

# 論文 高炉スラグ微粉末高含有コンクリートと CO<sub>2</sub> 固定した再生骨材を用いた RC 部材の構造性能に関する実験的研究

土居 晃基\*1・福原 武史\*2・掛 悟史\*1・井戸 裕 勇樹\*2

**要旨：**カーボンニュートラル社会の実現に向け、コンクリートの CO<sub>2</sub> 排出量削減のために高炉スラグ微粉末高含有コンクリートや再生微粉、再生細骨材に CO<sub>2</sub> 固定処理を施した CCU 材料を用いたコンクリートの開発に着手している。これらのコンクリートを合わせて使用した RC 柱・梁部材の構造性能を確認するために付着引抜実験および曲げせん断実験を実施した。CCU 材料を用いた試験体は付着引抜実験の付着強度が若干低下する傾向がみられたが、曲げせん断実験のせん断耐力、初期剛性、曲げひび割れ強度、せん断ひび割れ強度は既往の評価式で評価可能であることを確認した。

**キーワード：**高炉スラグ微粉末高含有コンクリート、CO<sub>2</sub> 固定微粉、CO<sub>2</sub> 固定細骨材、せん断耐力、付着強度

## 1. はじめに

カーボンニュートラル社会の実現に向けて、建築やまちづくりの基盤となるコンクリートの CO<sub>2</sub> 排出量の削減は喫緊の課題である。この課題に対して高炉スラグ微粉末などの産業副産物を活用し、CO<sub>2</sub> 排出量を削減した高炉スラグ微粉末高含有コンクリート（以下、ECM コンクリート）<sup>1)</sup>や、廃コンクリートから製造した再生微粉、再生細骨材に CO<sub>2</sub> 固定処理を施した CCU 材料（以下、CO<sub>2</sub> 固定再生微粉：CP、CO<sub>2</sub> 固定再生細骨材：CS）を使用したコンクリート<sup>2)</sup>の開発が進められている。一方で鉄筋コンクリート（以下、RC）部材レベルの構造性能のデータは乏しい。

本論では、ECM コンクリートをベースとし、細骨材（砂、砕石）を CP および CS に置換したコンクリート（以下、ECM+CPS コンクリート）を用いた RC 部材実験を行うことで構造性能を確認するとともに、既往の評価式との対応を検証した。

## 2. 付着引抜実験

### 2.1 試験体

再生骨材を用いたコンクリートに関して付着割裂強度が若干低下する懸念がある<sup>3)</sup>ため、本章では CP、CS を用いたコンクリートの基礎的な構造性能の確認の一環として異形鉄筋の付着引抜実験を実施した。また、後述の 3 章では付着割裂によるせん断破壊モードの梁型試験体による構造実験も実施している。

試験体図を図-1 に、試験体の一覧を表-1 に示す。試験体の ECM シリーズは ECM コンクリートのみ、CPS シリーズは ECM+CPS コンクリートを使用したものであり、引抜鉄筋の種類、径を変数としている。また、建物の長期利用は CO<sub>2</sub> 排出量抑制につながるため、中性化後の継続利用を期待した防錆鉄筋の利用ニーズの可能性も踏まえ、普通鉄筋に加え防錆鉄筋についても実験を行った。試験体形状は建材試験センター規格 JSTMC 2101 に準拠し、各水準で 3 体ずつ製作した。

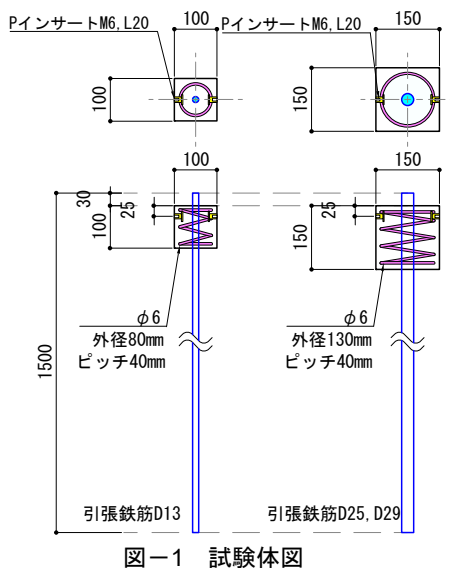


図-1 試験体図

表-1 試験体一覧

試験体名	試験体寸法(mm)	鉄筋		降伏強度(N/mm <sup>2</sup> )
		種類	径	
ECM-N13	100	普通鉄筋 (N)	D13	367.5
CPS-N13				
ECM-S13	100	ステンレス鉄筋 (S)	D13	344.5
CPS-S13				
ECM-E13	100	エポキシ被覆鉄筋 (E)	D13	363.4
CPS-E13				
ECM-Z13	100	亜鉛メッキ鉄筋 (Z)	D13	386.4
CPS-Z13				
ECM-N25	150	普通鉄筋(N)	D25	406.7
CPS-N25				
ECM-S25	150	ステンレス鉄筋 (S)	D25	355.9
CPS-S25				
ECM-E25	150	エポキシ被覆鉄筋(E)	D25	400.9
CPS-E25				
ECM-Z29	150	亜鉛メッキ鉄筋 (Z)	D29	412.9
CPS-Z29				

\*1 竹中工務店 技術研究所 (正会員)

\*2 竹中工務店 技術研究所 博士 (工学) (正会員)

表-2 コンクリート調合

コンクリート	W/B (%)	BFS 置換率 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )							
			水	セメント	高炉スラグ微粉末	CO <sub>2</sub> 固定微粉	CO <sub>2</sub> 固定細骨材	細骨材(1)	細骨材(2)	粗骨材
			W	C	BFS	CP	CS	S1	S2	G
ECM	60	70	170	85	198	—	—	263	635	928
ECM+CPS	60	70	170	85	198	142	713	—	—	896

W/B : W/(C+BFS)で計算, BFS 置換率 : BFS/(C+BFS)で計算, BFS : 高炉スラグ微粉末, CPおよびCS : CO<sub>2</sub>固定処理を施した再生微粉および再生細骨材, 細骨材(1) : 砂, 細骨材(2) : 石灰石砕砂

表-3 コンクリート材料試験結果

コンクリート	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (N/mm <sup>2</sup> )	割裂引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比
ECM	37.6	3.32×10 <sup>4</sup>	3.88	0.22
ECM+CPS	38.3	2.90×10 <sup>4</sup>	3.23	0.21

2.2 使用材料, 加力・計測

コンクリートの調合を表-2 に示す。いずれの調合も早強ポルトランドセメントと高炉スラグ微粉末 4000 (SO<sub>3</sub>量 3.5%) を重量比 30 : 70 とした結合材を用いている。CP, CS を用いた水準は, CP は結合材の 50unit% として, 細骨材(1), (2)に対してCP, CS を全量置換した調合としている。なお, 粗骨材の最大粒径は 20mm とし, 試験時の圧縮強度目標値を 27N/mm<sup>2</sup> として水結合材比 (W/B) 60%に設定した。コンクリートの材料試験結果をそれぞれ表-3 に, 実験に用いた鉄筋の材料試験結果は表-1 に併記した。

加力は 2000kN 万能材料試験機にて単調引抜荷重により行い, 計測項目は荷重と鉄筋の自由端変位 (自由端すべり量) とした。

2.3 平均付着応力-すべり量関係

実験で得られた平均付着応力とすべり量の関係の関係を図-2 に示す。平均付着応力は計測した引抜荷重を鉄筋の周長と付着長さ (D13 : 100mm, D25・29 : 150mm) で除して算出した。ECM コンクリートで引抜鉄筋に D13 を使用した試験体は, コンクリートの沈み込みや回転を考慮出来ない計測方法であったため, 最大耐力発揮以降のすべり量の計測値が若干不安定な領域がある。

ECM-N13-3 (ECM, 普通鉄筋 D13) と ECM-E13-1,3 (ECM, エポキシ被覆鉄筋 D13) の3体は最大付着応力到達直後に鉄筋が破断に至った。その他の試験体では最大付着応力到達後, 荷重が低下しながら鉄筋が抜け出す様子が確認された。載荷終了後にはほとんどの試験体で天端に付着割裂によると考えられる放射状の微細なひび割れが観測された。

実験で得られた最大平均付着応力 ( $\tau_{max}$ ) を, 文献4)の柱梁接合部内の付着強度算定式に倣い, コンクリートの圧縮強度の2/3乗 ( $\sigma_B^{2/3}$ ) で基準化した結果を図-3 に示す。引抜鉄筋に D13 を使用した場合, 鉄筋種によって比較すると ECM コンクリートと普通鉄筋間および ECM コンクリートと防錆鉄筋間の最大付着応力に大きな差はなく, ECM+CPS コンクリートでも同様であった。一方でコンクリートによって比較すると, ECM コンクリートに比べ ECM+CPS コンクリートの方が基準化した最大付着応力度が普通鉄筋で約 17%, 防錆鉄筋で 8~

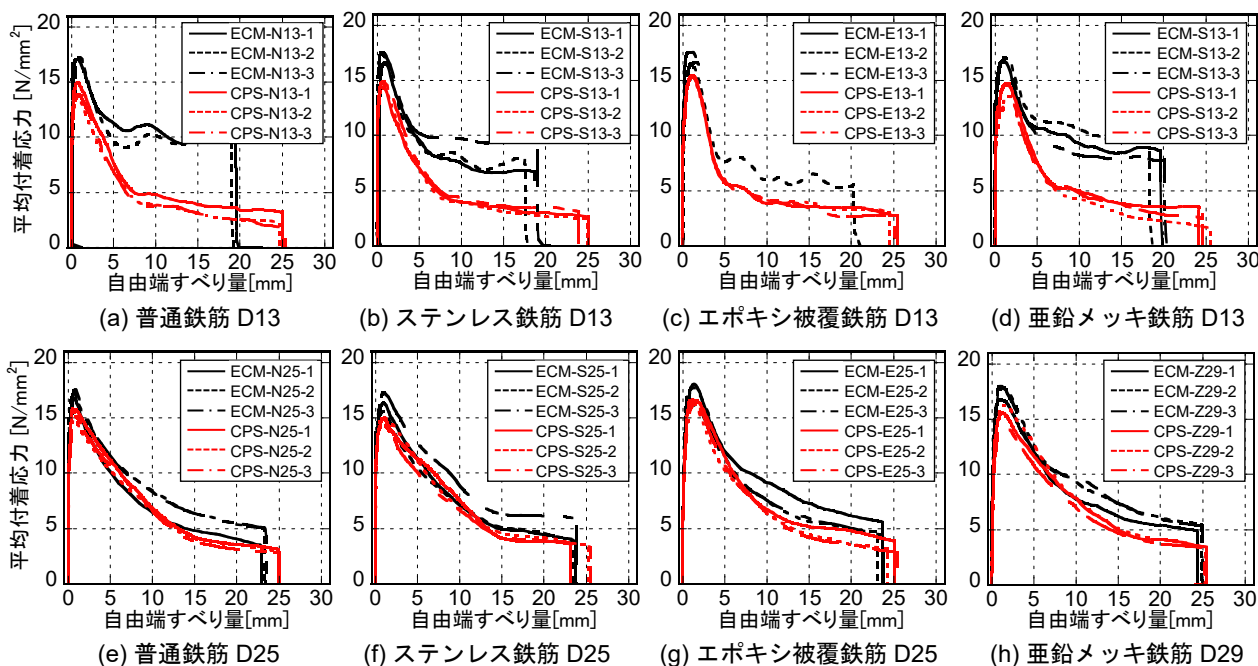


図-2 平均付着応力-すべり量関係

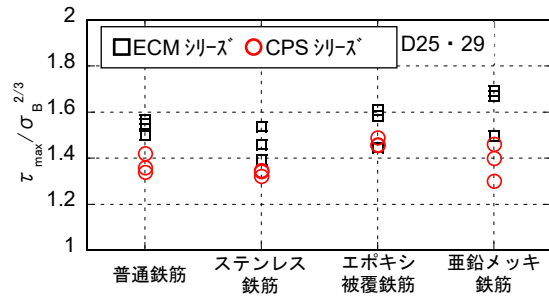
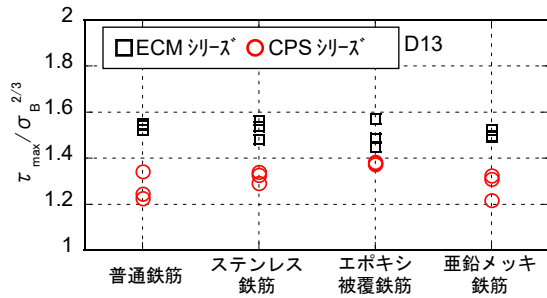


図-3 基準化した最大付着応力 (左: D13, 右: D25・29)

15%低い結果であった。D25・29を使用した場合でも同様の傾向がみられ、鉄筋種による比較では ECM, ECM+CPS コンクリートともに普通鉄筋間と防錆鉄筋間で最大付着応力度に大きな差はなかったが、コンクリートによって比較すると、ECM コンクリートに比べ ECM+CPS コンクリートの方が基準化した最大付着応力度が普通鉄筋で約 11%, 防錆鉄筋で 5~18%低い結果であった。文献 5)では ECM コンクリートと普通コンクリートの付着特性はほぼ等しいことが示されていることから、ECM+CPS コンクリートの付着強度は普通コンクリートより 5~18%低下すると考えられる。

ECM+CPS コンクリートを使用したものである。試験体 C-CPS01 は C-ECM01 とコンクリート種類による比較をするために、コンクリート以外の諸元は同様であり、せん断補強比  $p_w = 0.2\%$  である。試験体 C-CPS02 は  $p_w$  を変数とし、C-CPS01 の  $p_w$  を  $0.8\%$  とした。これら 3 体は柱部材を模擬したもので、軸力比  $\eta = 0.1$ , せん断スパン比を  $1.5$  とし、せん断破壊が先行するように計画した。試験体 B-CPS01 は梁断面形状を想定して断面幅を  $180\text{mm}$ , せん断補強筋比  $p_w = 0.4\%$  とし、付着割裂によるせん断破壊が先行するように計画した。いずれの試験体も試験区間  $L$  (柱試験体:  $L=900\text{mm}$ , 梁試験体:  $L=1200\text{mm}$ ) を前述のコンクリートを用いて先行して製作し、その後、スタブには普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートを打設した。

### 3. 柱・梁部材の曲げせん断実験

#### 3.1 試験体

ECM コンクリートをベースに CP および CS を用いた RC 部材において、既往の評価式でせん断耐力が評価可能であるか検証するため、柱および梁形状を模擬した RC 部材に対して曲げせん断実験を行った。

試験体図を図-4 に、試験体の一覧を表-4 に示す。試験体は柱および梁部材を縮小模擬した計 4 体であり、C-ECM01 は ECM コンクリートを使用し、残り 3 体は

#### 3.2 使用材料

コンクリートの調査は表-2 と同様であるが、粗骨材の最大粒径はいずれも  $13\text{mm}$  を用いた。コンクリートおよび鉄筋の材料試験結果をそれぞれ表-5 および表-6 に示す。

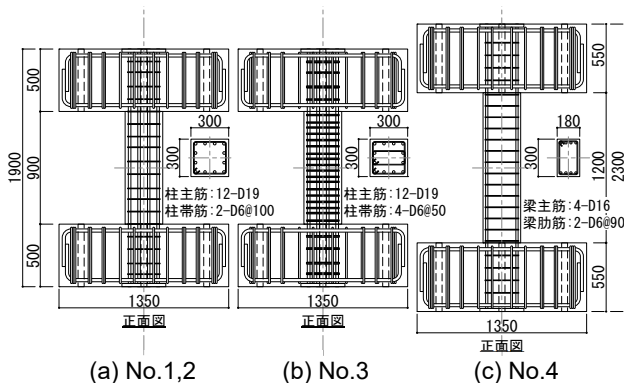


図-4 試験体図

表-5 コンクリート材料試験結果

試験体名	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (N/mm <sup>2</sup> )	割裂引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比
C-ECM01	25.6	$2.71 \times 10^4$	3.15	0.19
C-CPS01	27.1	$2.51 \times 10^4$	2.59	0.21
C-CPS02	27.1	$2.81 \times 10^4$	2.81	0.23
B-CPS01	29.4	$2.89 \times 10^4$	2.95	0.24

表-6 鉄筋材料試験結果

鉄筋種	種類	降伏応力 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強さ (N/mm <sup>2</sup> )
D19(SD490)	柱	524.8	$1.88 \times 10^5$	680.8
D16(SD490)	梁	499.4	$1.82 \times 10^5$	727.1
D6(SD295)	柱・梁	445.2	$1.90 \times 10^5$	546.3

表-4 試験体一覧

試験体名	形状	コンクリート	軸力比 $\eta$	せん断補強筋比 $p_w$	破壊形式
No.1; C-ECM01	柱	ECM	0.1	0.2%	せん断
No.2; C-CPS01	柱	ECM+CPS	0.1	0.2%	せん断
No.3; C-CPS02	柱	ECM+CPS	0.1	0.8%	せん断
No.4; B-CPS01	梁	ECM+CPS	0	0.4%	せん断(付着割裂)

### 3.3 加力・計測

図-5 に加力装置図を示す。加力はパンタグラフを設置した建研式逆対称加力装置を用いて行った。柱試験体では試験体上部に設置した鉛直方向の油圧ジャッキ 2 台を用いて軸力を加え、2 台の荷重がほぼ等しく一定軸力となるように加力した。なお、軸力を 0 とする梁試験体では圧縮軸力用ジャッキを取り外すとともに、装置自重キャンセル用の微調整用のジャッキを試験体左右に取り付けた。また、試験区間中央の位置に水平に設置した油圧ジャッキにより水平力を加え、押しを正加力とした正負交番繰り返し载荷を行った。加力は上下スタブ間の相対変位を試験区間  $L$  で除した部材角  $R$  に基づく変位制御とし、 $R=0.5, 1.0, 2.0, 3.3, 5.0, 7.5, 10, 15, 20/1000$  rad で正負各 2 回、 $30/1000$  rad で正負各 1 回ずつ繰り返し载荷を行った後、 $R=+40/1000$  rad まで加力を行った。

### 3.4 せん断力一部材角関係

実験で得られたせん断力一部材角関係および部材角  $R=20/1000$  rad 時の試験体の損傷状況を図-6 に示す。図

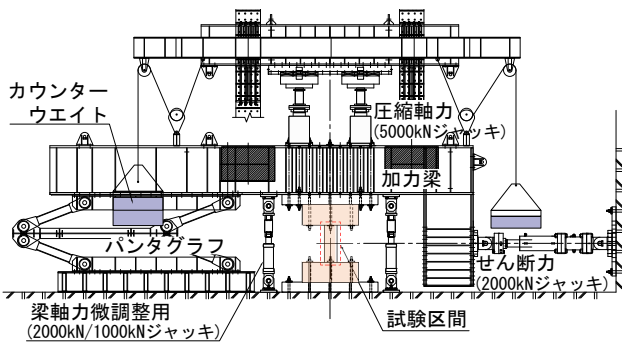


図-5 加力装置図

中のグラフには曲げひび割れ時 (○印)、せん断ひび割れ時 (△印)、せん断補強筋降伏時 (◇印)、最大耐力時 (□印) を示している。

柱形状の試験体である C-ECM01, C-CPS01 および C-CPS02 では、いずれも  $R=0.5/1000$  rad 付近で柱端部に曲げひび割れ、 $R=3.3/1000$  rad の加力サイクルでせん断ひび割れが発生し、その後せん断ひび割れの進行が顕著にみられた。また、C-ECM01 および C-CPS01 では  $R=5.0/1000$  rad 付近で、C-CPS02 は  $R=15/1000$  rad 付近でせん断補強筋が降伏ひずみに達し、せん断補強筋が降伏したサイクルで最大耐力を發揮した。なお、加力終了まで主筋は降伏ひずみに達しなかった。試験体損傷状況および鉄筋のひずみ状況から、柱試験体はせん断による破壊モードと判断できる。

梁形状の試験体である B-CPS01 では、 $R=0.5/1000$  rad 付近で梁端部に曲げひび割れが発生し、 $R=3.3/1000$  rad の加力サイクルでせん断ひび割れが発生した。 $R=5.0/1000$  rad の加力サイクルでは梁主筋に沿った付着割裂ひび割れが発生した後は、付着割裂ひび割れの進行が顕著にみられた。その後、 $R=10/1000$  rad の加力サイクルで最大耐力に達したが、主筋、せん断補強筋は加力終了まで降伏ひずみに達することはなかった。試験体損傷状況および鉄筋のひずみ状況から、梁試験体は付着割裂によるせん断破壊モードと判断できる。

### 3.5 最大耐力と計算耐力

各試験体の実験で得られた最大耐力とせん断耐力の各計算値の比較を表-7 に示す。せん断耐力は材料試験結果を用いて算出し、文献(6)より計算したせん断終局強

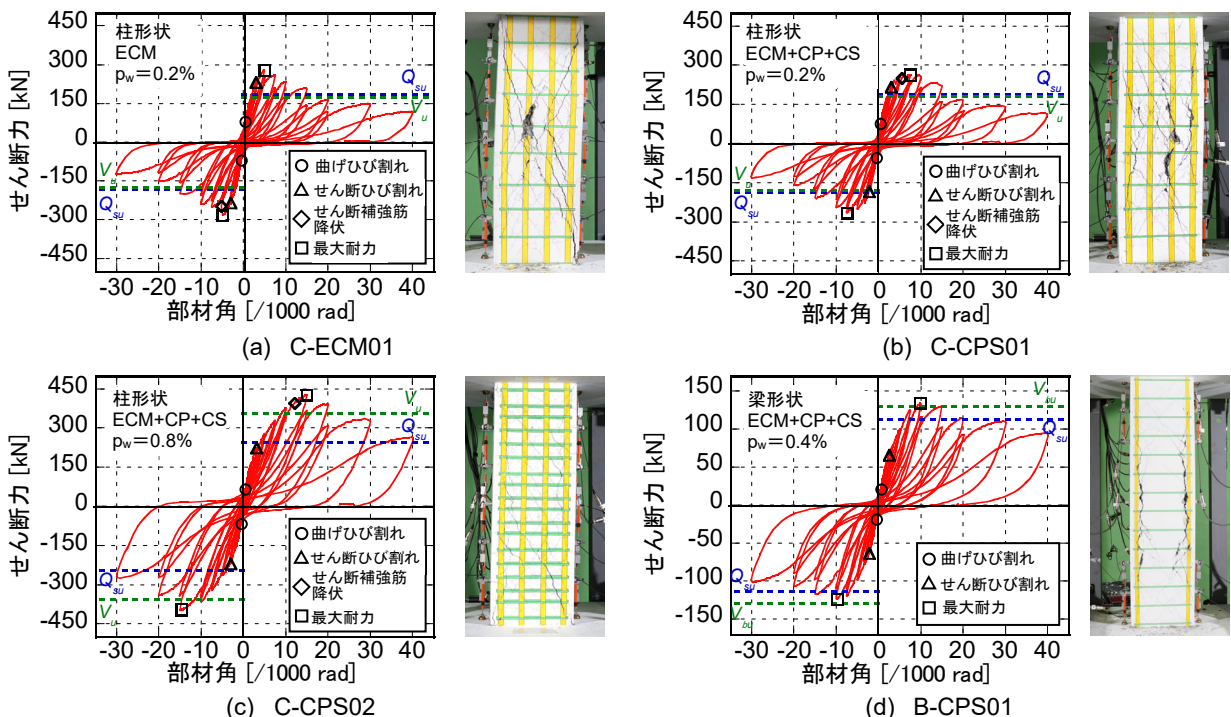


図-6 せん断力一部材角関係および部材角  $R=20/1000$  rad 時の試験体損傷状況

表-7 実験値および材料試験結果を用いた部材耐力の各計算値

試験体名	実験値 (kN)		計算値(kN)	実験値/計算値 $Q_{su}$		計算値(kN)		実験値/計算値 $\min(V_u, V_{bu})$	
	正	負	$Q_{su}^{(6)}$	正	負	$V_u^{(4)}$	$V_{bu}^{(4)}$	正	負
C-ECM01	279	-285	184	1.52	1.55	174	176	1.61	1.64
C-CPS01	263	-266	189	1.39	1.40	179	182	1.47	1.48
C-CPS02	427	-396	246	1.74	1.61	356	311	1.20 (1.37)**	1.11 (1.27)**
B-CPS01	134	-124	113	1.18	1.09	167	129	1.04	0.96

$Q_{su}$ : 文献 6 による荒川 mean 式,  $V_u, V_{bu}$ : それぞれ文献 4 による靱性指針せん断式, 靱性指針付着式  
 ※括弧外: 靱性指針せん断式, 括弧内: 靱性指針付着式

度  $Q_{su}$  (以下: 荒川 mean 式) と, 付着割裂によるせん断耐力が陽な形で算出される文献 4) より計算したせん断信頼強度  $V_u$  (以下: 靱性指針せん断式) および付着破壊の影響を考慮したせん断信頼強度  $V_{bu}$  (以下: 靱性指針付着式) を示している。また, 図-6 中には荒川 mean 式  $Q_{su}$  を青破線で, 靱性指針せん断式  $V_u$  および靱性指針付着式  $V_{bu}$  を緑破線で示している。

柱試験体のせん断補強筋比  $p_w=0.2\%$  である C-ECM01 および C-CPS01 の実験値の最大耐力と計算値の比 (以下, 耐力比) は, 荒川 mean 式  $Q_{su}$  においては C-ECM01 は 1.52~1.55, C-CPS01 は 1.39~1.41 であった。靱性指針せん断式  $V_u$  においては C-ECM01 は 1.61~1.64, C-CPS01 では 1.47~1.48 であった。文献 7) では既往の構造実験から得られた実験値と各計算値の比較がされており, 荒川 mean 式, 靱性指針せん断式の耐力比の平均値はそれぞれ 1.38, 1.45 である。このことから従来のコンクリートの耐力比の平均と比較して C-ECM01 は 10%程度大きく, C-CPS01 は同等程度であるといえる。柱試験体のせん断補強筋比  $p_w=0.8\%$  である C-CPS02 の耐力比は, 荒川 mean 式  $Q_{su}$  においては 1.61~1.64 であり, 従来のコンクリートの耐力比の平均より 15%大きかった。靱性指針式  $V_u, V_{bu}$  においては計算値では靱性指針付着式  $V_{bu}$  の方が小さかったが, 3.4 節での試験体の観察状況からせん断破壊と判断した。そのため主に靱性指針せん断式  $V_u$  でせん断耐力の評価をし, 括弧内に靱性指針付着式  $V_{bu}$  を示しており, 靱性指針せん断式  $V_u$  では耐力比は 1.11~1.20 と計算値に近い値であった。いずれの柱試験体においても実験の最大耐力は既往の評価式である荒川 mena 式  $Q_{su}$ , 靱性指針せん断式  $V_u$ , 靱性指針付着式  $V_{bu}$  以上の耐力を発揮していることが確認された。

梁を模擬して軸力を 0 とした B-CPS01 の耐力比は, 荒川 mean 式  $Q_{su}$  においては 1.10~1.19 であり, 文献 7) の耐力比の平均値は 1 段配筋の梁で 1.18 と従来のコンクリートの耐力比の平均と同等程度であった。靱性指針付着式  $V_{bu}$  においては耐力比は正側で 1.04, 負側で 0.96 であった。この値を文献 4) の解説図 6.8.15 (既往の付着割裂によるせん断破壊した実験の実験最大耐力  $V_{uexp}$ /曲げ終局強度計算値  $V_{mu}$  と  $V_{bu}/V_{mu}$  の関係) にプロットしたものを図-7 に示す。正負側ともに計算値に近い値であった

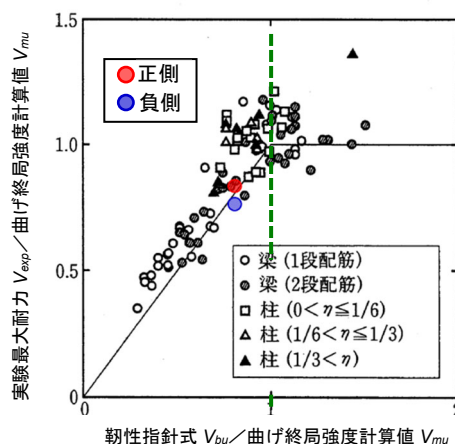


図-7 実験最大耐力  $V_{exp}/V_{mu}$  と  $V_{bu}/V_{mu}$  の関係 4)に加筆

が, 文献 4)によると図中の  $V_{bu}/V_{mu} \leq 1$  の実験データ (緑破線左側) の  $V_{uexp}/V_{bu}$  の平均値は 1.17 であり, この値より正側で 10%程度低く負側は 15%程度低い値であった。これはばらつきも考えられるが, 2 章をふまえると付着強度が影響している可能性もあるため, 付着割裂強度のデータの充実や同等の安全率の設定の検討が今後の課題として挙げられる。

### 3.6 初期剛性, ひび割れ強度の実験値と計算値

各試験体の初期剛性の実験値と計算値の比較を表-8 に示す。初期剛性の計算値は文献 6) に準じて曲げ剛性とせん断剛性を合成して算出し, 計算値 1 は試験区間  $L$  を用いて算出した。計算値 2 は, 剛域が  $1/4D$  ( $D$ =部材せい) スタブ側に入り込んでいる<sup>8)</sup>と仮定し,  $L'$  ( $L'=L+0.25D+0.25D$ ) を用いて算出した。算出に使用したコンクリートのヤング係数, ポアソン比は材料試験結果を用いており, 実験値は正側荷重の  $R=0.2/1000\text{rad}$  までのせん断力-部材角関係の割線剛性とした。

実験値と計算値 1 の比較では, 実験値/計算値 1 は 0.54~0.84 であった。文献 7) では計算値 1 と同様の算出方法で既往の構造実験から得られた実験値と計算値の比較が行われている。文献 7) の初期剛性の実験値/計算値の平均値は柱試験体で 0.76, 梁試験体で 0.46 であり, いずれの試験体も初期剛性は従来のコンクリートの評価と同程度の範囲であった。また, 実験値/計算値 2 は 0.72~1.18 であり, 剛域の入り込みを考慮すると計算値に近い結果となり, 初期剛性の評価の精度が良くなると考えられる。

表-8 初期剛性の実験値と計算値の比較

試験体名	L (mm)	L' (mm)	実験値 (kN/mm)	計算値 1 (kN/mm)	計算値 2 (kN/mm)	実験値/計算値 1	実験値/計算値 2
C-ECM01	900	1050	175.8	208.9	149.0	0.84	1.18
C-CPS01	900	1050	158.0	194.2	138.8	0.81	1.14
C-CPS02	900	1050	162.3	212.3	151.7	0.76	1.07
B-CPS01	1200	1350	38.6	71.3	53.7	0.54	0.72

L'=L+0.25D+0.25D, 計算値 1: スパン L を用いて算出した初期剛性, 計算値 2: スパン L' を用いて算出した初期剛性

表-9 ひび割れ強度の実験値と計算値の比較

試験体名	曲げひび割れ強度			せん断ひび割れ強度		
	実験値(kN)	計算値(kN)	実験値/計算値	実験値(kN)	計算値(kN)	実験値/計算値
C-ECM01	79.6	53.9	1.47	229.4	130.0	1.76
C-CPS01	77.7	56.3	1.38	215.6	133.9	1.61
C-CPS02	76.6	56.2	1.36	223.5	133.7	1.67
B-CPS01	17.0	13.7	1.24	76.9	73.2	1.05

表-9 に各試験体のひび割れ強度の計算値と実験値の比較を示す。ひび割れ強度の計算値も文献6)に準じて算出し、算出に使用したコンクリートの圧縮強度は材料試験結果を用いている。いずれの試験体も曲げひび割れ強度、せん断ひび割れ強度ともに実験値が計算値を上回っていた。文献7)の曲げひび割れ強度の実験値/計算値の平均値は柱試験体で1.23、梁試験体で1.07であり、せん断ひび割れ強度の実験値/計算値の平均値はせん断破壊型の柱試験体で1.41、梁試験体で1.05であることから、いずれの試験体もひび割れ強度は従来のコンクリートと同程度であった。

#### 4. まとめ

本研究では、ECM コンクリートをベースとし、細骨材をCO<sub>2</sub>固定処理を施した再生微粉および再生細骨材に置換したコンクリートの構造性能を確認するため、異形鉄筋の引抜試験および柱・梁形状を模擬したRC部材の曲げせん断実験を行った。その結果、以下の知見を得た。

- 1) ECM+CPS コンクリートはECM コンクリートよりも最大付着応力が普通鉄筋、防錆鉄筋ともに低くなる傾向がみられた。
- 2) ECM+CPS コンクリートを用いた柱部材は、既往の評価式(荒川mean式, 靱性指針式)以上のせん断耐力を発揮した。
- 3) ECM+CPS コンクリートを用いた付着破壊モードの梁部材は、既往の評価式の荒川mean式以上のせん断耐力を発揮し、靱性指針付着式と同程度のせん断耐力を発揮した。
- 4) ECM+CPS コンクリートを用いた柱・梁部材は従来のコンクリートと同程度の初期剛性を発揮し、剛域の入り込みを考慮すれば評価の精度が良くなる。
- 5) ECM+CPS コンクリートを用いた柱・梁部材は、既往の評価式の強度を超える曲げひび割れ強度、せん断ひび割れ強度を発揮した。

#### 謝辞

本研究は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託業務(JPNP21023)を受け、革新的カーボンネガティブコンクリートの材料・施工技術及び評価技術の開発プロジェクトで得られた成果である。ここに記して感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 高津比呂人, 宮内靖昌, 和地正浩ほか: エネルギー・CO<sub>2</sub> ミニマム (ECM) セメント・コンクリートを用いた躯体構造の開発, 日本建築学会技術報告集第17巻第37号, pp.891-896, 2011.10
- 2) 小島正朗, 池尾勇作, 西岡由紀子, 竹内優斗ほか: セメント系廃材へのCO<sub>2</sub>固定プロセス及び副産物の有効利用の研究その1~その5, 日本建築学会学術講演梗概集(北海道) pp.1197-1206, 2022.7
- 3) 師橋憲貴, 桜田智之: 乾燥収縮の抑制を目的とした再生コンクリート梁の付着性状, 日本建築学会学術講演梗概集(中国), pp.1165-1166, 2008.7
- 4) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説, 1999.7
- 5) 高津比呂人, 池尾陽作, 宮内靖昌ほか: 高炉スラグ高含有セメントを用いたコンクリートと鉄筋の付着特性確認実験, 日本建築学会が駆出講演梗概集(北陸), pp.99-100, 2010.7
- 6) 国土交通省国土技術政策総合研究所・国立研究開発法人建築研究所監修: 2020年版 建築物の構造関係技術基準解説書, 2020
- 7) 国立研究開発法人建築研究所: 実験データベースを用いた鉄筋コンクリート造部材の構造特性評価式の検証(2020年版), 建築研究資料, No.197号, 2020.3
- 8) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 2024.12