Japan Concrete Institute

論文　あと施工差込型連続繊維補強材により補強されたRCはりのせん断耐力に関する実験的研究

小林　朗[*1]・佐藤　靖彦[*2]・高橋　義裕[*3]

要旨：既設コンクリート部材のせん断補強を目的に，FRP格子筋およびFRPロッドをコンクリート部材に削孔したアンカー孔内に埋め込み，膨張モルタルまたはエポキシ樹脂を用いて定着する工法を考案した。その補強効果を確認するため，はり試験体にアンカー孔を設け，FRP筋の種類および補強量，定着材の種類を変えて補強して載荷実験を行った。FRP格子筋およびFRPロッドのいずれの補強筋でもはりのせん断耐力の向上が確認された。FRPロッドの場合，定着材に樹脂を使用した方が補強効果が高く，膨張モルタルを使用した場合，FRPロッドの引き抜けにより補強効果が低下した。せん断耐力の評価式について検討した。

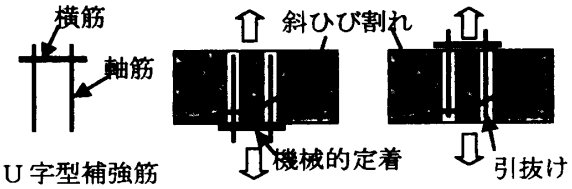
キーワード：連続繊維補強材，せん断耐力，定着，あと施工，FRP格子筋，FRPロッド

1. はじめに

ボックスカルバートなどの既設の地下構造物では，壁の面外せん断力に対してほとんどせん断補強筋が配置されておらず，耐震性を確保するためには補強が必要なものも多い。ボックスカルバートの側壁などの面部材では，連続繊維シートなどの補強材を壁の外側全体に閉鎖型に巻き立てることができず，また増厚工法では内空断面の減少などの問題があり有効なせん断補強方法を見出せない状況にある。

増厚以外の補強方法として，アンカー孔を削孔し，せん断補強鉄筋を埋め込む補強方法が検討されている[1)]。下水道施設等では，硫化水素などの非常に厳しい腐食環境にあり，優れた耐食性を有していることが補強筋には求められる。筆者らは，U字型に加工したFRP格子筋をあと施工アンカーのように削孔したアンカー孔に埋め込んで樹脂または膨張モルタルを充填・定着してせん断補強する方法を考案し，その補強効果をRCはり供試体を用いて実証した[2),3)]。

U字型補強筋を用いた場合，横筋が配置される面では機械的定着が得られるが，横筋のない端部では軸筋の表面付着による定着しか期待できないため，引き抜けが発生しやすい（図－1）。地下施設では，壁の外側が地盤に囲まれており補強材の配置作業が施設の内側の一面からのみしか行えず荷重の作用方向によっては，横筋による定着が有効に作用しない場合がある。また補強材の形状が複雑であるのでコスト高となる。そこで本研究では，差込方向の影響のない，直線状の連続繊維補強材を使用した。市販のFRP格子筋の横筋を節部を残して切断して加工したものと円形断面のFRPロッドの2種類の連続繊維補強材を用いた。コンクリート中に埋め込まれたFRP格子筋は，格子点の横筋により機械的定着に定着される。この格子筋の節部を残した棒材をアンカー穴に埋め込み，膨張性モルタルを充填材して定着した場合，膨張圧により軸筋の表面摩擦による付着力が得られ，格子点の機械的定着と併用することで定着特性の改善が期



図－1　U字型補強筋と差込方向の影響

*1 日鉄コンポジット（株）　技術部担当部長　工修　(正会員)
*2 北海道大学大学院　工学研究科環境創生工学専攻准教授　工博　(正会員)
*3 北海学園大学　工学部社会環境工学教授　工博　(正会員)

NII-Electronic Library Service

Japan Concrete Institute

待できる。

FRP ロッドは，軸方向の FRP 筋材の外周に炭素繊維を巻きつけて異形鉄筋のように節つきの筋材としたコンクリート構造物用 CFRP ロッドである。エポキシ樹脂と，膨張性モルタルの 2 種類の充填材について検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料

FRP 格子筋は，格子間隔 50mm の CFRP 格子筋の横筋を節部の 25mm を残して切断して棒状に加工したものを使用した（**写真－1 (a)**）。FRP ロッドは，φ4,8,12.5mm の 3 種類とした（**写真－1 (b)**）。実験で用いた連続繊維補強材および鉄筋の材料特性を**表－1**に示す。定着用の充填材として用いた膨張モルタルは，石灰エトリンガイト系構造用膨張材を用い，**表－2**に示す配合とした。充填材に用いた樹脂は，2 液混合常温硬化型のパテ状エポキシ樹脂であり圧縮強度 71N/mm^2，引張せん断強度 12.7N/mm^2，圧縮弾性係数 3000N/mm^2 であった。

2.2 供試体の概要と補強方法

実験には，**図－2**に示す RC はり試験体を用いた。せん断破壊先行となるように主鉄筋比を 3.7%と大きくし，かつ，せん断スパン比を a/d＝2.4 とした。コンクリートの目標圧縮強度は 30N/mm^2 とした。せん断スパン内の連続繊維補強材の差込位置には，φ33mm の貫通穴を設け，この貫通孔にせん断補強筋として FRP 格子筋および FRP ロッドを差込み，膨張モルタルまたはエポキシ樹脂を充填して硬化させて定着した（**写真－2**）。せん断補強筋は，はりの横断面に 2 本を一組として片側のせん断スパンに 2～5 組み設置した。せん断補強筋の種類，直径，本数および充填材の種類をパラメータとした，その

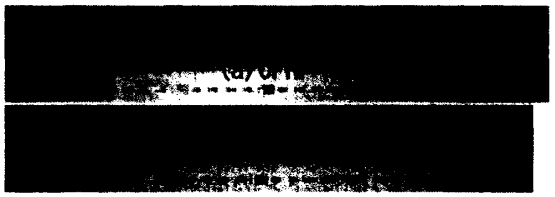
表－1　連続繊維補強材および鉄筋の材料特性

種類	呼び径	公称断面積 mm^2	強度*1 N/mm^2	弾性係数 kN/mm^2
FRP格子筋	C6	17.5	1795	105
FRPロッド	Φ4	12.6	1746	159
	Φ8	50.3	2123	127
	Φ12.5	122.7	2375	130
鉄筋	D22	387.1	361	187
	D10	71.3	355	179

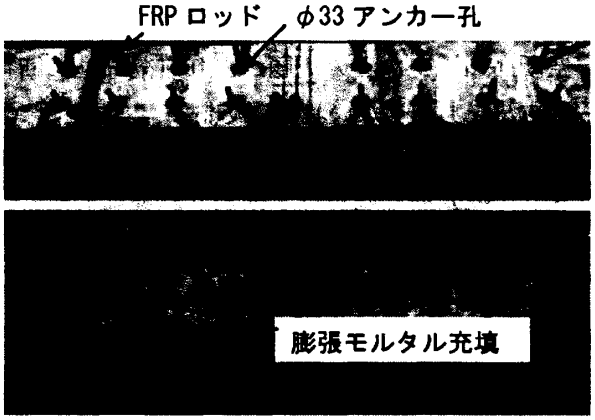
*1：連続繊維補強材は引張強度，鉄筋は降伏強度

表－2　膨張モルタルの示方配合（kg/m^3）

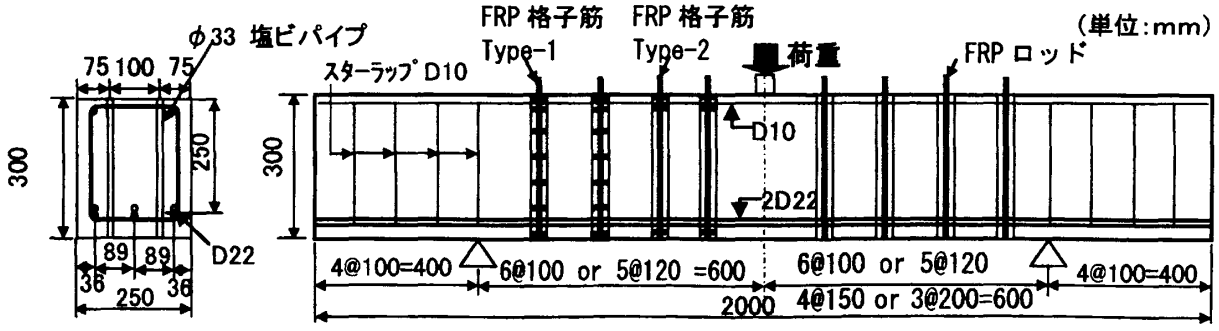
水セメント比	水	セメント	細骨材	膨張材
52%	329	614	1267	20



写真－1　連続繊維補強材



写真－2　FRP ロッドのあと施工差込補強



図－2　供試体の寸法と連続繊維補強材の配置

NII-Electronic Library Service

Japan Concrete Institute

表－３　供試体の補強仕様および最大荷重

記号	補強筋	サイズ	本数* (本)	充填材	せん断補強筋比p_w (%)	コンクリート強度f_c (N/mm^2)	最大荷重P_{max} (kN)
N-FRP	なし		0		0.000	32.1	279
4G6-1Mo	FRP格子筋	C6	4	モルタル	0.117	38.7	389
4G6-2Mo	FRP格子筋	C6	4	モルタル	0.117	29.2	395
5G6Mo	FRP格子筋	C6	5	モルタル	0.141	33.4	373
4R4Ep	FRPロッド	Φ4	4	樹脂	0.084	34.3	412
5R4Ep	FRPロッド	Φ4	5	樹脂	0.100	34.3	405
3R8Mo	FRPロッド	Φ8	3	モルタル	0.279	39.5	457
3R8Ep	FRPロッド	Φ8	3	樹脂	0.279	45.8	482
4R8Mo	FRPロッド	Φ8	4	モルタル	0.349	47.9	310
4R8Ep	FRPロッド	Φ8	4	樹脂	0.349	37.0	476
2R12.5Mo	FRPロッド	Φ12.5	2	モルタル	0.490	52.0	403

＊補強筋本数は，片面の本数，せん断スパン内総本数はその2倍

一覧を表－３に示す。表中の供試体の記号は，せん断補強筋の組数・種類[G:格子筋，R：ロッド]・サイズ（タイプ）・充填材の種類[Mo：膨張モルタル，Ep:エポキシ樹脂]である。4G6-2Moは，軸筋の上・下端部のみに定着用の横筋を残して中間部の横筋を切断したものを差込み，膨張モルタルで定着した（図－２，Type-2)。

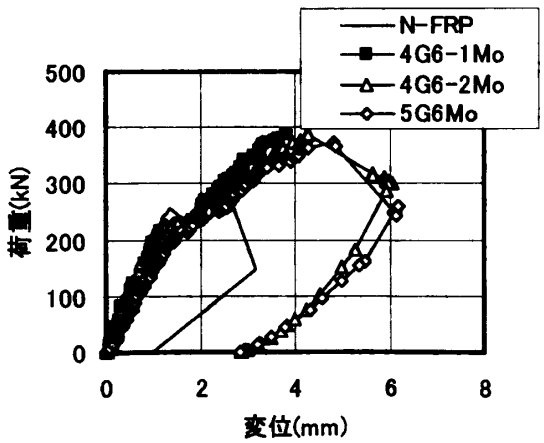
膨張モルタルおよび樹脂を充填後，7日以上養生した後，中央１点載荷により破壊まで単調載荷した。格子筋には，横筋との交点間の中間位置に 50mm 間隔でひずみゲージを取り付けた。FRP ロッドについても同じ位置に 50mm 間隔でひずみケージを取り付けた。

3. 実験結果と考察

3.1 荷重変位関係と最大荷重

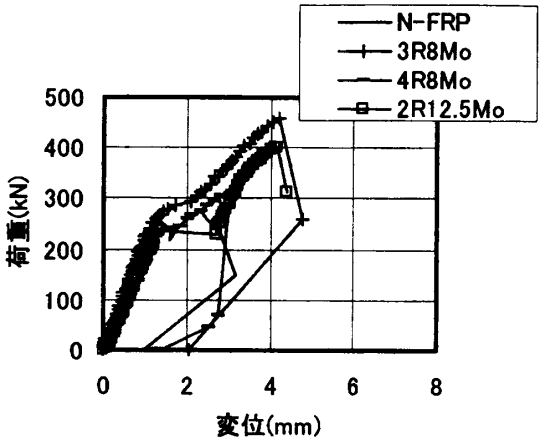
全ての供試体が，斜めひび割れ発生後，曲げ降伏前にせん断破壊した。最大荷重，試験時のコンクリート強度を表－３に示す。4R8Mo を除いて，無補強供試体 N-FRP の最大荷重 279kN を大きく上回る最大荷重となり，FRP 格子筋または FRP ロッドを使用したあと施工差込型補強が，せん断耐力の向上に有効であることが示された。

図－３に FRP 格子筋を膨張モルタルで定着した供試体の載荷点の荷重―変位関係を示す。N-FRP とほぼ等しい 230kN 付近で斜めひび割れが発生し，変位が一時的に急増したのち，再び荷重が増加しいずれの供試体も約 400kN で載荷点付近のはり上縁コンクリートの圧壊を伴ってせん断圧縮破壊により終局に至った。このときせん断補強筋の破断は発生しなかった。補強量が同じで，せん断補強筋全体に 50mm 間隔で横筋を残した 4G6-1Mo と，上下端の格子点のみ横筋を残して中間部の横筋を切断除去した 4G6-2Mo は，ほぼ同じ最大耐力を示しており，主鉄筋外側の横筋との格子点で定着が得られれば十分な補強効果が得られるといえる。補強筋を１組増やし５組とした 5G6Mo の最大荷重は，４組の 4G6-1Mo や 4G6-2Mo とほとんど差異はなかった。一方，斜めひび割れ発生後の剛性低下に着目すると，FRP 格子筋の本数の多い 5G6Mo が斜めひび割れ発生直後の変位の急増が少ない。中間部の格子点の横筋を除去した 4G6-2Mo は，横筋を残した 4G6-1Mo よりも斜めひび割れ発生後の変位の増分が大きくなっており，中間部で

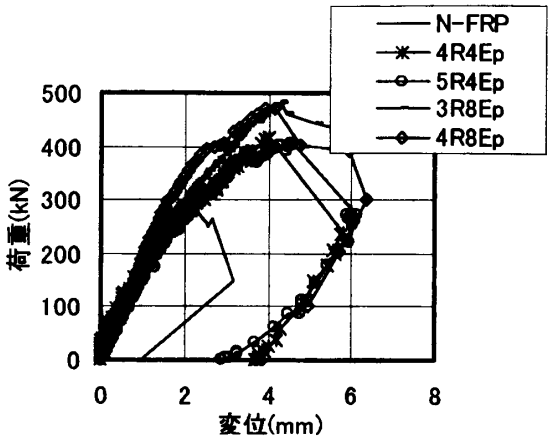


図－３　荷重-変位関係（格子筋モルタル定着）

NII-Electronic Library Service



図—4 荷重変位関係（ロッドモルタル定着）



図－5 荷重-変位関係（ロッド樹脂定着）

の定着がないためひび割れが分散せず，筋全体が伸び，斜めひび割れ幅が拡がり剛性低下が大きくなったものと考えられる。

FRP ロッドを膨張モルタルで定着した供試体の荷重-変位関係を図－4に示す。最大荷重は，最もせん断補強筋比の小さい 3R8Mo（p_w=0.279%）が 457 k N であったのに対して，4R8Mo（p_w=0.349%）が 310kN，2R12.5Mo（p_w=0.49%）が 403kN と 3R8Mo より小さい荷重でせん断破壊した。4R8Mo は，3R8Mo よりロッドの数は多いが，荷重点および支点に最も近い 2 本のロッドのそれぞれ上端・下端付近を斜めひび割れが通過したため定着が取れず，有効に機能した補強筋はせん断スパン中央の 2 組 4 本となったためと考えられる。230kN で斜めひび割れが発生した後にいずれの供試体も一旦変位が急増した後，剛性低下を伴いながら荷重が増大しているが，3R8Mo は変位の増分が比較的小さくその後の剛性低下も小さいのに対して，4R8Mo は変位急増後の剛性低下が大きく，2R12.5Mo は斜めひび割れ発生時の変位の増分が非常に大きい。載荷終了後 FRP ロッドの引き抜けが観察されており，格子筋のように機械的定着のない FRP ロッドを膨張モルタルで定着した場合には，十分な付着強度が得られず，アンカー孔内での FRP ロッドの引抜けによりせん断補強効果が低減するものと考えられる。

FRP ロッドをエポキシ樹脂で定着した供試体の荷重-変位関係を図－5に示す。FRP 格子筋を膨張モルタルで定着した場合（図－3），FRP ロッドを膨張モルタルで定着した場合（図－4）と比べると，斜めひび割れ発生直後の変位の急増がほとんどなく，剛性低下も小さい。本実験の範囲では FRP ロッドをエポキシ樹脂で定着した場合が最も付着性状が良いと考えられる。

最大荷重は，4R4Ep が 412 k N であったのに対して，FRP ロッドを 5 組に増やした 5R4Ep が 405kN となりせん断補強筋の本数を増やしてもせん断耐力に差異は見られなかった。FRP ロッドの直径をφ8mm と太くした 3R8Ep が 482kN，4R8Ep が 476kN の最大荷重となり，FRP ロッドの大径化によるせん断耐力の増加が確認されたが，FRP ロッドの本数の影響は見られなかった。

図－6に 3R8Ep と 4R8Ep の破壊時のひび割れ状況を示し，破壊直前の 470kN 載荷時の各 FRP ロッドのひずみゲージのうち最大値を示したゲージから得た FRP ロッドの歪分布を図－7に示す。FRP ロッドを 4 組差し込んだ 4R8Ep では，図－6に破線で示す主たる斜めひび割れが，最も支点に近い FRP ロッドを通過することなくはり下縁に達している。このためトラス内の有効なせん断補強筋としては，3 本が機能していることになる。また図－7に見るように 3R8Ep の方が 1 点を除き大きなひずみが発生しており，せん断力の負担が大きい。このため，せん断補強筋が 3 組の 3R8Ep と 4 組の 4R8Ep ではせん断耐

NII-Electronic Library Service

力に大きな差が生じなかったと考えられる。

3.2 せん断耐力の算定

次に，あと施工差込型連続繊維補強材により補強された RC はりのせん断耐力の算定法について検討する。せん断耐力 V_u がトラス理論から算定できるとして，せん断耐力をコンクリートの分担分 V_c と連続繊維補強材により受けもたれるせん断耐力 V_f の和として考える。FRP ロッドを樹脂定着した場合，斜めひび割れを跨ぐ狭い範囲で FRP ロッドの付着切れが生じ最大ひずみを示すため，ひずみの計測値から連続繊維補強材の負担せん断力を評価すると過小評価する可能性がある。そこで最大せん断力からコンクリートの負担せん断耐力を減じた値を各供試体の V_f の実験値として求めた。

無補強の N-FRP のコンクリート負担分の実験値（$P_{max}/2$）は，139.5kN であり土木学会コンクリート標準示方書[構造性能照査編]に基づいて，全ての安全係数を 1.0 とした計算値 85kN より相当大きな値となった。示方書式が安全側の評価式であること，a/d が 2.4 と比較的小さいことなどが原因と考えられる。そこでコンクリートの負担せん断耐力 V_c としてはせん断補強筋のない RC はり供試体 N-FRP のせん断耐力の実験値を用いて，それぞれの供試体のコンクリート強度の違いを補正して式(1)により算定した。

$$V_f = \frac{1}{2}\left(P_{\max} - \sqrt[3]{\frac{f_c}{f_{c0}}} \cdot P_0 \right) \qquad (1)$$

ここに，

P_{max}：実験の最大荷重

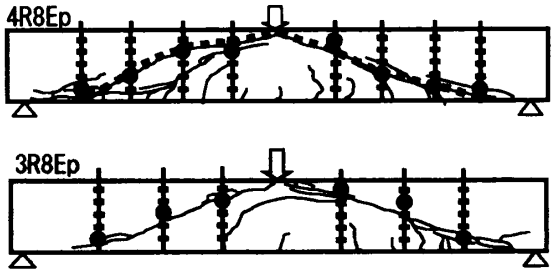
P_0：無補強供試体の最大荷重

f'_c：供試体のコンクリートの圧縮強度

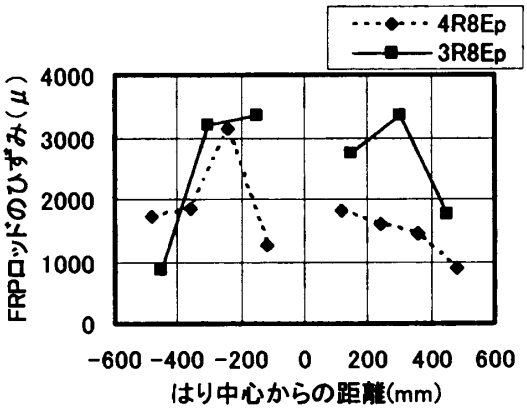
f'_{c0}：無補強供試体のコンクリートの圧縮強度

連続繊維補強材をスターラップとして用いた棒部材のせん断耐力の計算法として土木学会から式(2)が提案されている[5]。

$$V_f = A_w E_w \varepsilon_{fwd} (\sin\alpha_s + \cos\alpha_s)/z \qquad (2)$$



図－6 破壊時のひび割れ（4R8Ep・3R8Ep）



図－7 FRP ロッドのひずみ分布

表－4 せん断耐力の実験値と計算値

記号	せん断補強筋比 p_w(%)	コンクリート強度 f_c (N/mm²)	最大荷重 P_{max} (kN)	コンクリートの負担せん断力 V_c*(kN)	FRPの負担せん断力(実験) V_f(kN)	FRPの負担せん断力(計算) V_{fcal}(kN)
N-FRP	0.000	32.1	279	139.5		
4G6-1Mo	0.117	38.7	389	148.5	46.0	32.3
4G6-2Mo	0.117	29.2	395	135.2	62.3	28.3
5G6Mo	0.141	33.4	373	141.4	45.1	32.8
4R4Ep	0.084	34.3	412	142.6	63.4	31.7
5R4Ep	0.100	34.3	405	142.6	59.9	34.7
3R8Mo	0.279	39.5	457	149.5	79.0	56.6
3R8Ep	0.279	45.8	482	157.0	84.0	60.9
4R8Mo	0.349	47.9	310	159.4	0.0	69.6
4R8Ep	0.349	37.0	476	146.3	91.7	61.2
2R12.5Mo	0.490	52.0	403	163.8	37.7	86.0

NII-Electronic Library Service

Japan Concrete Institute

ここに,

A_w：区間 s におけるせん断補強筋の総断面積

E_w：せん断補強筋のヤング係数

ε_{fwd}：せん断補強筋のひずみの設計用値

$$\varepsilon_{fwd} = \sqrt{f'_{mcd}\frac{p_w E_{fu}}{p_{web} E_w}\left[1+2\left(\frac{\sigma'_N}{f'_{mcd}}\right)\right]}\times 10^4$$

α_s：連続繊維補強材が部材軸となす角度

z：圧縮応力の合力の作用位置から引張鋼材図心までの距離

E_{fu}：引張補強筋のヤング係数

p_w：引張補強筋比，p_{web}：せん断補強筋比

$f'_{mcd} = (h/0.3)^{-0.1} \cdot f'_{cd}$

σ_N：平均軸圧縮力

表－4 に式(1)より算定した連続繊維補強材の負担せん断力の実験値と式(2)より算定した計算値を示した。ここで連続繊維補強材の負担せん断力は，全ての安全係数を 1.0 として算定している。**図－8** に連続繊維補強材の負担せん断力の計算値と実験値を比較して示す。FRP ロッドを膨張モルタルで定着したものを除いて，負担せん断力の実験値は，計算値を上回り，かつ良い相関関係が見られる。このことから，あと施工差込型連続繊維補強材によるせん断補強に対しても，通常の連続繊維補強材のせん断耐力の算定法が適用できるものと考えられる。

4. まとめ

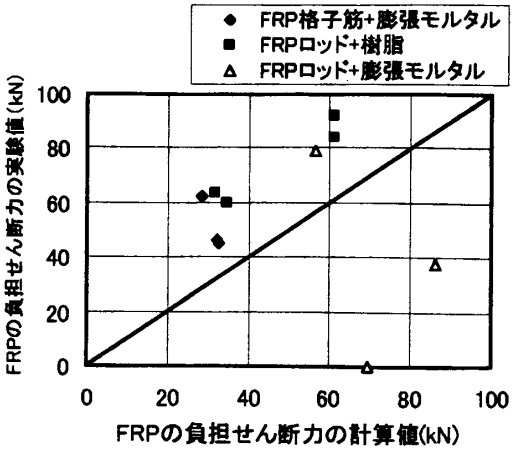
本研究で得られた主たる知見を以下に示す。

(1) 直線形状のあと施工差込型連続繊維補強材により RC はりのせん断耐力の向上を図ることが可能である。

(2) 膨張モルタルを充填材として用いた場合，FRP 格子筋では格子点の定着があるため十分な補強効果が得られるが，格子点のない FRP ロッドでは付着力が不足し補強効果が少ない。

(3) FRP 格子筋は，全体に格子点がなくてもはりの上縁と下縁に横筋の格子点があれば定着が得られ，せん断補強効果が得られる。

(4) FRP ロッドを膨張モルタルで定着した場合を除いて，連続繊維補強材をスターラップとして用いた新設の棒部材のせん断耐力の算定式を用いることで，あと施工差込型連続繊維補強材で補強した RC はりのせん断耐力を安全側に評価できる。



図－8 FRP の負担せん断力の計算値と実験値

参考文献

1) 小林靖典，小林亨，清宮理：異形鉄筋の埋め込みによるあと施工せん断補強効果に関するはりの載荷実験，コンクリート工学年次論文集，Vol.24, No.2 ,2002.6

2) 小林朗，増渕基，佐藤靖彦：FRP あと施工方式により補強された RC はりのせん断性状 コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集　第 3 巻, pp.83-86, 2003.10

3) 小林朗，佐藤靖彦，阿部篤史：埋込型 FRP 筋の付着特性とはり部材のせん断補強効果，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集　第 4 巻，pp.401-408, 2004.10

4) 関島謙蔵,久原高志，新明正人,林耕四郎：格子状連続炭素繊維補強材の引張強度と交差部強度に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集　Vol.18 No.1,pp.1167-1172,1996.6

5) 連続繊維補強材を用いたコンクリート構造物の設計・施工指針（案），土木学会，1996.9

NII-Electronic Library Service