

論文

[1137] 組紐状FRPロッドによるスパイラル筋を用いたコンクリート梁のせん断性状

正会員○遠藤 克彦 (三井建設 技術研究所)
 正会員 石橋 一彦 (千葉工業大学)
 正会員 岡本 直 (三井建設 技術研究所)
 正会員 谷垣 正治 (三井建設 技術研究所)

1. はじめに

筆者らは、これまでに高強度繊維を組紐状に編んだFRPロッドをコンクリート部材の曲げ強強に用いるための研究を行ってきた。この組紐状FRPロッドは樹脂が硬化していない状態ではロープ状であるので、直線形だけでなく任意の形に成形することができる。したがって、この繊維ロープをスパイラル状に成形すれば、せん断補強筋としてコンクリート部材に組み込むことが可能となる。本報は、組紐状にした炭素繊維およびアラミド繊維のスパイラル筋(写真-1)をせん断補強筋として使用したコンクリート梁のせん断実験を行い、これらのスパイラル筋のせん断補強効果について検討したものである。

2. スパイラル筋の材料特性

引張試験体は図-1に示すように角スパイラル筋の長辺部分を切り出し、両端に鋼製パイプ内に樹脂を充填した定着治具を取付けた。スパイラル筋としたFRPロッドは、表-1に示すように4種類である。C64Sは炭素繊維、K64Sはアラミド繊維、KH64Sは高剛性タイプのアラミド繊維で、いずれも直線部の断面形状は円形である。なおK96Sはアラミド繊維で、K64Sの1.5倍の繊維量を持ち楕円形の断面形状となっている。各繊維ロッドとも表面に珪砂が接着されており、ロッドの樹脂含有率は約40%である。

図-2にFRPロッドの応力とひずみ関係を、表-1に引張試験結果の一覧を示す。弾性係数は各6本の平均値、破断強さは定着部で抜け出したものを除いた平均値を示している。弾性係数はK64S、K96Sが0.57~0.58、KH64Sが0.84、C64Sが1.18(単位はいずれも $\times 10^6 \text{ kg/cm}^2$)で、引張強度はK64S、K96Sが1.47、KH64Sが1.13、C64Sが1.00(単位: $\times 10^4 \text{ kg/cm}^2$)であり、高剛性タイプのアラミド繊維を用いたKH64Sは弾性係数・引張強度ともにK64S、K96SとC64Sとの中間的な値を示している。

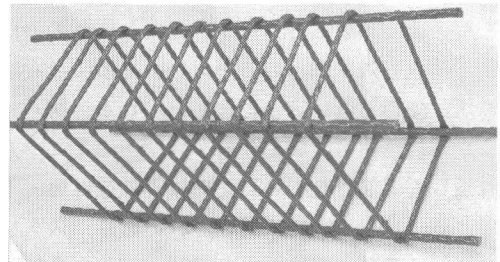


写真-1 FRPロッドによるスパイラル筋

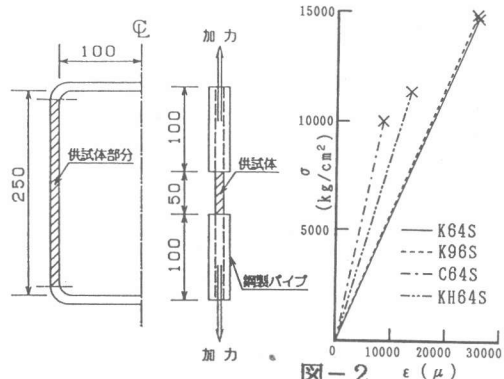


図-1 供試体・加力方法

図-2 スパイラル筋の応力-ひずみ関係

表-1 せん断補強筋の材料特性

棒材名	繊維種類	断面形	断面積 (cm ²)	弾性係数 $\times 10^6$ (kg/cm ²)	破断強度 (kg/cm ²)
K64S	アラミド繊維	●	0.460	0.570	14680
K96S	アラミド繊維	●	0.728	0.580	14790
C64S	炭素繊維	●	0.446	1.183	10040
KH64S	アラミド繊維 (高剛性タイプ)	●	0.460	0.842	11360

3. 試験方法

3.1 試験体

試験体は図-3に示すようにせん断試験区間が長さ60cm、梁せい30cmで、両側に加力用のスタブを持つ。せん断スパン比は $a/d=1.19$ で、試験体の幅は試験区間、スタブ部分ともに25cmである。表-2に示すように試験体は全部で8体あり、スパイラル筋としてFRPロッドのK64S、K96S、C64S、KH64Sの4種類としたが、比較のためにせん断補強筋にD6を用いたもの(S4K)と無補強のもの(NK)も加えた。なお、D6はスパイラルではなく、通常のフック付きとした。配筋ピッチは4cmと8cmの2種類である。曲げ補強筋にはFRPロッドK256S(直径約17mm)を用いるのを原則としたが、ただしKR4Sのみは曲げ補強筋に鉄筋(D19)を用い、その径は曲げ降伏が先行しないように定めた。なお、スパイラル筋は試験区間および両スタブ内に1ピッチ延長して配筋されている。曲げ補強筋は上・下端ともに6本を2段に配筋されており、スタブ内に64cmの長さで定着されている。表-3に本試験に用いたコンクリート・鉄筋およびFRPロッド(曲げ補強筋)の材料特性を示す。コンクリートの圧縮強度は 380kg/cm^2 、曲げ補強筋として用いたFRPロッドは砂付きのK256Sである。

3.2 加力・測定方法

図-4に加力装置を示す。加力は試験体のスタブ両端をピンおよびローラー支持し、試験区間から75mm離れた位置に2台の両動ジャッキを用いて逆対称荷重を与える大野式加力とした。加力ルールを図-5に示す。加力は正負交番加力で、部材角 $R=1/100$ および $2/100$ で3サイクル、 $3/100$ で2サイクルの繰返しとし、 $4/100$ のみ正荷重1サイクルとした。部材角の測定については、図-6に示すように両側のスタブに固定されたゲージホルダーにより、梁の中央点の変位を測定した。また、FRPロッドの表面にひずみゲージを貼付け、各部のひずみについても測定した。

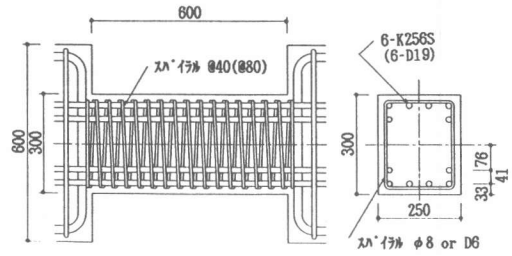


図-3 試験体の形状

表-2 試験体一覧

試験体 名称	せん断補強筋			曲げ補強筋	
	種類	ピッチ(cm)	P_v (%)	種類	P_t (%)
KR4K	K64S	4.0	0.92	6-K256S	1.90
KH4K	KH64S	同上	同上	同上	同上
KR4S	K64S	同上	同上	6-D19	2.72
CR4K	C64S	同上	0.89	6-K256S	1.90
KR8K	K64S	8.0	0.46	同上	同上
KO8K	K96S	同上	0.73	同上	同上
S4K	D6	4.0	0.64	同上	同上
NK	—	—	0	同上	同上

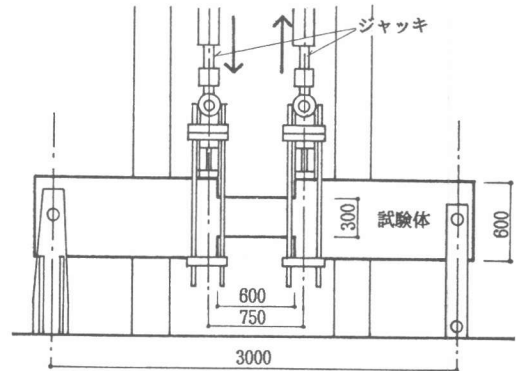


図-4 加力方法

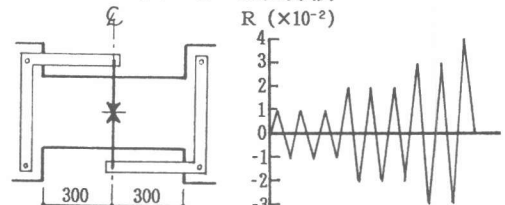


図-5 加力ルール

図-6 部材角の測定

表-3 コンクリート・補強筋の材料特性

a) コンクリート (kg/cm^2)		b) 補強筋			
圧縮強度	380	断面積 (cm^2)	降伏強度 (kg/cm^2)	弾性係数 $\times 10^4$ (kg/cm^2)	
割裂強度	28.1	D6	0.32	4570	1.88
弾性係数	2.52×10^5	D19	2.87	3830	1.87
		K256S	2.00	13200*	0.512

*は破断強度を表わす

4. 試験結果

4.1 破壊経過

部材角 $R=1/100$ におけるひびわれ状況を図-7に、試験結果の一覧を表-4に示す。せん断補強のないNKは、第1正サイクルの途中、 $R=0.4/100$ において梁両端の圧縮側隅角部を結ぶ斜め方向ひびわれが貫通してせん断破壊した。また、炭素繊維を用いたCR4Kでは、 $R=3/100$ の正サイクルの途中($R=2.5/100$)で、せん断補強筋が折曲げ部付近で数本同時に破断し、急激に荷重が低下した。その他の試験体では、せん断補強筋等の破断は見られなかった。初期段階においては、ほとんどの試験体が圧縮側隅角部から 45° 方向に伸びるせん断ひびわれが見られ、次第にひびわれの方向が材軸方向に傾く傾向が見られた。しかし、曲げ補強筋に鉄筋を用いたKR4Sのみは、初期段階から圧縮側隅角部を結ぶ対角方向のひびわれが支配的であった。またNKを除く試験体では、かぶりコンクリートがほとんど剥落あるいは浮上するなど、曲げ補強筋およびせん断補強筋で囲まれたコアコンクリートが露出する状態となっていた。

4.2 荷重-変形関係

各試験体の荷重-変形曲線を図-8に、その代表的な包絡線を図-9に示す。また、各折返し時の荷重の推移を図-10に示す。NKを除くほとんどの試験体が $R=2/100$ の第1サイクルで最大耐力に達したが、曲げ補強筋に鉄筋を用いたKR4Sのみは $R=1/100$ の第1サイクルで最大耐力を示した。また、図-9の包絡線に見られるように、KR4Sは $R=1/100$ のサイクル

における初期段階での剛性低下の割合が少なく、他とは異なった挙動を示したが、図-10に示すように、その後の同じ部材角での繰返しによる荷重の低下は他の試験体に比べて著しい。

なお、各試験体の曲率より求めた曲げ変形の全体変形に占める割合は、当初50~60%であったが、繰返しおよび変形の増大に伴い漸減する傾向を示した。

4.3 せん断補強筋のひずみ

図-11 a)に $R=1/100$ におけるせん断補強筋の、梁の軸方向についてのひずみ分布を示した。FRPロッドは弾性的な応力度-ひずみ度関係を持つため、補強筋のひずみ分布はそのまま応力分布を表していると考えられる。図によれば $R=1/100$ においてはほとんどの試験体が両側に2つの山を持ち、中央が落込んだ分布形状を示しているのに対して、曲げ補強筋に鉄筋を用いたKR4Sのみは全体に中高の傾向を示している。これは、初期段階ではほとんどの試験体で 45° 方向のひび

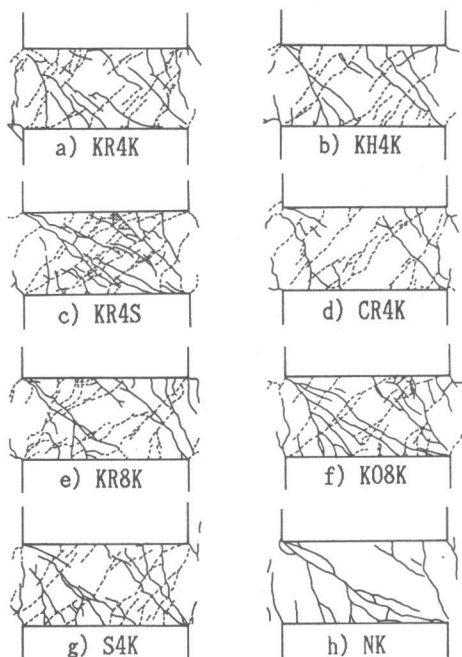


図-7 ひびわれ状況($R=1/100$)

表-4 試験結果一覧

試験体名称	最大耐力			破壊形式
	せん断力 (t)	せん断応力度 (kg/cm^2)	耐力時変形角	
KR4K	24.0	43.3	2/100	SC
KH4K	25.1	45.3	同上	SC
KR4S	26.8	48.3	1/100	SC
CR4K	27.3	49.3	2/100	WF
KR8K	19.0	34.2	同上	SC
KO8K	20.8	37.4	同上	SC
S4K	22.6	40.7	同上	SC
NK	12.0	21.6	0.4/100	ST

SC:せん断圧縮破壊 ST:せん断引張破壊
WF:せん断補強筋の破断

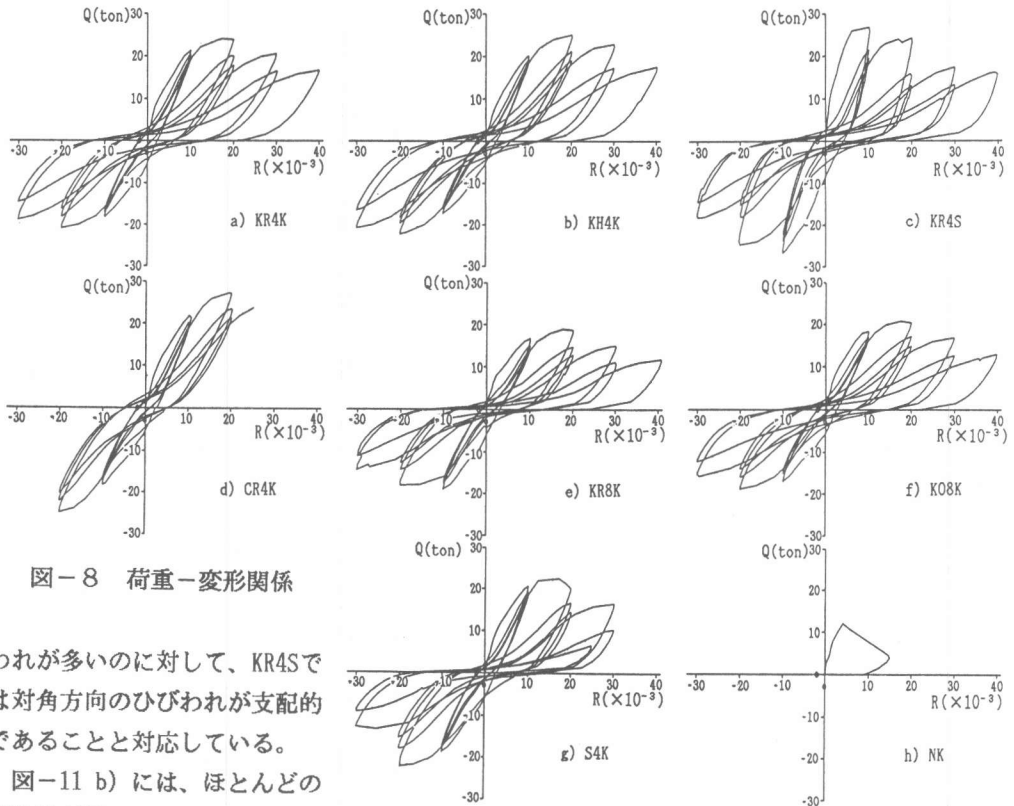


図-8 荷重-変形関係

われが多いのに対して、KR4Sでは対角方向のひびわれが支配的であることと対応している。

図-11 b) には、ほとんどの試験体が最大耐力に達したR=2/100におけるせん断補強筋のひずみ分布を示した。この段階では鉄筋を除いてひずみは中間部で2000~4000 μ に達し、全体的にほぼ均一の分布になっている。また、KR4SではR=1/100の値に比較してひずみの値が逆にやや減少する傾向を示している。

5. 考察

5.1 コンクリートの負担せん断力

繰返し述べたように、曲げ補強筋に鉄筋を用いたKR4Sは、他とは著しく異なった性状を示しており、曲げ補強筋を鉄筋にした場合は、特に初期段階におけるせん断抵抗機構が異なるものと考えられる。これは曲げ補強筋の剛性、だぼ作用等によるものと思われる。従って、以下のせん断耐力については、KR4Sを除いて検討を進める。

下に示す大野・荒川式の第1項によるせん断計算耐力(コンクリート負担分)と、せん断補強筋のないNKの耐力を比較すると、

$$Q_u = \left\{ k_u \cdot k_p \frac{0.115 (F_c + 180)}{M/Q_d + 0.12} + 2.7 \sqrt{P_w \cdot w \sigma_y} \right\} b \cdot j \quad \dots\dots 1)$$

$$k_p = 0.82 P_t^{0.23}$$

前者が24.1tに対して、後者は12.0tとほぼ半分の値であった。この違いは主として曲げ補強筋に

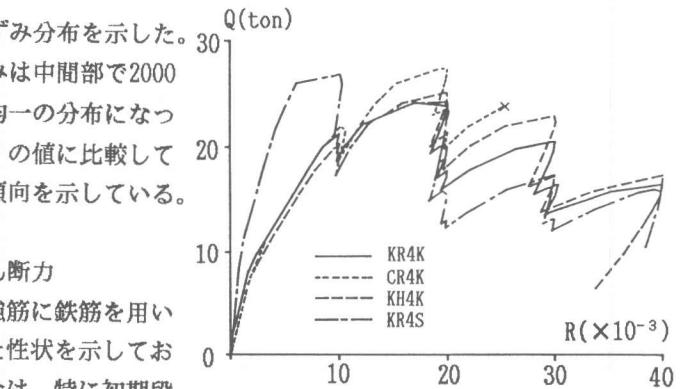


図-9 包絡線の比較

FRPロッドを用いたためと考えられる。FRPロッドによる曲げ補強筋量がコンクリートの負担するせん断耐力、 Q_u に与える影響については全くデータが無く、今後研究を進める必要があるが、本実験ではKR4Sを除いて曲げ補強筋の量が全ての試験体で同一であるため、今後何らかの方法で Q_u が求められるものと考え、ここではせん断補強筋量等の相違がせん断耐力に与える影響について考察する。

5.2 せん断補強筋比 P_w の影響

試験体のうち、他の条件は全く等しく、せん断補強筋比 P_w のみ異なるNK, KR4K, KR8K, K08Kの4体について、 P_w とせん断耐力 Q_u の関係を示したのが図-12である。図に見られるように両者の間にはほぼ線形関係が成り立つ。NKの値を Q_u として、最小自乗法により P_w と Q_u の関係を求めると次式が得られる。

$$Q_u = {}_c Q_u + 1300 P_w \quad (Q_u, {}_c Q_u : \text{ton}) \quad \dots\dots 2)$$

5.3 せん断補強筋の弾性係数 E_w の影響

試験体のうち、他の条件はほとんど同じで、せん断補強筋の弾性係数 E_w のみ異なるNK, KR4K, CR4K, KH4Kの4体 (NKでは $E_w = 0$ と考えられる) について、 $\sqrt{E_w}$ と Q_u の関係を示したのが図-13である。図に見られるように、ここでもほぼ直線関係が成立し、その回帰式を求めると次式が得られる。

$$Q_u = {}_c Q_u + 0.0146 \sqrt{E_w} \quad (E_w : \text{kg/cm}^2) \quad \dots\dots 3)$$

5.4 せん断補強筋比と弾性係数の影響

以上、 P_w と Q_u 、および $\sqrt{E_w}$ と Q_u の間にはほぼ直線関係が成立すると考えられるため、曲げ補強筋に鉄筋を用いたKR4Sおよびせん断補強筋に鉄筋を用いたS4Kを除く全ての試験体について $P_w \cdot \sqrt{E_w}$ と Q_u との関係を示したのが図-14である。ここでもほぼ線形関係が成立しており、その回帰式を求めると式(4)のようになる。

$$Q_u = {}_c Q_u + 1.63 P_w \cdot \sqrt{E_w} \quad \dots\dots 4)$$

なお、せん断補強筋に鉄筋を用いたS4Kの値を図中にプロットしたが、ややこの直線から離れた結果を示している。これは鉄筋が他のFRPロッドに比較して弾性係数がかなり大きいためであると考えら

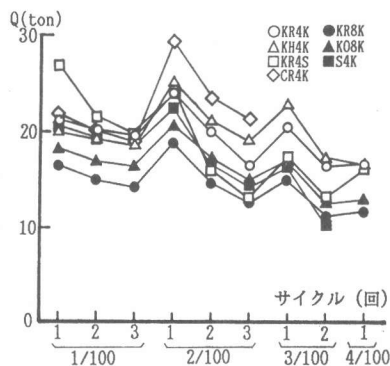


図-10 折返し荷重の推移

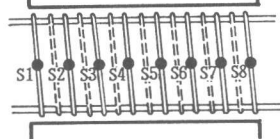
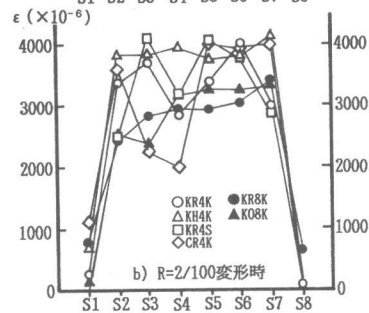
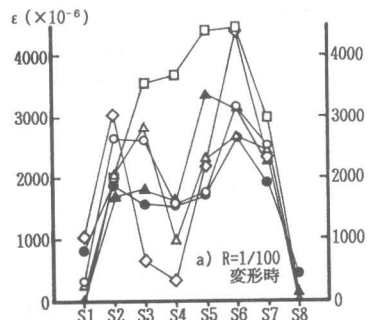


図-11 せん断補強筋のひずみ

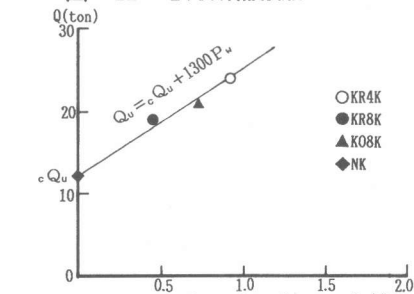


図-12 せん断耐力 (Q_u) とせん断補強筋比 (P_w) の関係

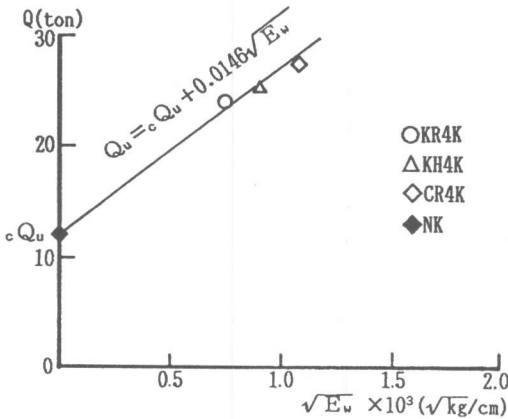


図-13 Q_u と $\sqrt{E_w}$ の関係

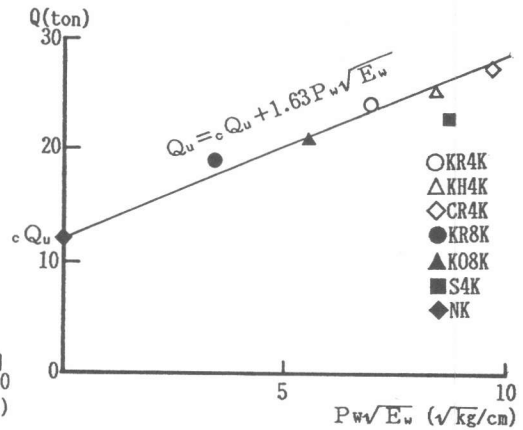


図-14 Q_u と $P_w \cdot \sqrt{E_w}$ の関係

れる。弾性係数の影響については、さらに検討する必要があるものと思われる。

6. まとめ

以上、本実験および考察より得られた結果を以下に要約する。

- 1) 曲げ補強筋に鉄筋を用いた場合と、FRPロッドを用いた場合では、特に初期段階におけるせん断抵抗機構が大きく異なると考えられる。
- 2) 炭素繊維によるFRPロッドをせん断補強筋として用いた試験体は、部材角 $R=2.5/100$ でFRPロッドが破断して荷重が急激に低下したが、他のせん断補強筋を用いた試験体では、最終状態 ($R=4/100$) までロッドの破断は見られなかった。
- 3) 曲げ補強筋に鉄筋を用いた試験体では、部材角 $R=1/100$ で最大耐力に達したが、それ以外の試験体では、せん断補強のないものを除き $R=2/100$ で最大耐力を示した。
- 4) せん断補強のない試験体のせん断耐力は、大野・荒川式の第1項によるコンクリート負担分の計算耐力に対して、約半分の値であった。これは主として曲げ補強筋にFRPロッドを用いたことによる影響と考えられる。
- 5) せん断補強筋比 P_w とせん断耐力 Q_u の間には、線形関係が見られた。
- 6) せん断補強筋の弾性係数の平方根 $\sqrt{E_w}$ とせん断耐力 Q_u の間にも、同様に線形関係が得られた。
- 7) 前2項より、せん断補強筋比 P_w とせん断補強筋の弾性係数の平方根 $\sqrt{E_w}$ との積 $P_w \cdot \sqrt{E_w}$ とせん断耐力 Q_u の間にも線形関係が得られた。
- 8) 本実験で、FRPロッドのせん断補強筋としての有効性が確認されたが、今後の課題として、曲げ補強筋の量および弾性係数等がせん断耐力に与える影響について研究する必要がある。

<参考文献>

- 1) 福原「高強度せん断補強筋を用いた鉄筋コンクリート梁のせん断終局強度 (せん断引張破壊型せん断終局強度)」日本建築学会学術講演梗概集 昭和60年10月
- 2) 岡本・遠藤・小杉・谷垣「アラミド繊維による組紐状棒材の研究 (その4.せん断強度試験 I 一方向単調載荷)」日本建築学会大会講演梗概集 昭和63年10月
- 3) 日本建築学会「鉄筋コンクリート終局強度設計に関する資料」1988年