

特集 「自然災害にそなえる」

耐震補強工法の低強度コンクリート躯体への適用性

増田 安彦 勝俣 英雄
木村 耕三

Application of Seismic Retrofit Methods to R/C Structure Made of Low Strength Concrete

Yasuhiko Masuda Hideo Katsumata
Kohzou Kimura

Abstract

The “CRS-CL” Method is one of the most common seismic retrofit methods undertaken by OBAYASHI Corporation for column members, where the applicable concrete strength is in principle over 15N/mm^2 . However, it has been reported that concrete strengths of about 15% of R/C buildings that need seismic retrofit are less than this value. Thus, the purpose of this experimental study is to determine the structural performance of low-strength R/C columns retrofitted by the CRS-CL Method. The test results are as follows. Retrofitted R/C columns with a concrete strength of about 10N/mm^2 showed performances as calculated by standard formulas. Furthermore, the restriction of axial force of retrofitted columns is relaxed for such low strength concrete members.

概要

当社の代表的耐震補強技術であるCRS-CL[®]工法(CFRPシート巻き付けによる柱耐震補強工法)は、適用範囲として、対象とする建物のコンクリート強度が原則 15N/mm^2 以上であることとされている。一方、この下限値を下回る低いコンクリート強度からなる建物は、耐震補強が必要な建物全体の約15%にも達するとの報告があるにもかかわらず、十分な技術資料が整備されていなかった。このような背景から、本報告は、CRS-CL工法を対象に、圧縮強度が 10N/mm^2 程度の低強度コンクリート躯体への補強効果を把握することを目的として実施した実験について述べたものである。実験結果から、低強度コンクリート躯体に対してもCRS-CL工法は十分な補強効果を発揮し、せん断耐力は普通強度コンクリートを対象に定められた計算式を用いて評価可能であった。また、低強度コンクリートに対してCRS-CL工法を採用する場合に、軸力比制限緩和の可能性についても検討した。

1. はじめに

既存鉄筋コンクリート建物を耐震補強する際に、コンクリート強度が低く、既存技術の適用範囲(概ね圧縮強度が 13.5N/mm^2 以上が適用範囲)¹⁾では対応できない場合がある。この様な低強度コンクリートからなる建物数は、耐震補強が必要な建物全数の約15%にも達するとの報告⁶⁾があるにもかかわらず、圧縮強度 13.5N/mm^2 を下回る低強度コンクリート躯体の耐震補強に対する技術資料は極めて少ないのが現状である。

本論文は、このような背景から、当社の代表的耐震補強技術で、適用範囲が原則として圧縮強度 15N/mm^2 以上と定めているCRS-CL工法を対象に、圧縮強度 10N/mm^2 程度の低強度コンクリート躯体への適用性を把握することを目的として実施してきた実験結果^{7),8),9)}についてまとめたものである。

CRS-CL工法⁴⁾は、炭素繊維強化プラスチック(以下、CFRPと略記する)ストランドまたはCFRPシートを巻き付ける柱の耐震補強工法であるが、ここでは特に、CFRPシートの巻き付け補強を対象とした。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

Table 1 に試験体概要を示す。実験は4シリーズよりなる。すなわち、せん断柱シリーズ(LcS)、極脆性柱シリーズ(LcG)、付着割裂柱シリーズ(LcB)、高軸力シリーズ(LcC)である。LcSおよびLcBシリーズは、無補強の場合の破壊性状がそれぞれせん断破壊および付着割裂破壊を生じる柱を対象とし、LcGシリーズは耐震診断基準⁵⁾で定義される極脆性柱を、LcCシリーズはコンクリート強度が低強度であったために過度な軸力が柱に作用する場合を想定し、それぞれCFRPシートの補強効果を調べることを目的としている。

各シリーズとも試験体数は3体で、主なパラメータはCFRPシート補強量とし、無補強、補強量少(ゼブラ状補強)、補強量多(2層または3層巻き補強)とした。目標としたコンクリート強度は、LcSおよびLcGシリーズは $F_c=9\text{N/mm}^2$ 、LcBおよびLcCシリーズは $F_c=10\text{N/mm}^2$ である。なお、Table 1 中の軸力比 $\eta=N/bDF_c$ には、この目標強度を用いている。Fig. 1 に試験体断面を、Fig. 2 に配筋例を、Fig. 3 にCFRPシート補強の詳細例を示す。

Table 1 試験体概要
Outline of Specimens

シリーズ	試験体	b×D (mm)	h0 (mm)	h0/D	主筋 (p _g %)	帯筋 (p _w %)	CFRPシート補強筋比 r _{p_w} (%)	軸力比 η	
LcS	LcS00	400×400	1250	3.125	16-D19 (2.87%)	2-φ6@60 (0.23%)	0	0.34	
	LcS03						0.028		
	LcS11						0.110		
LcG	LcG00		600	1.5	12-D19 (2.15%)	2-φ6@150 (0.09%)	0		
	LcG03						0.028		
	LcG17						0.167		
LcB	LcB00		800	2.0	20-D22 (1.00%)	2-D6@60 (0.27%)	0		
	LcB03						0.028		
	LcB17						0.167		
LcC	LcC00		1250	3.125	8-D16 (4.84%)	2-D6@60 (0.27%)	0		0.65
	LcC03						0.028		
	LcC17						0.167		

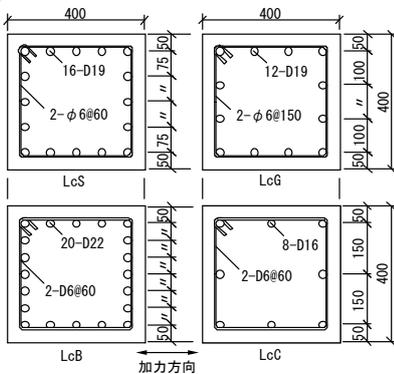


Fig. 1 試験体断面
Sections

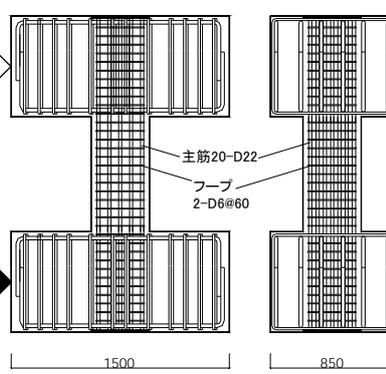


Fig. 2 試験体形状と配筋例 (Lcbシリーズ)
Configuration and Reinforcement

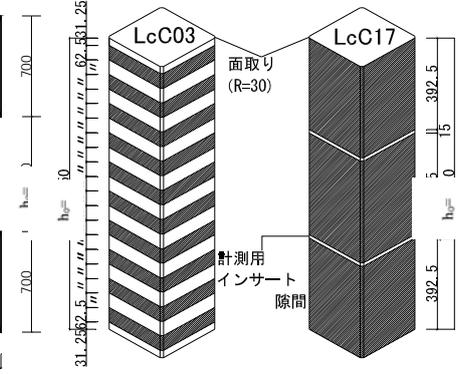


Fig. 3 CFRPシート補強例 (LcCシリーズ)
CFRP-Sheet Reinforcement

2.2 加力方法

加力は定軸力正負交番繰り返し逆対象荷重とし、変位制御で実施した。ただし、LcG、LcB シリーズは、まず荷重制御で $Q = \pm 100 \text{ kN}$ を載荷した。載荷履歴は LcG シリーズを除き、部材角 $R = \pm 1/2000$ (LcS シリーズは除く)、 $R = \pm 1/1000$ を 1 サイクル、 $R = \pm 1/500$ 、 $R = \pm 1/250$ 、 $R = \pm 1/125$ 、 $R = \pm 1/83$ 、 $R = \pm 1/63$ (LcS シリーズのみ)、 $R = \pm 1/50$ 、 $R = \pm 1/36$ 、 $R = \pm 1/25$ 、 $R = \pm 1/15$ (rad.) を各 2 サイクルとした。LcG シリーズは、部材角 $R = \pm 1/480$ を 1 サイクル、 $R = \pm 1/240$ 、 $R = \pm 1/120$ 、 $R = \pm 1/72$ 、 $R = \pm 1/60$ 、 $R = \pm 1/40$ (rad.) を各 2 サイクルとした。最大耐力の 80% 以下となったサイクルの正負 1 回目のサイクルで水平加力を終了した。なお、本論文では、部材角 R (=水平変形量/柱内のり高さ) により実験、考察の記述を統一する。

軸力比は、Table 1 に示すように、LcC シリーズを除き、 $\eta = 0.34$ と高めに設定した。高軸力の LcC シリーズは、建物の設計強度よりもコンクリート強度が低強度であったことを想定して、通常のコンクリート強度レベルにおいて CFRP シート補強が対象とする軸力比よりも高めの $\eta = 0.65$ に設定した。

Table 2 使用材料の特性
Material Properties

コンクリート				
シリーズ	LcS	LcG	LcB	LcC
圧縮強度 F_c (N/mm ²)	12.0	11.3	8.7	10.6
ヤング係数 E_c (N/mm ²)	13500	12200	16400	17600
鉄筋				
呼び名	降伏強度 σ_y (N/mm ²)	ヤング係数 E_s (N/mm ²)	引張強度 σ_u (N/mm ²)	伸び (%)
D22	338	1.94×10^5	512	22.2
D19	320	2.01×10^5	503	20.0
D16	318	1.85×10^5	477	18.6
D6	341	1.84×10^5	499	19.8
φ6	280	2.23×10^5	446	-
CFRPシート				
	目付量 (g/m ²)	設計厚さ (mm)	規格引張強度 (N/mm ²)	規格ヤング係数 (N/mm ²)
CFRPシート	200	0.111	3400	2.30×10^5

2.3 使用材料

試験体に使用した低強度コンクリートの調合は2種類である。LcS、LcGシリーズでは水セメント比160%で、軽量I種コンクリートを、LcB、LcCシリーズでは水セメ

Table 3 実験結果一覧
Test Results

シリーズ	試験体	Qc	Qsc	Qy	Qsy	Qu	δu	破壊モード	Qu計1	Qu計2	Qu計3	Qu計4	実/計
LcS	LcS00	113	218	(#203)	225	244	6.4	S	242	211	252	382	1.16
	LcS03	174	270	(240)	—	278	12.0	S	268	298	260	382	1.07
	LcS11	観察不可	269	#346	—	353	12.0	F→S	321	435	285	382	0.92
LcG	LcG00	158	242	(#-229)	(-261)	282	4.2	S	293	206	278	688	1.37
	LcG03	219	295	(#323)	(-311)	343	4.2	S	327	264	284	688	1.30
	LcG17	観察不可	340	(#443)	—	477	8.3	S	415	432	314	688	1.10
LcB	LcB00	163	159	(#186)	(185)	193	6.3	B, S	331	192	231	938	1.01
	LcB03	172	174	(#185)	—	222	12.5	B, S	354	263	237	938	0.94
	LcB17	観察不可	194	(#215)	—	277	12.5	B	432	342	268	938	1.03
LcC	LcC00	178	—	#186	—	213	4.0	F	278	211	228	167	1.28
	LcC03	177	—	#160	(#-32.4)	222	4.0	F	303	297	236	167	1.33
	LcC17	観察不可	—	#223	(#-26.1)	285	8.0	F	384	411	274	167	1.71

Qc: 曲げひび割れ荷重, Qsc: せん断ひび割れ荷重, Qy: 主筋降伏荷重, Qsy: 帯筋降伏荷重, Qu: 最大耐力, δu : 最大耐力時変位, 破壊モード: S(せん断), B(附着), F(曲げ), F→S(曲げ降伏後せん断), B, S(附着、せん断複合型), Qu計1: 荒川mean式(1)式, Qu計2: 終局指針式(2)式, Qu計3: 附着強度式(3)式, Qu計4: 曲げ強度時せん断力(4)式, 実/計: 計算値にはCRS-LC工法設計施工指針に応じて計算値2~計算値4のうち破壊モードに応じた計算値(複合型は小さいほう)を用いた。単位: 荷重はkN, 変位はrad($\times 10^{-3}$), ()内の数字は最大耐力以後を示す。#は圧縮降伏を示す。

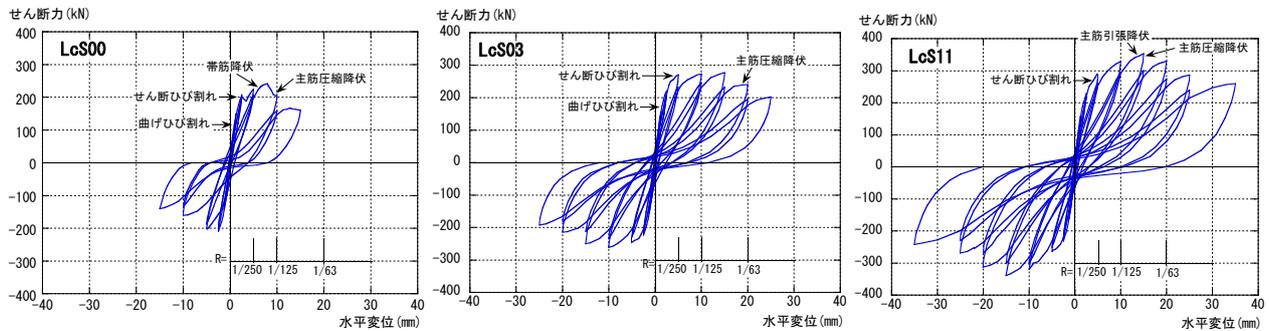


Fig. 4 LcSシリーズの柱せん断力-水平変位関係
Shear Force - Horizontal Deformation Relationship of Specimens on LcS-Series

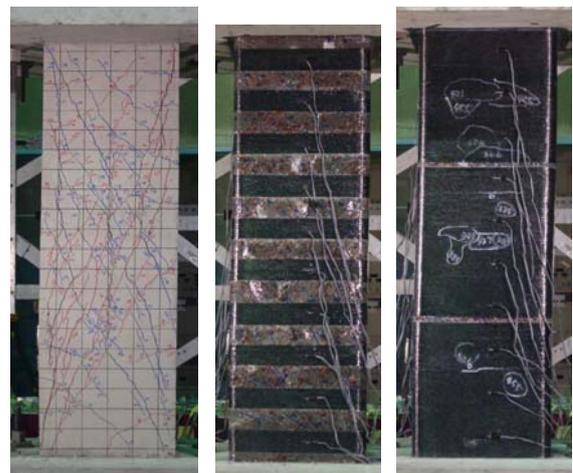
ント比155%の普通コンクリートとした。打設時の材料分離を防止するために前者ではフライアッシュ(II種)を、後者は石灰石微粉末を混和材として使用した。Table 2に使用材料の特性を示す。コンクリート強度はほぼ目標強度が得られたが、LcS, LcGシリーズではやや高めであった。コンクリートのヤング係数がLcS, LcGシリーズとLcB, LcCシリーズで大きく異なるが、これは前者のコンクリートの粗骨材に軽量骨材を用いたことによる。

3. 実験結果

実験結果一覧をTable 3に、シリーズごとに柱せん断力-水平変形関係をFig.4~7に、载荷終了時の試験体写真をPhoto.1~4に示す。

3.1 せん断柱シリーズ(LcSシリーズ)の破壊経過

LcS00, LcS03 試験体はR=1/1000のサイクルで曲げひび割れ, R=+1/250のサイクルで、せん断ひび割れが発生した。LcS00 試験体はR=-1/500で負側最大耐力に達し, R=+1/125サイクル中に正側最大耐力に達した。この最大耐力時に試験体正面中央部のフープが降伏し, R=



LcS00 LcS03 LcS11
Photo 1 LcSシリーズ载荷終了時試験体写真
Final State of Specimens on LcS-Series

+1/125で主筋が圧縮降伏した。LcS00 試験体は最大耐力以降せん断ひび割れが大きく広がり, 耐力低下が著しく見られた。LcS03 試験体はR=-1/125で負側最大耐力に達し, R=+1/83で正側最大耐力に達した。その後正負共

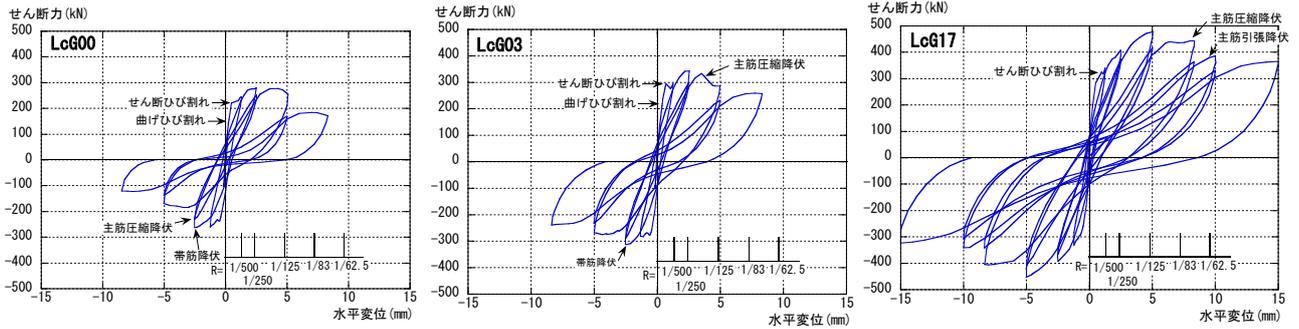


Fig. 5 LcGシリーズの柱せん断力-水平変位関係

Shear Force - Horizontal Deformation Relationships of Specimens on LcB-Series

に緩やかに耐力は低下し、 $R=+1/63$ サイクルで主筋が引張降伏、 $R=-1/50$ で圧縮降伏した。LcS03 試験体についても最大耐力後せん断ひび割れが進展した。両試験体共に最大耐力時に主筋の引張降伏は観察されなかった。

LcS11 試験体については $R=\pm 1/500$ の 2 サイクル目までは大きな変化は見られなかったが、 $R=+1/250$ サイクル中、鈍い音と共に水平力が一時的に低下した。この時にせん断ひび割れが生じたものと推定した。その後、 $R=+1/83$ サイクルで柱右上部に、 $R=-1/83$ サイクルで柱左上部に CFRP シートの浮きが発生した。このサイクルで正負共に最大耐力に達した。この後シートの浮きは進展していき、 $R=+1/50$ サイクルで柱正面にも発生した。また正側最大耐力に達する直前で主筋が引張降伏し、最大耐力時には圧縮降伏も確認された。正負荷荷共に LcS03 試験体よりもさらに緩やかに耐力は低下した。なお、フープの降伏は観察されなかった。破壊モードは LcS00、LcS03 試験体はせん断破壊、LcS11 試験体は曲げ降伏後のせん断破壊と推定される。なお、いずれの試験体も CFRP シートの破断は生じなかった。

3.2 極脆性柱シリーズ(LcGシリーズ)の破壊経過

LcG00, LcG03 試験体は $R=1/480$ サイクルで曲げひび割れ・せん断ひび割れが発生した。LcG00 試験体はその後せん断ひび割れが大きく進展した。LcG00, LcG03 試験体共に $R=1/240$ で最大耐力に達した。LcG00 試験体はこのサイクル中の負側最大耐力時に試験体正面中央部のフープが降伏したのち、主筋が圧縮降伏した。LcG03 試験体は $R=+1/120$ サイクル中に主筋が圧縮降伏すると共に大きく耐力低下し、せん断破壊を生じた。

LcG17 試験体は $R=+1/480$ サイクル中に大きな音と共に一時的に耐力が低下した。この時にせん断ひび割れが生じたと推定した。 $R=+1/72$ でシートの浮きが発生、その後シートの浮きは進展していった。

LcG17 試験体は $R=1/120$ で最大耐力に達し、その後緩やかに耐力が減少し、 $R=+1/72$ で主筋が圧縮降伏、 $R=+1/60$ で引張降伏した。なおフープの降伏は実験終了時まで見られなかった。破壊モードは LcG00, LcG03 試験体と同様にせん断破壊と推定した。

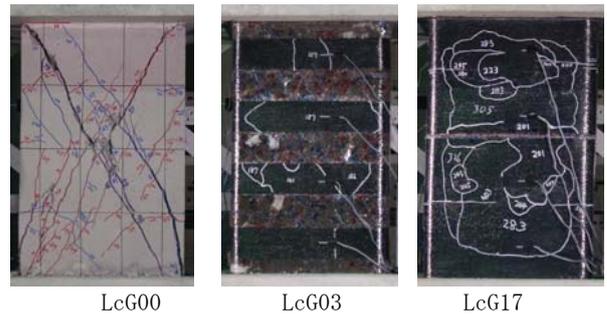


Photo 2 LcGシリーズ載荷終了時試験体写真
Final State of Specimens on LcG-Series

極脆性柱では、ゼブラ補強を施した LcG03 試験体の最大耐力は、無補強の LcG00 試験体を上回ったが、最大耐力以降の耐力低下を大きく改善するには至らなかった。シート 3 層で補強した LcG17 試験体では、最大耐力の大幅な向上が見られ、さらに最大耐力以降の耐力低下も緩やかであった。なお、いずれの試験体も CFRP シートの破断は生じなかった。

3.3 付着割裂柱シリーズ(LcBシリーズ)の破壊経過

LcB00 試験体は、 $R=1/1280$ で曲げひび割れ・せん断ひび割れが発生した。続いて $R=1/320$ サイクル中、主筋配列面に沿う付着ひび割れが発生した。 $R=1/160$ で最大耐力に達し、荷重変形関係上スリップが生じ始めた。 $R=1/80$ で主筋の圧縮降伏・フープの降伏が生じると共に、柱頭・柱脚付近の付着ひび割れが顕著に開き、除荷時にもその開きは戻らず、以降は緩やかな耐力低下を生じた。破壊モードは、せん断と付着の複合破壊と判定した。なお、CFRP シート破断は生じなかった。

LcB03 試験体は、 $R=-1/1280$ で曲げひび割れ、 $R=1/640$ でせん断ひび割れが発生し、 $R=1/320$ サイクル中、主筋に沿う付着ひび割れが発生した。続いて $R=1/160$ に上下部材端部で CFRP シートに浮きが生じた。 $R=1/80$ で正負共に最大耐力に達して LcB00 試験体と同様スリップが顕著となった。以降 CFRP シートの隙間からコンクリートが剥落し始め、 $R=1/53$ で主筋の圧縮降伏、 $R=1/32$ で主筋の引張降伏が確認され緩やかに耐力低下した。本試験体も LcB00 と同様に付着とせん断の複合破壊と判定し

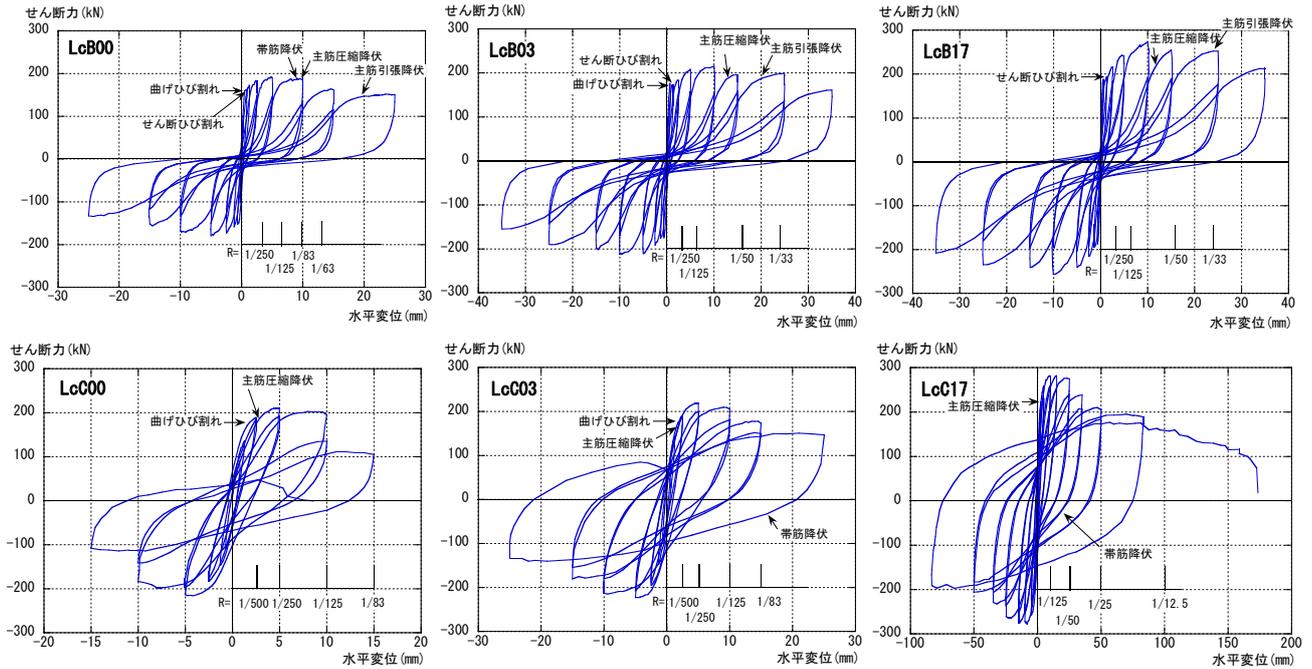


Fig. 6 LcBおよびLcCシリーズの柱せん断力-水平変位関係

Shear Force - Horizontal Deformation Relationships of Specimens on LcB and LcC-Series

た。CFRP シート破断は実験終了まで生じず、隅角部のシートの接着は実験後も維持されていた。

LcB17 試験体は、 $R=1/640$ でせん断ひび割れが確認されたが、最大耐力に達する $R=1/80$ まで CFRP シートの浮きも確認されず、目立った損傷は無かった。その後のサイクルでスリップが顕著となり、主筋に沿う位置で CFRP シートに浮きが生じ始めた。 $R=1/53$ で主筋の圧縮降伏、 $R=1/32$ で主筋の引張降伏が確認された後も、緩やかに耐力が低下し、付着破壊を生じた。CFRP シート破断は生じなかった。

3.4 高軸力シリーズ(LcCシリーズ)の破壊経過

無補強のLcC00試験体は、 $R=1/500$ で曲げひび割れが発生し、 $R=1/250$ ピーク付近で主筋の圧縮降伏を生じて最大耐力に達した。同時に柱頭柱脚部の圧壊が顕著になると共に、圧縮側主筋に沿う縦ひび割れが発生した。 $R=1/83$ サイクルの繰り返し载荷時に圧縮主筋の座屈が生じ、軸力保持能力が急激に低下し、極めて脆性的な破壊を示した。

LcC03試験体は、LcC00試験体と同様の経過をたどり、 $R=1/250$ 付近で主筋の圧縮降伏が生じ、最大耐力に達した。 $R=1/125$ で主筋沿いに縦ひび割れが発生し、以降のサイクルで圧縮側CFRPシートの浮き上がり・縦ひび割れの開きが共に顕著になり、コンクリートの剥落が進行した。 $R=+1/50$ から $R=-1/50$ にかけてフープの降伏が確認され、柱頭圧縮側CFRPシートが部分的に破断した。続いて圧縮鉄筋の座屈により水平力・軸力共に保持限界に達した。

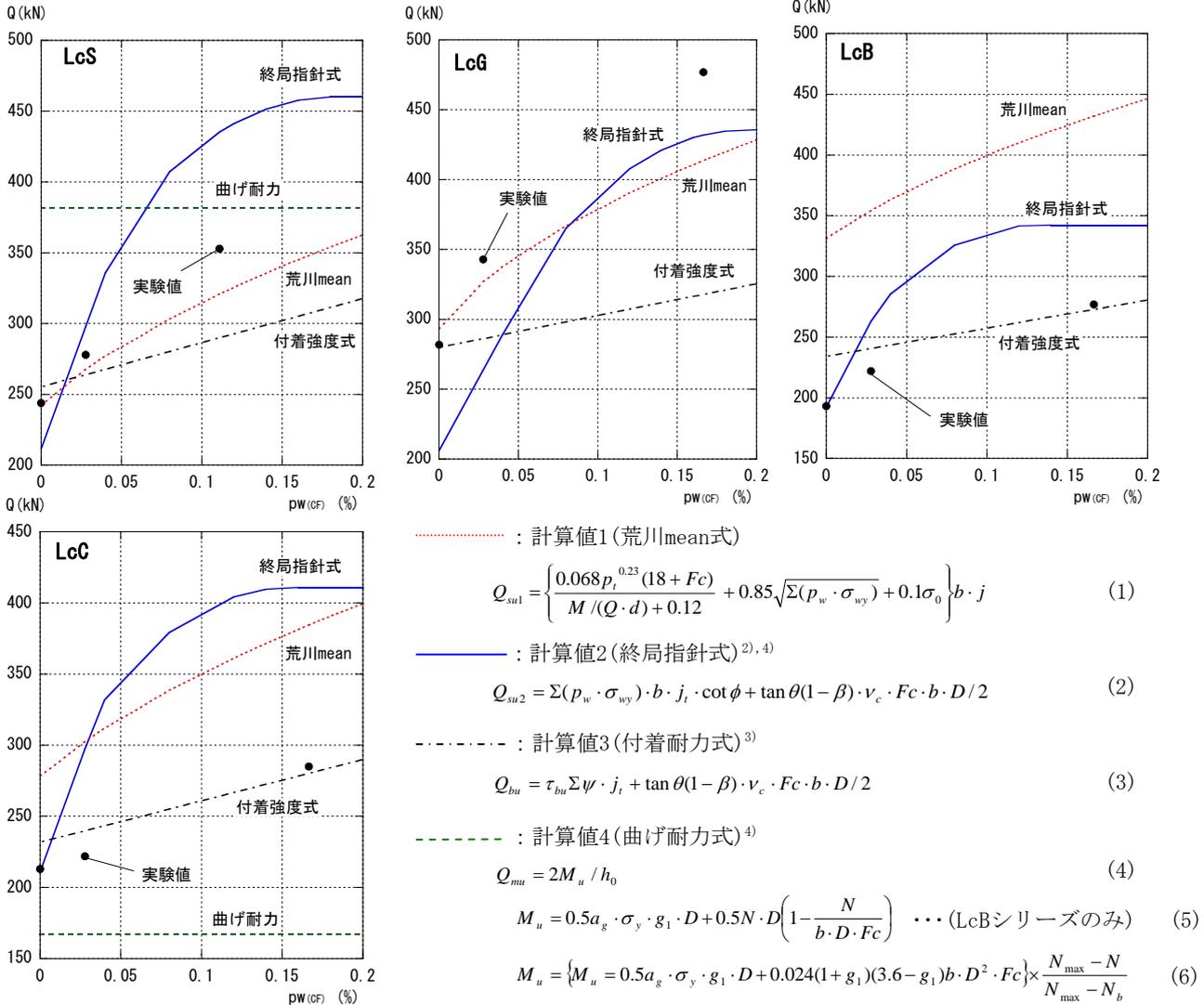
LcC17試験体は、 $R=1/500$ サイクルで圧縮側のCFRPシ



LcB00 LcB03 LcB17
Photo 3 LcBシリーズ载荷終了時試験体写真
Final State of Specimens on LcB-Series



LcC00 LcC03 LcC17
Photo 4 LcCシリーズ载荷終了時試験体写真
Final State of Specimens on LcC-Series



主な記号を以下に示す。ここにない一般的な記号は、各参考文献^{1),2),3),4)}を参照願いたい。

F_c : コンクリート強度(シリーズごとの平均値), d : 有効せい(2段筋考慮), j : 応力中心間距離=7/8d,
 $\Sigma(p_w \cdot \sigma_{wy})$: せん断補強量= $p_w(s) \cdot \sigma_{wy(s)} + p_w(CF) \cdot \sigma_{wy(CF)}$, $p_w(s)$: 帯筋のせん断補強筋比, $\sigma_{wy(s)}$: 帯筋の降伏強度,
 $p_w(CF)$: CFRPのせん断補強筋比, $\sigma_{wy(CF)}$: CFRPのせん断設計用強度で1750N/mm²とする, v_c : コンクリート強度の有効係数=0.7· F_c /(2000 γ), γ : 換算用係数=0.0980665, τ_{bu} : 付着強度=(0.163+0.117 b_i +9.51 $\Sigma p_w'(b/\Sigma db)$) $\sqrt{F_c}$, $b_i=bs$
 $i=(b-\Sigma db)/\Sigma db$, $\Sigma p_w'$: 断面外周に配置されたせん断補強筋比= $p_w'(s)+3p_w(CF)$, $p_w'(s)$: 断面外周の帯筋比

Fig. 7 各計算値と実験値の適合性

Comparisons of Test results and Calculated Value

ートの浮き上がりが生じ、またシート隙間からひび割れも確認された。R=1/250ピーク付近で主筋の圧縮降伏が発生したが、その後も耐力は上昇し、R=1/83で最大耐力に達した。以降圧縮側のCFRPシートの浮き上がりが進展し、R=1/50で柱中央部のCFRPシートに浮き上がりが生じ、フープの降伏が確認された。R=1/36で圧縮主筋の座屈と共に柱頭部のCFRPシートが爆発音を伴って大きく破断して水平力・軸力共に保持限界に達した。

4. 低強度コンクリート柱の耐力について

Fig.7は各シリーズのせん断耐力の計算値と実験値を横軸にCFRPの補強筋比をとって比較したものである。せん断、付着および曲げ耐力計算値にはTable 3中の計算値1, 2, 3, および4を用いている。各計算式は図中に示すが、計算値1は荒川mean式、計算値2~計算値4はCRS-CL工法設計施工指針に定められた、終局指針式に基づくせん断耐力度式⁴⁾(計算値2)、付着耐力度式³⁾(計算値3)、および曲

げ耐力略算式⁴⁾(計算値4)である。本章では、10N/mm²程度の低強度コンクリートを対象に耐震補強を施した柱部材への、これらの既往の耐力式の適用性について検討する。

4.1 セン断耐力

Fig.7によれば、せん断破壊シリーズ(LcS)および極脆性柱シリーズ(LcG)の実験値は、計算値1(荒川mean式)と良く一致する。一方、計算値2(終局指針式)と計算値3(付着耐力式)の小さいほうで評価すると、Table 3によれば、LcSシリーズは安全側に比較的精度良く耐力を推定することができるが、極脆性柱のLcGシリーズでは耐力を過小評価する傾向が見られる。またこの場合、CFRP補強量が多い試験体の破壊モードは付着破壊と判定されるが、実際の破壊モードと一致しない傾向がある。これは、計算値2および3は軸力の影響を考慮しない式であるが、実験では比較的高軸力を作用させた点が一因と思われる。

耐震改修設計指針・同解説⁷⁾では、計算値1の係数0.068を0.053とする荒川min式を採用している。Table 4は、荒川mean式および荒川min式による計算値と、LcSおよびLcGシリーズのせん断耐力実験値に対する計算値の比を示す。同表より、補強量が多い試験体に対する耐力をやや低く評価する傾向があるが、荒川mean式および荒川min式は低強度コンクリート柱の補強後のせん断耐力を精度良く評価できると考えられる。

以上をまとめると、CFRPによる耐震補強を行った低強度コンクリート柱のせん断耐力は、本実験で用いた程度のシアスパン(h₀/D=1.5)程度の極脆性柱含め、荒川min式、荒川mean式あるいは終局強度式と付着耐力式の組み合わせで求める評価方法で、比較的精度良く評価できる。ただし、極脆性柱に対しては、後者の評価式は耐力を過小評価する傾向がある。

4.2 付着耐力

Table 3およびFig.7によると、付着破壊シリーズ(LcB)の最大耐力は、計算値2と計算値3の小さいほうで評価する耐力計算値と精度良く一致しているが、ここでは主筋の付着応力に関しても把握しておく必要がある。Table 5は、LcBシリーズの各試験体における隅角部主筋と中間筋を対象として、ひずみ計測により求めた付着強度と付着割裂強度計算値を比較したものである。各試験体主筋の歪度は、柱頭柱脚のほかスパン内3点の計5点で計測したが、柱頭柱脚部を除き、安定して歪の計測ができた3点、すなわち2区間(h₀=800の内、中央の480mmの区間)の平均付着応力度を計算値との比較の対象とした。なお、実験値は、最大耐力を發揮した時の正側・負側の平均値を示している。計算値はFig.7中の記号の説明に示した付着割裂強度式による。同表によれば、いずれの試験体においても、最大耐力時平均付着応力度と付着割裂強度計算値は良く一致している。

一方、付着割裂破壊を生じる部材へも比較的適合性が

Table 4 荒川式の適合性
Estimated Shear Forces by Arakawa-Formula

シリーズ	試験体	Qu	Qu計 (荒川mean)	Qu計 (荒川min)	実/計mean	実/計min
LcS	LcS00	244	242	222	1.01	1.10
	LcS03	278	268	247	1.04	1.13
	LcS11	353	321	300	1.10	1.18
LcG	LcG00	282	293	256	0.96	1.10
	LcG03	343	327	289	1.05	1.19
	LcG17	477	415	376	1.15	1.27

Table 5 主筋付着応力度
Bond Stress of Main Bars

試験体	実験値			計算値	実/計
	in τ bu	out τ bu	ave τ bu	τ bu	ave τ bu / τ bu
LcB00	1.14	1.66	1.29	1.23	1.05
LcB03	1.18	1.78	1.35	1.29	1.05
LcB17	1.30	2.33	1.60	1.59	1.01

in τ bu, out τ bu : それぞれ中間主筋、隅角部主筋の最大耐力時付着応力度 (N/mm²)

ave τ bu : 一列に配された主筋の最大耐力時平均付着応力度 (N/mm²)

Table 6 断面解析結果
Fiber Model Analysis

試験体	実験値 Q _{mu}	計算値4 (Table3)	解析値 Q _{mu} (fib)	実/解析
LcC00	213	167	198	1.08
LcC03	222		214	1.04
LcC17	285		263	1.08

良いとされる計算値1(荒川 mean 式)は、LcBシリーズの試験体に対しては、補強の有無や補強量に関わらず、耐力を過大評価する結果となった。

4.3 曲げ耐力

Table 3の計算値4はCFRP補強による拘束効果を考慮していないため、高軸力を受ける曲げ破壊シリーズLcCの実験値をかなり低く評価している。これは通常の強度レベルのコンクリートに対しても同様な傾向があると言えるとともに、曲げ耐力は通常の強度においてはかなり精度良く算定することが可能である。そこで、低強度コンクリートに対しても同様の手法が適用できるかどうか確認しておく必要がある。

Table 6は拘束効果を考慮したコンクリートのσ-ε関係を用いたファイバーモデルによる断面解析の結果と、LcCシリーズの実験値を比較したものである。解析においては平面保持を仮定し、コンクリートの構成則には青山らのモデル¹⁰⁾を使用した。また、無補強のLcC00試験体では帯筋による拘束効果を考慮し、中塚らの提案¹¹⁾に従い、最大耐力、最大耐力時歪、応力降下勾配、終局歪をカバーコンクリート、コアコンクリートについて設定した。ゼブラ補強を施したLcC03試験体およびシート三層による補強を施したLcC17試験体ではCFRPシートによる横拘束効果を考慮し、中出らの提案¹²⁾に従い、最大耐力、最大耐力時歪、応力降下勾配、終局歪をカバーコンクリートについて設定し、更にコアコンクリートについても帯筋による拘束効果をLcC00試験体と同様に設

定した。同表によると、実験値と解析値の比（実/解析）は、補強の有無、補強量に関わらず、1.04~1.09と比較的よく対応した。ただし、解析結果に比べ、実験では、補強量が多いほど主筋応力がスパン全長にわたって圧縮応力が大きくなる傾向が見られた⁹⁾。

5 軸力比制限の緩和

柱の曲げせん断実験では、高軸力を受ける柱に対して、CFRP補強を施すことで、部材の耐力や変形能力を向上させることが可能であることが確認された。Fig.8にLcCシリーズの軸力比と鉛直ひずみ関係を一例として示す。

一方、耐震改修設計指針・同解説¹⁾においては、CFRP補強に軸力比制限の緩和を認めていない。そこで、CFRP補強における軸力比緩和の可能性について、CFRP補強を施したプリズム試験体を用いて検討する。

5.1 実験の概要および結果

試験体一覧と実験結果をTable 7に、プリズム試験体の形状及びCFRP補強をFig.9に、圧縮応力-鉛直ひずみ関係をFig.10に示す。実験は、CRS-CL工法の適用範囲である普通強度2種と、適用範囲を下回る低強度2種で実施した。低強度試験体のコンクリートは、柱試験体のLcS、LcGシリーズに用いたものと同調合の軽量コンクリートを使用している。荷荷は圧縮試験機による単調荷荷とした。

Fig.10より、普通強度1($F_c=34\text{N/mm}^2$)は、補強量を増加しても最大圧縮応力度に顕著な差は見られなかった。しかし、最大応力後の応力下降勾配は補強量の増大に従って緩やかとなった。普通強度2($F_c=17.5\text{N/mm}^2$)においても、普通強度1と同様、補強量を増加しても最大圧縮応力度に顕著な差は見られなかったが、最大応力後の応力下降勾配は補強量の増大に従って緩やかとなった。

一方、低強度1,2(平均 $F_c=10.1\text{N/mm}^2$)では、補強量の増大に従い、歪が約0.2%で最大応力に達し、その後応力度が下降するタイプから、0.2%以降も応力が上昇するタイプに移行した。上昇タイプのものはCFRPの破断直前点が最大圧縮応力度となった。

5.2 プリズム試験体の補強による釣合い軸力比の推移

軸力比-炭素繊維補強量関係をFig.11に示す。ここで言う軸力比は、以下の定義のもと算出されたものである。
 [定義1] 耐震改修設計指針・同解説¹⁾より、無補強試験体の釣合い軸力比 η を0.4とする。
 [定義2] 最大応力度は、圧縮応力-鉛直歪関係上において鉛直歪の制限を設けず、下降タイプ・上昇タイプを問わず常に最大となった点とする。すなわち、Fig.11中に示した補強後釣合い軸力比は、安全限界であり使用限界ではない。

Fig.11中の縦軸の補強後釣合い軸力比 η は、補強前のコンクリート強度を F_c 、補強後のコンクリート強度を F_c'

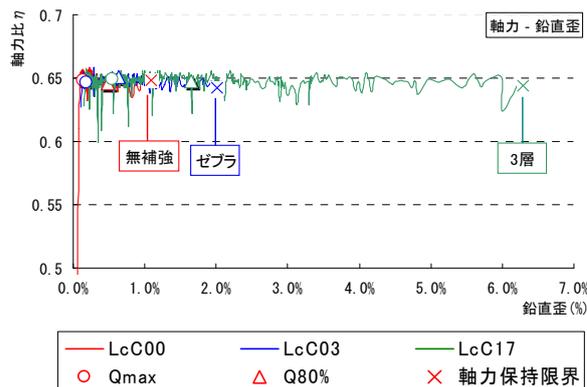


Fig. 8 軸力比-鉛直ひずみ関係の一例
Axial Force Ratio - Vertical Strain Relationship

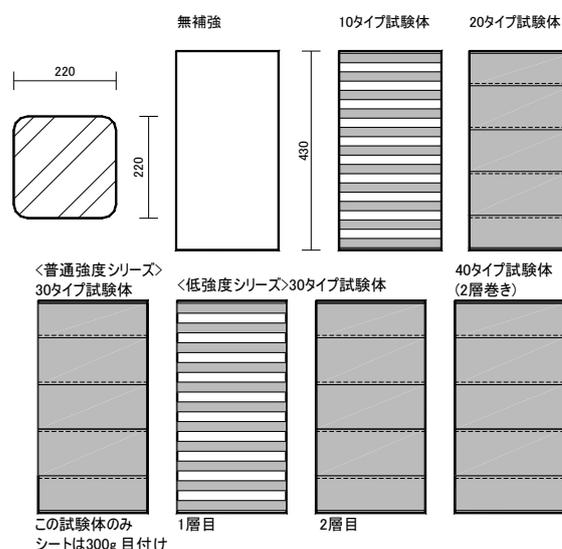


Fig. 9 プリズム試験体
Prism Specimens

Table 7 試験体および結果
Specimens and Test Results

シリーズ	タイプ	CFRPによる体積補強筋比 ρ_{CF} (%)	コンクリート圧縮強度 (N/mm^2)	強度上昇率 α
普通強度1	00	0.00	33.9	1.00
	10	0.10	33.7	0.99
	20	0.20	33.4	0.99
	30	0.30	32.6	0.96
	40	0.40	35.7	1.05
普通強度2	00	0.00	17.5	1.00
	10	0.10	17.5	1.00
	20	0.20	20.4	1.17
	30	0.30	20.2	1.16
	40	0.40	25.1	1.43
低強度1	00	0.00	10.8	1.00
	10	0.10	10.4	0.96
	20	0.20	12.2	1.13
	30	0.30	14.9	1.36
	40	0.40	16.0	1.66
低強度2	00	0.00	9.5	1.00
	10	0.10	9.1	1.04
	20	0.20	11.0	1.16
	30	0.30	14.0	1.48
	40	0.40	15.6	1.64

とした時に次式で算出した値を示す。

$$\eta = 0.4 \times F_c' / F_c \quad (7)$$

また、横軸は体積横補強筋比 ρ_{wf} ×有効強度 σ_{fd} を示す。なお、図はコンクリート強度ごとに示したが、低強度である低強度1,低強度2シリーズはほぼ同強度であるので、低強度シリーズとしてまとめて示した。

傾向として、各シリーズとも $\rho_{wf} \cdot \sigma_{fd} = 1.61(N/mm^2)$ ($\rho_{wf} = 0.1\%$)では補強コンクリートの強度は顕著な増大はみられなかった。しかし、 $\rho_{wf} \cdot \sigma_{fd} > 3.0(N/mm^2)$ の補強量ではコンクリート強度により差はあるものの、補強コンクリートの強度の増大がみられ、特に低強度のものには顕著な強度の増大がみられた。強度の増大が生じる範囲をデータの分布状況から $\rho_{wf} \cdot \sigma_{fd} > 2.0(N/mm^2)$ として、最小二乗法により求めた近似直線を図中に示す。

5.3 軸力比制限緩和式の提案

実験の結果から、以下の式を提案する。

コンクリート強度が $F_c = 10N/mm^2$ 程度であるとき、CFRPシート補強後の軸力比は以下の式で緩和できる。

$$\begin{aligned} &\rho_{wf} \sigma_{fd} \leq 2 \text{ のとき,} \\ &\eta = 0.4 \\ &\rho_{wf} \sigma_{fd} > 2 \text{ のとき,} \\ &\eta = \rho_{wf} \sigma_{fd} / 18 + 0.289 \end{aligned}$$

ここで、

ρ_{wf} :炭素繊維シート の体積横補強筋比

σ_{fd} :炭素繊維シート の有効強度(N/mm^2)

$$\sigma_{fd} = \min(E_{fd} \varepsilon_{fd}, \frac{2}{3} \sigma_f)$$

E_{fd} :炭素繊維シート の

規格ヤング係数(N/mm^2)

ε_{fd} :炭素繊維シート の有効歪度(0.7%)

σ_f :炭素繊維シート の

規格引張強度(N/mm^2)

5.4 提案式の適合性の検証

提案式の適合性を、前報のLcCシリーズを用いて検証する。

LcC03(ゼブラ巻き)試験体およびLcC17(3層巻き)試験体について計算すると以下の結果を得る。

LcC03(ゼブラ)

$$\rho_{wf} = 0.000555, \sigma_{fd} = 1610(N/mm^2)$$

$$\rho_{wf} \sigma_{fd} = 0.894 < 2 \text{ より, } \eta = 0.4$$

LcC17(3層)

$$\rho_{wf} = 0.003268, \sigma_{fd} = 1610(N/mm^2)$$

$$\rho_{wf} \sigma_{fd} = 5.26(N/mm^2)$$

$$\eta = 5.26 / 18 + 0.289 = 0.58$$

この計算結果とFig.8の実験結果を比較すると、LcC03試験体は、試験時軸力比 $\eta = 0.65$ 下で、最大耐力時及び復元力が耐力の80%以下に低下したときの層間変形角は無

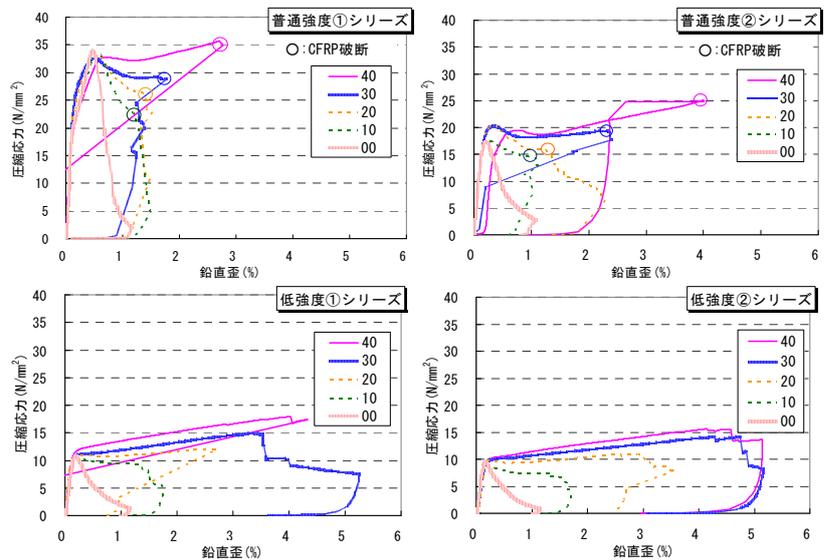


Fig.10 圧縮応力－鉛直ひずみ関係
Stress-Strain Relationships

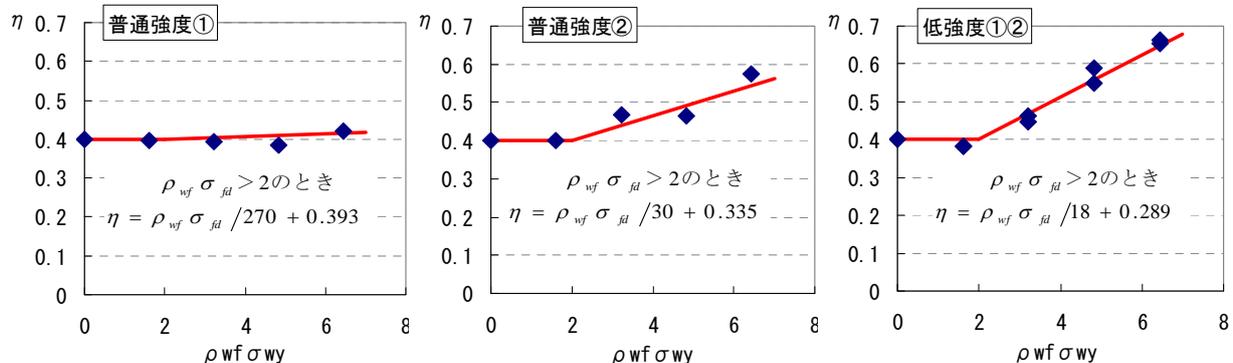


Fig.11 軸力比-CFRP補強量関係
Axial Force Ratio - CFRP Reinforcement Relationships

補強試験体と同じであった。また、LcC17試験体は、試験時軸力比 $\eta = 0.65$ と計算値より厳しい軸力レベル下においても、靱性指標 F 値=3.2に相当する $R=1/25(\text{rad.})$ で復元力が耐力の80%以下に低下した。以上より、LcC03試験体程度の補強量 ($p_{\text{wf}} \cdot \sigma_{\text{fd}}=0.894$) では軸力比の緩和は見込めず、LcC17試験体程度の補強 ($p_{\text{wf}} \cdot \sigma_{\text{fd}}=5.26$) を施せば、軸力比制限を0.58に緩和できるという本提案式による計算結果は、概ね実験結果に対応していることが分かる。

6. まとめ

低強度コンクリートを使用したRC柱試験体12体に対する静的加力実験を行い、CFRP補強の耐震補強効果について検討した結果、以下のような知見を得た。

- 1) せん断柱・極脆性柱・付着破壊柱・高軸力柱のいずれにおいても圧縮強度 $F_c=9\sim 12\text{N/mm}^2$ の低強度の領域において、CFRPシート補強により各種耐力の向上、および変形性能の向上を図ることが可能であった。
- 2) $F_c=11\sim 12\text{N/mm}^2$ 程度の低強度コンクリートを使用したせん断柱・極脆性柱ともに、補強の有無に係わらず、既往の計算式^{1)~4)}でせん断耐力の評価は可能であった。ただし、極脆性柱に対して、終局強度式と付着耐力式の組み合わせで求める評価方法は、耐力を過小評価する傾向がある。
- 3) $F_c=9\text{N/mm}^2$ 程度の付着破壊試験体の主筋付着強度および最大耐力実験値は、補強の有無に係わらず、学会指針案³⁾に基づく付着強度、および付着断耐力式を用いて求めた計算値とよく一致した。
- 4) $F_c=10\text{N/mm}^2$ 程度の低強度コンクリートを使用した高軸力下での曲げ破壊柱において、CFRPシート補強により曲げ耐力と変形能力の向上を図ることが可能である。その曲げ耐力は略算式⁴⁾によると過小に評価されるが、ファイバーモデルによる断面解析による解析値とは良く一致した。

高軸力の実験結果を踏まえ、CFRPシート補強における軸力比緩和の可能性について、CFRPシート補強を施したプリズム試験体を用いて検討した結果、以下のような知見を得た。

- 5) $F_c=10\text{N/mm}^2$ 程度のRC柱部材に、ある程度の炭素繊維シート補強 ($p_{\text{wf}} \cdot \sigma_{\text{fd}}$ で $2.0(\text{N/mm}^2)$ 程度以上) を施すことで、CFRPシート補強に対しても軸力比制限を緩和することが可能と考えられる。
- 6) 軸力比制限緩和式を提案した。また、提案式による計算値と高軸力柱実験の結果の適合性を検証した結果、良好な対応が得られた。

謝辞

CRS-CL工法に関する実験研究は、国立大学法人 横浜国立大学大学院 工学研究院 田才研究室との共同研究によるものである。本研究開発に関して多大なご助力と貴重なご意見を頂いた田才 晃 教授をはじめ、田才研究室の皆様、卒業生に深謝致します。

参考文献

- 1) 日本建築防災協会:既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震改修設計指針・同解説, pp.148-170,2001
- 2) 日本建築学会:鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針・同解説, pp.135-141
- 3) 日本建築学会:連続繊維補強コンクリート系構造設計施工指針案, pp.292-294
- 4) 村橋久広 他編著:連続繊維による補修・補強, 理工図書, pp.141-155
- 5) 日本建築防災協会:既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準・同解説, pp.5-18,2001
- 6) 坂巻健太 他:既存鉄筋コンクリート造建築物のコンクリート強度に関する研究(その 1)設計基準強度の変遷および圧縮強度の分布,日本建築学会大会梗概集, C-2,pp80-802,2001
- 7) 水野 生 他:低強度コンクリートRC柱に対する炭素繊維シート補強による補強効果, Vol.28, No.2, pp1153-1158,2006
- 8) 雨宮牧子 他:付着割裂破壊を伴う低強度コンクリートRC柱の炭素繊維シートによる補強効果に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.3, pp1129-1134,2007
- 9) 帆足勇磨 他:高軸力下における低強度コンクリートRC柱の炭素繊維シートによる補強効果に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.3, pp1231-1236,2007
- 10) 藤井俊二 他:材料特性により求めた鉄筋コンクリート断面のモーメント-曲率関係, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp1261 - 1262, 1973, 10
- 11) 鈴木計夫 他:角型横補強筋によるコンファインドコンクリートの拘束機構と強度・変形特性, コンクリート工学年次論文報告集 11 - 2, 1989, pp449 - 454
- 12) 中出陸 他:炭素繊維シートによるコンクリート柱の拘束効果に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集 Vol.23, No.1, 2001, pp859 - 864