

(32) CES部材のひび割れ強度に関する研究

六田 莉那子¹・荒牧 龍馬²・藤本 利昭³

¹正会員 日本大学大学院生産工学研究科 建築工学専攻 (〒275-8575 千葉県習志野市泉町1-2-1)
E-mail:ciri13036@g.nihon-u.ac.jp

²正会員 日本大学大学院生産工学研究科 建築工学専攻 (〒275-8575 千葉県習志野市泉町1-2-1)
E-mail:ciry13002@g.nihon-u.ac.jp

³正会員 日本大学生産工学部建築工学科 准教授 (〒275-8575 千葉県習志野市泉町1-2-1)
E-mail:fujimoto.toshiaki@nihon-u.ac.jp

現在, SRC構造の鉄筋を省略し, 繊維補強コンクリート(FRC)を用いた鉄骨コンクリート構造(CES構造)の実用化に向け, 構造性能の検討を行っている。

本研究では, まずCES構造に適用されるFRCのひび割れ強度を確認し, 更にCES部材のひび割れ強度についての検討を行った。その検討に用いる評価式としては, 普通コンクリートの評価対象の式である日本建築学会「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」の式, 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」の式の2式を対象に, これらがFRCならびにCES部材のひび割れ強度の評価に適用可能であるかを検討した。その結果より, CES部材ならびにCES部材に用いるFRCの曲げひび割れ強度およびせん断ひび割れ強度は, 既往の式で概ね評価できることがわかった。

Key Words : CES, fiber reinforced concrete, bending crack, shear crack

1. はじめに

筆者らは, 鉄骨鉄筋コンクリート構造(以下, SRC構造とする)の鉄筋を省略し, 繊維補強コンクリート(Fiber Reinforced Concrete; 以下, FRCとする)を用いた鉄骨コンクリート構造(Concrete Encased Steel Structure; 以下, CES構造とする。図-1参照)の実用化に向け, 構造性能の検討を行っている。¹⁾ これまでは, 主としてCES部材の終局耐力や変形能力に着目した研究が多く行われているが, 部材の構造性能の評価にあたっては, 使用性, 耐久性, 損傷制御の観点から, ひび割れ強度の把握も重要となる。

そこで本研究では, CES構造の曲げひび割れ強度, せん断ひび割れ強度の評価方法を確立するため, 最初にCES構造に適用されるFRCのひび割れ強度を確認した上で, 更にCES柱および梁部材のひび割れ強度について検討を行った。

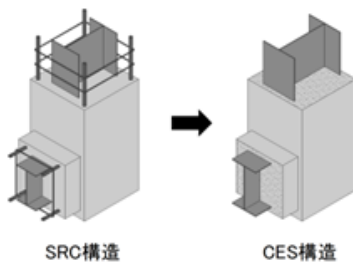


図-1 CES構造システム

2. ひび割れ強度の算定式

コンクリート系部材の曲げひび割れ強度式としては, 日本建築学会「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説(以下RC規準とする)」²⁾ に以下の強度式が示されている。

$$M_{cr} = \sigma_b Z_e + \frac{ND}{6} \quad (1)$$

ここで, σ_b : コンクリートの曲げ強度

$$(\sigma_b = 0.56\sqrt{\sigma_B})$$

σ_B : コンクリートの圧縮強度

Z_e : 等価断面係数

N : 作用軸力

D : 断面せい

一方, せん断ひび割れ強度に関しては, 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(以下靱性指針とする)」³⁾ に, 弾性理論によるモールの応力円に基づく次式が示されている。

$$V_{sc} = \sqrt{\sigma_T^2 + \sigma_0 \cdot \sigma_0} \cdot b \cdot D \cdot \frac{1}{\kappa} \quad (2)$$

ここで, σ_T : コンクリートの引張強度

$$(\sigma_T = 0.313\sqrt{\sigma_B})$$

σ_0 : 軸応力度

b : 断面幅

κ :形状係数で矩形断面では1.5

本研究では、これらの式を対象にFRCならびにCES部材のひび割れ強度の検討を行った。

3. FRCのひび割れ強度

(1) 実験方法

FRCのひび割れ強度を検討するため、材料の圧縮試験、曲げ強度試験、割裂引張試験を行った。圧縮試験および静弾性係数試験は「JIS A 1108 コンクリートの圧縮強度試験方法」および「JIS A 1149 コンクリートの静弾性係数試験方法」により、曲げ強度試験は「JIS A 1106 コンクリートの曲げ強度試験方法」により、割裂引張試験は「JIS A 1113 コンクリートの割裂引張強度試験方法」に基づき行った（図-2参照）。試験体寸法は、圧縮試験、割裂引張試験は100φ×200mm、曲げ強度試験は100×100×400mmである。図-3に実験状況を示す。試験装置は2000kN万能試験機を使用した。

試験体の一覧を表-1に示す。試験体は、文献4)～6)に示した構造実験に際して製作したものである。全てのFRCの試験体は、普通コンクリートにビニロンファイバー（RF4000）を体積混入率で1%混入して製作した。

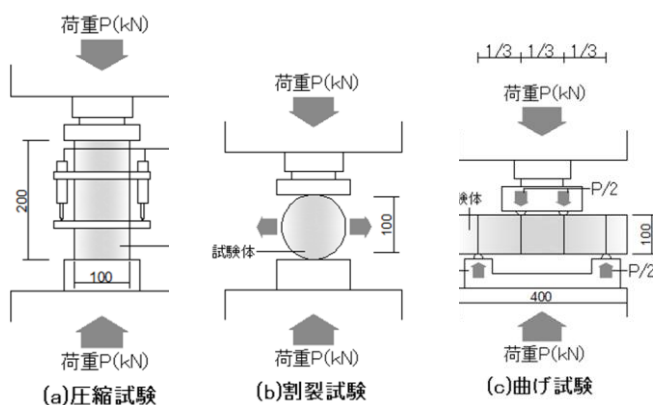


図-2 試験方法

(2) 実験結果

各材料の試験結果の一覧を表-1に示す。実験は各試験とも1調査当たり3体行い、表中には各々の平均値を示している。

a) 圧縮強度

圧縮試験結果より得られた普通コンクリートと FRC の圧縮強度の関係を図-4 に示す。図-4 の結果より普通コンクリートの圧縮強度は $\sigma_B = 33.3 \sim 51.9$ (N/mm²) に対して繊維を混入した繊維補強コンクリートは $\sigma_B = 33.0 \sim 45.4$ (N/mm²) であった。普通コンクリートに繊維を混入したコンクリートの圧縮強度は普通コンクリートに比べ低下することが既往の研究⁷⁾においても報告されており、本実験結果は同様の結果といえる。

表-1 試験体一覧および実験結果

	種類	設計基準強度 F_c (N/mm ²)	材齢	圧縮強度 σ_B (N/mm ²)	ヤング係数 E_c (N/mm ²)	曲げ強度 σ_b (N/mm ²)	引張り強度 σ_t (N/mm ²)
①	普通	36	974日	51.9	31461	7.2	—
	繊維補強			45.4	31173	7.1	—
②	普通	36	902日	49.3	28271	6.3	—
③	普通	27	560日	46.4	32548	—	3.2
	繊維補強			46.4	30982	—	3.5
④	繊維補強	27	36日	31.9	29985	—	2.8
			174日	39.1	26972	6.1	—
⑤	繊維補強	27	58日	31.7	27448	5.1	2.7

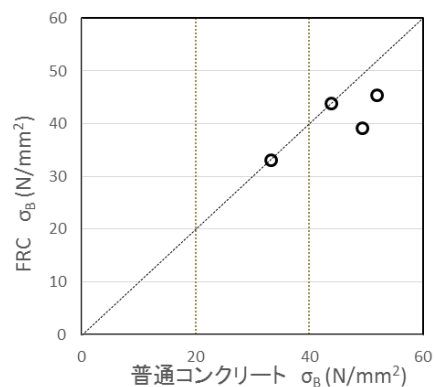


図-4 普通コンクリートとFRCの圧縮強度の関係



(a) 圧縮破壊



(b) 割裂引張破壊



(c) 曲げ破壊

図-3 実験状況

圧縮試験より得られた応力-ひずみ関係（ σ - ε 関係）のグラフの一例を図-5に示す。表-1および図-5より、FRCは普通コンクリートに繊維を混入することで、圧縮強度が若干低下する傾向が認められる。その一方で、FRCは最大荷重に達してから徐々に荷重が低下し、繊維を混入することにより圧縮靱性は向上することがわかる。

b) 曲げ試験

曲げ試験から得られた曲げ強度-中央たわみ関係（ σ - δ 関係）のグラフの一例を図-6に示す。普通コンクリートは、応力が $\sigma=7\text{N/mm}^2$ 程度で曲げひび割れ発生後、急激に強度が低下していることがわかる。それに対しFRCは、普通コンクリートと同様に $\sigma=7\text{N/mm}^2$ 程度で曲げひび割れが発生した後、強度が $\sigma=4\sim 5\text{N/mm}^2$ に低下するものの、一旦強度を維持した後に緩やかな強度低下をしている。このように、FRCの方が普通コンクリートに比べ曲げ靱性が向上することがわかる。但しFRCの曲げひび割れ強度は、上述のように普通コンクリートとほぼ同等であった。

c) 割裂引張試験

通常のコンクリートの割裂引張強度では、図-3(b)に示すように割裂引張強度に達すると試験体が二つに割れ、強度が低下（喪失）することは周知の事実である。一方FRCでは、割裂引張強度に達すると、図-3(b)のように中央にひび割れが発生し、強度が低下するものの、混入した繊維により試験体が2つに分離することなく、その後も荷重をかけ続けると、ある程度の強度を維持していた。このことは、圧縮試験、曲げ試験と同様に繊維による引張靱性を向上させる効果といえる。

なお、割裂引張強度に関しては、表-1に示す通り、普通コンクリートとFRCはほぼ同等であった。

(3) FRCのひび割れ強度

2章で示したひび割れ強度の算定式、(1)、(2)式は主として鉄筋コンクリート、普通コンクリートを対象とした算定式である。本節ではこれらの式がFRCにも適用可能であるかを実験結果を基に検討した。

a) 圧縮強度と曲げ強度の関係

図-7に曲げ強度と圧縮強度の関係（ $\sigma_b - \sqrt{\sigma_B}$ 関係）を示す。図中には、本実験データと既往の文献に7)～12)示された普通コンクリートとFRCの材料試験結果も併せて示している。

図中にはRC規準式におけるコンクリートの曲げひび割れ強度 $\sigma_b = 0.56\sqrt{\sigma_B}$ を実線で示すが、全てのデータが $\sigma_b = 0.56\sqrt{\sigma_B}$ を上回っていることがわかる。曲げひび割れ強度の実験値からコンクリートのひび割れ応力度を計算すると、普通コンクリートの平均値が

$\sigma_b = 0.79\sqrt{\sigma_B}$ 、FRCの平均値が $\sigma_b = 0.97\sqrt{\sigma_B}$ であり、FRCのひび割れ強度が普通コンクリートより高い結果となっている。3章(2)に示した結果より、圧縮強度に関しては、FRCが普通コンクリートより低下することを踏まえて考えれば、ほぼ同等と評価できる。以上の結果から、RC規準の曲げひび割れ強度式 $\sigma_b = 0.56\sqrt{\sigma_B}$ によりFRCの曲げひび割れ強度は安全側に評価できるものと考えられる。

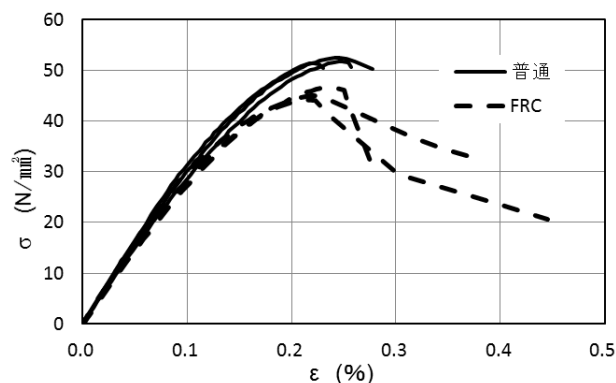


図-5 圧縮試験結果（表-1の①）

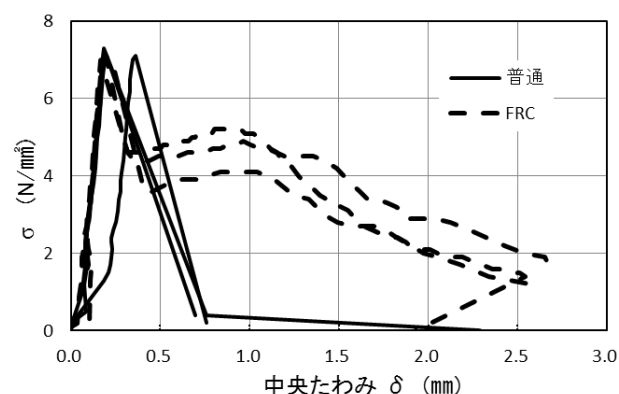


図-6 曲げ試験結果（表-1の①）

b) 圧縮強度と割裂引張強度の関係

図-8に割裂引張強度と圧縮強度の関係（ $\sigma_T - \sqrt{\sigma_B}$ 関係）を示す。図中には図-6と同様に本実験データと既往の文献7)～12)に示された普通コンクリートとFRCの実験結果を示している。

割裂引張強度に関しても、靱性指針におけるコンクリートのひび割れ強度 $\sigma_T = 0.313\sqrt{\sigma_B}$ を実線で示すが、全てのデータが $\sigma_T = 0.313\sqrt{\sigma_B}$ を上回っていることがわかる。先ほどの曲げひび割れ強度と同様に実験によるせん断ひび割れ強度からコンクリートのひび割れ応力度を計算すると、普通コンクリートの平均値が $\sigma_T = 0.44\sqrt{\sigma_B}$ 、FRCの平均値が $\sigma_T = 0.50\sqrt{\sigma_B}$ であり、普通コンクリートとFRCとの差は曲げ強度と比

べると僅かであるが、FRC が普通コンクリートを上回っている。これらの結果から、靱性指針式のせん断ひび割れ強度式 $\sigma_T = 0.313\sqrt{\sigma_B}$ により FRC のひび割れ強度は安全側に評価できるものと考えられる。

(4) 繊維混入前の普通コンクリートの圧縮強度とひび割れ強度との関係

3章(2)の結果より、FRCの圧縮強度は繊維混入前の普通コンクリート（以下、ベースコンクリートとする。）の圧縮強度より低下することから、ベースコンクリートの圧縮強度とひび割れ強度との比較を行った。

図-9にベースコンクリートの曲げひび割れ強度と圧縮強度の関係（ $\sigma_b - \sqrt{\sigma_B}$ の関係）を示す。図中には本実験データと既往の文献(7)～(12)のデータのベースコンクリートとFRCの材料試験結果も併せて示している。

図の横軸は、FRC に関しては、ベースコンクリートの圧縮強度を示しており、縦軸はコンクリートの曲げ強度を示している。データ数が少ないため、明確な結論は言えないが、圧縮強度と曲げひび割れ強度との関係は、普通コンクリートの平均値が $\sigma_b = 0.4414\sqrt{\sigma_B}$ に対し、FRC の平均値が $\sigma_b = 0.5352\sqrt{\sigma_B}$ となっており、普通コンクリートと FRC の差は僅かであった。このことに

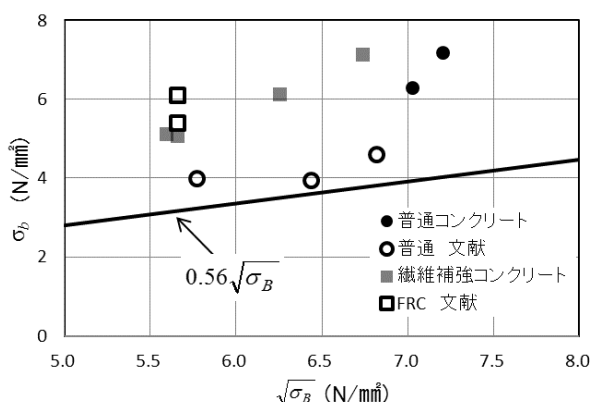


図-7 圧縮強度と曲げ強度の関係

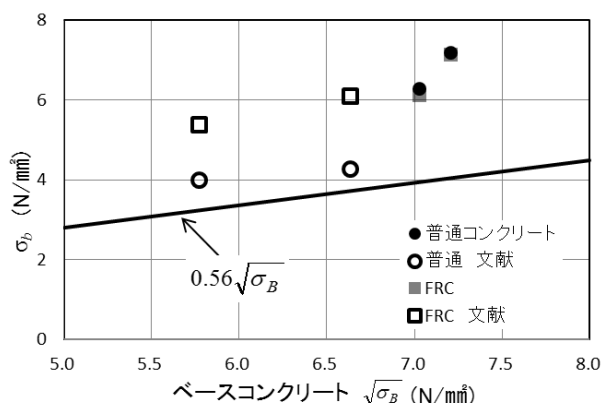


図-9 ベースコンクリートの圧縮強度と曲げ強度の関係

より、FRC のように繊維を入れることによる曲げ強度の向上は殆ど認められないと考えられる。

図-9と同様に図-10にベースコンクリートの割裂引張強度と圧縮強度との関係（ $\sigma_T - \sqrt{\sigma_B}$ の関係）を示す。図中には本実験データと既往の文献(7)～(12)のデータの普通コンクリートとFRCの材料試験結果も併せて示している。図-10より普通コンクリートとFRCのように繊維を入れたコンクリートの曲げ強度との比較した結果、圧縮強度と割裂引張強度との関係は、普通コンクリートの平均値が $\sigma_T = 0.8265\sqrt{\sigma_B}$ 、FRC の平均値が $\sigma_T = 0.9313\sqrt{\sigma_B}$ で、繊維を混入することによる割裂引張強度の向上は殆ど認められないと考えられる。

4. CES部材のひび割れ強度

3章の検討により、CES部材に用いられるFRCのひび割れ強度は、曲げひび割れ強度に関してはRC規準式の $\sigma_b = 0.56\sqrt{\sigma_B}$ 、せん断ひび割れ強度に関しては靱性指針式の $\sigma_T = 0.313\sqrt{\sigma_B}$ の両式でほぼ評価できることが分かった。これらを踏まえて、既往の文献(6)、(13)～(15)の実験結果に基づき、CES柱とCES梁部材の曲げひび割れ強度、ならびにせん断ひび割れ強度を検討した。

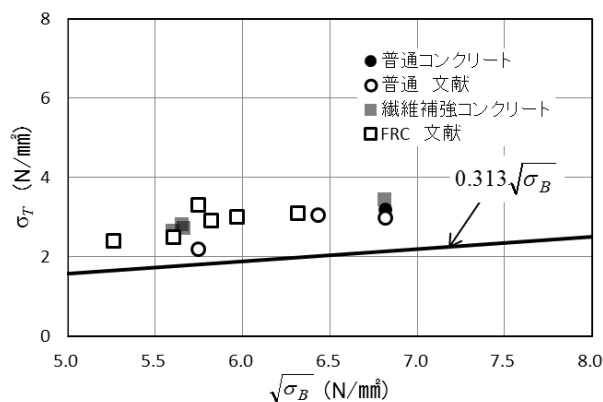


図-8 圧縮強度と割裂引張強度の関係

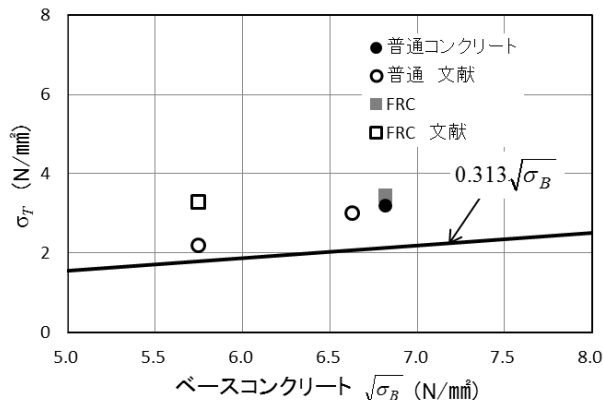


図-10 ベースコンクリートの圧縮強度と割裂引張強度の関係

(1) CES柱

a) 曲げひび割れ強度

CES柱の曲げひび割れ強度の一覧を表-2に、CES柱の曲げひび割れ強度の実験値と計算値の関係を図-11に示す。CES柱の実験における曲げひび割れモーメントは、RC規準式による曲げひび割れモーメントを概ね上回っており、実験値と計算値との比は1.28であった。以上の結果からCES柱の曲げひび割れ強度は、RC規準式により評価して良いものと考えられる。

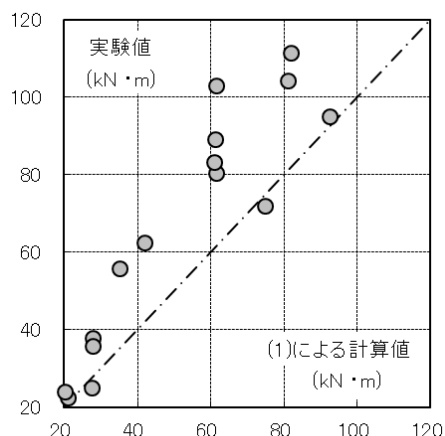


図-11 柱の曲げひび割れ強度の比較

b) 柱のせん断ひび割れ強度

CES柱のせん断ひび割れ強度の一覧を表-3に、CES柱のせん断ひび割れ強度の実験値と計算値の関係を図-12に示す。CES柱の実験における実験値と靱性指針式との対応はよく、実験値と計算値との比は1.09であった。以上の結果から、CES柱のせん断ひび割れ強度は、靱性指針式により評価して良いものと考えられる。

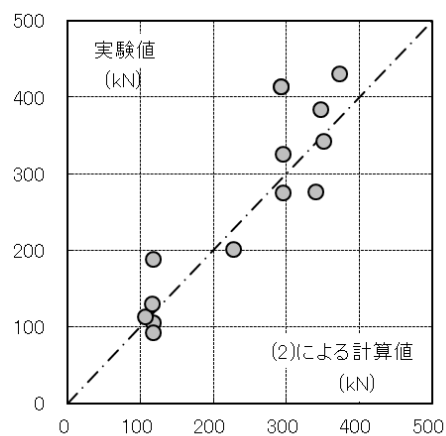


図-12 柱のせん断ひび割れ強度

表-2 柱の曲げひび割れ強度一覧^{13) 14)}

		A2	B1	B2	B3	B3L	B3H	C2	D2	D3	R1	R2	R3	R4	R5
コンクリート強度	σ_B (N/mm ²)	43.9	43.2	43.9	44.7	43.6	45.0	42.7	42.2	42.4	33.0	26.9	32.5	33.0	33.0
作用軸力	N (kN)	800	400	800	1200	1130	1365	800	800	1200	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0
コンクリート軸応力	$\sigma_c = N/bD$ (N/mm ²)	8.89	4.44	8.89	13.3	12.6	15.2	8.89	8.89	13.3	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63
実験値	M_{cexp} (kN·m)	80.4	62.6	103	112	72.0	95.0	89.1	83.3	104	38.0	24.2	25.1	56.0	35.8
RC規準式	σ_t (N/mm ²)	3.71	3.68	3.71	3.74	3.70	3.76	3.66	3.64	3.65	3.22	2.90	3.19	3.22	3.22
	M_c (kN·m)	61.4	42.0	61.4	81.8	74.9	92.3	61.1	60.9	80.9	27.8	20.3	27.4	35.0	27.8

表-3 柱のせん断ひび割れ強度^{13) 14)}

		A2	B1	B2	B3	B3L	B3H	C2	D2	D3	R1	R2	R3	R4	R5
コンクリート強度	σ_B (N/mm ²)	43.9	43.2	43.9	44.7	43.6	45.0	42.7	42.2	42.4	33.0	26.9	32.5	33.0	33.0
せん断ひび割れ発生荷重	V_c	275	202	326	343	277	431	415	415	385	106	113	130	93.3	188
せん断ひび割れ応力度	σ_T	2.19	2.17	2.19	2.21	2.18	2.21	2.16	2.14	2.15	1.90	1.71	1.88	1.90	1.90
せん断ひび割れ強度	V_c	295	227	295	351	340	372	293	292	346	117	107	116	117	117

表-4 梁の曲げひび割れ強度^{6) 15)}

		SH-200	SH-300	SH-400	DH-200	DH-300	DH-400	No.3
コンクリート強度	σ_B (N/mm ²)	31.9	31.9	31.9	31.7	31.7	31.7	45.3
実験値	M_{cexp} (kN·m)	16.8	21.0	22	13	15.1	21.6	22.5
RC規準式	σ_t (N/mm ²)	3.16	3.16	3.16	3.15	3.15	3.15	3.77
	M_c (kN·m)	12.6	17.3	22.0	11.6	16.3	21.0	20.9

表-5 梁のせん断ひび割れ強度¹⁵⁾

		SH-200	SH-300	SH-400	DH-200	DH-300	DH-400	No.3
コンクリート強度	σ_B (N/mm ²)	31.9	31.9	31.9	31.7	31.7	31.7	45.3
せん断ひび割れ発生荷重	V_c	65	112	172	101	107	145	
せん断ひび割れ応力度	σ_T	1.86	1.86	1.86	1.86	1.86	1.86	2.22
せん断ひび割れ強度	V_c	75	112	149	74	111.48	149	

(2) CES梁

a) 梁の曲げひび割れ強度

CES梁の曲げひび割れ強度の一覧を表-4に、CES梁の曲げひび割れ強度の実験値と計算値の関係を図-13に示す。CES梁の実験における曲げひび割れモーメントは、RC規準式による曲げひび割れモーメントとの対応はよく、実験値と計算値との比は1.07であった。以上の結果からCES梁の曲げひび割れ強度は、RC規準式により評価して良いものと考えられる。

b) 梁のせん断ひび割れ強度

CES梁のせん断ひび割れ強度の一覧を表-5に、CES梁のせん断ひび割れ強度の実験値と計算値の関係を図-14に示す。CES梁の実験における実験値と靱性指針式との対応はよく、実験値と計算値との比は1.05であった。以上の結果からCES梁のせん断ひび割れ強度も、靱性指針式により評価して良いものと考えられる。

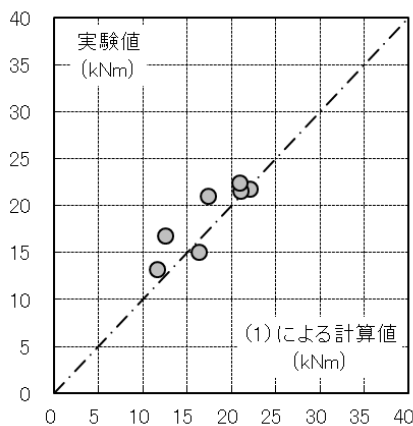


図-13 梁の曲げひび割れ強度

5. まとめ

CES部材に用いられるFRCの各種材料試験ならびにCES部材の実験結果に基づき、曲げおよびせん断ひび割れ強度の検討を行った。その結果、以下の結論が得られた。

- 1) CES部材の曲げひび割れ強度は、日本建築学会「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」の強度式により、安全側に評価できる。
- 2) CES部材のせん断ひび割れ強度は、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」に、弾性理論によるモールの応力円に基づく強度式により、安全側に評価できる。

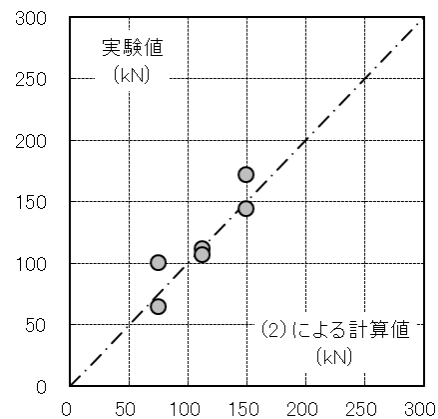


図-14 梁のせん断ひび割れ強度

参考文献

- 1) 藤本利昭, 倉本洋, 松井智哉, 小松博: 繊維補強コンクリートの材料特性を考慮したCES柱の終局耐力に関する考察, 日本建築学会構造系論文集, 第75巻, 第658号, 2010年12月
- 2) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 2010
- 3) 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, 1997
- 4) 藤本利昭, 小松博, 櫻田智之: 再生骨材コンクリートの合成構造への適用に関する研究—中心圧縮性状—, 日本建築学会技術報告集, 第35号, pp.183-186, 2011.2
- 5) 藤本利昭, 小松博, 櫻田智之, 師橋憲貴, 三橋博巳: 薄肉鋼管で補強した鉄骨コンクリート合成柱の軸圧縮性状, 日本建築学会技術報告集, 第39号, pp.565-570, 2012.6
- 6) 藤本利昭, 小松博, 櫻田智之: 再生骨材コンクリートを用いた合成構造部材の曲げ性状, 日本建築学

会大会学術講演梗概集, C-1 分冊, pp.1309-1310, 2012.9

- 7) 田口孝, 神谷隆, 倉本洋: 材料特性の異なるFRCを用いた外付耐震補強工法におけるCES補強柱の構造性能, 第8回複合構造の活用に関するシンポジウム, (CD-ROM), pp.52-1-6, 2009.11
- 8) 山口敏和, 倉本洋, 山本直輝, 松井智哉, 北村俊也, 小林義信: CES門形フレームで補強したRCフレームの静的および動的載荷実験, 第7回複合構造の活用に関するシンポジウム, (CD-ROM), pp.39-1-8, 2007.11
- 9) 山口敏和, 北村俊也, 松井智哉, 倉本洋: CESフレームを挿入した補強RCフレームの耐震性能に関する基礎研究, コンクリート工学年次論文集, 第29巻, 第3号, pp.1177-1182, 2007.7
- 10) 田口孝, 今村武大, 岩瀬勝洋, 松井智哉, 倉本洋: 2層2スパンCESフレームの構造性能に関する研究(その1)実験および予備解析の概要, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-1 分冊,

- pp.1269-1270, 2007.8
- 11) 深津尚人, 佐藤美郷, 廣瀬泰三, 芳賀亮祐, 田口孝, 神谷隆, 松井智哉, 倉本洋: CES 外付耐震補強フレームの開発研究 (その 4) 補強 RC フレームの動的載荷実験 実験概要と破断性状, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-1 分冊, pp.1283-1284, 2007.8
 - 12) 竹内博幸, 中根博, 村上秀夫, 駿河良司, 古川淳, 中出睦, 谷垣正治: ビニロン繊維補強コンクリートの強度特性に関する基礎的研究 (その 1~2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1 分冊, pp.479-482, 2002.8
 - 13) 田口孝, 神谷隆, 倉本洋: CES 外付耐震補強フレームの開発研究 (その 11)CES 補強柱の耐震性能に及ぼす FRC 混入繊維種,内蔵鉄骨量およびせん断スパン比の影響, 日本建築学会学術講演梗概集, C-1 分冊, P.1151-1152, 2009.9
 - 14) 松井智哉, 溝淵博己, 倉本洋: H 型鉄骨内蔵 CES 柱の構造実験と FEM 解析, コンクリート工学年次論文集, 第 32 巻, 第 2 号, pp.1171- 1176, 2010.7
 - 15) 荒牧龍馬, 六田莉那子, 藤本利昭: 22704 CES 部材の構造性能に関する研究 その 2 せん断性状に関する検討, 日本建築学会大会梗概集, 2013.8 (投稿中)

STUDY ON CRACK STRENGTH OF CES MEMBERS

Rinako ROKUTA, Ryoma ARAMAKI and Toshiaki Fujimoto

Concrete Encased Steel (CES) structural system consisting of fiber reinforced concrete (FRC) and encased steels is a new composite structural system, and is being conducted continuous and comprehensive studies to make it practical. This paper discusses how to evaluate the crack strength of FRC and CES members. It is revealed based on the test results that the AIJ design formulas for RC structures can be applied for evaluating the crack strengths of CES members such as bending crack and shear crack.