

# 論文 炭素繊維巻き立て補強橋脚のじん性率評価式に関する検討

田口 絢子\*1・幸左賢二\*2・足立幸郎\*3・鈴木直人\*4

**要旨：**土木学会のじん性率評価式，および道路橋示方書式の炭素繊維巻き立て橋脚への適用性の検討を行った。その結果，土木学会式では炭素繊維の負担するせん断力の補強効率を0.3に，同様に道路橋示方書式では炭素繊維の強度を0.4に低減することによりじん性率の評価が可能であることが明らかとなった。

**キーワード：**炭素繊維巻き立て，RC 橋脚，せん断耐力，じん性率

## 1. はじめに

現在既設 RC 橋脚のじん性向上のため，耐震補強工事が最優先で行われている。一般的には鋼板巻き立てや RC 巻き立て工法が主流であるが，最近では炭素繊維やアラミド繊維巻き立て工法も数多く実施されている。中でも炭素繊維は強度，耐久性に優れ，さらに軽量であるため施工の際に重機を必要としないなどの利点がある。しかし，各種の実験的検討により炭素繊維の補強効果についてはすでに数多く報告されているものの，供試体ごとのばらつきが大きく必ずしも定量的な評価には至っていない。また，既存橋脚に炭素繊維巻き立て補強を施すと，橋脚には炭素繊維と帯鉄筋による横拘束効果が生じるため，これら両者の効果を適切に考慮しなければならない。そこで本論では，既往の炭素繊維巻き立て補強橋脚の正負交番水平載荷試験データを収集し，(1)耐力比（せん断耐力と曲げ耐力の比）を用いたじん性率評価式，(2)道路橋示方書を用いたじん性率評価式の炭素繊維巻き立て補強橋脚への適用性の検討を行った。

## 2. 既往の実験結果

### 2.1 検討対象供試体

収集した 65 体のうち，じん性率評価式の適用範囲である，軸圧縮応力度  $\sigma_n \leq 5.0 \text{MPa}$ ，せん

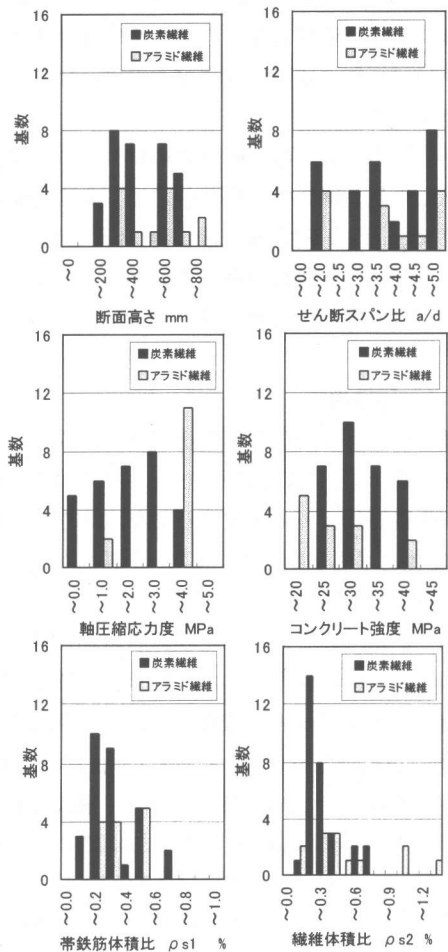


図-1 供試体諸元の分布

\*1 九州工業大学大学院 工学研究科設計生産工学専攻 (学生員)  
 \*2 九州工業大学助教授 工学部建設社会工学科 Ph.D. (正会員)  
 \*3 阪神高速道路公団 工務部設計課 (正会員)  
 \*4 建設技術研究所(株) 大阪支社技術第二部 (正会員)

断スパン比  $a/d \leq 5.0$  を満足する 43 体を解析対象とした。その諸元を図-1 に示すが、43 体のうち 13 体はアラミド繊維補強供試体である。

せん断スパン比は炭素繊維、アラミド繊維補強供試体ともに、 $a/d: 2.0 \sim 5.0$  で広範囲に分布している。繊維体積比は 0.3% 以下が多いが、図-2 に示す換算帯鉄筋体積比ではほとんどが 1.0% を超えている。中には 7% 以上もの高補強を施した供試体も含まれている。また、軸圧縮力度については、アラミド繊維補強供試体は高軸力を受けるものが多く、13 体中 2 体を除いて 11 体が  $4.0 \text{MPa} < \sigma_n < 5.0 \text{MPa}$  の範囲にある。低軸力の 2 体は橋脚をモデル化した供試体であり、残りの 11 体は建築の柱部材をモデル化した供試体である。

解析にあたっては、降伏点の材料定数を補正した上で最外縁の鉄筋が降伏に達する点を降伏変位  $\delta_y$  とし、最大荷重後に再び降伏荷重まで低下したときの変位を終局変位  $\delta_u$  として、 $\delta_u / \delta_y$  により実験じん性率を求めた。

## 2.2 破壊性状

表-1 に解析対象とした供試体データの破壊モードを示す。今回検討したデータでは主鉄筋の座屈後繊維シートが破断した供試体が 43 体中 22 体と最も多かった。また、主鉄筋が破断した供試体は 2 体のみであった。

図-3 に 3% で区分した換算帯鉄筋体積比と破壊性状との関係を示した。換算帯鉄筋体積比(補強量)が多いほど、繊維が破断する供試体が 17 体 ( $\Sigma \rho_s < 3.0\%$ ) から 5 体 ( $\Sigma \rho_s > 3.0\%$ ) と少なくなることがわかる。一方、鋼板巻き立て補強供試体では、補強量の増加に従い主鉄筋の座屈が先行せず、主鉄筋の破断が起こり終局に至る破壊モードが増加することが報告されている<sup>1)</sup>。これに対して繊維巻き立て供試体では、補強量が多くても主鉄筋の破断により終局に至るケースは 2 体のみであった。これは繊維シートでは巻き立て厚を増しても剛性的には鋼板比べて小さいため、拘束圧の増加も鋼板に比べて

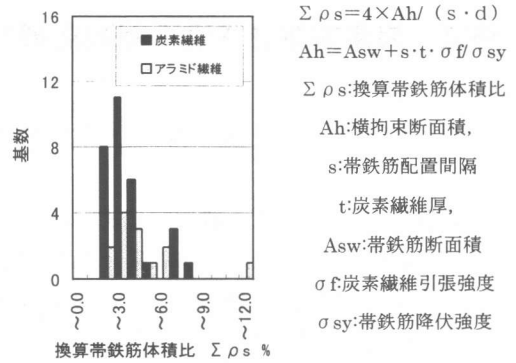


図-2 換算帯鉄筋体積比の分布

表-1 供試体の破壊状況

破壊状況	供試体数
シート破断+鉄筋座屈	22
シートはらみだし+鉄筋座屈	17
シートはらみだし	2
シートはらみだし+鉄筋破断	2

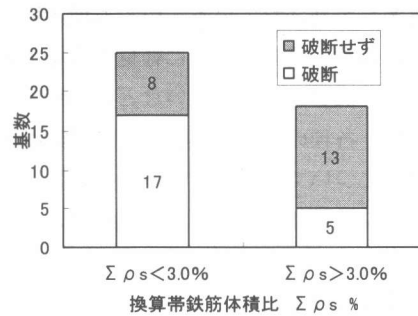


図-3 補強量と破壊性状の関係

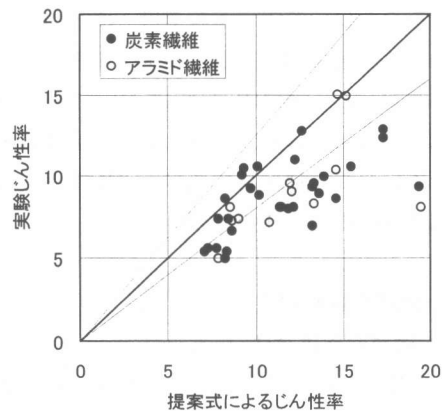


図-4 提案式と実験値の関係

小さいためと考えられる。

以上のように、繊維巻き立て補強供試体の破

壊モードは以下の2種類に大別できると考えられる。(1) 十分な繊維量を巻き立てた供試体ではコンクリートの圧壊によりシートがはらみ出し耐力の低下が始まる。その後、主鉄筋の座屈が進行しシートのゆるみや破断に至る。

(2) 繊維厚が比較的薄い場合には、主鉄筋の座屈とともにシートの破断が生じやすい。

### 3. 耐力比を用いたじん性率評価式の検討

#### 3.1 既往の評価式の検討

近年の耐震基準では橋脚は高い変形性能が要求され、高帯鉄筋比になる傾向がある。適用範囲を従来の比較的帯鉄筋比の部材を対象とした土木学会式 ( $V_c/V_{mu} \leq 1.4$ ,  $V_s/V_{mu} \leq 1.4$ ) では適用外となる場合が多い。

そこで著者らは高じん性域を対象とした(1)式を提案しており<sup>2)</sup>、ここでは式(1)に炭素繊維の負担するせん断力を考慮した式(2)の適用性について検討を行った。

$$\mu = 1.63(0.3V_c + V_s)/V_{mu} + 5.59 \quad (1)$$

$$\mu = 1.63(0.3V_c + V_s + V_f)/V_{mu} + 5.59 \quad (2)$$

ここで  $\mu$  : じん性率,  $V_c$  : コンクリートのせん断耐力,  $V_s$  : 鉄筋のせん断耐力,  $V_f$  : 炭素繊維のせん断耐力,  $V_{mu}$  : 曲げ耐力

適用範囲 :  $V_c/V_{mu} \leq 1.4$ ,  $V_s/V_{mu} \leq 3.5$ ,  $0.5 \leq (0.3V_c + V_s)/V_{mu} \leq 3.0$ , 帯鉄筋比 :  $\rho_w \geq 0.1\%$ ,  $a/d \geq 2.5$ ,  $\sigma_n \leq 2.0\text{MPa}$

図-4に提案式(式(2))と実験値の関係を示す。ほとんどの供試体のじん性率が実験値を過大評価している。従って式(2)においてコンクリートの負担するせん断耐力の低下を考慮した  $0.3V_c$  と帯鉄筋の負担するせん断耐力  $V_s$  は RC 橋脚と同じであると考え、炭素繊維が負担するせん断耐力の効率を低下させる必要がある。

図-5に示すように縦軸に炭素繊維の負担するじん性率(実験じん性率  $\mu - [1.63(0.3V_c + V_s)/V_{mu} + 5.59]$ ), 横軸に耐力比 ( $V_f/V_{mu}$ ) をとり、プロットした点の近似直線を求め、その傾きを求めた。その結果  $0.5194$  の値が得られ、式(2)の右辺の係数  $1.63$  で割ることによって、炭素繊維

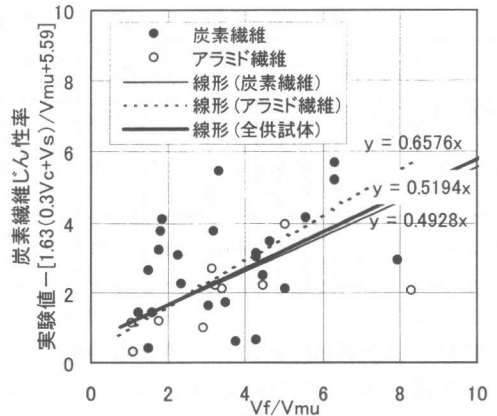


図-5 せん断余裕度と耐力比の関係

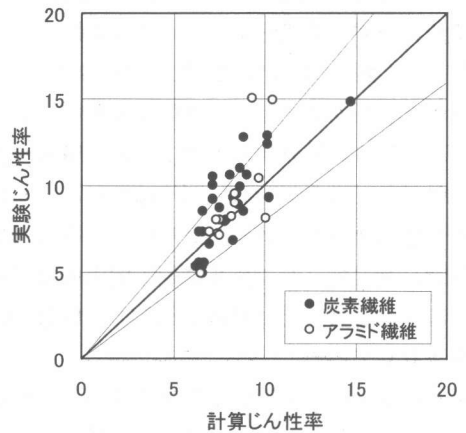


図-6 炭素繊維補強効率の考慮した実験値と計算値の関係

補強効率は  $0.5194/1.63 = 0.319 \approx 0.3$  となる。

式(2)において炭素繊維の負担するせん断耐力に  $0.3$  を乗じた計算値と実験値の関係を図-6に示す。実験値/計算値の平均値は  $1.09$ , 変動係数は  $18.7\%$  であり、両者の関係は  $2$  割程度の誤差内にほぼ納まっている。

今回は炭素繊維とアラミド繊維を特に分別せず両者に  $0.3$  の係数を乗じることを提案している。これは図-5に示すようにアラミド繊維のみで近似直線の傾きを求めた場合、その傾きから  $0.6576/1.63 = 0.403$  程度となり、ほぼ炭素繊維と同じ補強効率が得られたことによる。

#### 3.2 炭素繊維補強効率の検討

表-2 ひずみ性状検討対象供試体

シリーズ	供試体数	供試体名	断面高さ mm	せん断スパン比	引張鉄筋比 %	帯鉄筋比 %	炭素繊維比 %	繊維積層枚数	コンクリート強度 MPa	軸圧縮応力度 MPa	炭素繊維破断サイクル	炭素繊維破断サイクル	主鉄筋破断
シリーズ1	1	①	700	3.0	1.90	0.08	0.13	4	26	2.3	あり	6 $\delta_y$	なし
シリーズ2	4	②-1	700	4.6	2.59	0.12	0.10	3	37	3.9	あり	—	なし
		②-2					0.16	5	38	3.9	あり	データなし	なし
		②-3					0.25	8	37	3.9	なし	—	なし
		②-4					0.16	—	39	3.9	なし	—	なし
シリーズ3	3	③-1	400	3.1	1.58	0.23	0.08	1	40	1.0	あり	7 $\delta_y$	なし
		③-2					0.07	1	38		あり	6 $\delta_y$	なし
		③-3					0.17	2	40		なし	—	あり

②-4 は炭素繊維ストランド補強供試体  
③-3 はアラミド繊維巻き立て供試体

収集した炭素繊維巻き立て供試体、およびアラミド繊維巻き立て供試体について実験時のひずみ性状から炭素繊維の補強効率の分析を行った。収集した65体の実験データから繊維あるいは帯鉄筋のひずみ性状が記されている文献<sup>3)~5)</sup>を選出し、表-2に示すようにシリーズ1, 2, 3とした。分析対象とした供試体は8体で、シリーズ3の③-3の供試体のみがアラミド繊維巻き立て供試体である。シリーズ1はコンクリート強度が他に比べて小さく、シリーズ2では引張鉄筋比、せん断スパン比及び軸圧縮応力度が大きく、シリーズ3では帯鉄筋比が大きいなどの特徴を有している。

図-7のシリーズ1のひずみ性状から分かるように、4 $\delta_y$ 時までは帯鉄筋と炭素繊維には差がないが、4 $\delta_y$ 以降帯鉄筋は降伏ひずみに達しているのに対し、炭素繊維は終局時でも3500 $\mu$ 程度のひずみが発生したのみであった。報告によると「一部の炭素繊維が破断した」との記載があり、炭素繊維は破断ひずみに達することなく、隅角部等で局所的な繊維の破断が起こっていることが推測される。よって炭素繊維が期待した強度を発揮することなく、局所的な破断が起こり、巻き立ての補強効果が十分に発揮されないまま柱が破壊しており、炭素繊維巻き立ての補強効果は低減させる必要があるといえる。

図-8にシリーズ2の終局時のひずみ性状を示す。炭素繊維の巻き立て厚を3層(②-1供試体)、5層(②-2)、8層(②-3)と積層枚数を多くすると、じん性向上の傾向はあるものの、ひずみの増加はなく、逆にひずみは減少傾向にある。また、繊維ひずみが十分に生じた供試体は

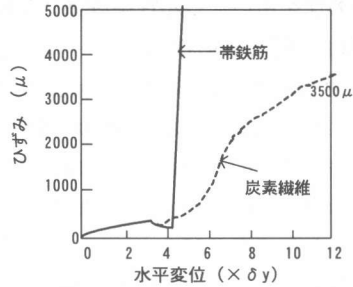


図-7 ひずみ性状 (シリーズ1)

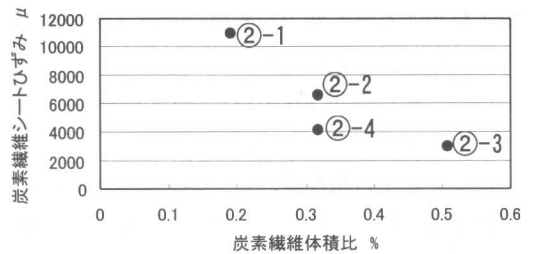


図-8 ひずみ性状 (シリーズ2)

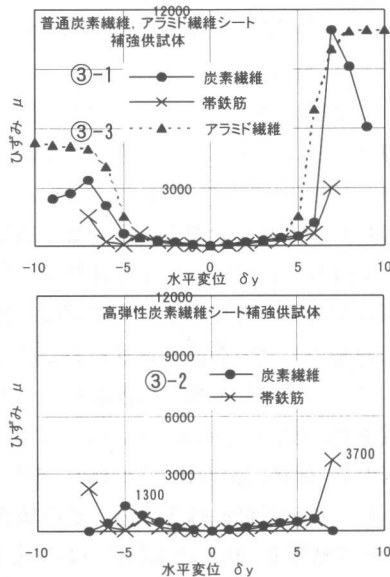


図-9 ひずみ性状 (シリーズ3)

②-1 供試体のみで、他の3体は3000~7000 $\mu$ 程度のひずみしか発生していない。

図-9の下図に示すシリーズ3の③-2 供試体のひずみ性状に着目すると、これは高弾性炭素繊維シートを使用しており、高弾性であるため炭素繊維がコンクリートのはらみ出しに追従できず、十分な伸びを発揮することができなかったことが推定される。また、炭素繊維と帯鉄筋のひずみを比較すると、帯鉄筋は終局時近傍で3700 $\mu$ と降伏ひずみを大幅に超えているが、炭素繊維は最大でも1500 $\mu$ 程度のひずみが生じただけである。一方③-1、③-3 供試体は炭素繊維、およびアラミド繊維の破断ひずみに達する程度の十分なひずみが生じている。これは断面も小さくシートが局所的な破断等を起すこともなく、コンクリートのはらみ出しに追従し繊維シートの補強効果を示した例であるといえる。隅角部等における局所的な破断がおこななければ、繊維シートは十分にその効果を発揮するといえる。

図-10にシリーズ1~3の実験値と計算値の関係を示した。炭素繊維のひずみが発揮されなかった供試体(シリーズ1~2)は繊維の効率が低下させた修正後の方が実験値と計算値の適合性がよいことがわかる。

#### 4. 道路橋示方書を用いた評価法

##### 4.1 実験値と計算値の比較

道路橋示方書を用いてじん性率を求め、実験値と対比したものを図-11に示す。図から実験じん性率は15程度で頭打ちの傾向があるのに対し、計算じん性率は15以上の値を示し、26.2、30.2、48.0など上限無くじん性率が算出されていることがわかる。

このことから帯鉄筋比が増加してもじん性率には頭打ちの傾向があることが分かり、直接炭素繊維シートの補強量を帯鉄筋換算して道路橋示方書式を用いることは、拘束効果を過大評価する傾向となる。

図-12に上限値を6.0%として換算帯鉄筋体

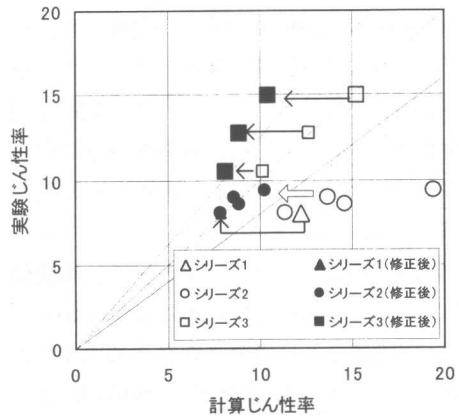


図-10 実験値と計算値の関係

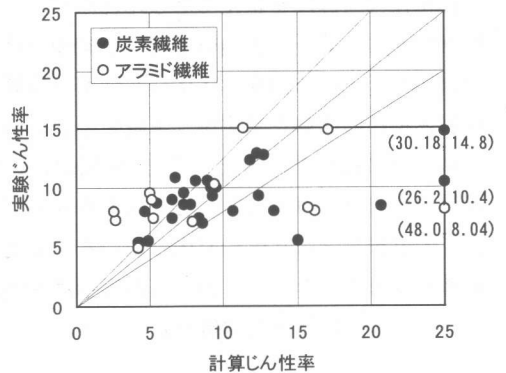


図-11 実験値と計算値の比較

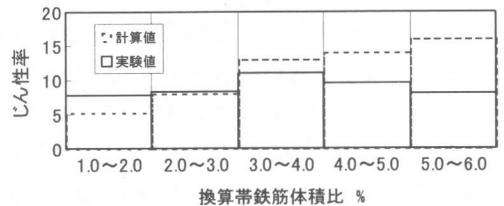


図-12 補強量とじん性率の関係

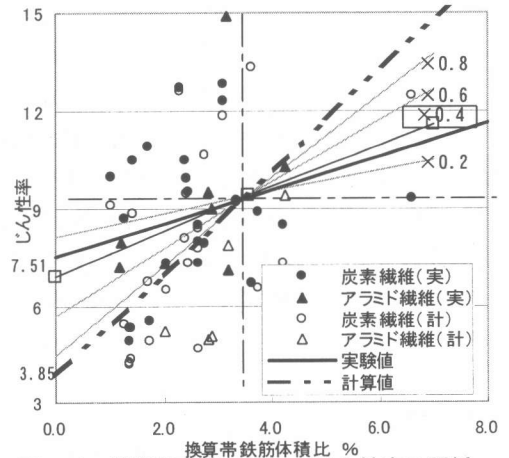


図-13 換算帯鉄筋体積比とじん性率の関係

積比とじん性率の関係を示す。上限値を設けた理由としては、換算帯鉄筋体積比が 6.0%を越す補強を施した供試体では、計算値が極端に過大評価となり、30 程度のじん性率を見込む供試体があるためである。図は換算帯鉄筋体積比 1%区間ごとのじん性率の平均値を示している。換算帯鉄筋体積比をパラメータとすると実験値と計算値の傾向が異なっていることがわかる。計算値、実験値ともに換算帯鉄筋体積比 3%程度までは、体積比の増加に伴い増加傾向にあるのは一致している。しかし、計算値は換算帯鉄筋体積比 3%程度を超えてもじん性率が一樣に増加するのに対し、実験値は増加と減少のばらつきが生じている。図-13 にじん性率と換算帯鉄筋体積比の関係を示すが、実験値と計算値の近似直線の接点を基準とすると、実験値の近似直線の傾きは計算値に対して、傾きを 4 割 (× 0.4 の直線) とした値に対応している。また、近似直線の切片から計算値のじん性率は実験値に対して 3.7 程度の余裕値を有している。

## 4.2 効率効果の検討

4.1 の検討結果から、炭素繊維の帯鉄筋への換算を以下に示す式 (3), (4) を用いて、断面の  $M-\phi$  関係を算定する際のコンクリートの応力ひずみ関係に適用した。さらに得られたじん性率に式 (5) に示すように 3.7 の余裕値を加え、補正を行った。

$$\Sigma \rho s = 4 \times Ah / (s \cdot d) \quad (3)$$

$$Ah = Asw + s \times t \times 0.4 \sigma f / \sigma sy \quad (4)$$

$$\mu = \mu' + 3.7 \quad (5)$$

ここで  $d$ : 有効高さ,  $\mu'$ : 式 (3), (4) を適用して得られたじん性率,  $\mu$ : 計算じん性率

図-14 に計算値と実験値の関係を示す。実験値/計算値の平均は 0.96, 変動係数は 17.6% となり図に示すように精度良くじん性率評価ができています。

## 5. 結論

土木学会式、道路橋示方書式の炭素繊維巻き

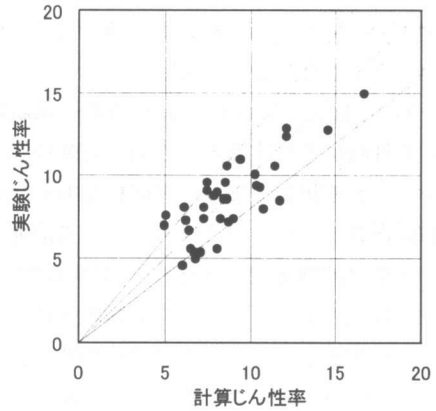


図-14 実験値と計算値の関係

立て橋脚への適用性の検討結果を以下に示す。

①耐力比を用いたじん性率評価式は炭素繊維の負担するせん断耐力に 0.3 を乗じることにより以下の式による評価が可能である。

$$\mu = 1.63 (0.3Vc + Vs + 0.3Vf) / Vmu + 5.59$$

適用範囲:  $a/d \leq 5.0$ ,  $\sigma n \leq 5.0 \text{MPa}$

②このように炭素繊維の補強効率が低下する要因としては、降伏ひずみの 1/3 程度で繊維シートの局所的な破断が生じるためと考えられる。

③道路橋示方書を用いたじん性率評価式は炭素繊維を帯鉄筋に換算する場合、その補強効率を 4 割とし、3.7 の余裕値を加えることでじん性率の評価が可能であることが明らかとなった。

## 参考文献

- 1) 鈴木, 幸左, 藤井, 澤田: 鋼板巻立て橋脚の変形性能に関する検討, コンクリート工学年次論文報告集 Vol.21, No.3, 1999
- 2) 幸左, 鈴木: 耐力比を用いた RC 橋脚のじん性率評価式の検討, 構造工学論文集, Vol.44A, 1998.3
- 3) 佐々木, 梶田, 前川, 星隈: 炭素繊維シートを用いた RC 橋脚補強の実験的検討, 第 24 回地震工学研究発表会講演論文集, 1997.7
- 4) 松本, 涌井, 岡野, 大内: 炭素繊維シートによる鉄道高架橋柱のじん性補強に関する実験, 第 2 回阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集, 1997.1
- 5) 堀口, 宇治, 細谷: 連続繊維シートの弾性係数の相違が鉄筋コンクリート橋脚のじん性に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文報告集 pp1273- p p1278