

繊維補強コンクリートを用いた鉄骨コンクリート部材の 構造性能に関する研究

—その6 せん断耐力の評価—

日大生産工 (院) ○荒牧 龍馬
日大生産工 (院) 六田莉那子
日大生産工 藤本 利昭

1 はじめに

筆者らは、繊維補強コンクリート (Fiber Reinforced Concrete : 以下, FRC) と内蔵鉄骨のみで構成される鉄骨コンクリート (Concrete Encased Steel : 以下, CES) 構造の実用化に向け、構造性能の検討を行っている¹⁾。

本報では、CES 構造の設計法を確立するため、既報(その3)²⁾で行った CES 部材の曲げせん断実験より得られた結果に基づき、せん断耐力評価法の検討および提案を行った。

2 耐力評価式の検討

2.1 CES部材の終局せん断耐力

CES部材の終局せん断耐力は、日本建築学会「鉄骨鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」(以下, SRC規準)³⁾を基に既往のSRC部材に対するせん断耐力評価式により、評価方法を検討した。

CES部材の終局せん断耐力 $_{sc}Q_{su}$ は、鉄骨部分の終局せん断耐力 $_sQ_{su}$ とコンクリート部分の終局せん断耐力 $_cQ_{su}$ を足し合わせて評価した。

$$_{sc}Q_{su} = _sQ_{su} + _cQ_{su} \quad (1)$$

2.2 鉄骨部分の終局せん断耐力

鉄骨のせん断降伏によって決まるせん断耐力は、SRC規準に基づき以下による。

$$_sQ_{su} = t_w \cdot d_w \cdot \sigma_y / \sqrt{3} \quad (2)$$

ここで、 t_w : 鉄骨ウェブ厚さ、 d_w : 鉄骨ウェブせい、 σ_y : 鉄骨ウェブの降伏応力度である。

2.3 コンクリート部分の終局せん断耐力

SRC 規準において、コンクリート部分の終局せん断耐力式は、規準本文に記載された規準式の他、解説に精度の良いコンクリートのせん

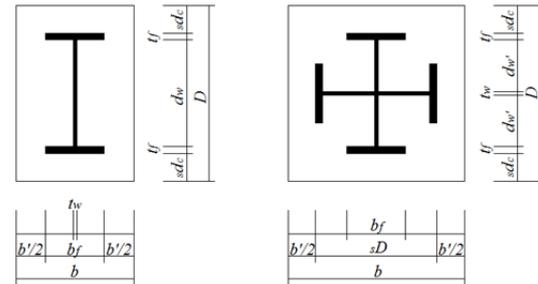


図-1 断面の定義

断耐力式として、分割アーチ式⁴⁾、簡略化せん断耐力式⁵⁾が記載されている。本報告では、まず文献5)を参考に SRC 規準のせん断耐力式、RC 終局強度指針式⁶⁾、分割アーチ式、簡略化せん断耐力式を用いて検討を行った。以下に各算定式を比較して示す。また、断面の定義を図-1に示す。

a) SRC 規準式

SRC 規準のコンクリート部分の耐力は、以下の $_cQ_{su1}$ と $_cQ_{su2}$ の小さい方でせん断耐力が決まる。

$$_cQ_{su1} = 0.5b \cdot D \cdot F_s \cdot \alpha \quad (3)$$

$$_cQ_{su2} = b' \cdot D \cdot F_s \quad (4)$$

ここで、 $_cQ_{su1}$: 斜張力による終局せん断耐力、 F_s : コンクリートのせん断強度で $F_s = \min(0.15\sigma_B, 2.25 + 4.5\sigma_B/100)$ 、 α : 柱のせん断スパン比 $M/(QD)$ による係数で $\alpha = 4/(M/(QD)+1)$ かつ $1 \leq \alpha \leq 2$ 、 $_cQ_{su2}$: 付着割裂による終局せん断耐力、 b' : コンクリートの有効幅 (H形鋼強軸 : $=b-b_f$, 交差型 H 鉄骨 : $=b-sD$)、 b_f : フランジ幅、 sD : 鉄骨せいである。

Study on Structural Performance of Concrete Encased Steel Member using
Fiber Reinforced Concrete

— Part.6 Evaluation of Shear Strength —

Ryoma ARAMAKI, Rinako ROKUTA and Toshiaki FUJIMOTO

b) RC 終局強度指針式

$${}_c Q_{su} = \tan\theta \cdot b \cdot D \cdot v \cdot \sigma_B / 2 \quad (5)$$

ここで、 $\tan\theta = \sqrt{(l'/D)^2 + 1} - l'/D$ 、 l' : 柱の内法スパン、 v : コンクリートの有効係数で $v = 0.7 - \sigma_B / 200$ である。

c) 分割アーチ式

分割アーチ式は図-2 に示すように、せん断付着破壊が、内蔵鉄骨によりせん断力の伝達が妨げられるため生じると考えた式である。H 形鋼強軸の場合 (式(6)) と交差型 H 形鋼の場合 (式(7)) の算定式を以下に示す。

$$\begin{aligned} {}_c Q_{su} &= \tan\theta \cdot b \cdot D \cdot v \cdot \sigma_B / 2 \\ &+ \tan\theta_1 (b_f - t_w) \cdot d_w \cdot v \cdot \sigma_B / 2 \\ &+ \tan\theta_2 \cdot b_f \cdot s \cdot d_c \cdot v \cdot \sigma_B \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} {}_c Q_{su} &= \tan\theta \cdot b \cdot D \cdot v \cdot \sigma_B / 2 \\ &+ \tan\theta_2 \cdot b_f \cdot s \cdot d_c \cdot v \cdot \sigma_B \\ &+ \tan\theta_3 (s \cdot D - b_f) (D - t_w) \cdot v \cdot \sigma_B / 2 \quad (7) \\ &+ \tan\theta_4 (b_f - t_w) \cdot d_w' \cdot v \cdot \sigma_B \end{aligned}$$

ここで、 t_w : 鉄骨ウェブ厚さ、 d_w : 鉄骨ウェブせい、

$$\tan\theta_1 = \sqrt{(l'/d_w)^2 + 1} - l'/d_w$$

$$\tan\theta_2 = \sqrt{(l'/s \cdot d_c)^2 + 1} - l'/s \cdot d_c$$

$$\tan\theta_3 = \sqrt{(2l'/(D - t_w))^2 + 1} - 2l'/(D - t_w)$$

$$\tan\theta_4 = \sqrt{(l'/d_w')^2 + 1} - l'/d_w'$$

v : 鉄骨フランジに囲まれるコンクリートは 1.0、 $s \cdot d_c$: 鉄骨のかぶり厚さである。

d) 簡略化せん断耐力式

$${}_c Q_{su} = \tan\theta \cdot b \cdot D \cdot \mu \cdot \sigma_B / 2 \quad (8)$$

簡略化せん断耐力式は、分割アーチ式を簡略化した式であり、 μ はアーチの有効係数で $\mu = (0.5 + b'/b) \leq 1.0$ である。

式(8)は、RC 終局強度指針式(5)のコンクリートの有効係数 v を μ に置き換えた式に見えるが、式の導出にあたっては、 $v=1.0$ とし、アーチの有効係数 μ を導入した式である。よって、式(8)は以下のようにも書き換えられる。

$$\begin{aligned} {}_c Q_{su} &= \tan\theta (0.5 + b'/b) \cdot b \cdot D \cdot v \cdot \sigma_B / 2 \\ &= \tan\theta \cdot 0.5 \cdot b \cdot D \cdot v \cdot \sigma_B / 2 \\ &+ \tan\theta \cdot b \cdot D \cdot v \cdot \sigma_B / 2 \end{aligned} \quad (9)$$

ここで、式(9)の第 2 項は、分割アーチ式(6)、(7)の第 1 項と同じであり、鉄骨幅外側部分のせん断耐力を表している。一方、式(9)の第 1 項は、分割アーチ式(6)、(7)の第 2 項以下を簡

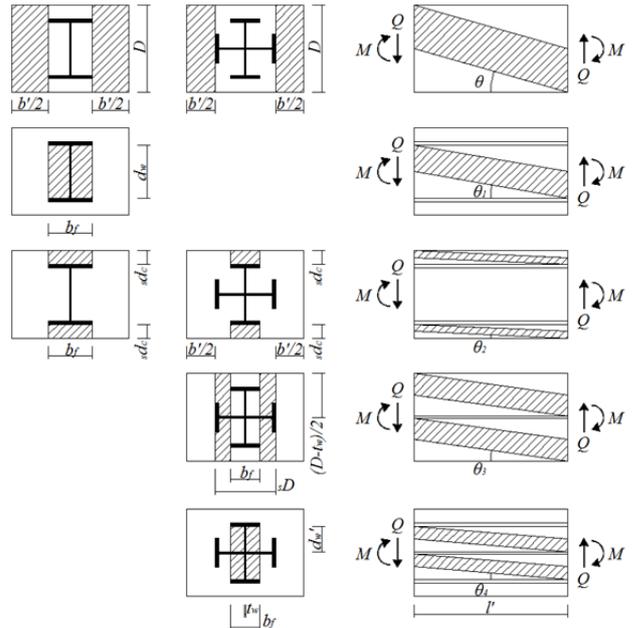


図-2 分割アーチ式解説図

表-1 計算値および実験値一覧

	SH-200	SH-300	SH-400	DH-200	DH-300	DH-400	
鉄骨	${}_s Q_{mu}$ (kN)	427			334		
	${}_s Q_{su}$ (kN)	208			185		
曲げ耐力	(4)式	539	561	580	567	642	709
	(5)式	263	373	483	185	295	406
(6)(7)式	${}_c Q_{su}$ (kN)	329	390	450	307	368	428
	(8)式	301	362	422	261	322	383
(10)式	μ	0.75	1.00		0.50	0.83	1.00
	${}_c Q_{su}$ (kN)	375	543	654	297	466	634
実験値	Q_{max} (kN)	387	476	565	381	478	576
	Q_{max} (kN)	414	495	599	458	495	574

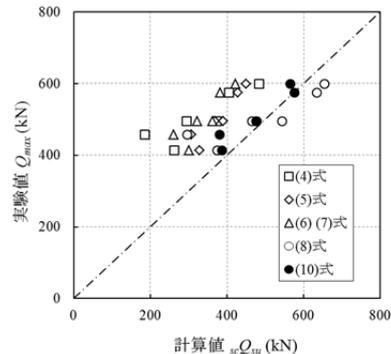


図-3 各式による計算値と実験値の関係

略化したものであり、鉄骨幅内側部分のせん断耐力を表している。アーチが鉄骨で分断されても鉄骨が入っていない場合、すなわちアーチが分断されていない場合の 0.5 倍のせん断力は確保されるという考えに基づき、 $b'=0$ すなわち鉄骨幅と柱幅が等しい場合となっても $\mu=0.5$ となるように μ を設定している。よって、式(9)の第 1 項の 0.5 は、 $\tan\theta$ の係数である。なお $b'=b$ の場合、すなわち内蔵鉄骨がない場合は、 $\mu=1.5$ となり 1.0 を超えるため、 $\mu=1.0$ として計算することになる。

e) 各式による比較

各算定式による計算値と実験値を表-1に、各算定式による計算値と実験値との関係を図-3に示す。計算値と実験値の比較により、SRC 標準式、RC 終局強度指針式、分割アーチ式のせん断強度は、実験結果に対してせん断耐力を極めて小さく評価していることがわかる。また、簡略化せん断耐力式は上記の三式に比べ実験値との対応が最も良いが、コンクリートの断面幅が小さい時には過小評価、断面幅が大きくなると過大評価となり、試験体 SH-400 においては計算結果が曲げ破壊先行となり、実験の破壊モードと一致しない場合が生じている。これらの理由として、CES 部材では鉄筋による負担せん断強度がないこと、鉄骨せいが大きいためコンクリートの有効幅 b が小さくなること、被覆コンクリートに FRC を用いているため分割アーチ式のような機構とならず、むしろかぶりコンクリートを含めたコンクリートが一体で挙動するため、簡略化せん断耐力式と比べてもコンクリートの有効幅を大きく取れる可能性が考えられることなどが挙げられる。

3 FRC 部分のせん断耐力式の検討

3.1 既往の CES 部材のせん断耐力評価式⁷⁾⁸⁾

ここでは、文献 7)8)に基づく CES 部材を対象とした、FRC 部分のせん断耐力評価式を示す。

$${}_c Q_{su} = \tan\theta \cdot b \cdot D \cdot \mu \cdot \sigma_B / 2 \quad (10)$$

ここで、 μ : コンクリート (FRC) の有効係数である。式(10)では、簡略化せん断耐力式(8)のコンクリートアーチの有効係数 μ を図-4に示すように、コンクリートの有効係数と考え、内蔵鉄骨が H 形鋼の場合、せん断破壊した CES 柱部材の実験結果⁷⁾に基づき $\mu=0.80$ 、交差型 H 形鋼の場合、せん断破壊を示した実験データがないことから、曲げ破壊した CES 柱の実験結果⁸⁾より逆算して $\mu=0.87$ としている。

図-3 に評価式による計算値と実験値との関係を示す。評価式では、CES 柱部材の実験結果に基づきコンクリート有効係数 μ を設定していることから、実験結果と良好な対応を示している。ただし、交差型 H 形鋼を内蔵した試験体では、コンクリートの断面幅によって実験値と計算値との比に差異が生じている (表-1 参照)。

そこで、実験結果に基づきコンクリートの負担せん断耐力に対する断面幅の影響を検討した。

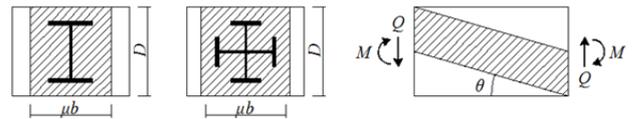


図-4 既往の CES せん断耐力式解説図

3.2 耐力評価式の提案

表-2 に検討結果を示す。検討に際し、FRC 部分のせん断耐力 ${}_c Q_{exp}$ は、CES のせん断耐力 Q_u から内蔵鉄骨の負担せん断力 ${}_s Q_{su}$ を差し引くことにより求めた。ここで各試験体の Q_u は、実験より得られた最大耐力 Q_{max} としたが、DH-200 試験体は、内蔵鉄骨のひずみ硬化による強度上昇分が含まれていると考えられることから、荷重 - 変形関係を基に、部材角 $R=2.00\%$ 時の耐力 $Q_u=425\text{kN}$ を用いることとした。

$${}_c Q_{exp} = Q_u - {}_s Q_{su} \quad (11)$$

次に FRC 部分のせん断耐力に対する有効係数 μ_{exp} を ${}_c Q_{exp}$ を基に、次式により逆算した。

$$\mu_{exp} = {}_c Q_{exp} / (\tan\theta \cdot b \cdot D \cdot \sigma_B / 2) \quad (12)$$

a) 鉄骨幅内側の FRC 部分の負担せん断力

鉄骨幅内側のコンクリートの有効係数 μ_i は、表-2 よりコンクリート幅が鉄骨幅と等しい試験体 DH-200 では $\mu_{exp}=1.069$ となったことから、 $\mu_i = \mu_{exp} = 1.0$ とできるものと考えた。なお、SH シリーズでは、断面幅と鉄骨幅が等しい試験体がないため、仮想試験体 (SH-150) を仮定し、 $\mu_{exp}=1.0$ として ${}_c Q_{exp}$ を求めた。

b) 鉄骨幅外側の FRC の負担せん断力

鉄骨の外側の負担せん断力は、各試験体の ${}_c Q_{exp}$ より SH シリーズでは仮想試験体 SH-150 の ${}_c Q_{exp}$ を、DH シリーズでは DH-200 の ${}_c Q_{exp}$ を差し引くことにより、外側コンクリートの負担せん断力 ${}_c Q_o$ を求めた。

$${}_c Q_o = {}_c Q_{exp} - {}_c Q_{exp} (\text{SH-150, DH-200}) \quad (13)$$

求めた外側コンクリートの負担せん断力 ${}_c Q_o$ より、外側コンクリートの有効係数 μ_o を求めた。

$$\mu_o = {}_c Q_o / (\tan\theta \cdot b \cdot D \cdot \sigma_B / 2) \quad (14)$$

図-5 に全断面幅 b に対する鉄骨外側のコンクリート幅 b' との比 ($= b'/b$) と μ_o との関係を示す。 μ_o は b'/b が大きくなるほど大きな値となることがわかる。これらの関係を近似式で表すと以下のように示される。

$$\langle \text{SH} \rangle \quad \mu_{opro} = 0.34 \cdot b'/b + 0.55 \quad (15a)$$

$$\langle \text{DH} \rangle \quad \mu_{opro} = 0.24 \cdot b'/b + 0.54 \quad (15b)$$

μ_o と鉄骨幅内側の有効係数 $\mu_i (=1.0)$ を用いコンクリート全断面の有効係数 μ_{pro} を求めると、次式のように表せる。

<SH>

$$\mu_{pro} = \frac{(b_f \cdot \mu_i + b \cdot \mu_o)}{b} = \frac{(b_f + b(0.34b'/b + 0.55))}{b} \quad (16a)$$

<DH>

$$\mu_{pro} = \frac{(sD \cdot \mu_i + b \cdot \mu_o)}{b} = \frac{(sD + b(0.24b'/b + 0.54))}{b} \quad (16b)$$

ここで、 b_f : 鉄骨フランジ幅、 sD : 鉄骨せいである。

表-2 より、 μ_{pro} は、SH シリーズが 0.852 ~ 0.909、DH シリーズが 0.830 ~ 0.873 となっている。これらの値は、CES 柱部材の実験において文献 7)8) で提案した値 SH が 0.80、DH が 0.87 と近い値となっている。

図-6 に提案式の計算値と実験値の関係を示す。本提案は実験値を精度よく評価できている。また文献 7)8) による (1) 式の計算値も併せて示すと、ほぼ同様に評価できており、本実験の範囲 (SH が $b'/b \leq 0.625$ 、DH が $b'/b \leq 0.5$) においては、どちらの有効係数を用いても評価可能である。

図-7 に既往の実験と本提案式の対応を示す。文献 7)8) において本提案を用いた計算値と実験値の関係は、内蔵鉄骨の差異によらず精度よく評価できており、本提案は既往の CES 部材の実験においても評価可能であることがわかる。

4 まとめ

既報 (その 3) の実験結果を基に、CES 部材のせん断耐力評価方法の検討および提案を行い、以下の知見を得ることができた。

CES 部材の終局せん断耐力は、SRC 部材を対象とした既往のせん断耐力評価式に基づきコンクリートの有効幅係数を用いた評価式を提案した。この方法により、本実験の範囲 (SH が $b'/b \leq 0.625$ 、DH が $b'/b \leq 0.5$) において、内蔵鉄骨および部材幅の差異によらず CES 部材の終局せん断耐力が評価可能であることを明らかとした。

「参考文献」

- 1) 日本建築学会 構造委員会 鋼コンクリート合成構造運営委員会: CES 建造物の構造性能評価指針 (案) の制定に向けて、2013 年度日本建築学会大会 (北海道) 構造部門 (SCCS) パネルディスカッション資料、2013 年 8 月
- 2) 荒牧龍馬、六田莉那子、藤本利昭: 繊維補強コンクリートを用いた鉄

表-2 検討結果の数値一覧

	(SH-150)	SH-200	SH-300	SH-400	DH-200	DH-300	DH-400
b'/b	0.000	0.250	0.500	0.625	0.000	0.333	0.500
sQ_{su} (kN)	208	208	208	208	185	185	185
Q_u (kN)	377	414	495	599	425	495	574
cQ_o (kN)	169	206	287	391	240	310	389
σ_g (N/mm ²)	31.9	31.9	31.9	31.9	31.7	31.7	31.7
μ_{exp}	1.000	0.912	0.847	0.865	1.069	0.921	0.866
cQ_o (kN)	0	37	118	222	0	70	149
μ_o	—	0.647	0.694	0.785	—	0.624	0.664
μ_{pro}	0.550	0.635	0.720	0.763	0.540	0.620	0.660
μ_{pro}	1.000	0.909	0.860	0.852	1.000	0.873	0.830
cQ_{su} (kN)	169	205	291	385	225	294	373
sQ_{su} (kN)	377	413	499	593	410	479	558
Q_{max}/sQ_{su}	—	1.002	0.991	1.011	1.118	1.033	1.029

$cQ_o = Q_u - sQ_{su}$ 、 $cQ_o = cQ_{exp} - cQ_{exp}(SH-150 \text{ or } DH-200)$ 、 $\tan\theta = 0.236$

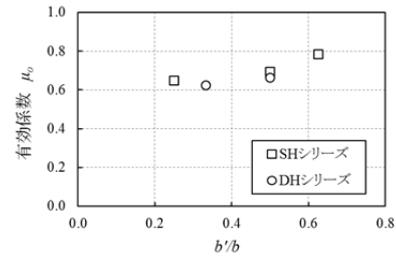


図-5 b'/b と μ_o の関係

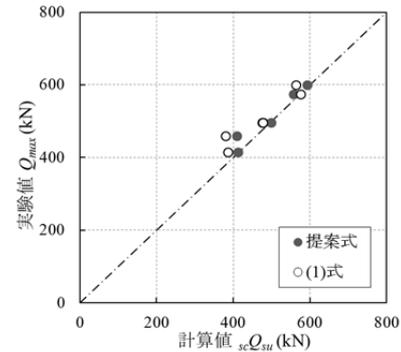


図-6 提案式と実験値の比較

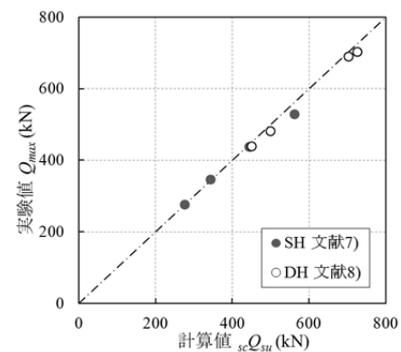


図-7 既往の実験との対応

骨コンクリート部材の構造性能に関する研究 その 3 せん断性状の検討, 日本大学生産工学部第 46 回学術講演会講演概要集, 2013 年 12 月, pp.5-8

- 3) 日本建築学会: 鉄骨鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 2014 年
- 4) 若林実, 南宏一: コンクリート系構造部材のせん断強度について, 京都大学防災研究所年報, 第 24 号 B-1, 1981 年 4 月, pp.245-277
- 5) 土井希祐, 称原良一: SRC 部材の塑性理論に基づくせん断設計式の検討, 日本建築学会構造系論文集, 第 516 号, 1992 年 2 月, pp.151-158
- 6) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート建造物の終局強度型耐震設計指針・同解説, 1990.11 耐震設計指針・同解説, 1990 年 11 月
- 7) 松井智哉, 溝淵博己, 藤本利昭, 倉本洋: シアスパン比が異なる CES 柱の静的載荷実験, コンクリート工学年次論文集, 2009 年 7 月, pp.1165-1170
- 8) 藤本利昭, 倉本洋, 松井智哉: 交差 H 型断面鉄骨を内蔵した CES 柱の構造性能, 第 8 回復合・合成構造の活用に関するシンポジウム, 土木学会/日本建築学会, 2009 年 11 月, Paper No. 4