A and B show Global, Local A and B Regions

Table 3 (c) Increased Strength Parameter r_{cr} Compared with Refs (1) and (4)

Compared Specimen	r_{cr}		
	r_{cr-G1}	r_{cr-LA1}	r_{cr-LB1}
N to RC. N	0.14	0.12	0.15
N to CC. N	0.91	0.86	0.88
R to RC. R	-0.09	-0.11	-0.06
R to CC. R	-0.01	-0.28	0.04
P0 to RC. P0	0.44	0.47	0.42
P0 to CC. P0	0.70	0.66	0.68
F0 to RC. F0	-0.04	0.00	0.01
F0 to CC. F0	0.64	0.70	0.72
S0 to RC. S0	-0.02	0.06	0.02
S0 to CC. S0	-0.36	-0.34	-0.33

造と比較して 64%増から 72%増が示された。修復 S に関して、F-RC 造による r_{cr} は、RC 造と比較して 2%減から 6%増、CC 造と比較して 36%減から 33%減が示された。

ここで、CC 造との比較において耐力の減少を示した理由は、コンクリートの圧縮強度 (CC. S0 の $F_c = 44.8\text{MPa}$: S0 の $F_c = 39.5\text{MPa}$) および引張強度 (CC. S0 の $F_t = 3.1\text{MPa}$: S0 の $F_t = 2.7\text{MPa}$) が小さいことに起因していると考えられる。以上より、修復 S に関しても、RC 造および CC 造の耐力と比較して、F-RC 造の場合の優位性が認められない。しかしながら、F-RC 造の耐力増大は、シート無しにおいて、特に修復 P の場合に、RC 造と比較して 4 割程度、CC 造と比較して 7 割程度がそれぞれ示された。

4.2 耐力比補正による面内力の有効性に関する検討

Table 4 に板厚と材料諸元を統一した数値解 S に基づいた耐力比補正結果を示す。最初に、健全な供試体に対する

る各供試体の全面板厚による板厚比を全面板厚比 T_G で示した。ここで、健全な供試体として、シート修復の無い場合に供試体 N を、シート修復の有る場合に供試体 R を、それぞれ採用した。同様に、各限定板厚 A・B を健全な供試体 N の限定板厚で除した値を限定板厚比 T_{LA} と T_{LB} で示した。同表は、上記の T_G および T_{LA} と T_{LB} に基づく耐力補正を示した。実験の健全な供試体に対する各実験供試体の耐力比を実験耐力比 E_0 で定義した。数値解 S の健全な供試体に対する各数値解 S の供試体の耐力比を数値解 S 耐力比 S_0 と定義した。ここで、健全な供試体として、シート無しの場合の実験供試体および数値解 S における N の耐力は、 $P_{N, exp} (= 3.25\text{kN})$ および $P_{N, num-S} (= 2.50\text{kN})$ であり、シート有りの場合の実験供試体および数値解 S における R の耐力は、 $P_{R, exp} (= 3.74\text{kN})$ および $P_{R, num-S} (= 5.70\text{kN})$ である。次に、3 種の修復の相違が実験と数値解 S の耐力に与える影響を確認するため、数値解 S 耐力比 S_0 に対する実験耐力比 E_0 を 0 次整合比 X_0 と定義

Table 4 Strength Ratio Adjusted by Shell Thickness for Global, Local A and B Regions

Strength Ratio	E_0	S_0	X_0	T_G	X_{G1}	X_{G2}	X_{G3}	T_{LA}	X_{LA1}	X_{LA2}	X_{LA3}	T_{LB}	X_{LB1}	X_{LB2}	X_{LB3}
P_{P0}/P_N	0.92	0.99	0.93	0.99	0.94	0.95	0.96	0.94	0.99	1.06	1.12	0.98	0.95	0.97	0.99
P_{P1}/P_N	0.93	1.02	0.91	0.93	0.99	1.06	1.15	0.93	0.98	1.06	1.14	0.93	0.99	1.07	1.16
P_{F0}/P_N	0.97	0.98	0.98	1.08	0.91	0.85	0.78	0.96	1.02	1.07	1.11	1.02	0.96	0.94	0.92
P_{F1}/P_N	1.01	1.06	0.95	0.91	1.05	1.15	1.27	0.87	1.10	1.27	1.47	0.87	1.09	1.25	1.43
P_{S0}/P_R	0.96	0.99	0.96	1.07	0.90	0.84	0.79	1.01	0.96	0.95	0.95	1.02	0.94	0.92	0.90
P_{S1}/P_R	0.99	1.03	0.96	1.02	0.94	0.92	0.91	1.01	0.95	0.94	0.94	1.04	0.92	0.89	0.86
RMS-0	-	-	0.05	-	0.07	0.11	0.15	-	0.02	0.06	0.12	-	0.04	0.05	0.06
STDEV-0	-	-	0.03	-	0.02	0.08	0.13	-	0.02	0.01	0.01	-	0.00	0.02	0.05
RMS-1	-	-	0.07	-	0.04	0.12	0.22	-	0.07	0.20	0.35	-	0.07	0.18	0.33
STDEV-1	-	-	0.03	-	0.04	0.06	0.09	-	0.08	0.15	0.24	-	0.07	0.13	0.20

して示した。上記の0次整合比に対して、全面板厚比 T_G による線形・2次・3次補正を求め、シェル全面領域に対する整合比を1・2・3次整合比と定義し、それぞれ X_{G1} ・ X_{G2} ・ X_{G3} で表示した上で、各値を求めた。同様に、限定領域 A・B に対する1・2・3次整合比を、それぞれ X_{LA1} ・ X_{LA2} ・ X_{LA3} 、 X_{LB1} ・ X_{LB2} ・ X_{LB3} で表示し、各値を求めた。以上を纏めて各整合比を次式より求めた。

$$X_0 = E_0 / S_0,$$

$$X_{Gm} = X_0 / (T_G)^m, (m = 1, 2, 3)$$

$$X_{L,im} = X_0 / (T_{L,i})^m, (i = A, B, m = 1, 2, 3) \quad (1a-c)$$

耐力比補正を評価するために、耐力の偏差に基づく2乗平均平方根(RMS: Root Mean Square)、標準偏差(STDEV: Standard Deviation)を同表に示した。ここで、RMSはj次(j=0, 1, 2, 3)整合比からの各偏差に基づく2乗平均平方根を示す。なお、実験と数値解Sが一致した場合に、上記のj次整合比のいずれかの値は、1.0となり、RMSでは0.0となる。上記のRMS, STDEVに対して、拡張子を加えて表示する。この拡張子は1および0であり、修復部の鉄筋の有無に対応している。同表において、シート有りの場合は、修復部の鉄筋の有無に対して、それぞれ1供試体のみであるため、特にRMSおよびSTDEVは求めない。

修復P・Fの場合は、複数の供試体があるため、RMSで比較を行う。領域毎の最適値は、鉄筋無しのRMS-0で0.07(X_{G1})、0.02(X_{LA1})、0.04(X_{LB1})を、鉄筋有りのRMS-1で0.04(X_{G1})、0.07(X_{LA1})、0.07(X_{LB1})を示した。これより、RMS-0で0.02(X_{LA1})、RMS-1で0.04(X_{G1})が最適値を示し、限定板厚比および全面板厚比による線形補正、即ち面内力による補正が有効であることが確認された。この理由は、F-RC造とした場合、シェルの剛性が増加し、板厚の変動を受け難いことが考えられる。修復Sの場合は、鉄筋無しで0.96(X_0)を、鉄筋有りで0.96(X_0)を示した。即ち、板厚比による補正の必要が無い0次整合比が最適値を示した。

更に、修復部の鉄筋の有無により、数値解Sの修復耐力を比較すると、修復Pで3%増、修復Fで8%増および修復Sで4%増が示された。今回のように局所的な修復領域を対象とした場合、修復部の鉄筋による耐力増加率は微小であるものの、修復Fの耐力増加率が最も大きい。実験値においては、耐力比補正を行う前の状態で、修復Pで1%増、修復Fで4%増および修復Sで3%増が示

れた。これにより数値解Sにおける3種の修復耐力の中で修復Fの耐力増加率が最大を示す傾向は、実験値においても確認されたものと考えられる。

4.3 施工板厚を考慮した数値解の耐力

実験耐力と数値解Aおよび数値解Dによる耐力を比較してFig.3に示す。ここで、数値解析の最大耐力 P_{num} から実験の最大耐力 P_{exp} を差し引いた誤差耐力 $P_{diff} (= P_{num} - P_{exp})$ と実験の最大耐力 P_{exp} との比を最大耐力誤差比 $r_{err} (= P_{diff} / P_{exp})$ と定義した。

同図より、N, P0, P1, F0 および F1 において、それぞれ数値解Dの誤差比が、5.6%増、1.9%減、5.8%減、6.2%増および4.0%減となり、数値解Aと比較して実験値との良好な対応が示された。これは、施工板厚の変動を忠実に再現したことに起因するものと考えられる。健全な供試体、修復Pおよび修復Fでは、数値解Dと実験値との良い対応が示されたのに対し、R, S0 および S1 では、数値解Aにおいて、誤差比がそれぞれ4.9%増、0.9%増および2.9%減となり、数値解Aと実験値との良好な対応が示された。数値解Aは、分布ひび割れモデルを採用しており、面外せん断破壊の正確な表現は困難であるが、耐力に関して、実験値との比較的良い対応が示され、シート修復により板厚の均一化効果が確認された。以上より、実験および数値解による耐力から修復耐力が明示された。

4.4 荷重変位曲線

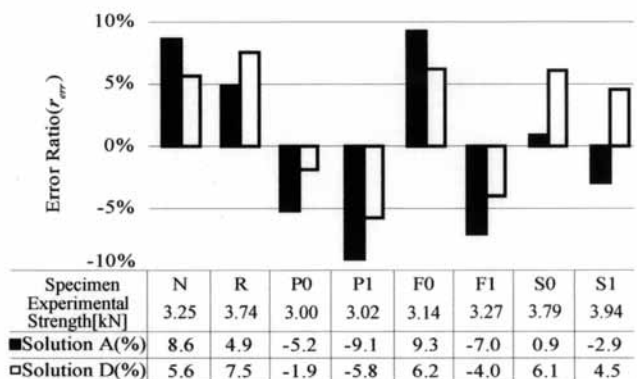


Fig.3 Strength Error Ratio to Experimental Strength

載荷荷重と載荷点直下の鉛直方向変位の関係を

Fig.4(a-h)に示した. 太い実線を実験値, 細い実線を数値解 A, 細い破線を数値解 Dとした.

最初に, 実験値における修復部の鉄筋の有無について考察する. 同図(c, d)より, 修復 P において, 初期剛性に大きな差異は認められないが, 鉄筋有りの場合は, 塑性変形量に若干の増大傾向が確認できる. 同図(e, f)より, 修復 F においては修復 P と同様に, 初期剛性に大きな差異は認められないものの, 鉄筋有りの場合は, 弾性範囲の増加が顕著である. 更に, 修復 P と比較して, 塑性変形量の増大が確認できる. 同図(g, h)より, 修復 S において, 鉄筋有りの場合は, 無しの場合と同様に最大耐力までほぼ直線的な耐力の増大が特徴的である. 次に, 同図(a)より, 健全な供試体 N は, 塑性変形量が大きく靱性的な挙動を示している. 最後に, 数値解との対応を検討すると, 健全な供試体 N, 修復 P および修復 F において, 数値解 D と実験値との良い対応が確認された. 一方, 修復 S に関して, 数値解 A は, 分布ひび割れモデルを採用しているため, 実験における面外せん断破壊の傾向を正確には表現できていないが, 数値解 A と実験値との比較的良い対応が示され, シート修復により板厚の均一化効果が確認された.

4.5 ひび割れ形態

載荷実験終了後, 目視により確認したシェル面のひび割れ形態およびシェル板厚の変動分布を Fig.5 に示した.

初めに, 修復部の鉄筋の有無について考察する. 修復 P の P0 と P1 を比較すると, P1 はシェル下面におけるひび割れ量が多いことを示している. これは, 塑性範囲の増大に起因するものと考えられる. 修復 F の F0 と F1 を比較すると, 修復 P の場合と同様の特徴が示された. 修復 S の S0 と S1 を比較すると, 両者共にシェル下面において, 載荷点を中心とした同心円状のひび割れ発生および載荷点直下の陥没破壊が特徴的である. この特徴は, CC 造の場合の報告とも類似している²⁾. これは, シェルの変形能力がシート修復により抑制され, 当該部分に面外せん断力を主体とした面外力による破壊が卓越したことに起因すると考えられる.

次に, 3 種の修復の比較に基づいて考察する. 健全な供試体と修復 P を比較すると, 修復 P はシェル全面のひび割れ量の増加が特徴的である. 修復 F と修復 P を比較すると, 修復 F はひび割れ量の減少傾向が確認できる. 修復 S と修復 F を比較すると, 修復 S は, 載荷点における面外せん断破壊が生じ, これに伴いひび割れ範囲の大幅な減少が示された. シート修復を施すことにより, 載荷点の近傍を除く領域におけるひび割れ発生を抑制する傾向が確認された.

5. 結論

F-RC 造円筒殻の載荷実験および数値解析を行い, 修復が耐力に与える影響を検討し, 以下の知見を得た.

- 1) 実験より得た耐力に関して, F-RC 造の耐力増大は, シート有りにおいては, RC 造および CC 造の耐力と比較して, 優位性が認められない. しかしながら,

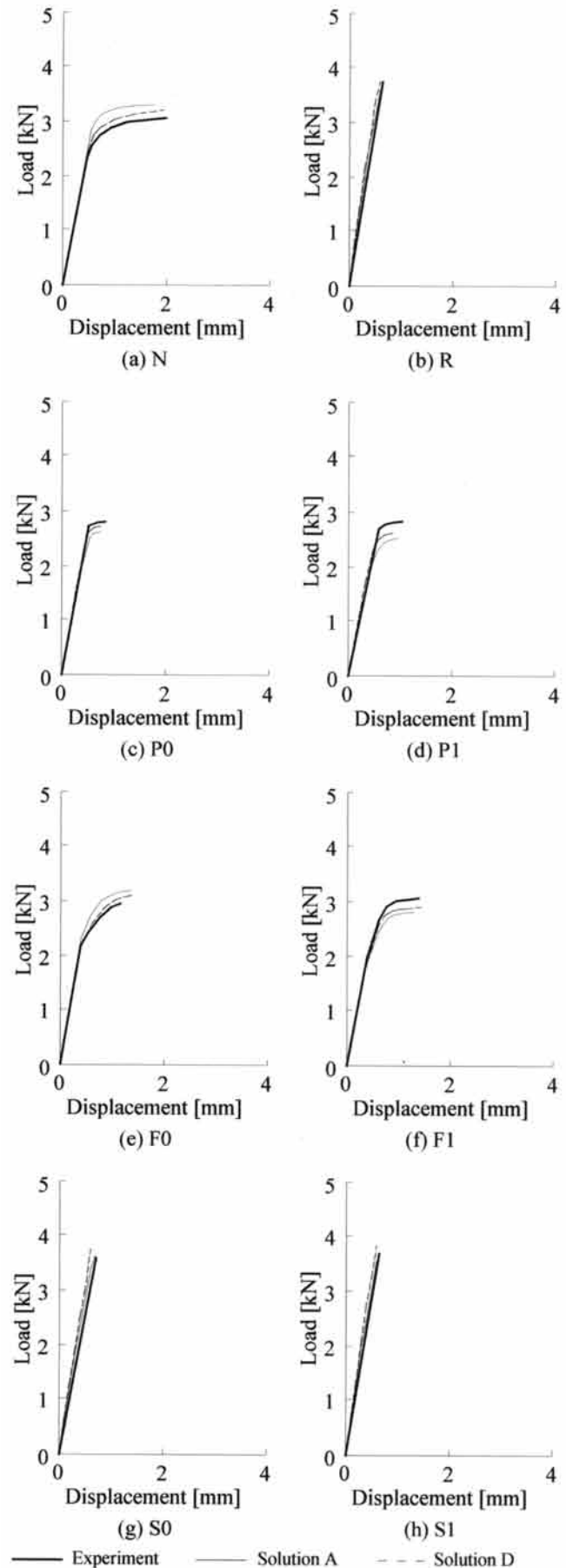


Fig.4 Load vs. Displacement Curves

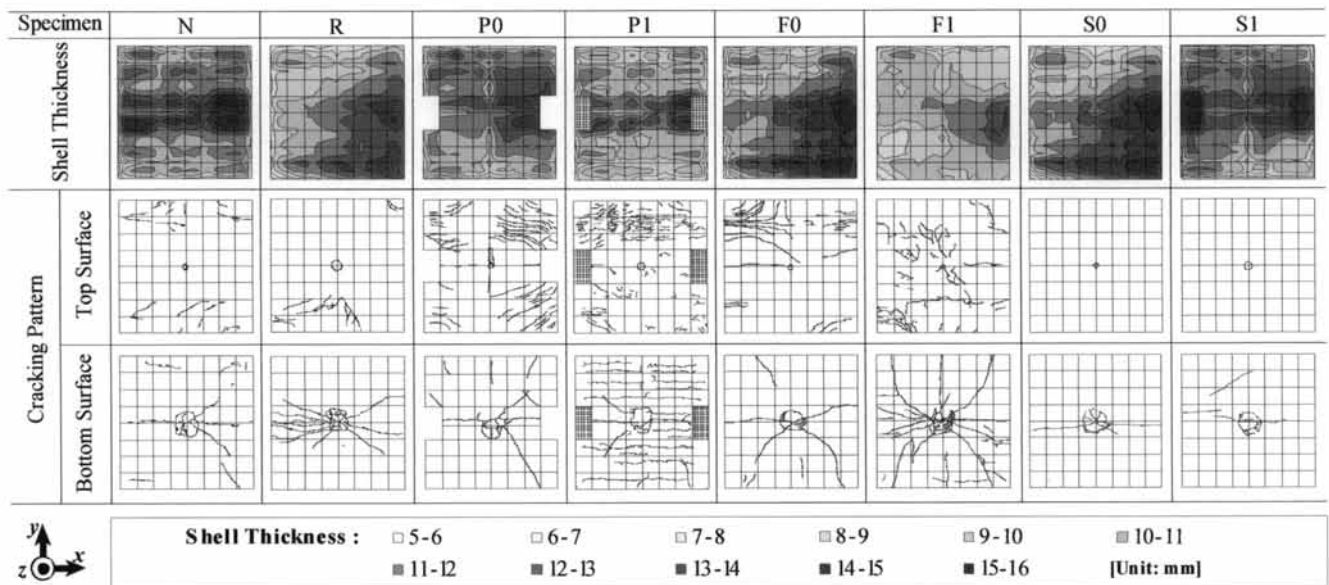


Fig.5 Cracking Pattern at Ultimate Strength

F-RC 造の耐力増大は、シート無しにおいて、特に修復 P の場合に、RC 造と比較して 4 割程度、CC 造と比較して 7 割程度がそれぞれ示された。

- 2) 実験値と数値解 S の耐力を比較し、載荷点直下および修復部近傍領域に基づく施工板厚比による耐力補正を行い、耐力の整合性を確認し、修復 P・F の RMS で、線形補正が有効であることを示した。
- 3) 修復部の鉄筋により、数値解 S の修復耐力において、修復 P で 3%増、修復 F で 8%増および修復 S で 4%増が示された。修復 F の耐力増大が最も大きく、この傾向は実験においても示された。
- 4) 実験と数値解における修復耐力の比較により、修復部の鉄筋の有無に関わらず、修復 P・F の場合に数値解 D と、修復 S の場合に数値解 A と比較的良い対応を示し、数値解の有効性が確認された。
- 5) 実験における載荷点直下の荷重変位曲線は、F-RC 造において、修復 S の耐力は最大耐力までほぼ直線的な挙動を示す特徴が確認された。
- 6) F-RC 造における 3 種の修復と対応したひび割れ形態の特徴が実験的に示され、修復部の鉄筋の有無がひび割れ形態に与える特徴を確認した。

謝辞

本論文の執筆にあたり貴重なご助言を頂きました、岩下大作氏に深謝致します。

参考文献

- 1) 田中正史, 真下和彦: 集中荷重を受ける単配筋鉄筋コンクリート造円筒殻の修復耐力, 日本建築学会構造系論文集, 第 655 号, pp.1681-1689, (2010.09).
- 2) 田中正史, 真下和彦: 炭素繊維シートにより修復された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 643 号, pp.1639-1648, (2009.9).
- 3) 真下和彦, 川崎健二郎, 渡邊寛明, 田中正史: 修復されたビニロン短繊維補強コンクリート造円筒殻の耐力, 東海大学紀要工学部, Vol.48, No.2, pp.25-34, (2008.09).
- 4) 田中正史, 岩下大作, 真下和彦: 修復領域を持つ短繊維補強コンクリート造円筒殻の耐力, 東海大学紀要工学部, Vol.49, No.1, pp.49-58, (2009.03).
- 5) 鹿毛忠継, 三井宜之, 村上聖, 坂井廣道: 鉄筋コンクリートはりにおける炭素短繊維補強コンクリートの積層補強効果 短炭素繊維補強コンクリートはりの曲げ特性に関する研究 その 1, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 419 号, pp.47-55, (1991.01).
- 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, (2005.06).