

繊維補強鉄筋コンクリートセグメントの構造性能評価

三桶 達夫*¹・福浦 尚之*¹・丸屋 剛*¹・堀口 賢一*¹・西田 与志雄*²・服部 佳文*³

Keywords : shield segment, reinforced concrete with fibers, steel fiber, organic fiber, tension softening curve

シールドセグメント, 繊維補強コンクリート, 鋼繊維, 有機繊維, 引張軟化曲線

1. はじめに

繊維補強鉄筋コンクリート製セグメントについては、国外では1970年頃に始まり現在に至るまで30件以上の実績があるが、国内では徐々にその適用が始まっている段階である。繊維補強コンクリートについては従来からいくつかの指針案^{1) 2)}が公開され、活用されている。しかし、これらは直接にシールドトンネルのセグメントを対象としたものではなく、繊維補強コンクリートのシールドセグメントへの適用を拡大・一般化する上では、シールドセグメントの特徴にあわせた設計の考え方、適用の方法を明確化していくことが必要である。繊維補強鉄筋コンクリート製セグメントを補強材の観点から分類し、期待される構造特性を表-1に示す。また、図-1にRCセグメントとRSF/RHFセグメントの比較を示す。

表-1 各セグメントの特性と適用範囲

Table.1 The scope and characteristics of each segment

項目	鋼繊維補強鉄筋コンクリート製セグメント	有機繊維・鋼繊維混合補強鉄筋コンクリート製セグメント
略称	RSFセグメント (reinforced concrete with steel fiber tunnel segment)	RHFセグメント (reinforced concrete with hybrid fiber tunnel segment)
補強材料	・鉄筋 ・鋼繊維	・鉄筋 ・鋼繊維 ・有機繊維 (耐荷用)
期待される構造特性	・施工時のひび割れ、欠けの防止 ・曲げ耐力,せん断耐力,変形性能などが従来のRCセグメントと同等以上 ・配力鉄筋の省略	

*1 技術センター土木技術研究所土木構工法研究室

*2 土木本部土木技術部

*3 土木本部土木設計部

本報告では、これらRSF,RHFセグメントについて以下の3点に着目し、これらの設計上の取り扱いについて示すものである。

- ①繊維補強鉄筋コンクリート製セグメントの引張り特性を適切に評価してセグメントの設計に反映する点。
- ②繊維補強鉄筋コンクリート製セグメントの終局限界状態における安全性照査手法を適切に設定する点。

2. 設計に用いる繊維補強コンクリートの引張軟化曲線の設定方法

2.1 繊維補強コンクリートの引張り軟化特性

繊維補強コンクリートは、コンクリートにひび割れが発生した後に繊維が応力を伝達するものであり、このコンクリートのひび割れ部にはフラクチャープロセスゾーンが存在していると考えられている。このゾー

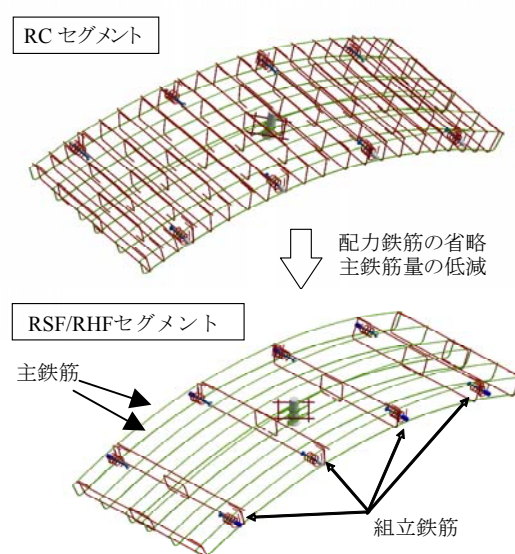


図-1 RCセグメントとRSF/RHFセグメントの比較

Fig.1 Comparison of RC segment and RSF / RHF segment

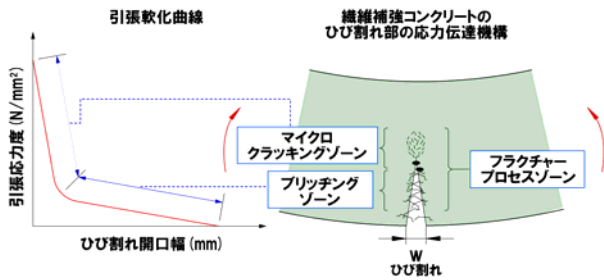


図-2 フラクチャープロセスゾーン

Fig.2 Fracture processing zone

は、骨材界面でモルタルのはく離等の微細なひび割れが複数発生しているマイクロクラッキングゾーンと、骨材・繊維などによるブリッジングが支配的なブリッジングゾーンに分けられる(図-2)。このひび割れ先端のフラクチャープロセスゾーンで伝達される引張応力とひび割れ開口幅との関係が引張軟化曲線として表される。

繊維を含むコンクリートでは、ひび割れが発生した後に、繊維がコンクリートからの引抜け抵抗を有することで応力を伝達する。図-3に示すように、UFC¹⁾、HPRCC²⁾など繊維混入率が高く繊維の応力伝達能力が大きい場合にはひび割れ発生時の応力以上の引張抵抗を示すことから、これらの特性が設計に取り込まれている。一方、比較的低い繊維混入率のRSF柱部材では、鋼繊維混入による繊維補強コンクリートの引張強度の増加は期待できないことが示されている³⁾。また、図-4に示すように、鋼繊維の種類・形状・混入率等により、引張軟化曲線の形状が異なることも報告されている⁴⁾。以上のことから、繊維補強コンクリートを用いた部材の設計においては、引張軟化曲線を適切にモデル化する必要があると言える。

2.2 各種繊維補強コンクリートの引張り軟化特性

本報告において実施した実験に使用した繊維種別および混入率を表-2,3に示す。これらにケースについて10×10×40 cmあるいは15×15×53 cm供試体の切欠き曲げ試験を行い、結果を逆解析して繊維補強コンクリートの引張軟化曲線を求めた。なお、逆解析にあたっては、日本コンクリート工学協会にて公開されているプログラムを使用した。

(http://jci-web.jp/jci_standard/kitsutaka_dl.html)

図-5に、個々に得られた引張軟化曲線を全平均して求めた平均軟化曲線を示す。このように、いずれも繊維混入量の増加に伴い引張り軟化特性が向上していくのがわかるが、繊維種類やその組み合わせにより、引張

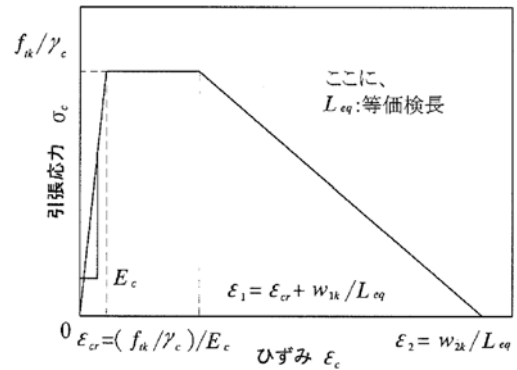
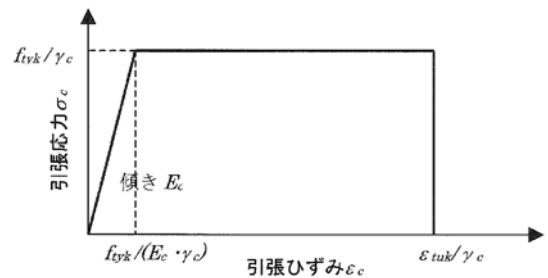
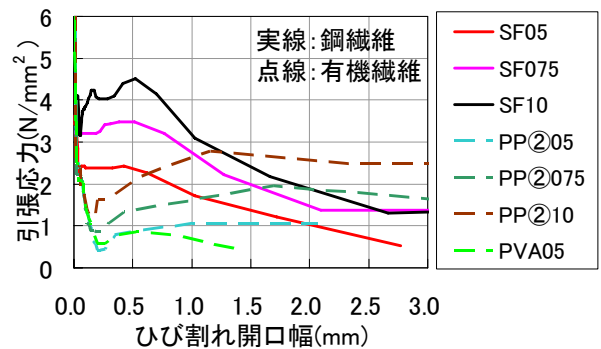
a) UFC の設計引張軟化曲線⁵⁾b) HPRCC の設計引張軟化曲線⁶⁾

図-3 設計引張軟化曲線の例

Fig.3 Examples of the design tension softening curve



SF:鋼繊維, PP:ポリプロピレン, PVA:ポリビニルアルコール

図-4 繊維種類と引張軟化曲線⁴⁾

Fig.4 Fiber types and tension softening curves

表-2 切欠き曲げ試験実施ケース

Table 2 Cases of bending tests of specimen with notch

繊維混入率(%)				データ数	破壊エネルギー Gf, 1mm (*) (N/mm)	繊維補強コンクリート圧縮強度 (N/mm ²)
鋼繊維 A	鋼繊維 B	鋼繊維 C	有機繊維 D			
	0.4			124	1.33	49.0~78.5
	0.5			62	1.49	57.9~71.3
	0.6			47	1.63	56.8~71.4
	0.7			5	1.89	72.4
	0.8			5	2.32	70.9
0.4				39	1.43	59.9~63.8
0.5				35	1.95	64.1~72.2
0.6				8	2.28	69.5
0.7				6	2.57	71.5
0.4		0.25		16	1.84	64.0~69.0
0.3		0.25		16	2.02	63.6~68.0
0.3		0.5		7	2.03	60.3~63.6
		0.25		8	0.74	64.2
		0.5		8	0.91	60.8
		0.4		25	1.77	57.9~79.1

(*) 開口1mmまでの破壊エネルギーの平均値を示す。

表-3 鋼繊維と有機繊維

Table.3 Steel fibers and an organic fiber

種類および外観		寸法			特徴		
		直径 (mm)	長さ (mm)	7スベクト比	材質	引張強度 (N/mm ²)	製造方法
鋼繊維A (両端フックタイプ)		0.55	35	64	JIS G 3532 JIS G 3505	>1080	伸線切断法
鋼繊維B (両端フックタイプ)		0.5	30	60	KS D 3554 (JIS G 3505相当)	>900	伸線切断法
鋼繊維C (両端フックタイプ)		0.75	43	57	JIS G 3532 SWM-B	>1000	伸線切断法

耐荷用:有機繊維D(エンボスあり)			
			
素材	ポリプロピレン	引張強度	530.3N/mm ²
密度	0.91g/cm ³	ヤング率	10500N/mm ²
厚さ×幅	0.5×0.9mm	繊維長	48.0mm
公称断面積	0.385mm ²	耐薬品性	酸・アルカリに強い

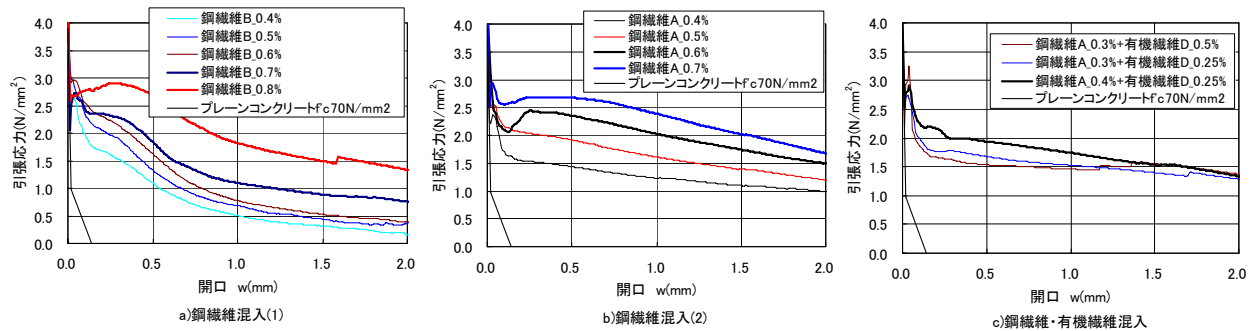


図-5 各種配合における引張軟化特性

Fig.5 Tension softening properties of various formulations

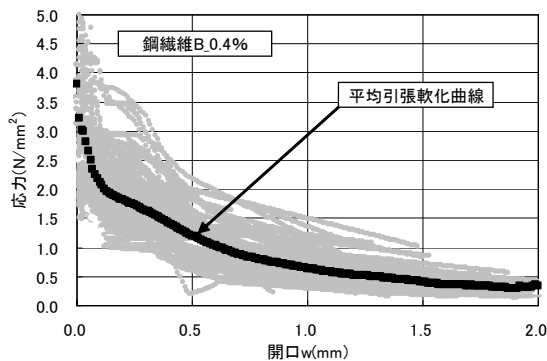
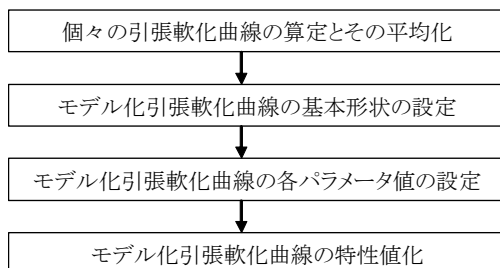


図-6 全引張軟化曲線と平均引張軟化曲線の関係

Fig.6 The relationship of average tension softening curve

表-4 引張軟化特性の特性値化フロー

Table.4 Flowchart of determining tension softening properties



り軟化形状は大きく異なっている。

また、図-6 に示す、鋼繊維B_0.4%の全試験結果と平均曲線の関係より、引張り軟化曲線にはある程度のばらつきがあることがわかる。このように、繊維補強コンクリートの引張軟化曲線は、繊維量・形状・強度

およびコンクリート強度の組合せにより変化し、その特性を一律に定めることは現実的でない。設計への適用を可能にするには、繊維補強コンクリートの引張軟化特性に応じて適切に引張軟化曲線を定める方法が必要となる。

2.3 繊維補強コンクリートの引張軟化特性の特性値化

表-4 に繊維補強コンクリートの引張り軟化特性の特性値化のフローを示す。

鋼繊維混入率 0.4 vol.%の鋼繊維 B (繊維長 30mm) を用いた、試験時の圧縮強度が 50~80 N/mm² 程度となる繊維補強コンクリートを例に、具体的に説明する。(図-7 参照)

まず、実験より得られた引張軟化曲線の特徴を適切に反映できるモデル化引張軟化曲線を設定する。切欠き曲げ試験結果の逆解析から求めた個々の軟化曲線を全平均して平均軟化曲線を求め、これに対して図-8 に示す一般的な各種モデル化引張り軟化曲線との適合性を検討したうえで EXP 型曲線の d) 式を選択し、平均軟化曲線式のパラメータ $\alpha 1=1.0$, $\alpha 2=-1.733$, $\alpha 3=0.55$ と定めたものである。モデル化引張り軟化曲線の選択および平均軟化曲線式のパラメータを設定するにあたっては、引張軟化曲線自体の適合性だけでなく、ひび割れ位置を中央一断面に固定した有限要素解析よ

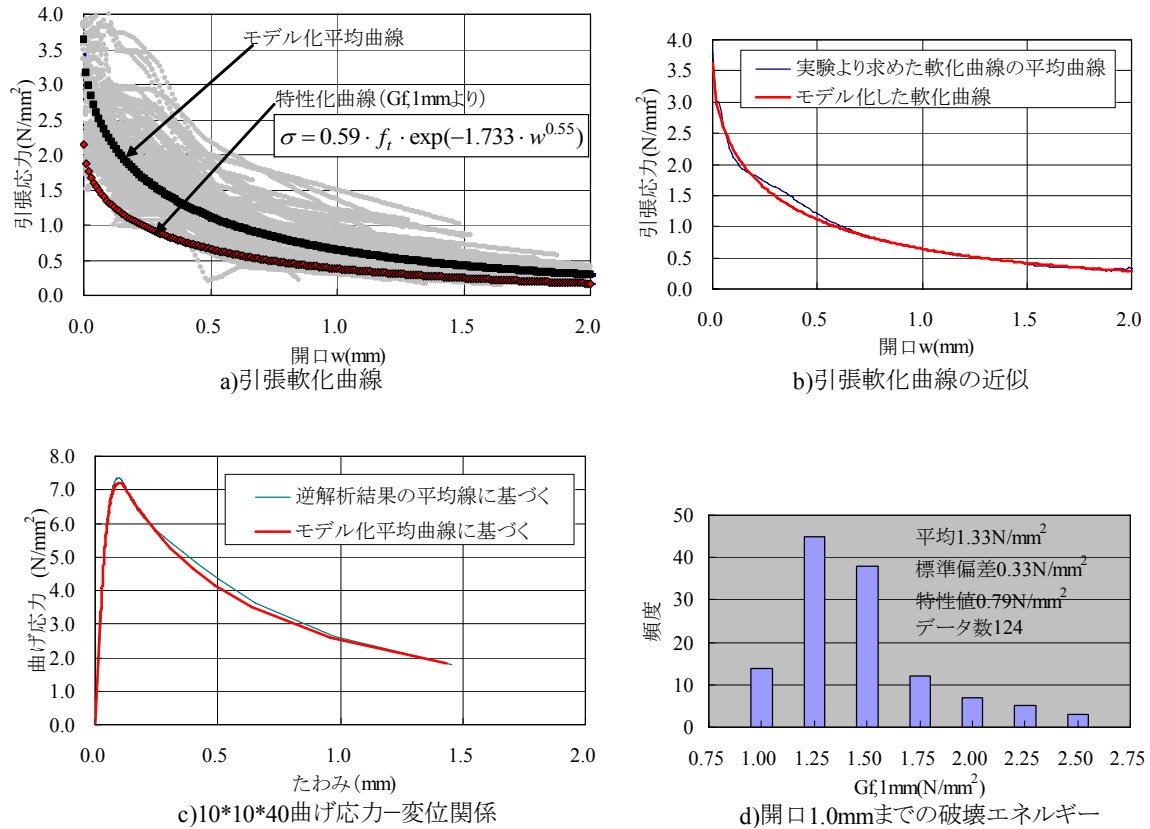


図-7 鋼繊維 B 0.4vol. % の場合のモデル化と特性化

Fig.7 Modeling and characterization of steel fiber B using 0.4vol. %

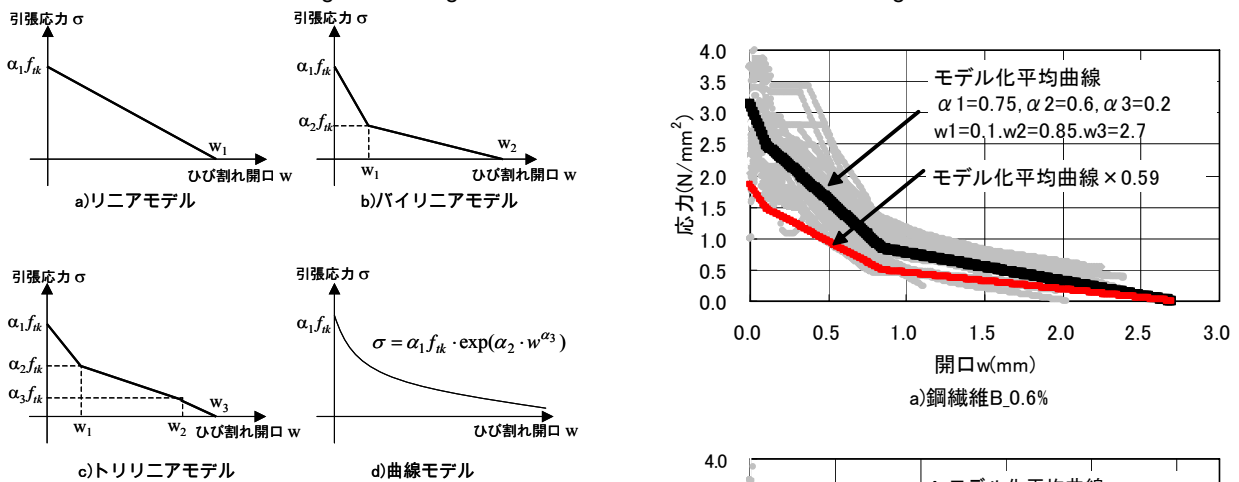


図-8 引張軟化特性のモデル化

Fig.8 Modeling of tension softening properties

り得られる曲げ応力-たわみ関係との適合性についても考慮して定めることが重要である。(図-7a), b), c))

モデル化引張軟化曲線を設計に反映させるためには特性値化して安全性を確保する必要がある。そこで、実験より得られた引張軟化曲線より、開口幅 1 mm における破壊エネルギーの実験データを正規分布と仮定し、危険確率 5 %となる破壊エネルギーの特性値を 0.79 N/mm² と定めた。そして、設計に用いる引張軟化

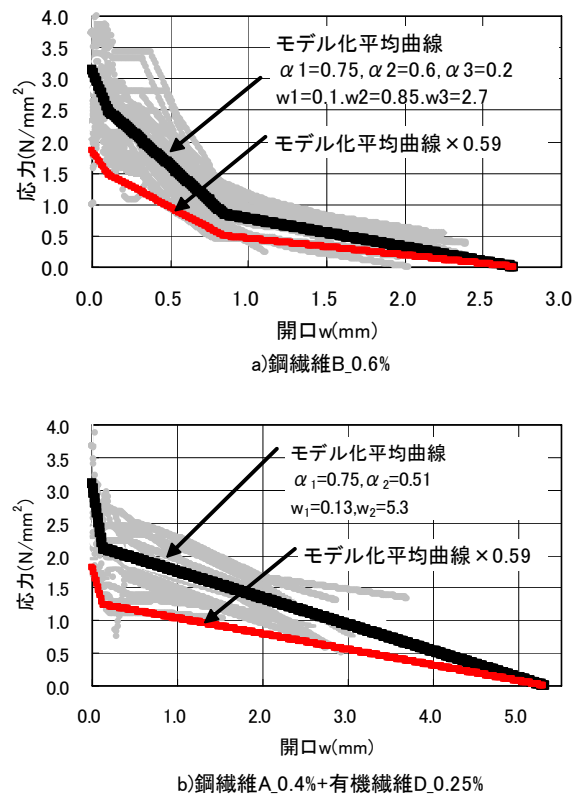


図-9 平均軟化曲線のモデル化例

Fig.9 Examples of Modeling of average tension softening curves

表-5 実験概要

Table.5 Overview of experiments

実験 ケース	桁高さ (mm)	桁幅 (mm)	圧縮強度 (N/mm ²)	引張鉄 筋比 (%)	配置鉄筋 引張/圧縮 側等量配置	繊維混入率(%)			鉄筋材質
						鋼繊維	有機繊維	混入率 合計	
I	150	500	64.6	0.25	2-D10	0.5(A)		0.50	SD345
			64.6	0.44	2-D13	0.5(A)		0.50	
			64.0	0.69	2-D16	0.5(A)		0.50	
			64.0	1.04	3-D16	0.5(A)		0.50	
			65.8	0.44	2-D13	0.3(A)	0.25	0.55	
			66.9	0.44	2-D13	0.4(A)	0.25	0.65	
	350	200	64.6	0.25	2-D10	0.5(A)		0.50	
			64.6	0.44	2-D13	0.5(A)		0.50	
			64.0	0.68	2-D16	0.5(A)		0.50	
			64.0	1.03	3-D16	0.5(A)		0.50	
			65.8	0.44	2-D13	0.3(A)	0.25	0.55	
			66.9	0.44	2-D13	0.4(A)	0.25	0.65	
II	150	325	51.1	0.40	2-D10	0.4(B)		0.40	SD295
			51.1	0.40	2-D10	0.4(B)		0.40	
			51.1	0.40	2-D10	0.4(B)		0.40	
			68.0	0.40	2-D10	0.5(B)		0.50	
			68.0	0.40	2-D10	0.5(B)		0.50	
			68.0	0.40	2-D10	0.5(B)		0.50	
III	150	1300	78.5	0.40	8-D10	0.4(B)		0.40	SD295
IV	350	2000	57.9	0.46	12-D16	0.4(C)		0.40	SD345

曲線を、Gf の平均値に対する特性値の低減率 (0.79 / 1.33=0.59) を用いてモデル化した平均軟化曲線を特性値化して定めることができる (図-7a), d))。実験より得られた引張軟化曲線, モデル化平均曲線, 特性値化曲線の関係を図-7a) に示す。

これ以外の配合, 繊維混入率の条件下においても同様の手法により, 引張軟化曲線およびその特性値を定めることができる。モデル化引張軟化曲線の例を図-9 に示す。

モデル化引張軟化曲線を統計処理して特性値化するには十分な試験結果に基づき定めるのがよいが, 鋼繊維 B (繊維長 30mm) を混入率 0.4 vol.% で用い, 圧縮強度が 50~80 N/mm² 程度となる繊維補強コンクリートと同程度の配合条件および繊維材料においては, 前記材料に対する低減値 0.59 を用いても同程度の安全性が確保されるものと考えられる。(図-9 参照)

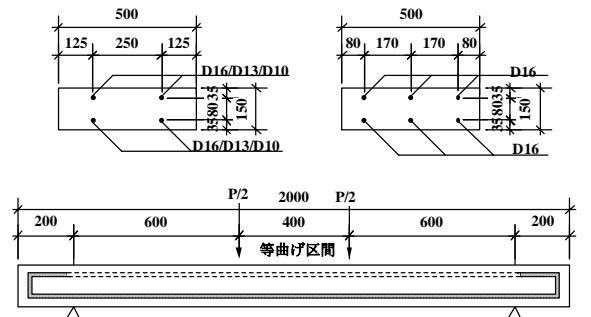
3. 繊維補強鉄筋コンクリート部材の曲げモーメントに対する安全性の検討方法

3.1 概要

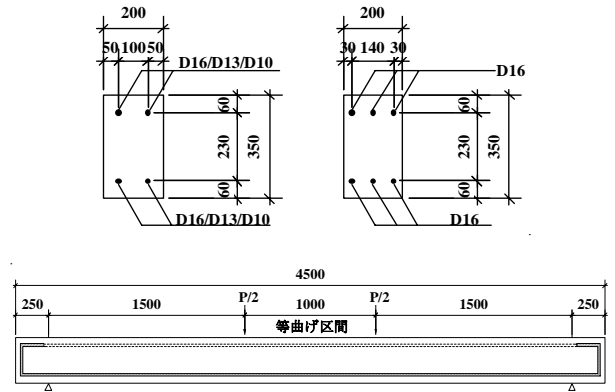
前項に示したように, 繊維補強コンクリートは通常のコンクリートより多くの引張応力分担に富んだ特性を持っている。この特性を考慮した曲げ耐力, 曲げ変形性能の算定方法について, 梁部材, 実大セグメント部材の曲げ載荷実験に基づき, 検討を行った。

3.2 繊維補強鉄筋コンクリート部材の曲げ載荷実験

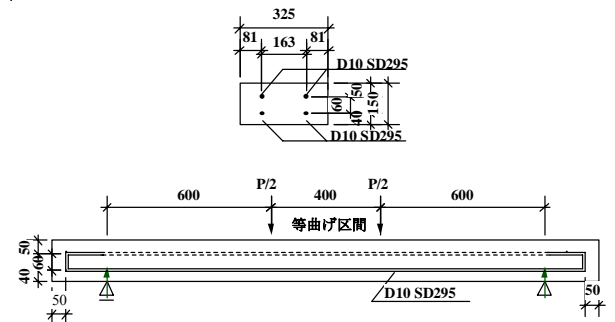
以下の繊維種別および混入量に関して曲げ載荷実験を行った。表-5 に実験概要を, 図-10, 11 に載荷実験条件を示す。



a) シリーズ I-1



b) シリーズ I-2



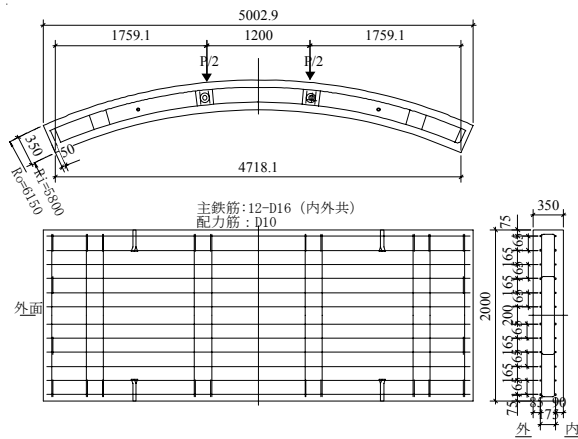
c) シリーズ II

図-10 梁試験体の載荷条件

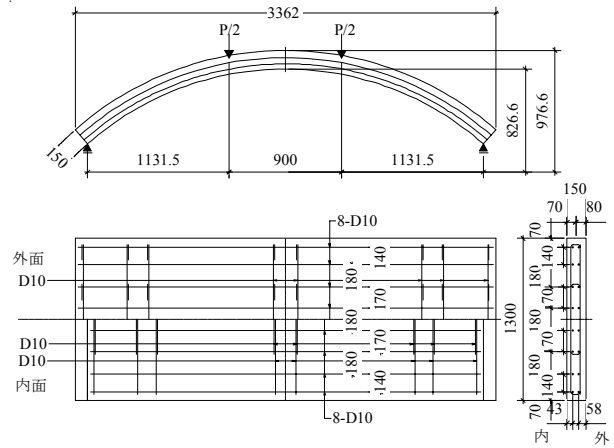
Fig.10 Loading conditions of the specimen

今回実験した範囲, すなわち, 繊維混入率 0.25~0.8 vol.%, 引張鉄筋比 0.25~1.04%, 試験時の圧縮強度が 50~80 N/mm² 程度の範囲における繊維補強鉄筋コンクリート部材実験では, 繊維が引張応力を分担することで, 曲げひび割れ発生後にただちに鉄筋が降伏あるいは破断するぜい性的な破壊性状を示すことがなく, 繊維のない RC 部材に比べて曲げ降伏荷重が増加し, その後も安定して荷重を保持し, 圧縮側コンクリートで圧壊に至ることが確かめられている。また, 繊維混入率の増加に伴い曲げ耐力が増大していることが確かめられた。図-12 に実験結果の例を示す。

このように, 繊維補強鉄筋コンクリート部材では, ひび割れ発生以降も繊維混入率・繊維種別に応じて引張応力を



d) シリーズⅢ



e) シリーズⅣ

図-11 実大セグメント部材試験体の载荷条件

Fig.11 Loading conditions of the specimen

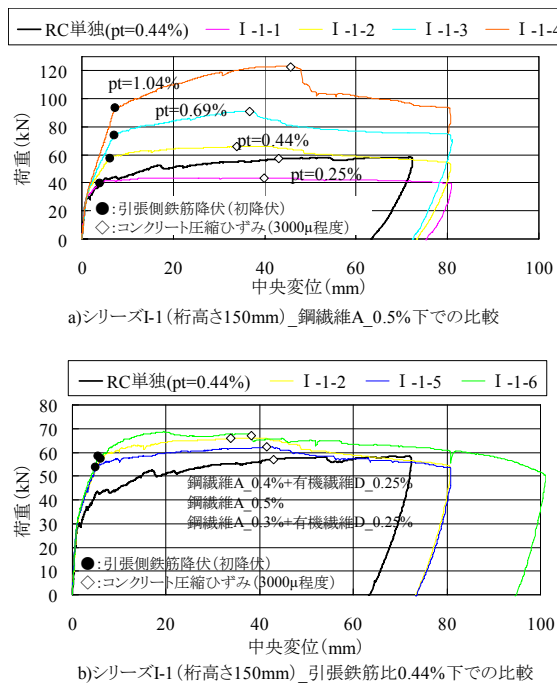


図-12 RSF と RHF 梁の载荷実験結果

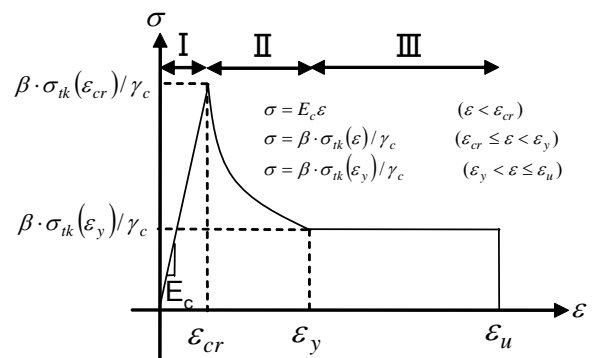
Fig.12 Results of bending tests

負担できることから、これを考慮することで合理的な曲げ耐力の算定ができるものと考えた。具体的には、一般の鉄筋コンクリート部材についての算定方法と同様の平面保持を仮定した断面解析を基本とし、従来は考慮していなかったコンクリートの引張応力に代えて特性値化した繊維補強コンクリートの引張応力-ひずみ曲線を考慮することとした。

3.3 繊維補強コンクリート引張応力-ひずみ曲線

繊維補強コンクリート引張応力-ひずみ曲線は、引張応力とひび割れ開口幅の関係を示す引張軟化曲線と

ひび割れ間隔から求める方法^{1), 5)}を基本とした。繊維補強コンクリートの引張応力-ひずみ曲線を図-13に示す3つの領域に分けてモデル化を行った。領域Ⅰは、応力-ひずみ関係が初期のヤング係数に基づく線



ここに、

$\sigma_{ik}(\epsilon)$: 特性値化した引張軟化曲線より求めた応力ひずみ関係

ϵ_u : 引張応力を一定値とする限界ひずみ ($= 50 \times \epsilon_y$)

ϵ_y : 鉄筋降伏ひずみ

β : 引張鉄筋比に応じた応力の低減係数

図-13 引張応力-ひずみ曲線のモデル化

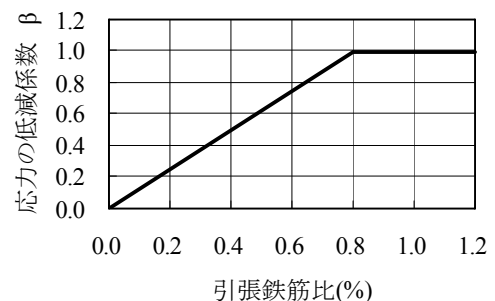


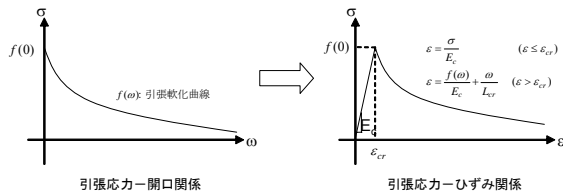
図-14 引張鉄筋比に応じた応力の低減係数

Fig.13 Tensile stress - strain curve model

Fig.14 Stress reduction factor depending on the ratio of tensile reinforcement

形関係となる領域であり、領域Ⅱ・Ⅲは、ひび割れ発

生以降の繊維補強コンクリートの引張応力分担が耐荷機構に反映される領域である。鉄筋の降伏ひずみ ϵ_y までの領域Ⅱについては、特性値化された引張軟化曲線から求めた応力-ひずみ関係を基本とすることとした。



$$L_{cr,eq} = 1.1 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot \{4c + 0.7(c_s - \phi)\}^6$$

図-15 引張軟化曲線の引張応力-ひずみ曲線への変換

Fig.15 Conversion of tension softening curve

ただし、低引張鉄筋比の部材においては、高引張鉄筋比の部材に比べて繊維の効果が小さくなる傾向があることから、この影響を図-14 に示す応力の低減係数 β で表すこととした。この応力の低減係数 β については、繊維補強鉄筋コンクリート部材実験のパラメータ解析より定めた。

引張軟化曲線から応力-ひずみ関係への変換は、[2007 年制定コンクリート標準示方書設計編]に示されるひび割れ幅算定式に基づくひび割れ間隔 L_{cr} を用いて、図-15 に示す方法によることができる⁵⁾。

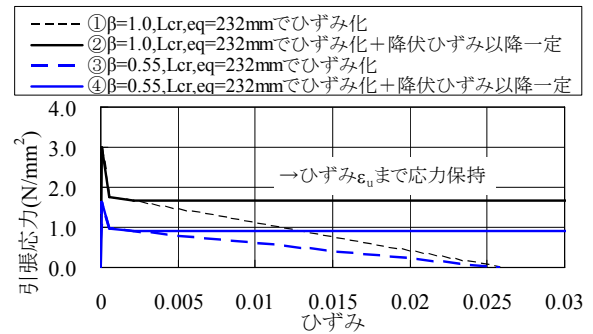
鉄筋の降伏ひずみ ϵ_y 以降の領域Ⅲについては、1) 鉄筋降伏後にはひび割れ位置で鉄筋がひずみ硬化し計算上の仮定であるバイリニアの関係よりも鉄筋が大きな応力を分担すること、2) 鉄筋降伏後における繊維補強コンクリートの応力-ひずみ関係について十分な知見が得られていないことから、鉄筋の降伏ひずみ時の引張応力を保持するモデルとしてよいこととした。

応力の低減係数 β および領域Ⅲのモデル化の影響に関する比較解析を図-16 に示す。これより、モデル化された繊維補強コンクリートの引張応力-ひずみ関係を用いることで、適切に繊維補強鉄筋コンクリート部材の曲げ挙動を表現できることがわかる。

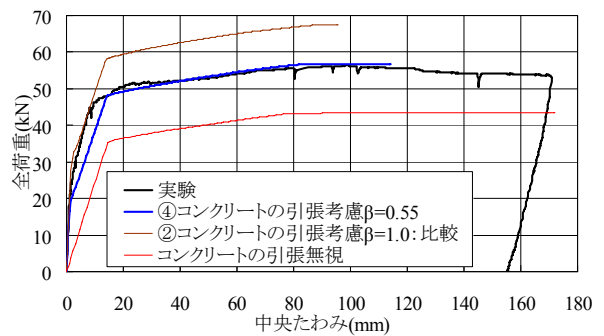
ここで、図-13 に示す繊維補強コンクリートの引張応力-ひずみ関係は、通常の設計における仮定である完全弾塑性バイリニア型の鉄筋モデルと組み合わせて用いることを前提としており、これ以外の鉄筋モデルと組み合わせて用いてはならないことは明らかである。

3.4 繊維補強鉄筋コンクリート部材の曲げモーメントに対する安全性の検討方法とその検証

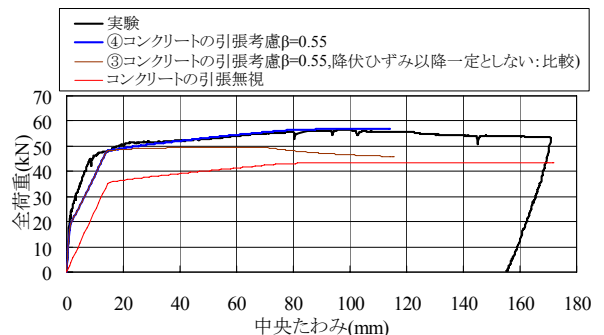
曲げ耐力算定に用いる部材係数 γ_b について検証を行った結果を図-17 に示す。実験値と部材係数 γ_b を



a) 引張応力-ひずみ関係の比較



b) 領域Ⅱにおける応力の低減係数 β の影響の比較



c) 領域Ⅲのモデル化方法の比較

図-16 引張応力-ひずみ曲線のモデル化に関する比較解析 (引張鉄筋比 $p_t=0.44\%$, 鋼繊維 $A_{0.3\%}$ +有機繊維 $D_{0.25\%}$)

Fig.16 Comparative analysis for modeling of Tensile stress - strain curve

1.0 とした設計値の対比より、正規分布を仮定し危険確率 5%となる実験値と設計耐力値の比は $1.11 \times (1.304 - 1.64 \times 0.118)$ であり、計算上必要な部材係数は 1.0 を下回るが、十分な安全性を確保できるように $\gamma_b=1.1$ としよ。また、耐力・変形性能に関する設計計算との比較例を図-18 に示す。

このように、従来どおりの設計計算方法に特性値化した引張り軟化曲線に基づく引張応力-ひずみ曲線を考慮することで、繊維補強コンクリートの曲げ耐力および曲げ変形性能を適切に求めることができる。

実験 シリーズ	実験最大 荷重(kN)	計算耐力(kN)		設計耐力(kN)	
		Pu,cal	実験最大 /Pu,cal	Pud,cal	実験最大 /(Pud,cal)
I	43.6	37.7	1.16	29.4	1.48
	65.9	64.5	1.02	50.1	1.32
	90.6	91.5	0.99	72.7	1.25
	122.9	127.9	0.96	100.0	1.23
	61.9	62.7	0.99	49.2	1.26
	68.3	64.2	1.06	50.1	1.36
	36.1	34.0	1.06	26.7	1.35
	53.6	58.4	0.92	45.8	1.17
	82.6	82.8	1.00	65.3	1.26
	114.2	114.4	1.00	91.4	1.25
	56.4	56.9	0.99	45.0	1.25
	55.7	58.1	0.96	45.8	1.22
II	36.0	32.9	1.09	25.1	1.43
	35.3	32.9	1.07	25.1	1.41
	37.8	32.9	1.15	25.1	1.51
	36.3	35.1	1.03	26.4	1.38
	37.7	35.1	1.07	26.4	1.43
	35.9	35.1	1.02	26.4	1.36
III	59.5	74.6	0.80	55.2	1.08
IV	396.3	447.0	0.89	364.0	1.09
実験/算定値の平均			1.01		1.30
実験/算定値の標準偏差			0.09		0.12
実験/算定値の特性値			—		1.11
計算上の必要部材係数			—		0.90

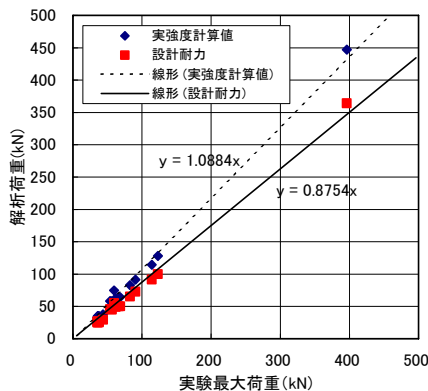


図-17 各種繊維配合下での曲げ耐力算定式の検証

Fig.17 Formula of bending strength under various conditions

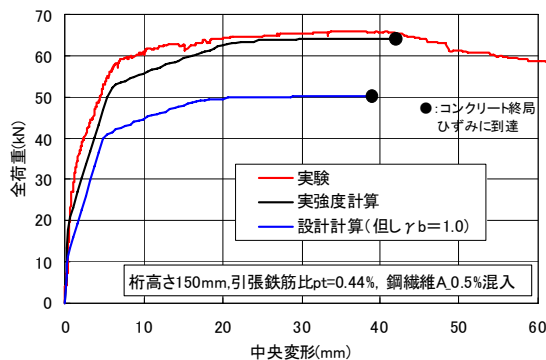


図-18 RHF 梁の載荷実験と解析の比較

Fig.18 Comparison of loading test result and of the analysis result

4. おわりに

本報告で示された繊維補強鉄筋コンクリート製セグメントの設計手法は、従来より用いられている一般的な断面設計手法を一部修正するのみで、繊維補強鉄筋コンクリート部材の設計を行うことができる。また、異なる適用範囲・材料条件においても本報告で示された材料および構造性能を確認することで本設計手法の適用が可能となるものと考えられる。

謝辞 本報告は、大成建設(株)より土木学会技術推進機構に技術評価を依頼し、「繊維補強鉄筋コンクリート製セグメントの設計・製作技術」に関する技術評価委員会（委員長：東京工業大学二羽淳一郎教授）において審議を受けた成果の一部を取りまとめたものである。委員各位に厚くお礼を申し上げます。

5. 参考文献

- 1) 土木学会：超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針（案），コンクリートライブラリー第113号，2004
- 2) 土木学会：複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料設計・施工指針（案），コンクリートライブラリー第127号，2007
- 3) 土木学会：鋼繊維補強鉄筋コンクリート柱部材の設計指針（案），コンクリートライブラリー第97号，1999
- 4) 三桶 達夫, 福浦 尚之, 丸屋 剛, 堀口 賢一：複合繊維を使用したコンクリートの力学特性に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.32, No.1, pp.311-316，2010
- 5) 内田 裕市・六郷 恵哲・小柳 洽：コンクリートの曲げ強度の寸法効果に関する破壊力学的検討，土木学会論文集，No. 442, V-16, pp.101～107，1992. 2
- 6) 土木学会：コンクリート標準示方書 設計編，2007
- 7) 土木学会：トンネル標準示方書 シールド工法・同解説，2006