

# 各種短繊維材料を用いた繊維補強鉄筋コンクリート構造物の 設計手法の開発

## Development of Design Method for Fiber Reinforced Concrete Structures using Various Types of Short Fibers

プロジェクト代表者： 牧 剛史(工学部・助手)

Takeshi MAKI (Faculty of Engineering, Research Associate)

### 1 研究の概要

鋼繊維を始めとする各種短繊維をコンクリート中に混入した繊維補強コンクリート(以下, FRC)は、鉄筋コンクリート(以下, RC)部材のかぶりコンクリートの剥落防止や、耐久性の観点からのひび割れ制御を目的として、既に実構造物へ広く適用されている。また、繊維を主たる引張抵抗材として用いるケースとして、部材のせん断補強材として用いられるケースもあり、その補強効果は既に数多くの実験的検討によって確認されている。

しかしながら、繊維を引張抵抗材として混入する部材の設計に関して言えば、その補強効果は通常のコンクリートに比べて引張靱性が向上するという形でしか考慮されていない。具体的には、部材のせん断耐力算定式において、通常のRC部材ではコンクリートの寄与分+せん断補強鋼材の寄与分のトータルとしてせん断耐力を算定する仕組みとなっているが、せん断補強鋼材を用いない FRC部材の場合、前者のコンクリート寄与分の算定に対して、適当な割り増し係数を乗じることによって間接的に繊維の効果を考慮することにとどまっており、繊維の補強材としての効果を積極的に耐力算定に取り入れるには至っていない。この理由の一つとして、混入された短繊維は、コンクリート中で様々な方向を向いており、ある方向のひずみに対する抵抗材として設計上考慮するには配向のばらつきが大きいことが挙げられる。

FRC部材の耐力算定において、コンクリートの寄与分に対して繊維の効果を考慮することは、設計・積算実務上も、プレーンコンクリートを繊維補強コンクリート置換することとなり、部材の施工単価が増大するという弊害を招いている。すなわち、れっきとした補強材として考慮可能であるにも関わらず、それが陽な形で設計に考慮されないことが、繊維を主たる補強材として混入した FRC部材のシェアが伸び悩んでいる一つの原因であるとも言える。

本研究では、短繊維を混入したコンクリート部材が広く使用に供されることを目指し、その設計手法と適用範囲について検討することを目的とするものである。前者に対しては、繊維の配向の違いがFRC部材の耐力に及ぼす影響を実験的に検討した。また、後者に対しては、鉄筋を全く使用せずに混入される繊維のみによって補強されたFRC部材を杭基礎へ適用することを試みた。

### 2 繊維の配向がFRC部材のせん断耐力に及ぼす影響

#### 2.1 FRC梁の載荷実験

既往の研究において、コンクリート中に混入された鋼繊維の配向がFRC部材の曲げ耐力に及ぼす影響について検討が既に行われている。作製時に配向板を用いて繊維を強制配向させた試験体と、通常通りにFRCを打設した試験体との比較により、強制配向させた試験体の方が曲げ耐力が高くなることを実証すると共に、型枠面近傍での自然な配向を含めて、その配向状態を数値化して耐力算定式に取り込むことによって、部材の曲げ耐力を精度良く算定可能であることを明らかにしている。

そこで、本研究では同様の実験手法を用いて、せん断スパン内で繊維を強制配向させた FRC 試験体を作製し、繊維の配向がせん断耐力に及ぼす影響について検討を行った。

繊維は長さ 30mm、径 0.8mm の鋼繊維を用いた。繊維の両端には、コンクリートとの定着を増すためのフックが設けられており、コンクリート混練時にファイバーボールが生じずに適切に分散するように、10 本の繊維が水溶性接着剤によって結束されている。この鋼繊維を体積混入率 1.5% で混練した FRC を用いて RC 梁試験体を 6 体作製した。

実験要因を表-1に示す。せん断スパン長と主鉄筋の有効高さとの比  $a/d$  を 2.5 および 3.0 の 2 水準とし、各々のケースについて、せん断スパン内で右斜め 45 度方向の強制配向板を設置して打設したもの、左斜め 45 度方向に配向させて打設したもの、配向板を用いずに通常通り打設したもの(ランダム配向)の 3 体ずつとした。 $a/d=2.5$  で繊維を右上 45 度方向に配向させた試験体(A1)を図-1に示す。

各試験体の荷重実験より得られた最大荷重と破壊形式を一覧にして表-2に示すと共に、B シリーズの荷重-変位関係をグラフにして図-2に示す。A, B シリーズ共に、繊維を右上方向に配向させた試験体は斜めひび割れの貫通に伴うせん断破壊、その他の 2 ケースは荷重点間のコンクリートが圧壊する曲げ破壊を生じた。せん断スパンにおける斜めひび割れの向きが、支点から荷重点方向、すなわち右上方向に進展することを考えると、右上配向させた試験体では、ひび割れ部における繊維の架橋効果が発揮されなかったため、せん断耐力が低かったものと考えられる。一方、左上配向させた試験体では、ランダム配向させた試験体に比べて斜めひび割れの進展が小さく、このために最大荷重も高くなった。いずれにしても、A1, B1 を除く 4 体においては、ひび割れを跨ぐ繊維が存在したことによって架橋効果が発揮され、せん断耐力が増大して曲げ耐力を上回ったものと言える。本実験では、繊維の配向によってせん断耐力が大きく変化しうることが確認された。ただし、せん断耐力を定量的に評価するためには、本実験結果のみでは不十分であり、解析的評価も含め、さらなる検討が必要である。

## 2.2 現状のせん断耐力算定式による耐力評価

せん断耐力評価の確立に先立って、現行設計基準もしくは指針(案)にて提案されているせん断

表-1 実験要因

シリーズ	$a/d$	配向方向		
		右上	左上	ランダム
A	2.5	A1	A2	A3
B	3.0	B1	B2	B3

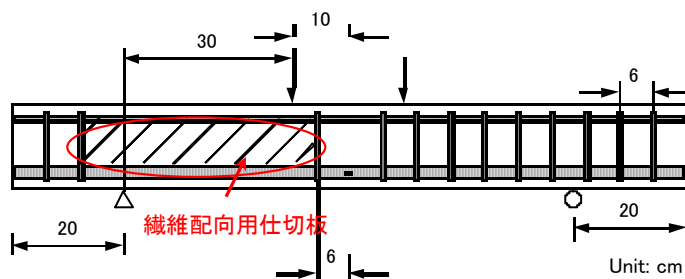


図-1 FRC 梁試験体(A1)

表-2 各試験体の最大荷重と破壊形式

シリーズ	$a/d$	最大荷重 (kN)	破壊形式
A1	2.5	64.33	せん断(斜め引張)
A2		100.34	曲げ(曲げ圧縮)
A3		89.84	曲げ(曲げ圧縮)
B1	3.0	61.67	せん断(斜め引張)
B2		94.0	曲げ(曲げ圧縮)
B3		85.67	曲げ(曲げ圧縮)

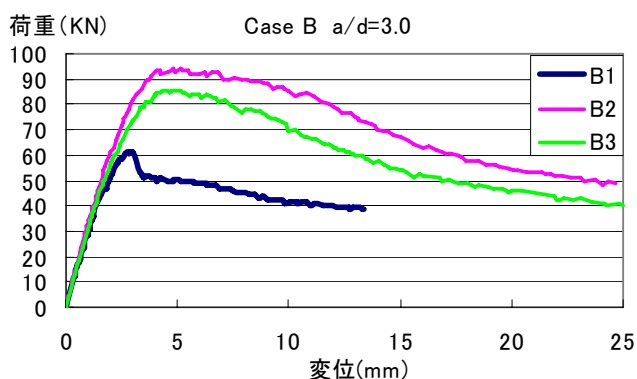


図-2 荷重-変位関係(Bシリーズ)

耐力評価式を用いて検討を行った。適用した算定式は、土木学会コンクリート標準示方書構造性能照査編の RC 部材用  $V_c$  算定式 (JSCE 式)、二羽・岡村によって提案された RC 部材用算定式 (二羽式)、鋼繊維補強コンクリート柱部材の設計指針 (案) の算定式 (指針式) の 3 つである。なお、本実験には曲げ圧縮破壊を生じた試験体も含まれており、曲げ圧縮耐力は通常の RC 部材の算定方法によって算定した。

また、一般に鋼繊維補強コンクリートの圧縮強度は、通常のプレーンコンクリートに比べて数 10% 程度低下することが知られている。著者らが行った既往の実験においても、約 30~40% 程度の強度低下が見られた。そこで、耐力算定に用いる圧縮強度として、今回の実験で実測された圧縮強度 (22MPa) の他に、同一水セメント比を有するプレーンコンクリートとしての強度値を便宜的に算定した値 (38MPa) を用いた試算も併せて行った。

表-3 耐力算定結果

上記の手法により算定した各シリーズの耐力値を表-3に示す。まず、曲げ圧縮耐力の実験結果との比較により、実際に部材中で発揮された FRC の圧縮強度は約 30MPa 程度であったものと推測される。これを念頭に置いてせん断耐力の算定結果について考察を行う。

耐力算定結果 (kN) (強度は MPa)		A シリーズ		B シリーズ	
		$f'_c=22$	$f'_c=38$	$f'_c=22$	$f'_c=38$
せん断 耐力	JSCE 式	30.4	36.4	30.2	36.2
	二羽式	39.8	47.6	36.8	44.1
	指針式	79.4	95.2	73.6	88.3
曲げ圧縮破壊耐力		76.9	124.6	63.8	103.3

JSCE 式と二羽式は元来、せん断補強鋼材を有しない RC 部材のせん断耐力算定式として提案されたものであり、繊維混入による効果は考慮されない。これらの式による算定結果を、実験でせん断破壊を生じた A1, B1 試験体の最大荷重と比較すると、算定値はかなり小さい値を示している。繊維を斜めひび割れ方向に配向させた、すなわち繊維の架橋効果が殆ど表れない試験体の結果との比較であることを考慮すると、算定値が小さめに表れることは、設計上は安全側となることが確認された。また、指針式は繊維が通常通り (ランダムに) 混入された FRC 部材の耐力算定式であるが、これと比較すると算定値は実験値よりも大きな値を示している。本算定式においては、通常の RC 部材のせん断耐力を  $(1+\kappa)$  倍することによって繊維の効果を表現しており、通常は  $\kappa=1$  が用いられるが、上述の A1, B1 試験体について言えば、 $\kappa=0.7$  程度が妥当であることが分かる。一方、斜めひび割れを跨ぐ方向に繊維を配向させた A2, B2 試験体では  $\kappa>1.5$ 、ランダム配向させた試験体では  $\kappa>1.3$  となる。ランダム配向で  $\kappa>1.3$  と高めになっているが、これらの結果は、部材奥行き 100mm の試験体を用いた結果であり、実際の構造部材寸法では繊維の効果はこれよりも小さくなることが予想される。

### 3 軸方向鉄筋を用いない FRC 杭基礎の耐震性状

#### 3.1 せん断土槽を用いた FRC 杭基礎の振動実験

前章の耐力評価と併せて、繊維を混入したコンクリート杭基礎の応答・変形状を検討した。試験体寸法と実験設備の制約から、ここでは寸法の小さいビニロン繊維 (繊維長 12mm, 繊維径 0.1mm) を体積混入率 1.5% で混入した繊維補強コンクリートを用いた。杭体は  $50\times 50\text{mm}$  の矩形断面とし、杭間隔 150mm の 4 本杭基礎試験体を製作した。地盤定数が既知の地盤材料を満たしたせん断土槽中に試験体を設置し、振動台上で加振実験を行った。実験装置図を図-3に示す。試験体上部には 300kg の錘を載せ、軸応力 0.4MPa が杭体に生じるようにした。また、比較のために D3

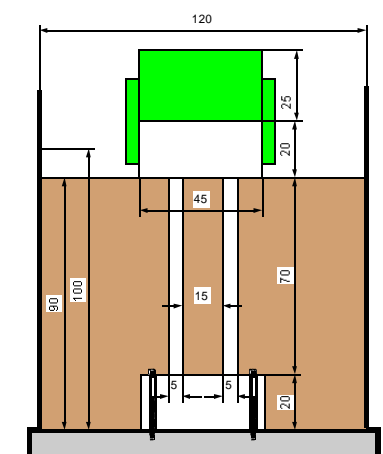


図-3 振動実験セットアップ

鉄筋を4本ずつ杭体に配置したRC杭基礎試験体も作製した。入力波は最大加速度レベルの異なる正弦波とし、地盤および試験体の固有振動数を考慮して、加振振動数を5Hzおよび10Hzとした。

本実験は、繊維の引張靱性に期待して、大地震時において基礎の剛性を意図的に下げることによって、構造物全体としての応答を低減させることを念頭に置いたものである。すなわち、繊維補強コンクリートの実構造物への効果的な適用と耐震設計を念頭に置いた実験とした。

### 3.2 実験結果

振動台上で計測した入力加速度および試験体錘位置で計測した応答加速度の最大値を表-4に示す。計測された杭体ひずみの変化より、RC杭基礎ではロッキング振動、FRC杭基礎ではスウェイ振動が卓越していたものと考えられたため、ここではスウェイ振動のみに着目し、ひずみ値を用いて最大加速度を換算した平均換算応答加速度を用いて比較した。また、ケース毎に入力加速度に差が生じたため、平均換算応答加速度を入力加速度で除した増幅比によって比較した。各ケースの平均換算応答加速度および増幅比を併せて表-3に示す。この結果から、FRC杭基礎ではRC杭基礎に比べて地上部分での応答を低減できることが分かる。これは、FRC杭はモーメント伝達能力が低いために、下方からの振動を上部へ伝えにくく、結果的に応答が低減されたものと考えられる。

実験結果では、繊維補強コンクリートを適用した基礎は、比較のために実施した通常の鉄筋コンクリート杭基礎に比べて震動エネルギーの伝達を低減できることが明らかとなった。この結果は、繊維補強コンクリートの有効利用法の一つを示すものであり、研究対象としている短繊維が今後、広く使用される可能性を示唆するものである。

表-4 加振実験結果および増幅比

		入力加速度 (gal)	実測応答加速度 (gal)	平均換算応答 加速度(gal)	平均増幅比
1回目	FRC杭基礎	399.7	769.8	992.51	2.48
	RC杭基礎	311.2	492.7	1158.72	3.72
2回目	FRC杭基礎	815.7	878.7	1146.46	1.41
	RC杭基礎	678.3	574.5	1389.54	2.05
3回目	FRC杭基礎	508.2	1054.8	1388.22	2.73
	RC杭基礎	349.7	925.6	2159.96	6.18

## 4 まとめ

各種短繊維を用いた構造物の設計手法の確立を目指して、一般的なFRC棒部材の耐力評価法およびFRCの適用拡大を念頭に置いた杭基礎の耐震性状について検討を行った。

FRC部材のせん断耐力評価については、繊維配向を強制的に変化させたFRC梁部材の載荷実験を行い、配向の違いがせん断耐力に及ぼす影響について実験的に明らかにした。しかし、より一般的な耐力評価および耐力算定式の確立に向けては、解析的評価を含めたさらなる検討が必要である。特に、実構造物を構成する部材は、今回実験で用いた試験体寸法よりもかなり大きいこと、繊維配向は材料異方性に直結する特徴であること等を勘案すると、解析による評価は必須である。

FRC部材の特性を活かし、これを杭基礎へ適用することを念頭に置いて実施した振動実験の結果より、軸方向鉄筋を用いないFRC杭基礎が上部構造物に伝達する振動エネルギーを低減できる可能性が明らかとなった。ただし、このようなFRC杭基礎を適用するためには、構造物全体としての設計手法をペアで開発する必要があると共に、地震を受けた後の補修補強の必要性についても検討しておく必要があり、今回は定性的評価に留まっている。今後は、構造物ー基礎ー地盤全体としての応答評価を行い、実構造物への適用に向けてさらなる検討を進める必要がある。