

## 論文

## [1200] 格子状連続繊維補強材を用いたコンクリートはりの最小補強材量

伊藤朋紀\*1・栗原哲彦\*2・内田裕市\*3・六郷恵哲\*4

## 1. はじめに

アラミド繊維、炭素繊維、ガラス繊維等を樹脂で成形した連続繊維補強材は、耐腐食性に優れ、軽くて強度が大きいという特徴があり、コンクリート用の補強材として期待されている。連続繊維補強材は、鋼材に比べ弾性係数が小さいため、プレストレストコンクリート用緊張材としての利用が進んでいる。鉄筋の代替としては、コンクリートとの付着が良い格子状連続繊維補強材が開発され、トンネルや斜面の吹付けコンクリートの補強等に利用されている。

曲げを受ける通常の鉄筋コンクリート部材に対しては、万一破壊した場合の変形性能を確保する目的で、引張鉄筋量に制限が設けられているが、連続繊維補強材を鉄筋の代替として用いる場合の補強材量の限界についての検討は、必ずしも十分には行われていない。

本研究においては、格子状連続繊維補強材で補強した高強度コンクリートならびに普通強度コンクリートはりについて、破壊時の荷重変位曲線の形状やひびわれ性状をもとに、最小補強材量の考え方について検討した。

## 2. 実験概要

連続繊維補強材で補強した高強度コンクリートならびに普通強度コンクリートはりを、表-1に示すように、12種類（各2体）作製した。高強度コンクリートはりの幅は10cm、普通強度コンクリートはりの幅は20cmとし、はり高さを6~18cmに変化させた。補強材は図-1に示すように配置し、かぶり厚は1cmとした。はりCN8-0は集中載荷、CN8-100はモーメントスパンを100cmとした2点載荷、その他のすべてのはりはモーメントスパンを50cmとした2点載荷（3等分点載荷）とした。

ガラス繊維を成形したN社製の連続繊維補強材（筋番：G4）を用いた。補強材の特性を表-2に示す。補強材の応力ひずみ関係は破断までほぼ直線状である。図-2に示すように、補強材の厚さは2mm、格子間隔は、高強度コンクリートはりでは5cm、普通強度コンクリートはりでは10cmである。補強材1本当たりの引張耐力の保証値は0.78tonfである。

高性能AE減水剤（SP-8SX3）を用いて高強度コンクリート（粗骨材の最大寸法15mm、スランプ6.0cm、空気量4.5%、W/C=27.9%、早強セメント使用）を作成し、材齢19日で載荷試験を行った。普通強度コンクリートには、レディーミクストコンクリート（粗骨材の最大寸法15mm、スランプ6.5cm、空気量4.4%、W/C=50.4%、早強セメント使用）を用い、材齢10~11日で載荷試験を行った。いずれのはりも湿潤状態で試験を行った。コンクリートの強度試験結果を表-3に示す。

図-1に示すように、支点はローラ支持とし、荷重と載荷点の変位とを計測した。

- 
- \* 1 岐阜大学大学院 工学研究科土木工学専攻（正会員）
  - \* 2 岐阜大学助手 工学研土木工学科、工修（正会員）
  - \* 3 岐阜大学助教授 工学部土木工学科、工博（正会員）
  - \* 4 岐阜大学教授 工学部土木工学科、工博（正会員）

表-1 供試体

供試体	コンクリートの種類	供試体寸法 (cm)			
		幅	載荷スパン [モーメントスパン]	高さ	
CH6	高強度	10	150 [ 50 ]	6	
CH8				8	
CH11				11	
CH14				14	
CH18				18	
CN6	普通強度	20	150 [ 50 ]	6	
CN8				8	
CN11				11	
CN14				14	
CN18				18	
CN8-0				100 [ 0 ]	8
CN8-100				200 [ 100 ]	8

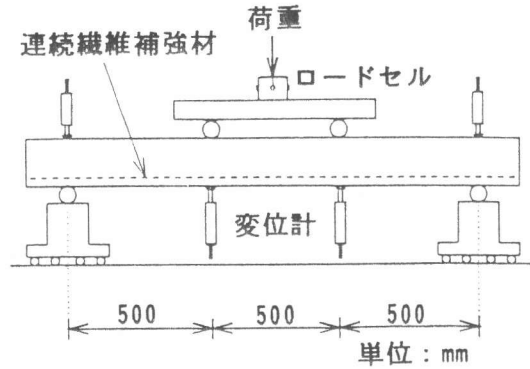


図-1 載荷試験方法 (CN8-0、CN8-100以外)

表-2 連続繊維補強材の特性

引張強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	破断ひずみ (%)	弾性係数 (kgf/cm <sup>2</sup> )	比重
60	2.2	3×10 <sup>5</sup>	1.7

表-3 コンクリートの特性

コンクリートの種類	強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )			弾性係数 (kgf/cm <sup>2</sup> )	材齢 (日)
	圧縮	曲げ	引張		
高強度	766	96.0	59.7	3.85×10 <sup>5</sup>	19
普通強度	327	46.4	27.4	2.94×10 <sup>5</sup>	11

[ ] : 格子間隔が10cmの場合

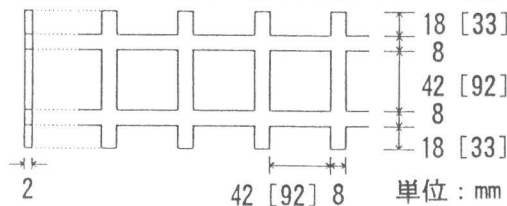


図-2 連続繊維補強材の形状寸法

### 3. 結果と考察

格子状連続繊維補強材で補強した高強度コンクリートはりならびに普通強度コンクリートはりの荷重変位曲線を、はり側面のひびわれ図とともに、それぞれ図-3と図-4に示す。はり断面の実測寸法、最初のひびわれ荷重、ひびわれ本数、最大荷重、補強材引張耐力、等を表-4に示す。この表における測定荷重は、はりの自重とロードセルや載荷ビーム等の重量の影響を考慮して補正済みのものである。

#### 3.1 ひびわれ本数と変形状

モーメントスパンが50cmではり高さが6cmまたは8cmの場合には、最初のひびわれ荷重 $P_{cr}$ よりも補強材の抵抗による最大荷重 $P_u$ のほうが大きく、4本以上の曲げひびわれが生じ、最大変位も40mm以上と大きくなった。一方、はり高さが14cmまたは18cmの場合には、 $P_{cr}$ より $P_u$ が小さくなり、ひびわれは1本しか生じず変形量も小さくなった。なお、はり高さが8cmであっても、集中荷重を受ける場合にはひびわれは1本しか生じなかった。

以上の結果から、格子状連続繊維補強材で補強したコンクリートはりにおいて、モーメントの大きな領域が広がるように荷重を与え、かつ $P_u/P_{cr}$ が1より大きくなるように十分に補強材を配置すれば、ひびわれの分散と大きな変形が期待できることがわかる。

#### 3.2 荷重変位曲線の形状

高強度コンクリートはりとはり普通強度コンクリートはりとはりを比較した場合、高強度コンクリートでは曲げ強度は普通強度コンクリートの約2倍であるが、はり幅を1/2としているため、はり高さが同じ場合には荷重変位曲線の形状はよく似ている。

格子状連続繊維補強材で補強したはりの荷重変位曲線は、通常の鉄筋に比べ補強材の弾性係数

表-4 試験結果

供試体名	実測断面寸法 (cm)			最初のひびわれ荷重 (tonf)			ひびわれ 本数	補強材 1本の 引張耐 力 (tonf)	最大 荷重 Pmax (tonf)	補強材の 抵抗によ る最大 荷重 Pu (tonf)	Pu Pcr
	幅	高さ	有効 高さ	実測 Pcr	推定1	推定2					
CH6-1	10.0	6.1	5.0	0.220	0.225	0.246	7	0.789	0.333	0.333	1.51
CH6-2	9.8	6.1	5.0	0.200	0.224	0.245	8	0.894	0.349	0.349	1.75
CH8-1	10.2	8.0	6.9	0.361	0.390	0.407	5	0.849	0.461	0.461	1.28
CH8-2	10.2	8.1	6.9	0.349	0.402	0.418	5	0.888	0.482	0.482	1.38
CH11-1	10.0	11.1	10.0	0.778	0.758	0.743	1	1.01	0.798	0.798	1.03
CH11-2	10.1	11.0	9.9	0.745	0.755	0.741	2	0.956	0.755	0.755	1.01
CH14-1	10.0	14.3	13.2	1.23	1.28	1.19	1	1.01	1.23	1.06	0.87
CH14-2	10.1	14.1	13.0	1.21	1.24	1.16	1	0.961	1.21	0.990	0.82
CH18-1	10.0	18.1	17.0	1.90	2.05	1.82	1	1.00	1.90	1.35	0.71
CH18-2	10.0	18.0	16.8	1.97	2.02	1.81	1	1.06	1.97	1.41	0.72
CN6-1	20.0	6.1	5.0	0.244	0.199	0.217	5	0.918	0.357	0.357	1.46
CN6-2	20.0	6.0	4.9	0.242	0.190	0.208	5	0.862	0.329	0.329	1.36
CN8-1	20.0	8.1	7.1	0.419	0.366	0.380	4	0.956	0.532	0.532	1.27
CN8-2	20.1	8.2	7.1	0.474	0.375	0.389	4	0.874	0.487	0.487	1.03
CN11-1	20.0	10.7	9.6	0.648	0.657	0.649	3	0.941	0.712	0.712	1.10
CN11-2	20.0	10.8	9.7	0.805	0.664	0.655	1	0.994	0.805	0.759	0.94
CN14-1	20.1	13.7	12.4	1.08	1.10	1.04	1	0.980	1.08	0.960	0.89
CN14-2	21.0	13.9	12.8	1.18	1.18	1.11	1	1.04	1.18	1.05	0.89
CN18-1	21.0	18.0	16.9	1.90	2.00	1.79	1	1.02	1.90	1.37	0.72
CN18-2	20.0	17.9	16.9	1.62	1.88	1.69	1	0.827	1.62	1.11	0.69
CN8-0-1	20.0	7.9	6.8	0.485	0.353	0.368	1	0.939	0.485	0.482	0.99
CN8-0-2	20.0	8.0	6.9	0.472	0.320	0.377	1	1.08	0.562	0.562	1.19
CN8-100-1	20.1	7.7	6.7	0.385	0.296	0.312	6	1.04	0.481	0.481	1.25
CN8-100-2	20.1	8.0	6.9	0.409	0.327	0.341	5	0.962	0.462	0.462	1.13

が小さく格子点以外の部分の付着が弱いため、ひびわれ発生後に荷重が急激に低下し、ひびわれ本数が多い場合には鋸の歯状となった(例えば、図-3(1)等)。本試験では、はり載荷試験装置の剛性がはりの剛性に比べ相対的に大きいため、変位制御試験(変位増加速度が一定となる制御)を行った場合に近い結果となったが、荷重制御試験(荷重増加速度が一定となる制御)を行えば、図-5に破線で示すような荷重変位曲線が得られると考えられる。

砂袋等の重りで荷重を与え、重りを増加させた場合には破線で示すような経路を経て最終的な破壊に至ると考えられる。ただし、図-5で影を付けた部分のエネルギーは運動エネルギー等に変わり、はりに振動を生じさせる可能性が考えられる。

鋸の歯状の形状を改善するには、補強材にプレストレスをあらかじめ導入することが有効であり[1]、短繊維補強コンクリートを使用することも有効であろう。また、二次元的なスラブでは一次元的なはりよりもひびわれ後の荷重の低下の度合いは小さくなる[2]。

荷重変位曲線の形状が鋸の歯状であっても、最終破断までの変形が大きいことは、破壊時のエネルギー吸収量が大きいだけでなく、破壊の予告にも有効であり、不静定な構造形式の場合には構造全体の耐荷力の向上に寄与すると考えられる。

### 3.3 最初のひびわれ荷重

表-4に示すはりの最初のひびわれ荷重の推定値1と2は、はり下縁の応力の限界値に、高さ10cmの供試体から求めた曲げ強度 $f_b$ を用いた場合と、下記の式によりはり高さ $d$ の効果[3]を考慮した場合のものである。表-2に示す引張強度 $f_t$ と高さ $d=10\text{cm}$ の供試体から求めた曲げ強度 $f_b$ とを用いて、特性長さ $L_{ch}$ を決めた後に、はり高さ $d$ が異なる場合の曲げ強度 $f_b$ を算定した。

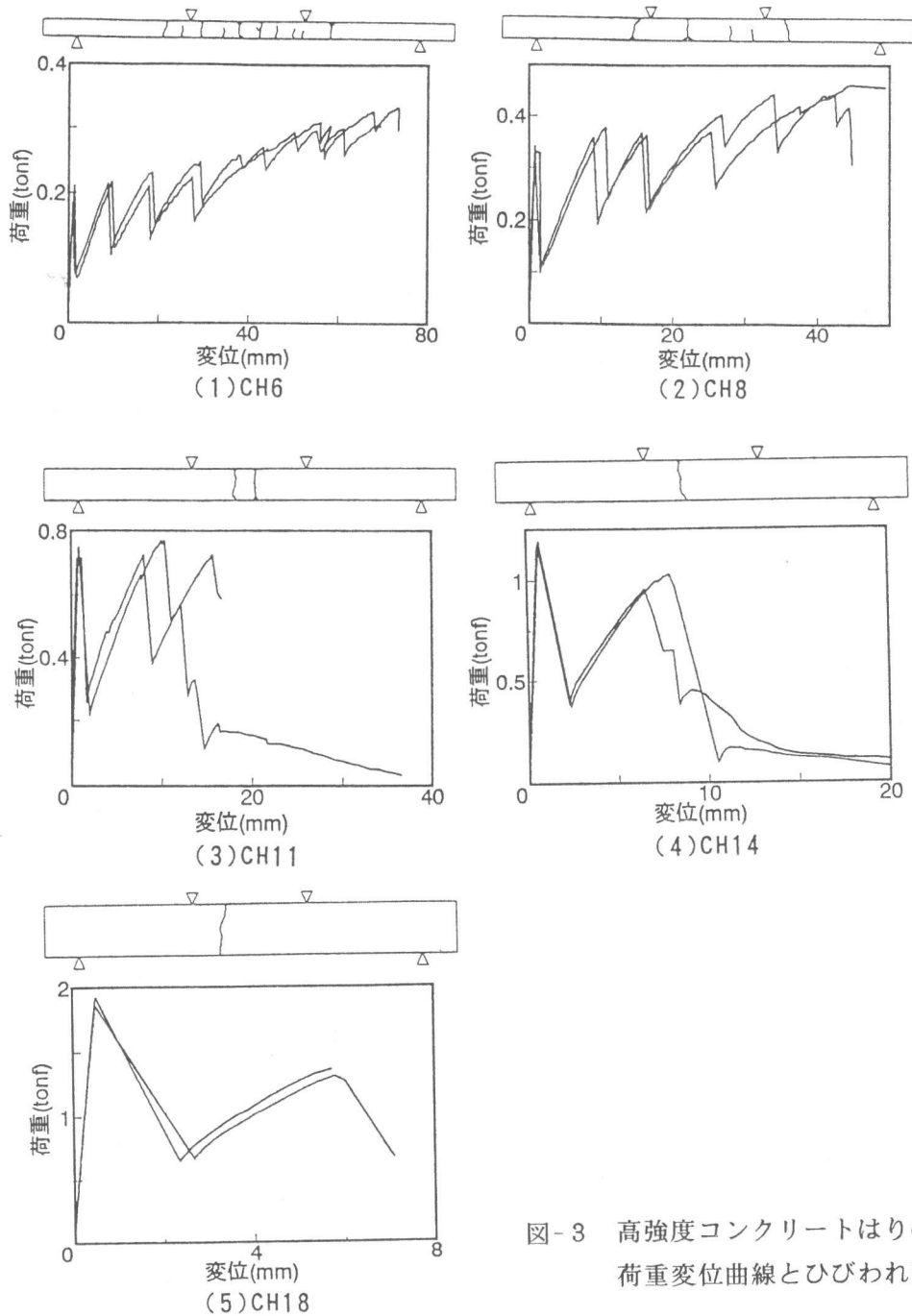


図-3 高強度コンクリートはりの荷重変位曲線とひびわれ図

$$f_b / f_t = 1 + 1 / (0.85 + 4.5d/Lch) \quad (1)$$

はり高さが18cmと高い場合、高さの効果を考慮した推定値の方が実測値に近い値となった。

### 3.4 補強材の引張耐力

表-4に示す補強材1本当たりの引張耐力は、補強材の抵抗による最大荷重 $P_u$ （2本目のひびわれ以降で最大の荷重）から、圧縮側に長方形の応力ブロックを用いたRCはりの曲げ理論を用いて算定したものであるが、いずれも最大荷重の保証値0.78tonfを上回っている。引張耐力は、はりの高さが小さいほど小さくなる傾向にあるが、この原因として曲げ変形の影響が考えられる。

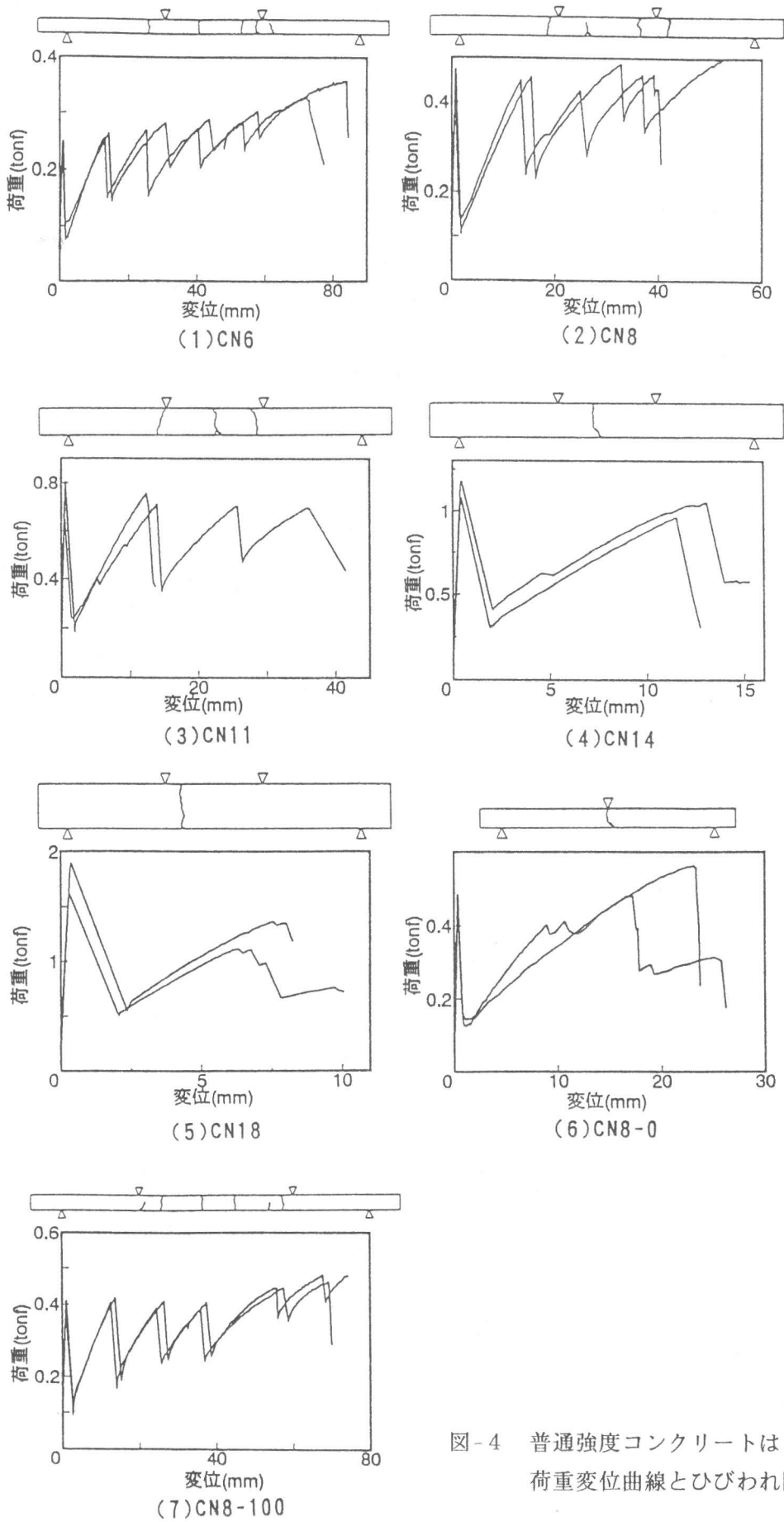


図-4 普通強度コンクリートはりの荷重変位曲線とひびわれ図

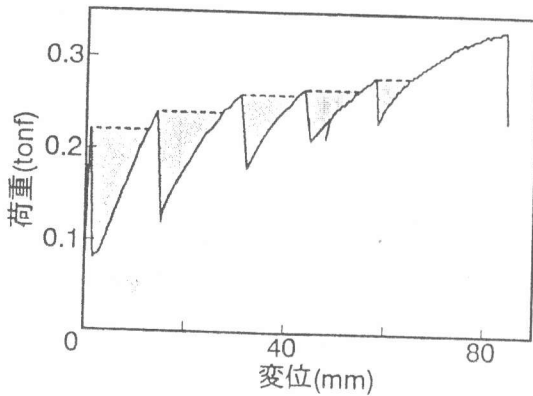


図-5 鋸の歯状の荷重変位曲線

### 3.5 最小補強材量

通常の鉄筋コンクリートはりの場合には、曲げ破壊時の変形能を確保する目的で引張鉄筋比（コンクリートの断面積に対する鉄筋の断面積の比）の最小値が規定されているが、連続繊維補強材を用いたはりの場合には、断面積比よりもむしろ  $P_u/P_{cr}$  のような断面の耐力比によって補強材の最小量を規定するとよいと考えられる。

ひびわれ荷重  $P_{cr}$  をより精度よく算定するには、強度のばらつきの他に寸法や乾燥等の影響を考慮する必要があり、一方、補強材の抵抗に

よる最大耐力  $P_u$  の算定にあたっては、強度のばらつきの他はり高さ等の影響（曲げ変形が大きいと耐力が小さくなる）を考慮する必要がある。コンクリートの曲げ強度と補強材の引張耐力の保証値のみを用いて  $P_u/P_{cr}$  の比を概略計算する場合には、この比が例えば 2.0 以上となるように、またはり高さの影響等を考慮して算定精度を高めた場合にはこの値よりも小さなある値（例えば 1.5）以上となるように、補強材量を決めるとよいと考えられる。こうした具体的な数値の確定にあたってはさらに検討が必要であると考えられる。

### 4. まとめ

格子状連続繊維補強材で補強したはりの最小補強材量について検討し、下記の結果を得た。

(1) モーメントの大きな領域が広がるように荷重を与え、かつ  $P_u/P_{cr}$  が 1 より大きくなるように十分に連続繊維補強材を配置すれば、ひびわれの分散と大きな変形が期待できる。

(2) はりの荷重変位曲線の形状が鋸の歯状であっても、最終破断までの変形が大きいことは、破壊時のエネルギー吸収量が大きいだけでなく、破壊の予告にも有効であり、不静定な構造形式の場合には構造全体の耐荷力の向上に寄与するとの考え方を示した。

(3) はりの試験結果から推定した補強材の引張耐力は、はり高さが小さいほど小さくなる傾向にあるが、いずれも最大荷重の保証値を上回っていた。

(4)  $P_u/P_{cr}$  のような断面の耐力比を指標として、この比が算定精度に応じてある値以上となるように最小補強材量を定める考え方を提案した。

### 参考文献

- [1] 関島謙蔵・二川稔・岡村甫：格子状FRP緊張材を用いたプレストレストコンクリートの開発研究、コンクリート工学年次論文報告集、第10巻、第2号、pp.689-694、1988.
- [2] 小柳洽・六郷恵哲・内田裕市：FRPロッドにより補強したコンクリートスラブならびにはりの力学性状、セメント・コンクリート論文集、No.45、pp.600-605、1991.
- [3] 内田裕市・六郷恵哲・小柳洽：コンクリートの曲げ強度の寸法効果に関する破壊力学的検討、土木学会論文集、No.442/V-16、pp.101-107、1992.2.