

論文

[1144] 鋼繊維で補強した CPC はりの曲げ性状

正会員 辻 幸和 (群馬大学工学部)
 正会員 ○岩井 稔 (群馬大学大学院)
 奥泉貴朗 (群馬大学大学院)
 小川晃市 (首都高速道路公団)

1. まえがき

鋼繊維で補強した膨張コンクリート部材の膨張性状および曲げ性状に関しては、既に幾つかの貴重な研究成果が報告されている^{1)~3)}。しかしながら、鋼繊維の混入効果を定量的に明確に示した研究結果は、これまでにほとんど報告されていない。

本研究は、膨張コンクリートを用いてケミカルプレストレスを導入した鉄筋コンクリートはり (CPC はり) の力学的性状を更に改善するために、鋼繊維の混入によるはりの曲げ性状への補強効果を定量的に把握することを試みたものである。すなわち、曲げを受ける CPC はりに及ぼす鋼繊維の補強効果について、鋼繊維を鉄筋と同様な拘束体とモデル化し、その混入による膨張率およびケミカルプレストレスの変化は、先に報告した仕事量の概念に基づく推定方法⁴⁾を採用するとともに、はりの曲げ性状を解析する方法を提示し、実験結果と比較検討をするものである。

2. 実験の概要

はり供試体の形状寸法は、図-1 に示すような $15 \times 15 \times 75$ cm の矩形断面である。載荷試験は、スパンが 60 cm、載荷点間が 14 cm の 2 点集中載荷を行った。はり供試体の養生は、脱型後材令 21 日までを水中養生とし、以後は材令 28 日の載荷試験まで実験室内に放置した。

補強鋼材は SD30 の鉄筋を使用し、図-1 に示すように引張側に D10 を 2 本配置した断面 (A 断面) と、D13 を 2 本配置した断面 (B 断面) の 2 種類のはり供試体を作製した。なお、いずれの断面とも圧縮側には D10 を 2 本配置した。

コンクリートの配合は、単位結合材量を 440 kg/m^3 、単位水量を 220 kg/m^3 、細骨材率を 65% とし、アルキルアリルスルホン酸塩系の高性能減水剤を結合材量の 0.7% 添加して、鋼繊維を混入しない場合のスランプが $20 \pm 1 \text{ cm}$ の一定となるようにした。鋼繊維の混入率 V_f は、体積比で 0、0.5、1.0 および 1.5% の 4 種類に変化させた。また膨張材は、単位量 E で 0、50 および 60 kg/m^3 とし、セメントと置き換えて用いた。

鋼繊維は $0.5 \times 0.5 \times 30 \text{ mm}$ のせん断品を、膨張材はエトリングイト系のものを、また、セメントは普通ポルトランドセメントをそれぞれ用い

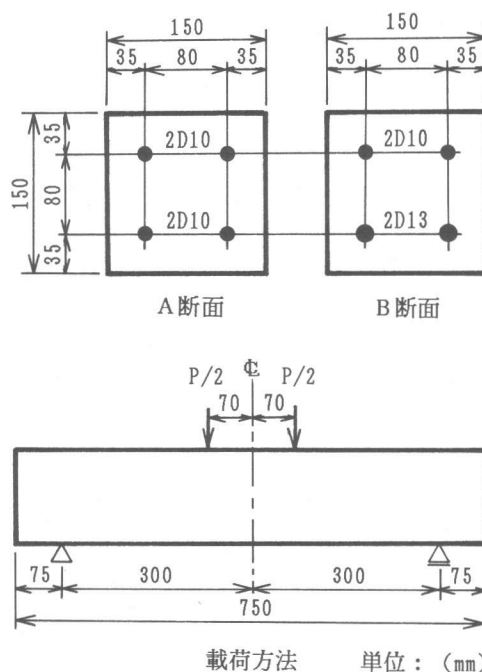


図-1 供試体の形状寸法

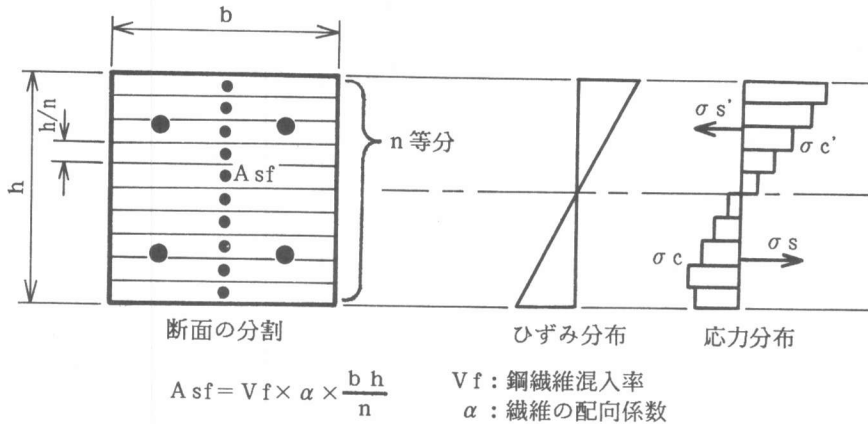


図-2 断面の細分割の一例

た。骨材は、渡良瀬川産の川砂および川砂利を用い、比重はそれぞれ2.60および2.66、粗粒率はそれぞれ2.57および6.63（最大寸法15mm）であった。

3. 解析の方法

解析においては、図-2に示すように、はりの断面を中立面と平行にn等分に細分割する積層モデルを採用した。断面内のひずみは中立面からの距離に比例すると仮定し、応力とひずみを各層の図心位置で代表させた。

鋼繊維は断面内に一様に分散していると仮定し、各層内の鋼繊維はその図心位置に仮想的に配置された鉄筋と等価であるとして扱った。このような仮想的な鉄筋にモデル化することによって、鋼繊維の膨張力に対する拘束分と曲げにより生じる軸方向引張力の分担分を、それぞれ算定した。この仮想的な鉄筋の断面積 A_{sf} は、鋼繊維の混入率 V_f に、一軸方向の有効率である配向係数 α とコンクリート層の断面積 bh/n を乗じた値とした。なお、鋼繊維は3次元方向に均等に配向していると仮定して、 $\alpha = 0.405$ とした。図-3は、コンクリートと仮想的な鉄筋の応力とひずみとの関係を示す一例である。仮想的な鉄筋の引張応力とひずみとの関係は、鋼繊維とマトリクスとの付着が完全である領域と、繊維がマトリクスからの引き抜けに抵抗する領域とに分けて設定した。

はり断面内における膨張率およびケミカルプレストレスの分布は、『単位体積当りの膨張コンクリートが鋼繊維と鉄筋の拘束体に対してなす仕事量は、その拘束の程度にかかわらず一定の値となる。』という仕事量の概念に基づく推定方法⁴⁾を適用して、JIS A 6202 のA法一軸拘束膨

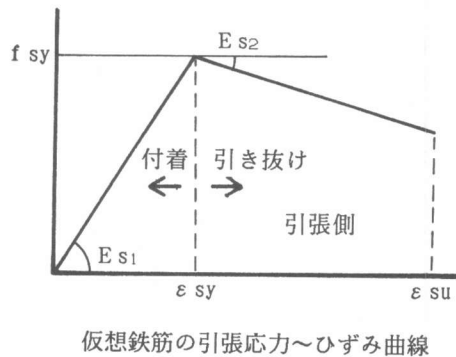
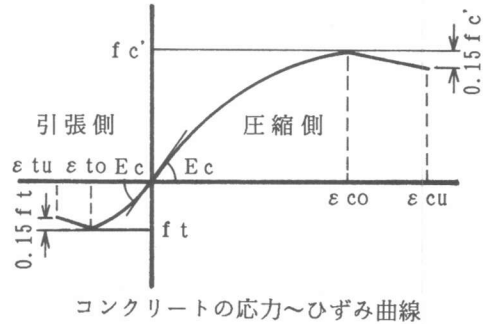


図-3 解析に用いた応力～ひずみ曲線

張率より算定した仕事量の値がはり供試体に生じる仕事量に等しいと仮定することにより求めた。また、曲げ性状の解析は、以下の手順で行った。すなわち、断面圧縮縁にひずみ ϵ_c を与え、内力の軸方向の釣合い条件を満足するようなひずみ分布を、中立軸の位置を修正することにより求める。このときのひずみ分布より、断面内に作用している内力モーメントを算出する。 ϵ_c を段階的に増加させて繰返し計算を行ない、曲げモーメントとひずみとの関係を求めた。

4. 曲げひびわれ耐力

曲げひびわれ発生の判定は、はり断面引張縁に貼付したワイヤストレーンゲージにより測定した引張ひずみの急変点より行い、全断面を有効とした弾性計算により求めた下縁の応力度を、曲げひびわれ発生応力度とした。この曲げひびわれ発生応力度と断面下縁に導入されるケミカルプレストレスの推定値との関係を図-4に示す。曲げひびわれ発生応力度はケミカルプレストレスにほぼ比例して増加することが認められる。また、少し実測値にばらつきがあるが、曲げひびわれ発生応力度およびケミカルプレストレスは、単位膨張材量 E を一定としても、鋼繊維混入率の増加にともなって一般に大

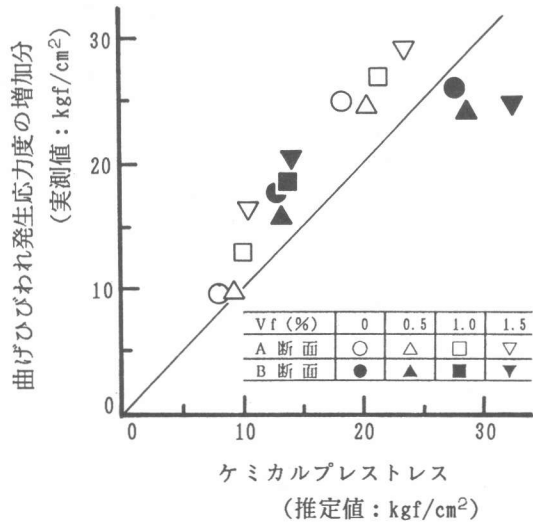
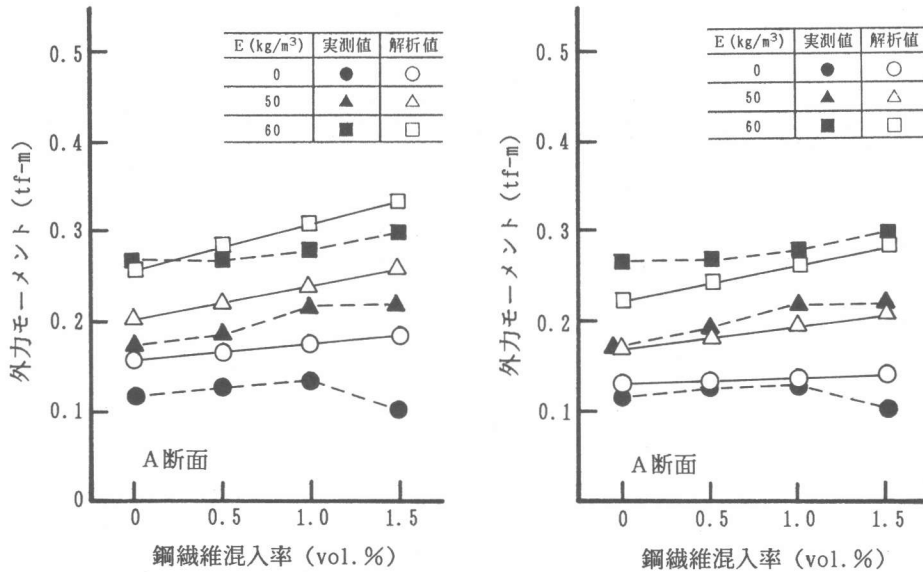


図-4 断面下縁におけるケミカルプレストレスと曲げひびわれ発生応力度の増加分との関係



(a) 乾燥収縮を考慮しない場合

(b) 乾燥収縮を考慮した場合

図-5 曲げひびわれ発生モーメントに及ぼす鋼繊維の影響

きくなっている。

図-5はA断面の曲げひびわれ発生モーメントをまとめたものである。上述のように、鋼繊維を用いていないVfが0%のCPCはりの曲げひびわれ発生モーメントの実測値は、単位膨張材量Eの増加にともなって大きくなっており、ケミカルプレストレスの導入により曲げひびわれ耐力の向上が認められる。

鋼繊維混入率Vfを増加させても、普通コンクリートでは曲げひびわれ発生モーメントの増加がほとんど認められないのに対し、置換する膨張材の単位量Eを多くすると、わずかではあるものの、Vfの増加にともなう曲げひびわれ発生モーメントの増加が認められる。これは、図-4に示した鋼繊維の混入によって導入されるケミカルプレストレスの効果が現れたものである。図-5(a)に示した解析値においては乾燥による収縮を考慮していないためか、曲げひびわれ耐力の解析値は実測値より大きく評価している。実際のはりでは、1週間実験室内に放置したため、わずかではあるが乾燥収縮が生じていた。そこで、断面内に一様に 50×10^{-6} の収縮がコンクリートに生じたと仮定して解析した結果を図-5(b)に示す。曲げひびわれ耐力を精度よく算定するためには、乾燥収縮の影響を正確に把握することが必要であることを示すものである。この図より、乾燥収縮を受けた場合においても鋼繊維と膨張材の使用効果を算定できることが認められる。

B断面においては、Vfが曲げひびわれ耐力に及ぼす影響は、A断面の場合よりも小さい。この原因としては、鋼繊維を混入しないB断面の鉄筋比($p = 1.76\%$)が、A断面の鉄筋比($p = 1.27\%$)と比較して、鋼繊維が3次元的に配向しているとした場合のVf=1%に相当する0.49%分大きいいため、鋼繊維混入の影響が緩和されたことが考えられる。鋼繊維の混入によるCPCはりの曲げひびわれ耐力の向上効果は、鉄筋比の小さい断面ほど期待される。

5. 引張鉄筋のひずみ

外力モーメントの増加にともなう引張鉄筋のひずみの変化を図-6および図-7に示す。B断面の場合であるが、曲げひびわれが発生するまでは、実測値と解析値はともに単位膨張材量や鋼繊維混入率の影響がほとんど認められず、ほぼ等しいひずみ変化を示している。

図-6はVfが0%のCPCはりの場合である。上述のように、単位膨張材量の増加にともなう、曲げひびわれ発生モーメントの実測値が大きくなっている。また、ひびわれ発生以降の段階では、同

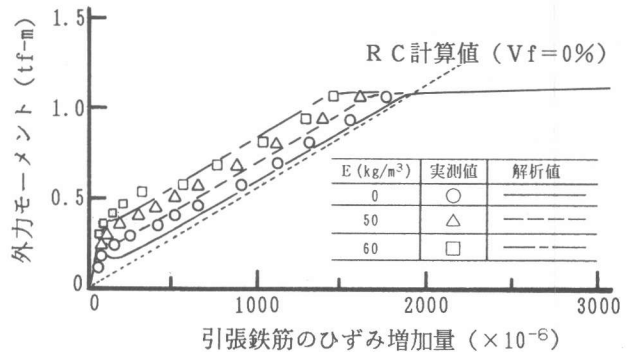


図-6 外力モーメントと引張鉄筋のひずみ増加量との関係 (B断面 Vf=0%)

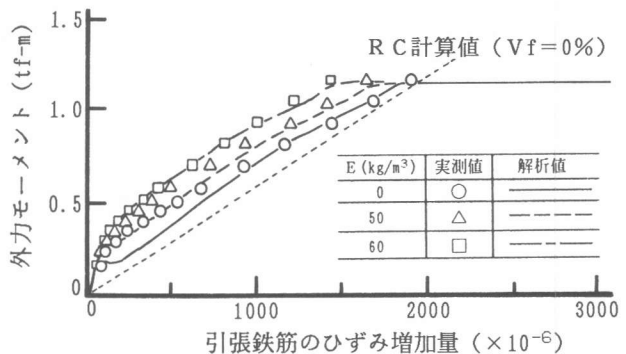


図-7 外力モーメントと引張鉄筋のひずみ増加量との関係 (B断面 Vf=1.5%)

一の外力モーメントによる引張鉄筋のひずみ増加量は、膨張材の使用量が多くなるほど一般に小さくなっている。これは、養生期間中に生じた膨張作用によって、引張鉄筋があらかじめ引張ひずみを与えられたことによるものであり、曲げひびわれが発生した以降においてもケミカルプレストレスの効果が存続していることを示すものである。膨張材使用の効果は、解析値においても現れている。図-7に示すように、Vfを1.5%まで混入したはりにおいても同様の傾向がみられ、鋼繊維を混入した場合にも、単位膨張材量が引張鉄筋のひずみ増加量に及ぼす影響を解析することができた。

図-8は、引張鉄筋のひずみ増加量が 1000μ となるときの外力モーメントに及ぼす鋼繊維量の影響をまとめたものである。A断面の場合であるが、曲げひびわれ耐力の場合と同様に、膨張材の使用量によるモーメントの増加が実測値に現れている。また、鋼繊維の使用によって増加する外力モーメントの割合は、図-5に示した曲げひびわれ耐力の場合より顕著である。鉄筋のひずみの増加量が所定値となる外力モーメントの解析値は、実測値より小さくなった。この原因としては、解析値には図-5(b)に示した 50×10^{-6} の乾燥収縮を考慮したこと、実測値にはゲージ位置と実際のひびわれ位置が相違することが考えられる。しかしながら、解析値においても実測値と同様な増加傾向があり、鋼繊維と膨張材の使用効果を定量化することができた。

鉄筋比の大きいB断面におけるVfの及ぼす影響は、曲げひびわれ耐力の場合とは逆に、A断面よりわずかに大きいものであった。B断面の鉄筋比が大きいため、引き抜けた繊維量がA断面より少ないことが原因と考えられる。

6. 破壊モーメント

はりの破壊モーメントを図-9に示す。B断面の膨張材が少量あるいはVfが小さい一のはりはせん断破壊となったが、大部分のはりは曲げ引張破壊となった。

単位膨張材量が一定の場合、鋼繊維混入率の増加にともなって破壊モーメントが大きくなっており、Vfを1.5%まで増加させると10%程度破壊モ

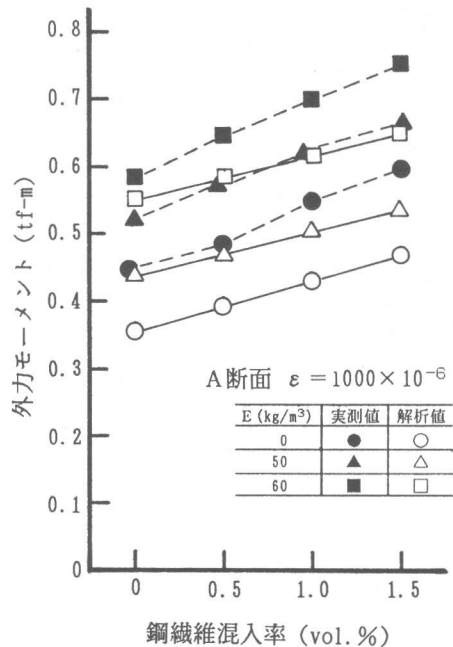


図-8 引張鉄筋のひずみ増加量に及ぼす鋼繊維の影響

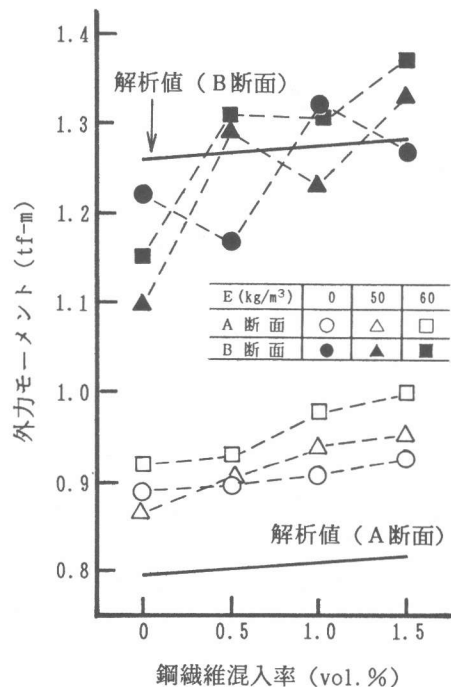


図-9 破壊モーメントに及ぼす鋼繊維の影響

ーメントが向上している。また、鋼繊維混入量を一定としたときの破壊モーメントに及ぼす単位膨張材量の影響はほとんど認められない。これらの現象は、図-6および図-7に示した解析結果においても現れており、鉄筋比が一定の断面においては、鋼繊維の混入によって破壊耐力が向上し、ケミカルプレストレスの影響を受けないことが確かめられた。なお、引張鉄筋比の小さいA断面のはりでは、破壊時に圧縮鉄筋も引張降伏していた。このような応力状態においては、引張鉄筋のひずみは降伏域を過ぎ、ひずみ硬化域に入るので、引張鉄筋はその引張強度に相当する応力を分担していると考えられる。一方、解析においては、引張鉄筋の応力-ひずみ曲線をバイリニア形と仮定したため、引張鉄筋の分担する最大の応力は降伏強度に相当する値となっている。そのため、実測値と解析値の破壊モーメントに差が生じたと考えられる。引張鉄筋比の大きいB断面の曲げ引張破壊を生じたはりにおいては、引張鉄筋のひずみはA断面ほど大きくならず、上記の仮定で精度よく解析できたものと思われる。

せん断力に対する検討を解析では行っていないため、明確にすることはできないが、鋼繊維の混入による斜めひびわれの進展抑制効果、ならびに多方向に導入されるケミカルプレストレスによる斜めひびわれおよびひびわれ幅の抑制効果により、せん断破壊から曲げ破壊へと、破壊形式を改善できることも期待される。

7. 結論

ケミカルプレストレスを導入した鉄筋コンクリートはり（CPCはり）において、鋼繊維の混入による曲げ性状の改善効果を定量化するため、鋼繊維を仮想的な鉄筋として取扱う解析方法を提案し、実験結果と比較検討した。本研究の範囲内で、次のことがいえると思われる。

(1) 鋼繊維の混入によるケミカルプレストレスの変化は、鋼繊維の影響を考慮した仕事量の概念に基づく推定方法によって、断面に非対称に鉄筋を配置したはりにおいても定量的に評価できる。

(2) 鋼繊維の混入による曲げひびわれ発生モーメントの増加の程度は、膨張材の使用による効果ほど大きくない。しかしながら、鋼繊維と膨張材を併用する効果は、鋼繊維が膨張力を拘束することによってコンクリートに導入されるケミカルプレストレスにはほぼ比例している。これらの使用効果は、解析方法に採り入れて表示することができる。

(3) 曲げひびわれ発生以降の引張鉄筋のひずみ増加量も、鋼繊維と膨張材のそれぞれを用いることにより減少でき、その効果は、解析方法で定量化できる。

(4) 曲げ引張破壊耐力は、単位膨張材量の影響を受けず、鋼繊維混入率とともに増加する。また、両者の併用により、破壊形式をせん断破壊から曲げ引張破壊へ移行させることができる。

参考文献

- 1) 小林一輔, 野口哲夫: 膨張コンクリートをマトリックスとした鋼繊維補強コンクリートの複合特性, 土木学会論文報告集 第336号 1983年 3月 pp.169~177.
- 2) 戸川一夫, 中本純次: 鋼繊維補強膨張コンクリートの力学的特性に関する研究, セメント技術年報, 36, 1982年 pp.397~400.
- 3) 辻 幸和, 佐藤喜悦: 鋼繊維を用いた膨張コンクリートの膨張収縮性状および圧縮強度特性, セメント技術年報, 36, 1982年 pp.155~158.
- 4) 辻 幸和, 古川 茂: 鋼繊維で補強した膨張コンクリート部材の膨張特性, 土木学会論文集, 第384号 / V-7, 1987年 8月 pp.111~118.