

論文

[2182] 格子状 CFRP ロッドを用いた RC はりの曲げ性状に及ぼす
格子間隔の影響

趙 唯堅*1・丸山久一*2・鈴木秀門*3

1. はじめに

連続繊維補強材（以下 FRP ロッドと記す）は一般的に弾性係数が小さいため、使用荷重での部材の変形およびひびわれ幅などが大きい。現時点では、FRP ロッドを RC 部材に単独に使用することは困難であるが、FRP ロッドの持つ材料特性が従来使われてきた鉄筋と全く異なる点から、連続繊維補強コンクリートの基本的な力学挙動を知るうえで、RC 部材の場合についても、その研究の理論的価値が非常に大きいと思われる。

FRP ロッドをコンクリートはりに適用する場合、その曲げ耐力は既往の RC 曲げ理論で推定できると言われている。しかし、FRP ロッドの形状、寸法および付着特性が異なる場合、はりの耐荷力、ひびわれ、たわみ等の曲げ性状にどのような影響を及ぼすかまだ明らかにされていない。本研究は 2 次元格子状 CFRP ロッドを用いた場合に、格子間隔がはりの曲げ性状に及ぼす影響を実験的に検討し、既往の算定式の適用性を調べたものである。

2. 実験概要

2.1 使用材料および供試体

使用した CFRP ロッドは、PAN 系炭素繊維をビニルエステル樹脂をマトリックスとして 2 次元格子状に形成したもので、平均繊維含有率が 40% のものである。表-1 に CFRP ロッドの諸寸法および力学的特性を示す。コンクリートの呼び強度は 300 kgf/cm²、セメントは早強ポルトランドセメントを用い、粗骨材の最大寸法は 25mm とした。

表-1 CFRP ロッドの形状寸法および力学的特性

CFRP ロッド 呼び名	断面寸法 (mm × mm)	周長 (cm)	断面積 (cm ²)	格子間隔 (cm)	引張強度 (kgf/cm ²)	ヤング係数 (kgf/cm ²)	伸び率 (%)
C13	8.0 × 8.0	3.20	0.63	10, 20	13080	0.94 × 10 ⁶	1.40
C16	10.0 × 10.0	4.00	1.03	10, 20	13080	0.94 × 10 ⁶	1.40
C22	14.0 × 14.0	5.60	1.98	10, 20	13080	0.94 × 10 ⁶	1.40

供試体の形状寸法および配筋を図-1 に、供試体諸元を表-2 に示す。今回試験を実施した供試体の数は 6 体で、主筋には格子間隔が 10cm (A シリーズ) と 20cm (B シリーズ) の 2 種類、ロッド径が C13、C16、C22 の 3 種類を使用し、断面寸法および有効高さは一定とした。曲げによるひびわれおよび変形を十分に生じさせるために、等曲げモーメント区間の長さを断面高さの 5 倍 (有効高さの 6 倍) とした。なお、せん断破壊が先に起きないように、せん断スパン内に D10 鉄筋のスターラップを 10cm 間隔で配置した。

*1 長岡技術科学大学大学院 工学研究科材料工学専攻 工修 (正会員)

*2 長岡技術科学大学助教授 工学部建設系 Ph.D. (正会員)

*3 長岡技術科学大学大学院 工学研究科建設工学専攻

表-2 供試体諸元

供試体名	断面高さ (cm)	断面幅 (cm)	CFRP	有効高さ (cm)	主筋面積 (cm ²)	主筋比 (%)	底面かぶり (cm)	側面かぶり (cm)	横中心間隔 (cm)	格子間隔 (cm)
A 1	30	15	2-C 13	25	1.26	0.34	4.6	3.6	7.0	10
A 2	30	15	2-C 16	25	2.06	0.55	4.5	3.5	7.0	10
A 3	30	15	2-C 22	25	3.96	1.05	4.3	3.3	7.0	10
B 1	30	15	2-C 13	25	1.26	0.34	4.6	3.6	7.0	20
B 2	30	15	2-C 16	25	2.06	0.55	4.5	3.5	7.0	20
B 3	30	15	2-C 22	25	3.96	1.05	4.3	3.3	7.0	20

2. 2 載荷・測定方法

載荷は対称2点集中載荷とした。ひびわれの発生を確認した後、一旦除荷し、その後再び荷重を単調に増加し破壊に至らしめた。測定は、荷重ステップ毎に行うこととし、供試体表面およびCFRPロッドに貼付したワイヤストレインゲージによりコンクリートと主筋のひずみを測定し、また10cmピッチで供試体側面に貼付したコンタクトチップによって等曲げモーメント区間のひびわれ幅を測定した。ひびわれ間隔および幅の測定は主筋高さ位置で行った。なお、はりスパン中央と載荷点のたわみを変位計で測定した。各測定点の位置を図-2に示す。

3. 実験結果および考察

3. 1 曲げ耐荷性状

表-3にひびわれ発生荷重および破壊荷重を示す。ひびわれ発生荷重の計算値には土木学会コンクリート標準示方書に基づき、曲げ

引張強度 $f_b=0.9 \times f_c'^{(2/3)}$ を使用した。破壊荷重の計算値は平面保持を仮定した通常の曲げ理論で求めた。破壊形式についてA 1以外全てが曲げ圧縮破壊によるものであった。A 1が曲げ引張破壊となったのは主筋比が小さくて釣合鉄筋比に近いことと、CFRPロッドに何らかの欠損部あるいは損傷部があり、破断したものと考えられる。表-3から分かるように、曲げ耐力の実測値と計算値はよく一致しているが、ひびわれ発生荷重の実測値は計算値をはるかに下回っている。初期ひびわれの発生位置はほぼ格子交差部と一致することも含めて、その理由として、交差部での応力集中と、軸直角方向の格子筋による断面欠損の二つと考えられる[1]。

図-3に各供試体の荷重-変位曲線を、図-4に荷重-主筋ひずみ関係を示す。ひびわれ発生

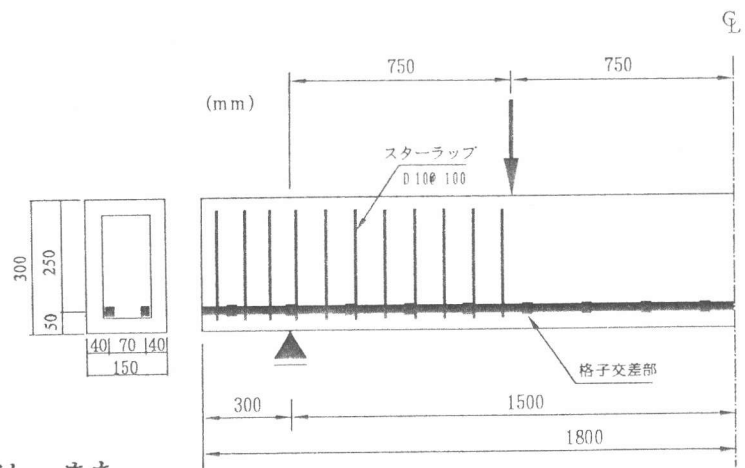


図-1 供試体の形状寸法および配筋

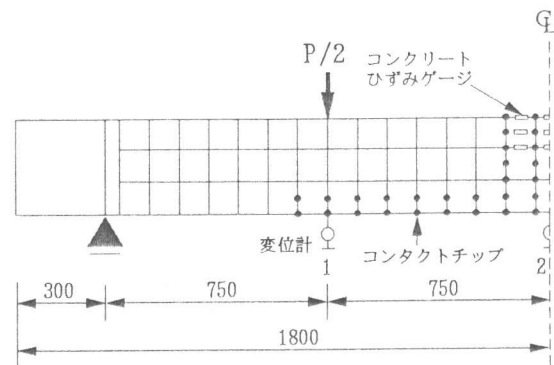


図-2 載荷方法および測定位置

表-3 実験結果一覧表

供試体名	圧縮強度 (kgf/cm ²)	ひびわれ荷重(tf)			破壊荷重(tf)			破壊形式	ひびわれ間隔(cm)		
		実験値	計算値	実験/計算	実験値	計算値	実験/計算		平均値	最大値	最大/平均
A 1	310	1.6	2.5	0.64	9.9	9.9	1.00	曲げ引張	17.8	30.0	1.69
A 2	318	1.4	2.6	0.54	12.6	12.2	1.03	曲げ圧縮	16.5	21.0	1.27
A 3	318	1.9	2.7	0.70	16.5	15.4	1.07	曲げ圧縮	15.6	20.5	1.31
B 1	310	1.8	2.5	0.72	9.9	9.9	1.00	曲げ圧縮	29.6	39.0	1.32
B 2	318	1.6	2.6	0.62	12.9	12.2	1.06	曲げ圧縮	26.2	39.0	1.49
B 3	310	1.7	2.6	0.65	14.5	15.2	0.95	曲げ圧縮	27.0	35.6	1.32

後、変位およびひずみはほぼ直線的に増加し、主筋ひずみの実測値と解析値はよく一致していた。また、ひずみゲージ位置とひびわれ発生位置は必ずしも合致していないが、鉄筋コンクリートの実験結果[2]と比べると、ひびわれ発生時に変位およびひずみの進展が大きく、しかもその後のひずみの実測値は、すぐにコンクリートの引張強度を無視した解析値に近づいていく。これはCFRPロッドの弾性係数が小さいほか、ロッドのストレート部の付着が非常に弱く、テンションステイニング効果が非常に小さいという格子状CFRPロッド特有な性状と考えられる[1]。図-5にゲージの測定結果による断面ひずみ分布の例を示す。等曲げモーメント区間内のひずみの直線性が保たれていることから、せん断スパン内で格子部とコンクリートの付着と定着が確実に得られていると推測できる。なお、以上の曲げ耐荷性状について格子間隔の影響は特に認められなかった。

3. 2 曲げひびわれ

図-6に定常状態になった後のひびわれパターンを示し、表-3に平均ひびわれ間隔と最大ひびわれ間隔の実測値を示す。まず図-6より等曲げモーメント区間内のひびわれはほとんど交差部位置に発生していること、それから表-3よりAシリーズとBシリーズを比べると、平均ひびわれ間隔で約1.7倍、最大ひびわれ間隔では格子間隔の倍数となり、約2倍の差が認められる。これらのことから、本実験の範囲内では、ひびわれ間隔に及ぼす格子間隔の影響は支配的であると言える。すなわち、ひびわれ間隔の最大値は格子間隔の2倍を越えることはないから、格子間隔が小さいほどひびわれ分散性はよくなる。そのメカニズムは既に著者らによって検討されていたが[1]、本実験ではその検証ができたと言える。なお、CFRPロッド径の細い供試体A1の最大ひびわれ間隔は格子間隔の2倍を越えているが、

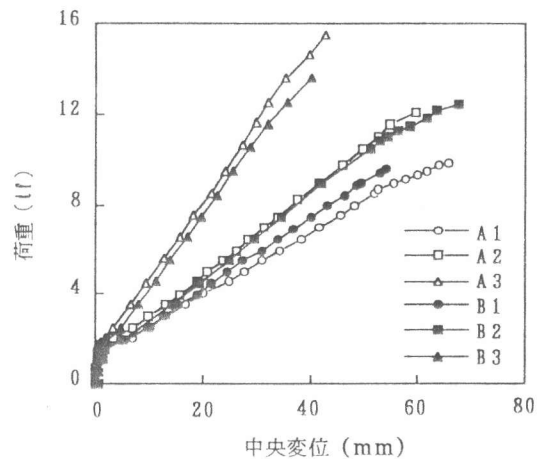


図-3 荷重-変位関係

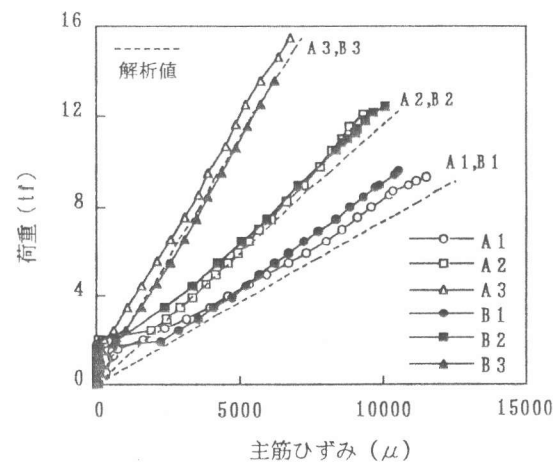


図-4 荷重-主筋ひずみ関係

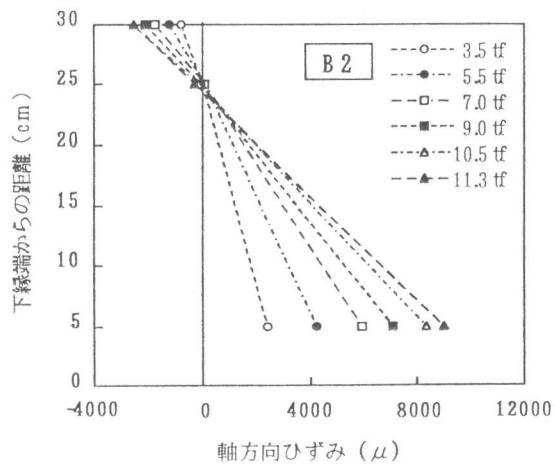
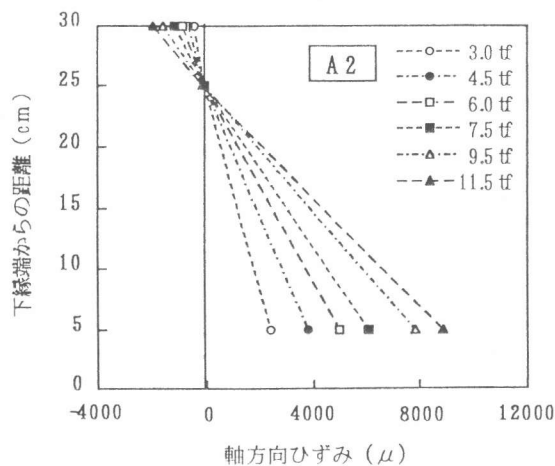


図-5 断面ひずみ分布

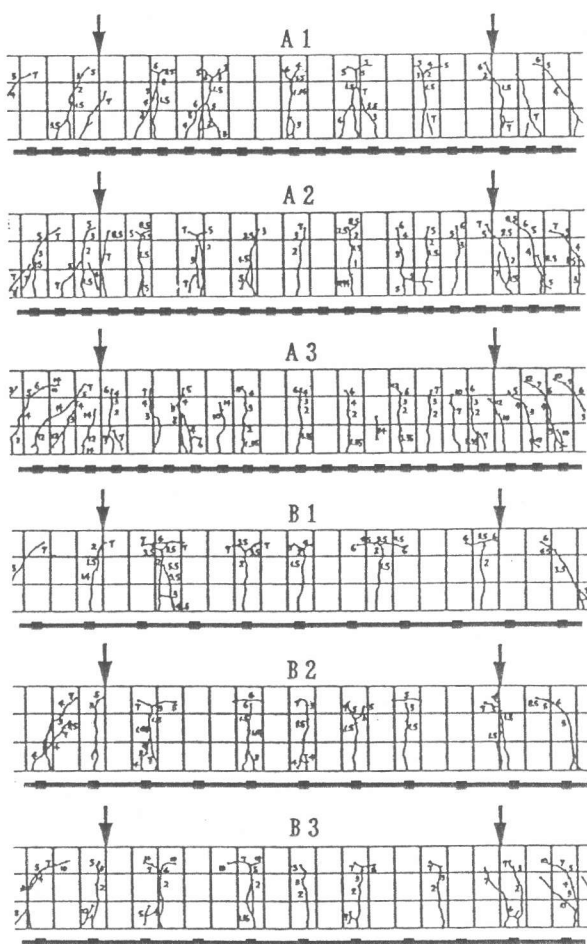


図-6 ひびわれパターン

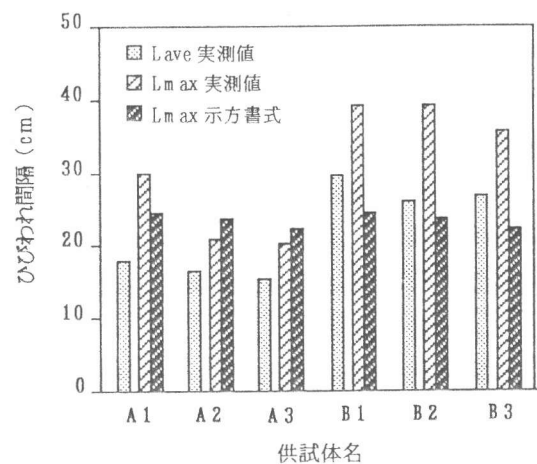


図-7 ひびわれ間隔の実測値と示方書式の比較

これは、ある一定のかぶりに対しひびわれ間隔は格子間隔に影響されるほか、交差筋の径にも関係すること、すなわちロッド径が細すぎると、交差筋は十分に機能できないことを示唆している。図-7にひびわれ間隔の実測値と土木学会コンクリート標準示方書の算定式[3]（以下 示方書式と記す）による算定値の比較を示す。示方書式の適用については、付着性状を表す k_1 の値を定める必要があるが、CFRPロッドの付着性状は異形鉄筋に

比べ低いことから普通丸鋼と同じ1.3を使用した。図-7より、示方書式ではAシリーズ（A1を除く）をやや大きく算定しているが、Bシリーズをかなり過小評価している。これは、示方書式ではこのような格子間隔で付着性状が異なるものを適切に評価できないことを示している。

図-8に荷重-ひびわれ幅の関係を、図-9にひびわれ幅-主筋ひずみの関係を示す。ここでもひびわれ間隔で認められたものと同じ傾向が見られ、示方書式では対応が難しい。特に図-9では、AシリーズとBシリーズの挙動がはっきりと二つのグループに分かれ、ひびわれ間隔に及

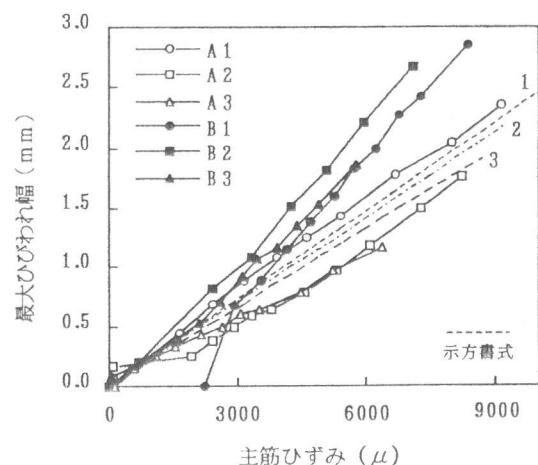
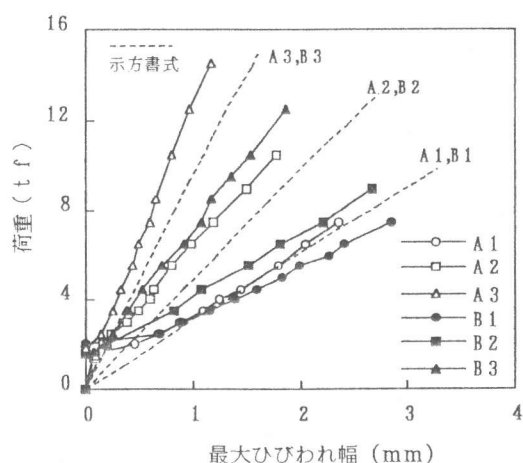
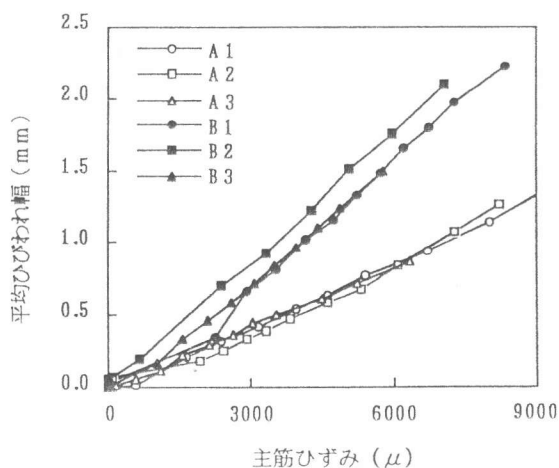
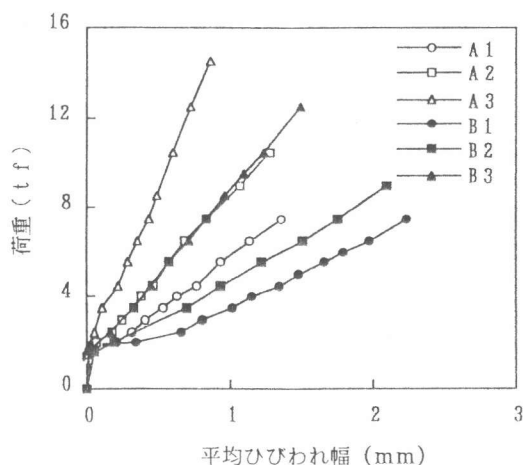


図-8 荷重-ひびわれ幅関係

図-9 ひびわれ幅-主筋歪関係

ばす格子間隔の影響がそのままひびわれ幅に現れている。

3.3 たわみ

図-10では実測の荷重-たわみ曲線を示すとともに、幾つかの算定方法と比較した。実測値の傾向として、主筋比が大きいほど、曲線の勾配(曲げ剛性)が大きくなるが、格子間隔の違いによる相違は認められなかった。A、Bシリーズのひびわれ間隔がそれほど違うにも関わらず、図-4のひずみおよび図-10の変位は同じ傾向を示すことから、A、Bシリーズで付着性状に大差がないと推測できる。またたわみの算定方法として、示方書式の方法、Bransonの換算断面二次モーメント4乗式を用い各断面の曲率をはり全長に渡って数値積分する方法、およびコンクリートの引張強度を無視する方法の三つを示した。たわみの実測値と算定値を比較すると、主筋比の小さいA1、B1は比較的良好一致しているものの、主筋比が大きいものほど、荷重が大きくなるにつれて、計算値に比べ実測たわみが大きくなっている(A2, 3、B2, 3)。この原因として、ひびわれ部での変形の局所化、圧縮域コンクリートの塑性化、あるいは斜めひびわれの影響等が考えられるが、今後さらに検討する必要がある。

4. まとめ

格子間隔の異なる2次元格子状CFRPロッドを主筋に用いたコンクリートはりの曲げ性状に関して、本研究より得られた結果を要約すると、次のとおりである。

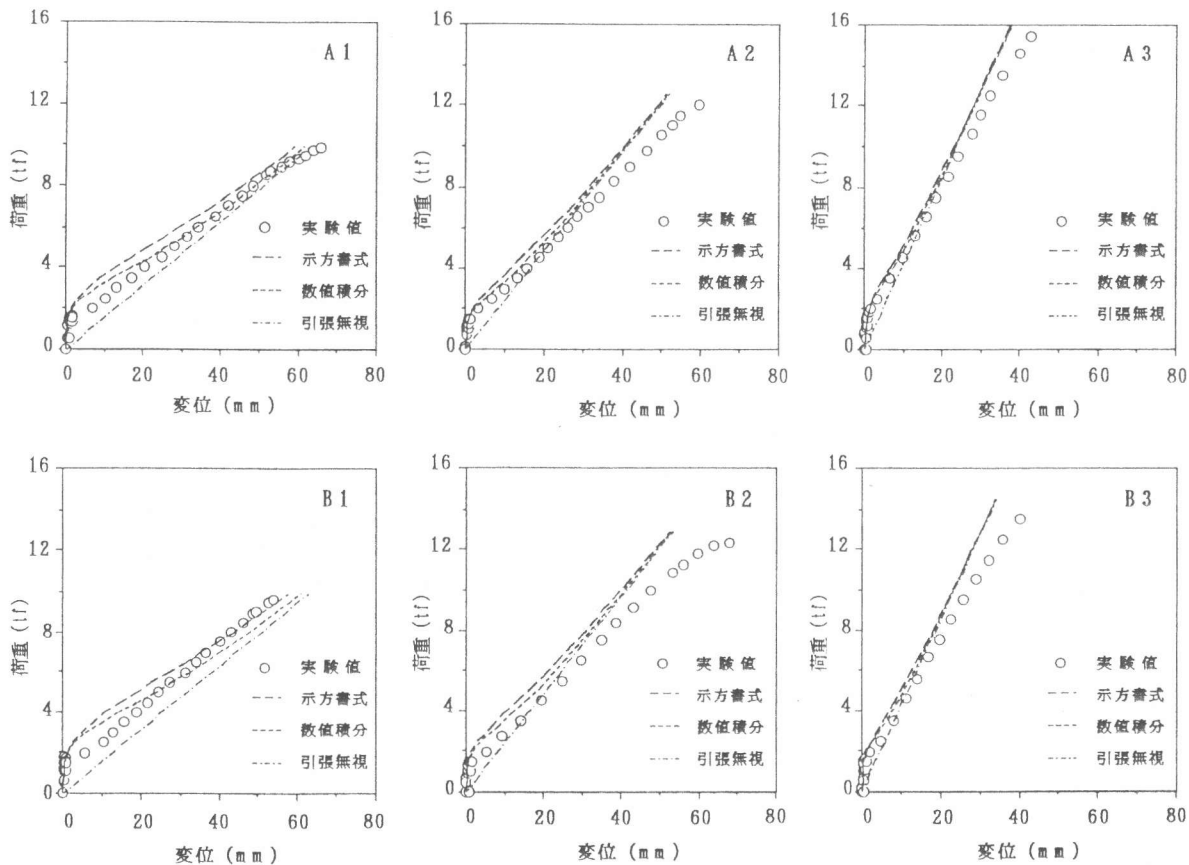


図-10 たわみに関する実測値と計算値の比較

(1) はりの曲げ耐荷力は格子間隔の影響を受けない。曲げ耐力は既往の曲げ理論で推定できるが、ひびわれ荷重は格子筋の存在によって低下し、示方書の方法では実測値を過大評価する。

(2) ひびわれ性状は格子間隔の影響を受け、格子間隔が小さいほどひびわれ分散性はよくなる。ひびわれ間隔および幅の評価について、示方書の式のままでは適用が難しい。

(3) はりのたわみは格子間隔の影響を受けないが、既往の算定方法では実測値を過小評価する恐れがある。

謝 辞

本研究は文部省科学研究費補助金（総合研究(A)、課題番号04302040、代表者：角田與史雄 北海道大学教授）の一部を受けて行ったものである。また、格子状CFRPロッドは清水建設から提供して頂いた。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 趙 唯堅・丸山久一・山本康之・清水敬二：FRPロッドを主筋に用いたコンクリートはりの曲げひびわれ性状、土木学会連続繊維補強材のコンクリート構造物への適用に関するシンポジウム論文集、pp.123-128、1992.4
- 2) 趙 唯堅・丸山久一・清水敬二・大高昌彦：多段配筋を有するRCはりの曲げひびわれ性状、コンクリート工学年次論文報告集15-2、pp.365-370、1993
- 3) 土木学会：コンクリート標準示方書（設計篇）、1991