

鋼繊維補強コンクリート部材の曲げ終局耐力の評価に関する研究

オリエンタル建設㈱ 正会員 工学博士 ○余 国雄
 オリエンタル建設㈱ 正会員 工学修士 阿部 浩幸
 オリエンタル建設㈱ 正会員 武知 勉
 東京工業大学 正会員 工学博士 二羽淳一郎

1. はじめに

普通鉄筋コンクリート (以下 RC) と比べ、鋼繊維補強鉄筋コンクリート (以下 SFRC) はひび割れ性状が改善され、終局耐力が増加することが著者らの実験研究を含んだ多くの実験研究より明らかとなった¹⁾。コストの削減を図るため、SFRC を構造部材に適用することが望まれている²⁾。そのため、SFRC に関する設計手法の確立が必要となる。使用限界状態における設計手法として著者らは定量的に SFRC のひび割れ幅を計算する式を提案した³⁾。本論文では、著者らによる実験¹⁾に基づいて、SFRC の終局破壊状況を検討し、断面計算 (Sectional Analysis) 法および等価圧縮ブロック法による SFRC の曲げ終局耐力の評価を試みた。

2. 実験の概要

文献 1) の実験では、SFRC および RC について図-1 に示すような 5 種類の試験体を製作した。No. 1~No. 4 供試体においては実橋に使用する鉄筋 (D25) を適用するため、供試体の高さ寸法を大きくした。また、既存の RC 実験と比較するため、No. 5 供試体は参考文献 4) と同じ寸法とした。SFRC に使用した鋼繊維は、長さ 30mm、公称径 0.6mm (アスペクト比 50) のもので、混入量は体積比で 1% とした。実験時のコンクリート材料試験結果を表-1 に、鉄筋材料試験結果を表-2 に示す。コンクリートの配合とフレッシュ性状については参考文献 1) を参照する。

ひび割れ幅を計測するために、図-2 に示すように等曲げ区間に引張鉄筋の高さでコンクリート表面に計測間隔 100mm の π ゲージを並列に配置した。また、最大鉄筋ひずみを計測するために、No.5 供試体を除き、図-2 に示すように支間中央 320mm 区間に、鉄筋の付着性能を損なわないように縦ふしに溝を設け、そこにひずみゲージを 20mm 間隔で千鳥配置に貼り付けた。

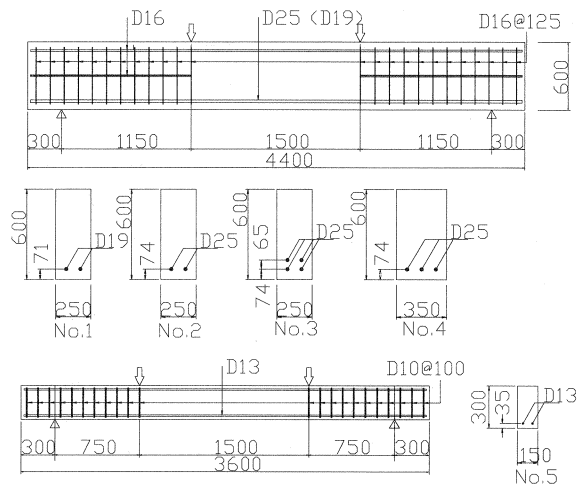


図-1 試験体形状寸法

表-1 コンクリート材料試験結果

種別	圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
SFRC	47.2	29.5	4.87
RC	55.3	33.2	3.64

表-2 鉄筋材料試験結果

種別	降伏応力 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	降伏ひずみ (μ)
D13	397	183	2169
D19	384	183	2098
D25	370	185	2000

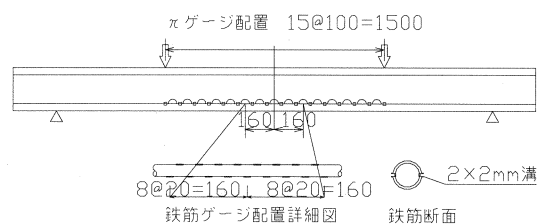


図-2 π ゲージおよび鉄筋ゲージ計測位置図

さらに、供試体の上面には、等曲げ区間の中央および左右位置に長さ 60mm のコンクリートゲージを張り付け、上縁コンクリートの圧縮ひずみを計測した。

載荷方法は単調載荷とした。鉄筋が降伏した前は荷重制御、鉄筋が降伏した後は変位制御として載荷実験を行った。いずれの供試体においても、上縁コンクリートの圧縮破壊が観察された後、荷重がある程度低下した時点で載荷を中止し、実験を終了した。

3. 終局時の挙動に関する実験結果および考察

図-3に供試体の曲げモーメントと変位関係を示す。RC供試体に比べ、SFRC供試体は曲げ終局耐力が高くなっていることから、鋼繊維の架橋効果が終局耐力の向上に寄与することが分かった。実験で得られた最大曲げモーメント結果を表-3にまとめる。同一断面寸法で鉄筋比が異なる供試体 No.1~3 を比較すると、供試体の鉄筋比が低ければ、低いほど RC 供試体に対する SFRC 供試体の終局耐力の増加比率が高くなる。これは鉄筋比の増加に伴い、鋼繊維の耐力に及ぼす影響の割合が少なくなるためと推測される。

図-4に実験が終了した後の供試体の等曲げ区間内における破壊状況を示す。

RC 供試体においてはいずれもひび割れが均等に広がり、上縁コンクリート圧縮破壊が発生した後に、供試体破壊に達したことが分かった。これは、供試体の鉄筋比は釣合ひ鉄筋比以下であったため、供試体がひび割れ発生、引張鉄筋降伏、上縁コンクリート圧縮破壊の順番で、典型的な曲げ引張破壊パターンに従って破壊したためと考えられる。

一方、SFRC 供試体においては、最終的な破壊損傷は一つのひび割れに集中し、このひび割れ面で鋼繊維の引抜きが発生した。また、鋼繊維の引抜きが発生した断面の上縁で、コンクリート圧縮破壊が発生したことが観察された。SFRC 供試体は破壊損傷が一箇所に集中したため、図-3に示すように RC 供試体より SFRC 供試体の支間中央の変位が小さくなったと考えられる。

図-3の曲げモーメントと変位曲線で○の点は下段鉄筋が降伏した点である。鉄筋降伏時のひずみとそれに対応するひび割れ幅の最大値を表-4に示す。No. 1~No. 4 供試体において SFRC の値は RC の約 0.8 倍となり、SFRC 供試体で一番大きいのは SFRC2 の 0.45mm である。後の図-7 (b) から分かるように鉄筋降伏時(ひび割れ幅 約 0.5mm)において、ひび割れ面での引張応力はまだ低下してないため、

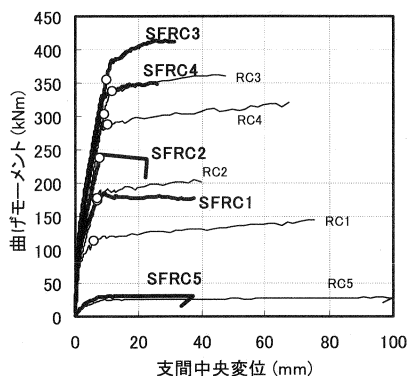


図-3 曲げモーメントと変位関係

表-3 最大曲げモーメントの実験結果

供試体	鉄筋比 (%)	最大曲げモーメント		比率 (%)
		SFRC(kNm)	RC(kNm)	
No.1	0.43	184	145	1.27
No.2	0.76	242	204	1.19
No.3	1.64	413	362	1.14
No.4	0.82	351	321	1.09
No.5	0.64	32	29	1.10

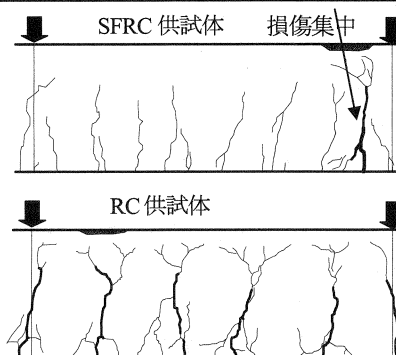


図-4 供試体の破壊状況

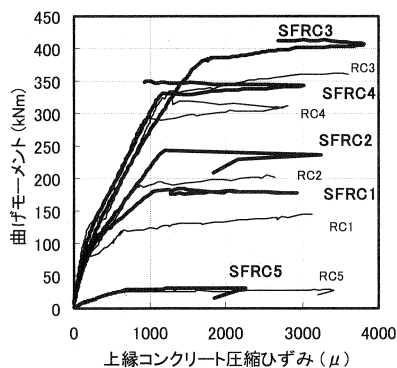


図-5 曲げモーメントと上縁コンクリート圧縮ひずみ関係

表一 鉄筋降伏時の最大ひび割れ幅の実験結果

供試体	SFRC1	SFRC2	SFRC3	SFRC4	SFRC5	RC1	RC2	RC3	RC4	RC5
鉄筋ひずみ(μ)	2134	2253	2029	2055	—	2121	2036	1999	2026	—
ひび割れ幅(mm)	0.43	0.45	0.32	0.36	—	0.53	0.59	0.42	0.53	—

表一 最大ひび割れ幅の経験値

供試体	SFRC1	SFRC2	SFRC3	SFRC4	SFRC5	RC1	RC2	RC3	RC4	RC5
ひび割れ幅(mm)	4.97	4.89	1.88	3.21	2.31	2.55	2.78	2.11	2.23	2.18

鋼繊維の引抜きは鉄筋が降伏した後に起きたと判断できる。しかしながら、鋼繊維の引抜きと上縁コンクリート圧縮破壊のどちらかが先に発生したかは判明できなかった。

図一五に荷重と上縁コンクリート圧縮ひずみ関係を示す。RC 供試体の終局圧縮ひずみは約0.003~0.004であった。SFRC 供試体では、コンクリートゲージが添付された位置以外でコンクリートの圧縮破壊が発生したため、ゲージ位置でのひずみが解放され、図一五に示すように上縁コンクリートのひずみが逆戻りした。そのため、SFRC 終局圧縮ひずみが得られなかった。表一五に下段鉄筋高さでの最大ひび割れ幅の経験値を示す。SFRC3を除いてSFRCの方がRCより大きくなっている。また、SFRC 供試体は上縁から中立軸までの距離がRC 供試体より大きくなるため、終局圧縮ひずみがRC 供試体より大きいと考えられる。

4. 断面計算(Sectional Analysis)による終局耐力計算

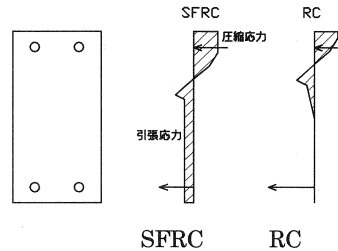
設計断面において軸力とある高さのひずみが与えられたとき、断面縦方向に層を分け、軸力において内力と外力が一致するまで、以下のプロセスを繰り返すことで、断面に作用する曲げモーメントを計算できる。①断面の中立軸を仮定する。②各層のひずみを計算する。③各層の応力および内力を計算する。④各層の力を合計して、外力軸力との比較を行う。このような方法は断面計算と言われている。

図一六に断面計算における応力分布図を示す。

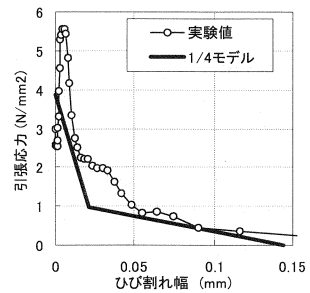
各層のひずみからその層の応力を計算する以上のプロセス③では、普通コンクリート(以下PL)と鋼繊維コンクリート(以下SFC)において引張応力と引張ひずみ関係が必要となる。この関係は引張応力とひび割れ幅関係から求められる。

本研究において、曲げ実験供試体と同じPLおよびSFCを用いて、曲げタフネス試験体を製作し、試験を行った。試験から得られた引張応力とひび割れ幅関係の結果を図一七に示す。また、図一七にも、本研究計算に用いた引張応力とひび割れ幅関係を示している。PLにおいては、1/4モデルを用い、SFCにおいては、Drop-constantモデル(残留引張応力 $f_r=2N/mm^2$)を用いることとした。SFCにおいて、ひび割れ幅が2.5mm以上になる時の引張応力の解が逆解析で得られなかった。従って、図一七(b)に示すようにひび割れが小さい時は鉄筋ひずみおよびひび割れ幅を評価するに際して、Drop-constantモデルが適切であるものの、ひび割れ幅が大きくなる終局破壊においてはひび割れ面での残留応力 f_r を大きく評価する可能性がある。表一五に示すようにSFRC1の最大ひび割れ幅経験値は約5mmである。

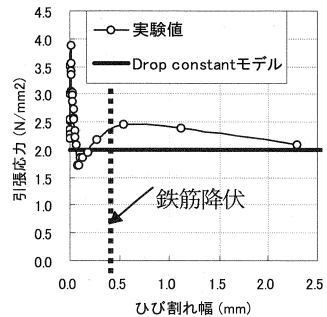
文献1)のように、ひび割れ幅をひび割れ発生後のひずみに変換することにより、引張応力と引張ひずみの関係が求められる。



図一六 断面応力分布図



(a) RC



(b) SFRC

図一七 引張応力とひび割れ幅関係

圧縮応力と圧縮ひずみ関係においては、圧縮強度までの挙動に対する鋼繊維の混入の影響が少ないが、ピーク以降の変形性能が改善されることが報告された⁵⁾。本研究では、図-8に示すような圧縮応力とひずみ関係を用いた^{5), 6)}。PLは圧縮終局ひずみ $\epsilon'_{cu} = 0.0035$ とした。この値は本研究で得られた値と一致している(図-5)。SFCについては圧縮終局ひずみが得られなかったが、参考文献7)に規定されている値 ($\epsilon'_{cu} = 0.01$) とした。

鉄筋の降伏後はひずみ硬化を考慮せず、剛性を0とした。

5. 等価圧縮ブロック法による断面耐力の計算

RC 曲げ終局耐力において、等価圧縮ブロック法という近似計算方法がある。図-9にRCおよびSFRC断面における等価圧縮ブロックを示す。参考文献6)では、RCにおける終局強度パラメータは実験から決定され、以下の値としている。 $\epsilon'_{cu} = 0.0035$, $k_1 = 0.8$, $k_2 = 0.4$, $k_3 = 0.85$ 。

これらのパラメータをそのまま SFRC に適用できるかどうかは実験で検証する必要があるが、ここでは、 $\epsilon'_{cu} = 0.01$, $k_1 = 0.8$, $k_2 = 0.4$, $k_3 = 0.85$ を用いて終局耐力を計算し、計算結果が実験値と一致するかを確認する。

以下の式の誘導にあたって、図-9に記載していない記号の定義は以下ようになる。 f_{sy} , f'_{sy} は引張側と圧縮側鉄筋の降伏強度, f_r はSFCの残留引張応力 ($f_r = 2N/mm^2$), f_{ck} はコンクリートの圧縮強度, E_s は鉄筋のヤング率, p と p' は引張側と圧縮側鉄筋比である。

SFRCにおいて圧縮側の鉄筋が降伏する場合、力の釣合いより、

$$k_1 k_3 f'_{ck} b x_o + f'_{sy} A'_s = f_{sy} A_s + f_r (h - x_o) b \tag{1}$$

よって、中立軸の位置は
$$x_o = \frac{A_s f_{sy} - A'_s f'_{sy} + f_r b h}{k_1 k_3 f'_{ck} b + f_r b} \tag{2}$$

終局耐力は
$$M_u = (d - k_2 x_o) f_{sy} A_s + (k_2 x_o - d') f'_{sy} A'_s + ((h + x_o) / 2 - k_2 x_o) f_r (h - x_o) b \tag{3}$$

x_o を求めた後に、圧縮側の鉄筋が降伏したことを確認する必要がある。圧縮側の鉄筋が降伏しない場合は、以下のように再計算する。力の釣合いより、

$$k_1 k_3 f'_{ck} b x_o + E_s (1 - d' / x_o) \epsilon'_{cu} A'_s = f_{sy} A_s + f_r (h - x_o) b \tag{4}$$

以上の x_o に関する2次方程式を解けば、

$$x_o = \frac{d}{2(k_1 k_3 f'_{ck} + f_r)} \left[(p f_{sy} - E_s \epsilon'_{cu} p' + \frac{h}{d} f_r) + \sqrt{(p f_{sy} - E_s \epsilon'_{cu} p' + \frac{h}{d} f_r)^2 + 4 \frac{d'}{d} E_s \epsilon'_{cu} p' (k_1 k_3 f'_{ck} + f_r)} \right] \tag{5}$$

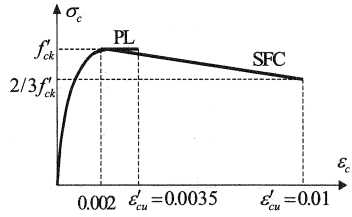


図-8 圧縮応力とひずみ関係

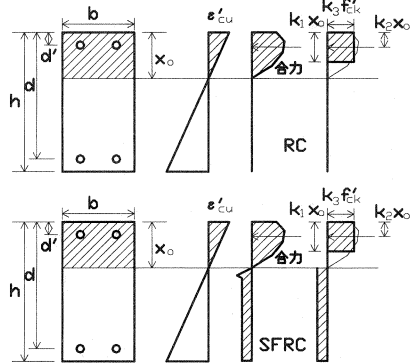


図-9 RCおよびSFRCにおける等価圧縮ブロック

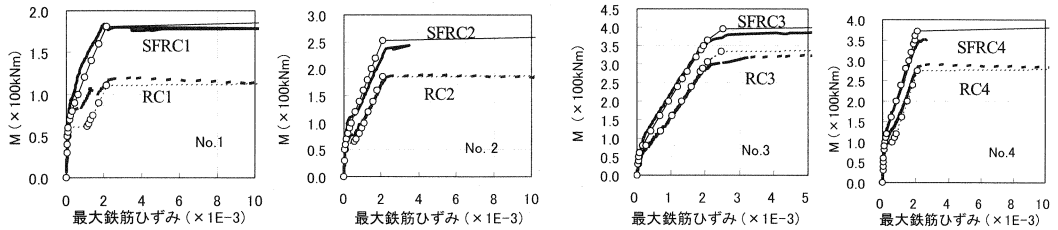


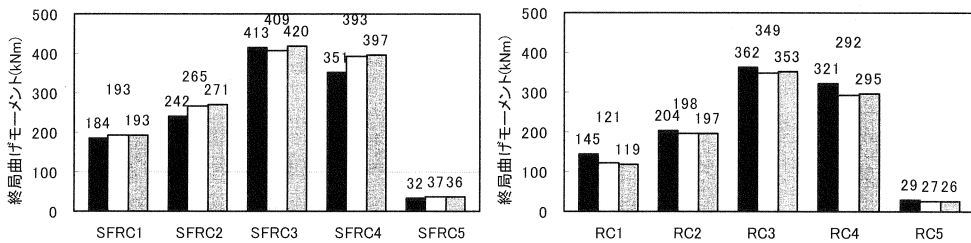
図-10 断面計算による最大鉄筋ひずみ結果 (○は解析値)

表-6 断面計算による終局耐力結果 (Me は実験値, Ma は解析値)

	SFRC1				SFRC2				SFRC3				SFRC4				SFRC5			
	Me	Ma	誤差	xo	Me	Ma	誤差	xo	Me	Ma	誤差	xo	Me	Ma	誤差	xo	Me	Ma	誤差	xo
$\epsilon'_{cu}=0.01$	184	193	-5	61	242	265	-10	68	413	409	1	91	351	393	-12	64	32	37	-16	34
	RC1				RC2				RC3				RC4				RC5			
	Me	Ma	誤差	xo	Me	Ma	誤差	xo	Me	Ma	誤差	xo	Me	Ma	誤差	xo	Me	Ma	誤差	xo
$\epsilon'_{cu}=0.0035$	145	121	17	34	204	198	3	46	362	349	4	69	321	292	9	45	29	27	7	25

表-7 等価圧縮ブロック法による終局耐力結果 (Me は実験値, Ma は解析値)

	SFRC1				SFRC2				SFRC3				SFRC4				SFRC5			
	Me	Ma	誤差	xo	Me	Ma	誤差	xo	Me	Ma	誤差	xo	Me	Ma	誤差	xo	Me	Ma	誤差	xo
$\epsilon'_{cu}=0.01$	184	193	-5	65	242	271	-12	75	413	421	-2	108	351	397	-13	77	32	36	-13	35
	RC1				RC2				RC3				RC4				RC5			
	Me	Ma	誤差	xo	Me	Ma	誤差	xo	Me	Ma	誤差	xo	Me	Ma	誤差	xo	Me	Ma	誤差	xo
$\epsilon'_{cu}=0.0035$	145	119	18	44	204	197	3	56	362	353	2	89	321	295	8	45	29	26	10	28



■ 実験値 □ 断面計算 ▨ 等価圧縮ブロック法

図-11 終局耐力における解析値と実験値の比較

よって,

$$M_u = (d - k_2 x_o) f_{sy} A_s + (k_2 x_o - d')(1 - d'/x_o) \epsilon'_{cu} E_s A'_s + ((h + x_o)/2 - k_2 x_o) f_r (h - x_o) b \quad (6)$$

以上の式に $f_r = 0$ を代入すれば, RC における圧縮鉄筋を有する断面の終局耐力の計算式となる⁸⁾。

6. 鉄筋降伏時の断面力における解析結果

図-10に断面計算による最大鉄筋ひずみとその実験値を示す。No. 5 供試体は, 鉄筋に溝を設けることができず, 最大鉄筋ひずみを計測できなかったため, 図-10にはNo. 5 供試体の結果を載せていない。図から, 鉄筋降伏時の曲げモーメントは計算値と実験値がおよそ一致していることがわかる。前述したように, SFRC 供試体において, ひび割れ間の鋼繊維の引抜きが生じる時期と上縁コンクリートの圧縮破壊が生じる時期は,

どちらが先行したかを判断できないが、鉄筋が降伏した時点で鋼繊維の引抜きが発生していないことを確認できた。実際の設計では、断面の最終破壊機構を明確に把握できない場合は、鉄筋降伏時の断面力を断面の終局耐力とする方法もあると考えられる。

7. 上縁コンクリート圧縮破壊時の断面力における解析結果

本研究供試体における計算では、鉄筋が降伏した後、上縁コンクリートが圧縮破壊するまで、断面力が多少増加する。よって、上縁コンクリートの圧縮破壊する時の断面力が断面の終局耐力となる。表-6に断面計算による断面の終局耐力と実験で得られた荷重の最大値の比較を示し、表-7に等価圧縮ブロック法による断面の終局耐力と実験で得られた荷重の最大値の比較を示す。図-11は表-6と表-7を図化したものである。断面計算と等価圧縮ブロック法による計算結果はほとんど一致しており、どちらもおよそ実験値を予測できると言える。RC 供試体において、実験結果は解析結果より多少大きくなっている。これは、本研究の計算では、鉄筋降伏後のひずみ硬化を考慮せず、剛性を0としたことが原因であると考えられる。また、SFRC 供試体において、実験結果は解析結果より多少小さくなっているが、これは、本論文節4に述べたように、Drop-constant モデルを用いてSFCの挙動を近似したためであると考えられる。

SFRC 供試体において以上に述べられた終局耐力は $\epsilon'_{cu} = 0.01$ とした解析結果である。 $\epsilon'_{cu} = 0.0035$ の場合、二つの方法を用いて終局耐力を求めてみたが、終局耐力の結果はあまり変わらなかった。

8. まとめ

鋼繊維の架橋作用により、SFRC 部材のひび割れ挙動が改善されると同時に、終局耐力も高められる。供試体の鉄筋比が低ければ、低いほどRC 供試体と比べ、SFRC 供試体の終局耐力の増加率が高くなる。SFRC 供試体が破壊する時、破壊損傷は一つのひび割れに集中し、このひび割れ面で鋼繊維の引抜きが発生した。また、このひび割れ面の上縁で、コンクリート圧縮破壊が発生したことが観察された。本研究において鉄筋が降伏した時、鋼繊維の引抜きがなかったことを確認できた。

断面計算および等価圧縮ブロック法を用いて終局耐力を計算した。本研究のSFRC 供試体とRC 供試体において、二つ方法による計算結果がほぼ同じであり、およそ実験で得られた最大曲げモーメントと近い値となっていた。

本研究SFRC 供試体の終局耐力において、実験値と近い解析値が得られたが、より精度が高い手法を確立するために、以下のような課題があると思われる。①圧縮等価ブロック法において、強度パラメータに対する実験検証、②鉄筋降伏後のひずみ硬化に対する考慮、③SFCの応力とひび割れ幅において軟化を考慮したモデル化。

参考文献

- 1) 阿部浩幸, 大城壮司, 余国雄, 二羽淳一郎: 鋼繊維補強コンクリートの曲げひび割れに関する研究, 第13回シンポジウム論文集, プレストレストコンクリート技術協会, pp. 159~164, 2004. 10.
- 2) 武知勉, 大城壮司, 阿部浩幸, 余国雄: 鋼繊維補強コンクリートを用いたPRC橋の適用性の検討, 第13回シンポジウム論文集, プレストレストコンクリート技術協会, pp. 155~158, 2004. 10.
- 3) 余国雄, 大城壮司, 阿部浩幸, 二羽淳一郎: 鋼繊維補強コンクリート部材の曲げひび割れの評価に関する研究, 第13回シンポジウム論文集, プレストレストコンクリート技術協会, pp. 165~170, 2004. 10.
- 4) 趙唯堅, 丸山久一: 多段配筋を有する鉄筋コンクリートはりの曲げひびわれ性状に関する実験的研究, 土木学会論文集, No. 490, V-23, pp. 137~145, 1994. 5.
- 5) 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, 1999.
- 6) 土木学会: コンクリート標準示方書「構造性能照査編」, 2002.
- 7) 田辺忠顕: 「コンクリート構造」, 朝倉書店, 1992.