

論文 連続繊維シートで補強された部材のじん性率照査式に関する検討

勝木 太^{*1}・丸山 久一^{*2}・陸好 宏史^{*3}・樋口 昇^{*4}

要旨: 本論文は、筆者らが土木学会コンクリート委員会連続繊維補修・補強小委員会の中で検討してきた連続繊維シートで補強された部材のじん性率照査法について報告するものである。本論において、連続繊維シートで補強された部材のじん性率は、補強材料の力学的特性と補強量をパラメータに入れたせん断余裕度を用いることにより、これまで補強材料ごとに評価されてきたものが統合して評価できることを明らかにし、その設計方法について提案した。

キーワード: 連続繊維シート、耐震補強、じん性率、炭素繊維、アラミド繊維

1. はじめに

連続繊維シートによる RC 部材のじん性補強設計式は、構造物や補強材料の種類ごとに、実構造物に近い試験体を用いた正負交番繰返し試験の結果に基づいて定められている。これは、連続繊維シートによる RC 部材のじん性補強効果が、補強材料の種類、躯体の断面寸法、軸力、また引張鉄筋比等の様々な影響により異なることから、未だ理論解を得ることができないための措置である。したがって、他の新しい補強材料を耐震補強材として使用する場合、これまで提案されているじん性補強設計式を利用し設計することができないのが現状である。

そこで筆者らは、特に補強材料の力学的特性や補強量等に着目し、これまで補強材料ごとに評価されてきた RC 部材のじん性補強効果を統合して評価できる設計式の提案を試みた。

なお本論で提案するじん性補強設計式は、既往の研究で行われたアラミド繊維シート及び炭素繊維シートで補強された RC 柱の正負交番載荷繰返し実験の結果^{1), 2), 5)~8)}を用いて検討したものである。

2. 既往の研究成果

今回連続繊維シートによる RC 部材のじん性補強設計式を検討する際に使用した試験体の断面諸元と使用材料の特性を表-1 に示す。試験体はすべて矩形断面であり、(財)鉄道総合技術研究所で行われたものは鉄道高架橋柱の実物大モデル試験体で、アラミド補強研究会で検討されたものは道路橋脚のモデル試験体である。また、使用された連続繊維シートはアラミド繊維シートの場合、ケブラーシート（以下、アラミド 1 と略称）とテクノーラシート（以下、アラミド 2 と略称）の 2 種類、及び炭素繊維シートの合計 3 種類である。なお、表中のせん断補強筋の断面積と配置間隔は試験体基部の緒元である。

表-2 に土木学会コンクリート標準示方書⁴⁾に準拠して求めた各々の試験体のせん断耐力と現有曲げ耐力及び実験で得られたじん性率を示す。なおアラミド繊維シート及び炭素繊維シートにより受け持たれるせん断耐力 V_f は、参考文献 1) 及び 2) に準拠して算定した。ただし、両者の補正係数 K はすべて 1.0 として計算した。また、設計値算定にはすべて表-1 の特性値を使用した。

*1 芝浦工業大学助教授 工学部土木工学科、工博（正会員）

*2 長岡技術大学教授 工学部環境・建設系、工博（正会員）

*3 埼玉大学教授 工学部建設工学科、工博（正会員）

*4 三井建設株式会社 土木設計部設計室 室長、工博

表-1 試験体の断面緒元及び材料特性

試験体		総研 0	総研 1	総研 2	総研 3	総研 4	総研 5	JH-0	JH-1	JH-2	JH-3	JH-4	総研 D3	総研 D5	総研 D8
補強材料		無補強	アラミド 2	アラミド 2	アラミド 2	アラミド 2	アラミド 1	無補強	アラミド 1	アラミド 1	アラミド 1	アラミド 2	炭素	炭素	炭素
断面幅	cm	70	60	60	80	80	70	45	45	45	45	45	70	70	70
断面高さ	cm	70	60	60	80	80	70	30	30	30	30	30	70	70	70
有効高さ	cm	64	54	54	74	74	64	26.5	26.5	26.5	26.5	26.5	64	64	64
せん断スパン	cm	320	290	290	300	300	300	150	150	150	150	150	320	320	320
軸力	kN	1921	1176	1176	2352	2352	1959	79.38	79.38	79.38	79.38	79.38	1920.8	1920.8	1920.8
主鉄筋の降伏強度と緒元															
特性値	N/mm ²	295	295	295	295	295	295	343	343	343	343	343	295	295	295
実験値	N/mm ²	349	345	349	345	345	316	368	368	368	368	368	349	349	349
引張鉄筋比	%	0.89	0.98	0.98	0.80	0.80	0.89	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	0.89	0.89	0.89
せん断補強筋の降伏強度と諸元															
特性値	N/mm ²	235	235	235	235	235	235	343	343	343	343	343	235	235	235
実験値	N/mm ²	345	325	317	319	319	325	394	394	394	394	394	345	345	345
断面積	cm ²	0.636	0.636	0.636	0.636	0.636	0.636	0.317	0.317	0.317	0.317	0.317	0.636	0.636	0.636
配置間隔	cm	15	10	10	15	15	15	25	25	25	25	25	15	15	15
コンクリートの圧縮強度															
特性値	N/mm ²	20.58	17.64	17.64	20.58	20.58	17.64	23.52	23.52	23.52	23.52	23.52	20.58	20.58	20.58
実験値	N/mm ²	36.65	21.95	27.34	22.54	24.01	20.09	29.4	31.16	32.05	30.38	30.87	38.22	37.142	38.906
連続繊維シートの材料特性と諸元															
引張強度の特性値	N/mm ²	0	2352	2352	2352	2352	2058	0	2058	2058	2058	2352	3430	3430	3430
引張強度の実験値	N/mm ²	0	2950	2950	2842	2896	2666	0	2401	2401	2401	2663	4312	4312	4321.8
設計厚さ	cm/枚	0	0.014	0.014	0.022	0.036	0.029	0	0.019	0.019	0.019	0.017	0.0111	0.0111	0.0111
枚数	枚	0	1	3	2	2	3	0	1	2	2	1	3	5	8
弾性係数の特性値	kN/mm ²	78.4	78.4	78.4	78.4	78.4	117.6	117.6	117.6	117.6	117.6	117.6	230.3	230.3	230.3
弾性係数の実験値	kN/mm ²	78.4	82.32	82.32	79.38	80.85	117.6	117.6	127.4	127.4	127.4	87.22	251.86	251.86	245.98

表-2 中の部分安全係数である $\gamma_{mc} \cdot \gamma_{ms} \cdot \gamma_{mf}$ と $\gamma_{bc} \cdot \gamma_{bs} \cdot \gamma_{bf}$ は、それぞれコンクリート・鉄筋・連続繊維シートの材料係数とせん断耐力の算定に使用する部材係数であり、 ρ_s は鉄筋の材料修正係数である。なお設計現有曲げ耐力の算定に使用する部材係数 γ_b は、じん性率を評価するための安全側の措置として 1.0 を用いた。また実験値を用いて算定する場合は、部分安全係数を全て 1.0 とした。

表中の試験体の破壊形式は、主筋座屈後、シート破断により終局に至ったものが、総研 1・総研 3・総研 5・JH1・JH2・JH3・総研 D3・総研 D5 の試験体で、総研 2・総研 4・JH4・総研 D8 の試験体は主筋座屈後、シートの破断無しに終局に至った。

3. 検討結果

図-1 にせん断余裕度とじん性率との関係を、また図-2 及び図-3 には鉄筋と連続繊維シートの弾性係数比及び終局ひずみ比を考慮したせん断余裕度とじん性率との関係を示した。図-1 より、図中の回帰直線を比較すると弾性係数が小さく変形性能が大きいアラミド繊維シートのほうが炭素繊維シートよりもじん性の補強効果が高いことが分かる。しかし、じん性率をせん断余裕度で評価した場合、統合した評価式を得ることができないことが分かる。また図-2 においては、アラミド 1 と炭素の回帰式はほぼ一致するものの、アラミド 2 の回帰式は他者と大きく異なる。図-3 においては 3 者とも異なる結果となること

表-2 試験体の断面耐力及びじん性率

記号	単位	総研 0	総研 1	総研 2	総研 3	総研 4	総研 5	JH-0	JH-1	JH-2	JH-3	JH-4	総研 D3	総研 D5	総研 D8
実験値 (部分安全係数: $\gamma_{mc}=1.0$, $\gamma_{ms}=1.0$, $\gamma_{mf}=1.0$, $\gamma_{bc}=1.0$, $\gamma_{bs}=1.0$, $\gamma_{bf}=1.0$, $\gamma_b=1.0$, $\rho_s=1.0$)															
Vc	kN	320	210	226	335	343	262	108	110	111	109	110	324	321	326
Vs	kN	163	194	189	174	174	153	23	23	23	23	23	163	163	163
Vf	kN	0	399	1197	1580	2683	2608	0	214	427	427	207	1598	2664	4272
Vfy	kN	482	803	1612	2090	3200	3023	131	347	561	559	340	2085	3148	4760
Mu	kN・m	1737	956	1007	2284	2313	1453	166	166	166	166	166	1737	1737	1737
Vmu	kN	543	330	347	761	771	484	110	111	111	111	111	543	543	543
設計値 (部分安全係数: $\gamma_{mc}=1.3$, $\gamma_{ms}=1.0$, $\gamma_{mf}=1.2$, $\gamma_{bc}=1.3$, $\gamma_{bs}=1.15$, $\gamma_{bf}=1.15$, $\gamma_b=1.0$, $\rho_s=1.2$)															
Vcd	kN	186	138	138	229	229	177	71	71	71	71	71	186	186	186
Vsd	kN	97	122	122	112	112	97	17	17	17	17	17	97	97	97
Vfd	kN	0	230	691	948	1579	1459	0	133	265	265	133	921	1535	2457
Vfyd	kN	282	490	951	1289	1920	1732	88	221	353	353	221	1204	1818	2739
Mud	kN・m	1463	875	875	2144	2144	1415	177	177	177	177	177	1463	1463	1463
Vmud	kN	457	302	302	715	715	472	118	118	118	118	118	457	457	457
じん性率 μ_{exp}		4.2	7.2	9.45	7.3	7.05	10.3	5.2	7.7	9.9	8.6	9.4	7.26	7.845	9.07

が分かる。さらに図-4に、せん断補強量とじん性率との関係を示したが、図中の回帰式はこれまでと同様3者とも異なる性状を示す結果となった。ここで、現有のせん断余裕度がどの程度補強効果に影響を与えるのか考察するために、図-5に現有のせん断余裕度とじん性率の関係を示した。また、図-6に連続繊維シートのみでのせん断耐力を用いて算出したせん断余裕度とじん性率の関係も示した。なおせん断補強筋で受け持つせん断耐力 (V_s) は、最もせん断補強量の少ない区間で算定しており、凡例中の括弧内の数値は現有のせん断余裕度である。両図より、現有のせん断余裕度が1.0近傍の試験体のじん性補強効果は、補強量が増加すると比較的向上するのに対し、現有のせん断余裕度が0.55と低い試験体のじん性補強効果はほとんど向上しないことが分かる。

よって、単純にコンクリート、せん断補強筋及び連続繊維シートのせん断耐力の和を用いて算定したせん断余裕度では現有のせん断余裕度の小さい試験体の試験結果の影響で、3者を統合したじん性率の評価ができないと考えられる。そこで筆者らは、既往の試験結果を現有のせん断余裕度に補強後のせん断余裕度を乗じたもの

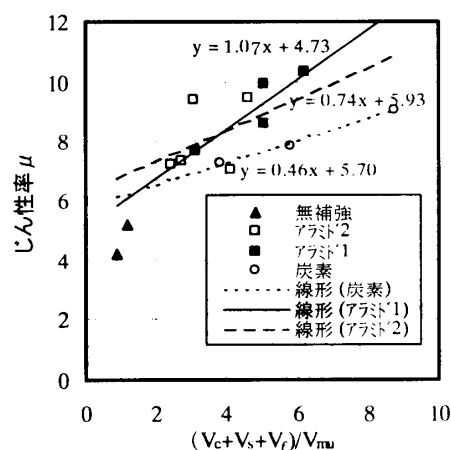


図-1 せん断余裕度とじん性率の関係

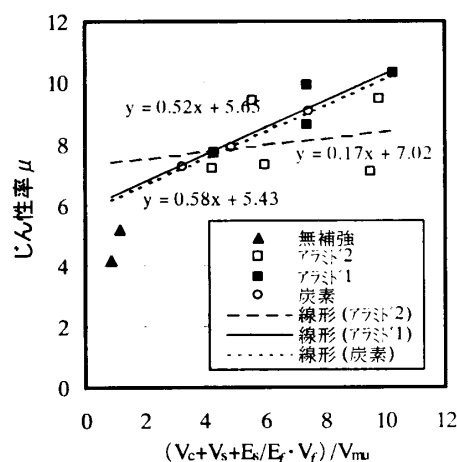


図-2 ヤング係数比を考慮したせん断余裕度とじん性率の関係

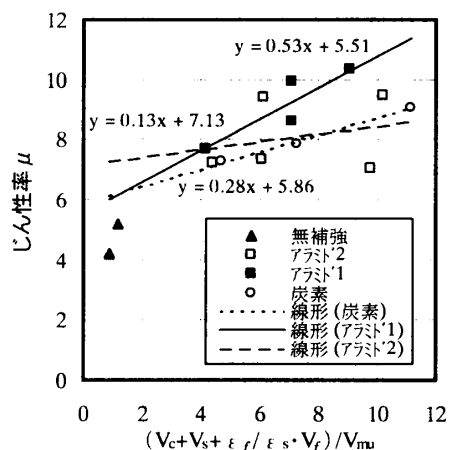


図-3 終局ひずみ比を考慮したせん断余裕度とじん性率の関係

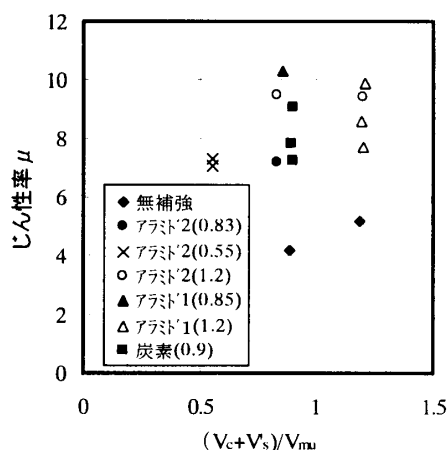


図-5 現有せん断余裕度とじん性率の関係

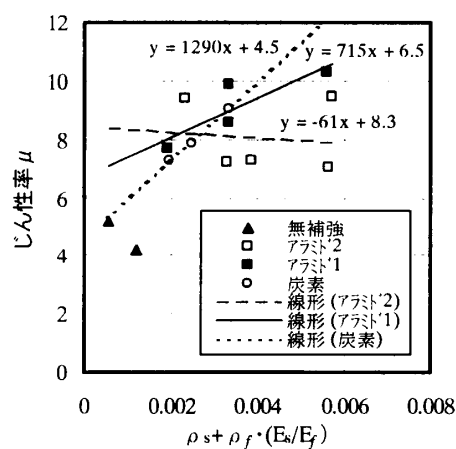


図-4 せん断補強量とじん性率の関係

でじん性率を評価した (図-7 参照)。図-7 において 3 者の回帰直線は、弾性係数の小さい順にじん性の補強効果が大きくなり、はっきりと 3 者の特性を分離することが可能になった。さらに、図-7 のデータに鉄筋と連続繊維シートの弾性係数比を考慮したものでじん性率を評価するとほぼ 3 者の回帰直線が重なることが分かる (図-8)。したがって、図-8 の関係を利用することにより補強材料ごとではなく統合したじん性補強設計式を得ることができると考えられる。

一方、土木学会コンクリート標準示方書「耐震設計編」では、曲げ降伏後の繰返し作用によるコンクリートの受け持つせん断耐力の低下を考慮し、コンクリートが受け持つせん断耐力に 0.5 を乗じてじん性率を評価している。そこで本論においても土木学会に準拠し、コンクリートが受け持つせん断耐力に 0.5 を乗じて図-8 と

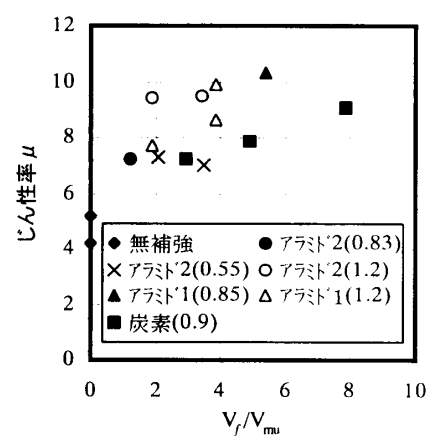


図-6 連続繊維シートのみでのせん断余裕度とじん性率の関係

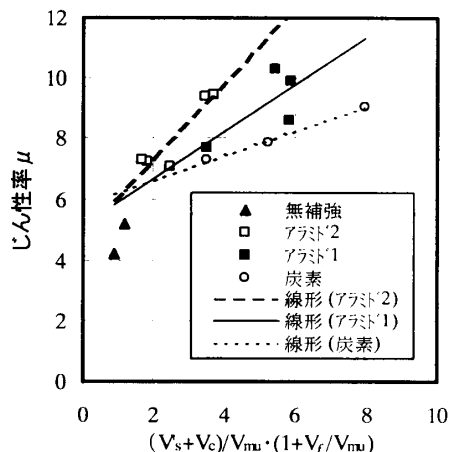


図-7 $(V'_s+V_c)/V_{mu} \cdot (1+V_f/V_{mu})$ とじん性率の関係

同じパラメータでじん性率を評価することにした。図-9 にその結果を示すが、アラミド 2 の回帰直線が他の者と多少ばらつく傾向にあるもののほぼ全データの中央値で 3 者の実験値を評価することができることが分かる。なお、せん断

補強筋で受け持たれるせん断耐力は柱基部のせん断補強量を用いて算定した。

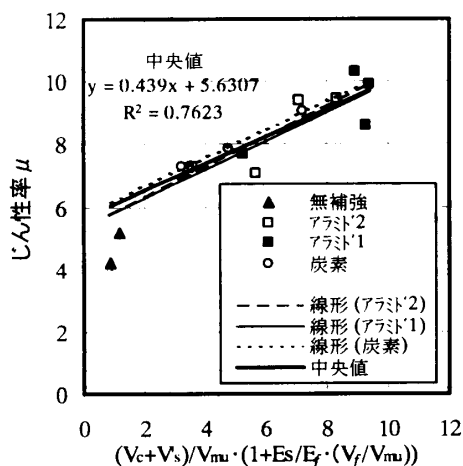


図-8 $(V_c+V_s)/V_{mu} \cdot (1+E_s/E_f \cdot (V_f/V_{mu}))$ とじん性率の関係

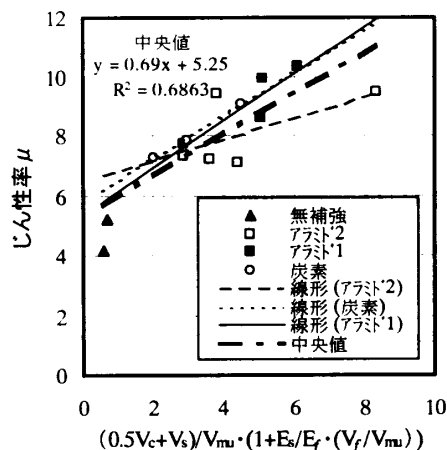


図-9 $(0.5V_c+V_s)/V_{mu} \cdot (1+E_s/E_f \cdot (V_f/V_{mu}))$ とじん性率の関係

4. 設計式の提案

ここでは、図-9の関係式を利用することにより連続繊維シートで補強した RC 部材のじん性補強設計式を構築することにする。図-9によるとじん性評価式は式(1)のようになるが、ここでは連続繊維シートの補強量と終局ひずみを明確に評価式に反映させるために式(2)のように整理したものを評価式とした。

$$\mu = a \cdot \frac{(0.5V_c + V_s)}{V_{mu}} \cdot \left(1 + \frac{E_s}{E_f} \cdot \frac{V_f}{V_{mu}} \right) + b \quad (1)$$

また、 $V_f = A_f \cdot f_{fu} / S \cdot z$ であることから

$$\mu = a \cdot \frac{(0.5V_c + V_s)}{V_{mu}} \cdot \left(1 + \frac{E_s}{V_{mu}} \cdot \frac{A_f \cdot f_{fu} \cdot z}{E_f \cdot S} \right) + b$$

$$= a \cdot \frac{(0.5V_c + V_s)}{V_{mu}} \cdot \left(1 + \alpha_0 \cdot \frac{\varepsilon_f \cdot \rho_f}{V_{mu} / (B \cdot z)} \right) + b \quad (2)$$

ただし、

a 及び b : 定数

V_{mu} : 部材が現有曲げ耐力 M_u に達するときの最大せん断力

f_{fu} : 連続繊維シートの引張強度

A_f : S 区間の連続繊維シート断面積

S : 連続繊維シートの間隔

z : 一般に有効高さ/1.15 としてよい

E_s : 鋼材の弾性係数

E_f : 連続繊維シートの弾性係数

B : 部材の幅

$$\varepsilon_f = f_{fu} / E_f$$

$$\rho_f = A_f / (B \cdot S) = 2 \cdot n \cdot t \cdot S' / (S \cdot B)$$

n : 連続繊維シートの枚数

t : 連続繊維シート一枚の設計厚さ

S' : 連続繊維シートのシート幅

α_0 は部材のじん性率の算出に用いる係数で、帯鉄筋によりせん断補強されている部材に対しては α_0 として帯鉄筋の弾性係数を用いてよいことにした。($\alpha_0 = E_s$) さらに、参考文献 5)～8)の無補強及び炭素繊維シートで補強された試験体の結果を追加して式(2)で評価した結果を図-10 に示す。図よりアラミド繊維シート及び炭素繊維シートで補強された部材のじん性率を $(0.5V_c+V_s)/V_{mu} \cdot (1+E_s \cdot \varepsilon_f \cdot \rho_f / (V_{mu} / (B \cdot z)))$ との関係で整理することにより、両者を統合して良好な直線関係で評価できる。そこで、使用材料の特性値を使用し、かつ材料係数及び部材係数を考慮して求めた $(0.5V_{cd}+V_{sd})/V_{mu0} \cdot (1+E_s \cdot \varepsilon_f \cdot \rho_f / (V_{mu0} / (B \cdot z)))$ とじん性率との関係に試験結果を整理し直し、そのデータを直線近似してすべてのデータを安全側に包絡するような直線式を設計式と定めた (式(3)及び図-11 参照)。これは実験で求めたせん断耐力と現有曲げ耐力を、設計式においても精度よく利用するための措置である。式(3)中のコンクリートが受け持つ設計せん断耐力 (V_{cd}) 及びせん断補強筋が受け持つ設計せん断耐力 (V_{sd}) に用いる材料係数及び部材係数

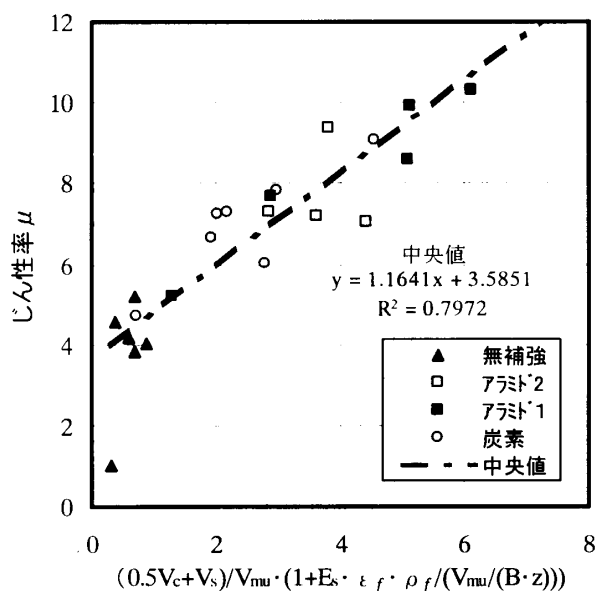


図-10 じん性率評価（実験値）

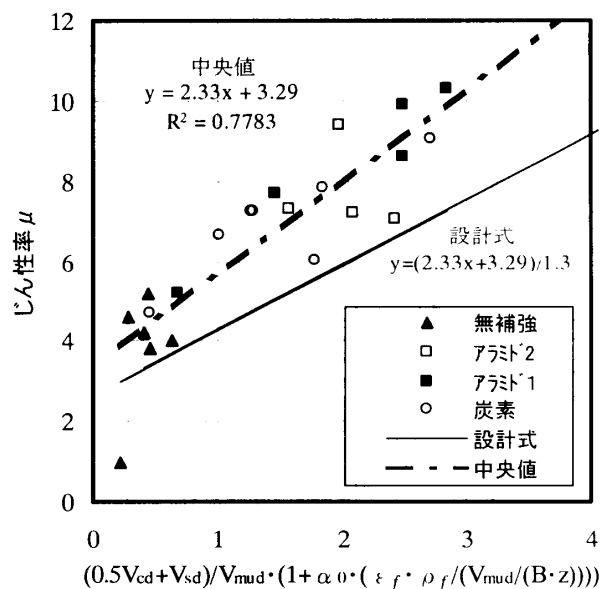


図-11 じん性率評価（設計値使用）

は参考文献 4)に規定された値と同一である。ただし、設計現有曲げ耐力についての部材係数 γ_b は、じん性率を評価するための安全側の措置として 1.0 を用いることとした。

$$\mu = \left[2.33 \cdot \frac{(0.5V_c + V_s)}{V_{mu}} \cdot \left(1 + \alpha_0 \cdot \frac{\varepsilon_f \cdot \rho_f}{V_{mu} / (B \cdot z)} \right) + 3.29 \right] / \gamma_{bf} \quad (3)$$

ただし、

$$\varepsilon_f = f_{fud} / E_f = (f_{fuk} / \gamma_{mf}) / E_f$$

f_{fud} ：連続繊維シートの設計引張強度

f_{fuk} ：連続繊維シートの引張強度の特性値

γ_{mf} ：連続繊維シートの材料係数 (=1.2)

γ_{bf} ： μ 算出に用いる部材係数 (=1.3)

5. まとめ

連続繊維シートで補強された部材のじん性率は、シートの終局ひずみと補強量をパラメータに入れたせん断余裕度の関係で整理することにより、比較的精度の良い直線関係で評価できることがわかった。本論ではこの結果を利用することで、補強材料の種類別ではなく、統合したじん性補強設計式を構築することができると考えている。したがって、委員会では連続繊維シートにより補強された部材のじん性に関する安全性の照査は、コンクリート標準示方書「耐

震設計編 4 章」に準拠するものとし、補強された部材のじん性率 μ_{fd} は式 (3) を利用して求めればよいと考えている。なお今回提案した設計式は、代表的な矩形の RC 柱においてアラミド繊維シート及び炭素繊維シート補強によりじん性能を確保することを確認し、補強された部材のじん性率を算定する式として採用した。よって、矩形の RC 柱と著しく条件が違う場合には別途安全性を検討する必要があると考えられる。

参考文献

- 1) 鉄道総合技術研究所：アラミド繊維シートによる鉄道高架橋柱の耐震補強工法設計・施工指針（付属資料 7），1996.11
- 2) 鉄道総合技術研究所：炭素繊維シートによる鉄道高架橋柱の耐震補強工法設計・施工指針（付属資料 7），1996.7
- 3) アラミド補強研究会：アラミド繊維シートによる鉄筋コンクリート橋脚の補強工法設計・施工要領（案）（付属資料 6），1997.8
- 4) 土木学会：平成 8 年度制定コンクリート標準示方書・設計編，pp52～64，1996.6
- 5) 増川，秋山，斎藤：炭素繊維シートとアラミド繊維シートによる既存 RC 橋脚の耐震補強，新素材のコンクリート構造物への利用シンポジウム論文報告集，pp.193～198，1996
- 6) 長田他：炭素繊維シートで補強した鉄筋コンクリート橋脚の耐震性能，コンクリート工学論文集，pp.189～203，1997.1
- 7) 袴田文雄：壁式橋脚の RC 耐震補強及び CFRP による RC 耐震補強の実験と解析，コンクリート系構造物の耐震技術に関するシンポジウム論文報告集，1994.4
- 8) 大野他：炭素繊維による RC 橋脚の耐震補強に関する実験的検討，土木学会第 51 回年次学術講演会，pp.950～951，1996.9