

論文

[1195] 曲げ成形部における連続繊維補強材の破壊基準に関する研究

兼松秀行\*1・上田多門\*2・角田與史雄\*3・今村晃久\*4

1. はじめに

連続繊維補強材（以下「FRP ロッド」）をはり部材のせん断補強筋として用いた場合に、FRP ロッドの曲げ成形部において、一軸引張強度以下で破断することが報告されている[1]。この現象の解明を目的とし、FRP ロッドの材質、曲げ半径、成形方法、およびコンクリート圧強度に着目した研究が行われている[2]。しかしながら、この現象はFRP ロッドの材料特性FRP ロッドとコンクリートとの付着性状、およびひび割れ位置と曲げ成形部との距離に密接関係していると考えられる。そこで本研究では、ひび割れ交差位置とFRP ロッドの曲げ成形部との距離、FRP ロッドのひずみ分布、および曲げ成形部におけるすべり変位に着目した実験を行った。さらにコンクリートとFRP ロッド間における付着すべり関係に着目した有限要素解を行い、実験的、解析的に検討した結果について報告するものである。

2. 実験概要

2.1 使用材料

使用したFRP ロッドは、アラミド繊維を組紐状に編み、樹脂を含浸させたものである。その公称直径は6mmであり、一軸引張強度および弾性係数は、それぞれ1280MPa、66GPaである。コンクリートは、早強ポルトランドセメントを用いた。粗骨材の最大寸法を25mm、単位水量を175kg/m<sup>3</sup>、細骨材率を45%とした。また目標コンクリート圧縮強度を35MPaとした。

2.2 実験供試体および方法

実験供試体は、図-1に示されるように、FRP ロッドのせん断補強筋がコンクリートはりに用いられた場合をモデル化したものである。本来、主筋のはいる部分には直径10mmの鉄筋を配置しているが、その影響は本研究では考えないこととした。ヒンジ、鋼板、鋼棒を経た引張荷重が、支圧板に伝わることによって、人工ひび割れが拡がり、引張荷重がFRP ロッドの曲げ成形部に伝達するようになっている。

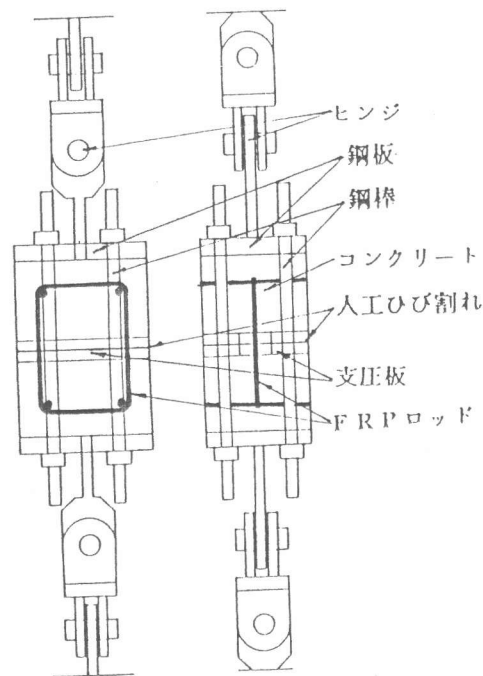


図-1 供試体図

供試体の両端には、偏心を防ぐためにヒンジを用い、

- \*1 三菱重工業(株) 広島製作所 (元北海道大学大学院)、工修 (正会員)
- \*2 北海道大学助教授 工学部土木工学科、工博 (正会員)
- \*3 北海道大学教授 工学部土木工学科、工博 (正会員)
- \*4 ドーピー建設工業(株) (正会員)

また人工ひび割れ部分は、グリースを塗った厚さ 0.5mmのプラスチック板によって完全に仕切っている。本実験では、100ton万能試験機を用いて、約200kgfずつ引張荷重を加えた。供試体は、人工ひび割れ位置とFRPロッドの曲げ成形部までの距離の異なるものを3体作製した。その供試体諸元を表-1に示す。FRPロッドのひずみ分布を詳細に調べるために、ひずみゲージは1つの測定点においてFRPロッドの内側、外側の2箇所に貼っている。またFRPロッドの曲げ成形部においてはすべり変位を測定している。その方法は、島らの方法[3]を参考に行った。実験の供試体寸法、人工ひび割れの位置、ひずみの測定位置、およびすべり変位の測定位置を図-2に示す。

表-1 供試体諸元

	$f_c$ (MPa)	L (cm)	P (kN)	E (%)	A (%)
実験1	36.0	11.0	71.4	111	113
実験2	32.8	6.0	64.0	100	106
実験3	32.2	1.0	26.0	41	81

$f_c$  : コンクリート圧縮強度  
 L : 直線部付着長さ P : 耐力  
 E : 強度保持率 (実験) A : 強度保持率 (解析)

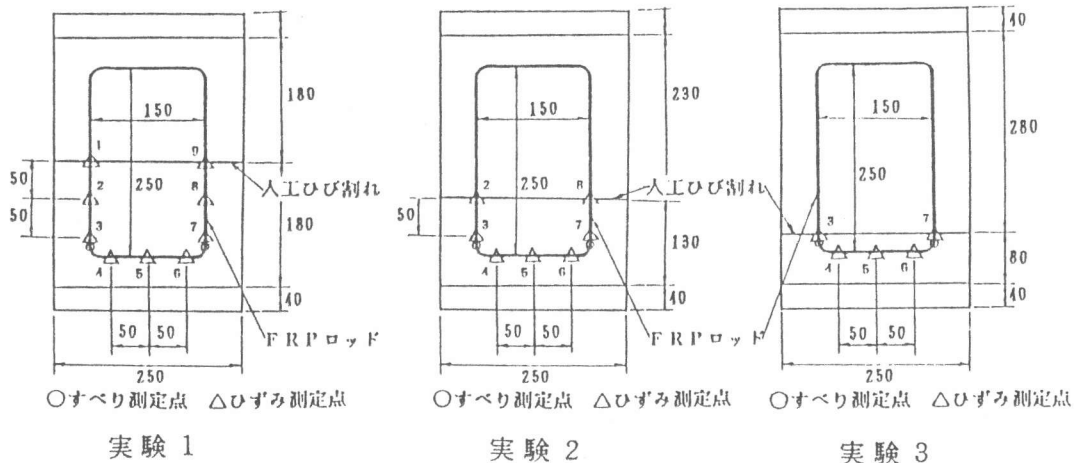


図-2 供試体図

### 3. 解析概要

曲げ成形部を有することによるFRPロッドにおけるひずみ分布、付着すべり関係への影響を把握するために、実験供試体に基づいて有限要素解析を行った。解析には、COMM2[4]を使用し、2次元平面応力問題として行った。FRPロッドの材料異方性およびFRPロッドとコンクリートとの付着すべり関係について考慮できるように修正を行った。

#### 3.1 解析供試体および諸元

有限要素解析で用いた要素分割図の一例を、図-3に示す。実験供試体における支圧板部分に強制変位を与えることによって、解析を行っている。また解析に用いたFRPロッドの材料定数は、表-2に示すもの[5]であり、その方向の定義を図-4に示す。ただし、T方向弾性係数、せん断弾性係数およびポアソン比の値は、一般的なアラミド繊維とエポキシ樹脂の一方方向性複合材料の数値であり、FRPロッドについて計測されたものではない。解析は、FRPロッドのあるガウス求積点がL方向に関して引張ひずみが破壊に達した時点で終了させた。

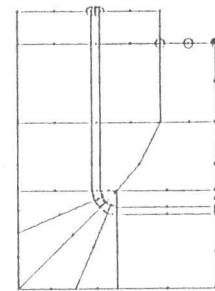


図-3 要素分割図

表-2 材料定数

elastic moduli (GPa)	L	66.0
	T	5.5
shear modulus (GPa)		2.1
Poisson's ratio		0.30

### 3. 2 付着すべり関係

鉄筋とFRPロッドでは、弾性係数および表面性状が異なるために、コンクリートとの付着すべり関係は異なる。そこで本解析では、付着すべり関係として、菅らによって行われた実験[3]におおよそ整合するような式(1)を考え、FRPロッドとコンクリートの間のボンドリンク要素の剛性として用いることとした。またひび割れ部分よりFRPロッドの直径の5倍の区間で付着の乱れを考慮している。

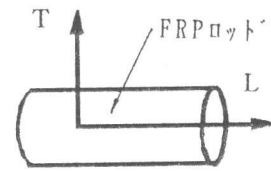


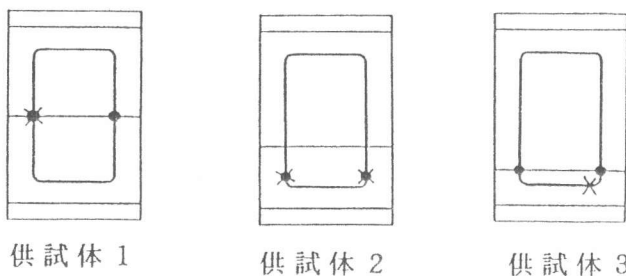
図-4 方向定義

$$\tau = 0.65 (1 - \exp(-30s^{0.9})) \quad (\text{MPa}) \quad (1)$$

$\tau$  : 付着応力、 $s = S/d$ 、 $S$  : すべり量、 $d$  : ロッド径

### 4. 実験および解析結果

実験および有限要素解析によって得られたFRPロッドの曲げ成形部の耐力および強度保持率(耐力/一軸引張強度)を表-1に示す。また実験および解析における破断箇所を図-5に、実験における破断形状を図-6に示す。解析において、FRPロッドの破断は、あるガウス求積点においてL方向の引張ひずみが破壊に達した点で定義した。曲げ成形部までの付着長さの最も長い実験1については、FRPロッドは人工ひび割れが交差する部分で一軸引張強度以上で破断したのに対して、実験2においてはFRPロッド曲げ成形部直前の直線部において、実験3では曲げ成形部直後の直線部で破断している。実験1、2については、強度保持率、破断箇所ともに解析結果とおおむね一致している。しかしながら実験3については、強度保持率は著しく低下し、その破断箇所も異なっている。以後、実験結果についてはFRPロッドの破断側に着目し、その結果を示すものとする。



● 解析による破断位置 × 実験による破断位置

図-5 破断箇所



図-6 破断性状

#### 4. 1 FRPロッドのひずみ分布

実験におけるFRPロッドのひずみ測定点における引張荷重とひずみ(内側測定値と外側測定値の平均値)の関係を図-7に示す。また、有限要素解析によって得られたFRPロッドの繊維水平方向のひずみと引張荷重の関係を図-8に示す。供試体1、2においては、解析値はおおむね実験値の傾向を捉えている。しかしながら、供試体3については、解析と実験ではひずみの増

加の傾向も異なり、破壊箇所、耐力等も異なる。その原因としては、ひび割れ部分と曲げ成形部までの距離が非常に短いために、偏心、ねじれが起き易いことによると考えられた。実際の部材中においてもその可能性は有り得る。つぎにFRPロッドの内側ひずみ測定値と外側ひずみ測定値の差は、曲げ成形部直前のひずみ測定点（点 3, 7）および直後のひずみ測定点（点 4, 6）にお

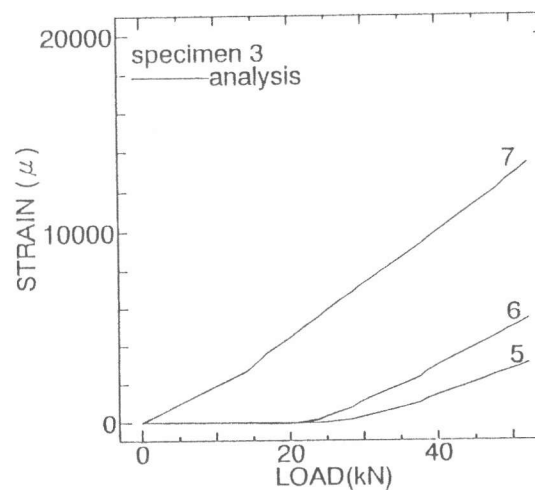
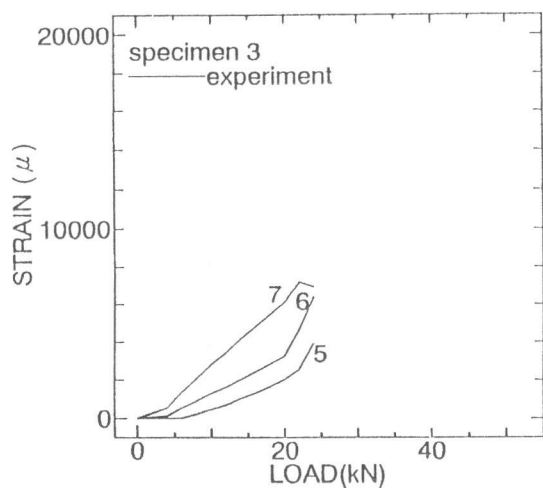
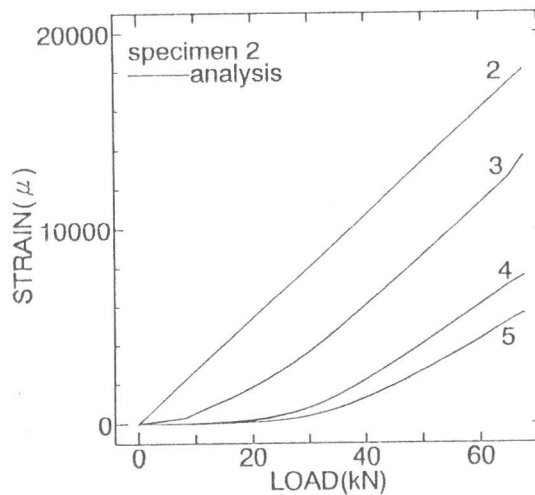
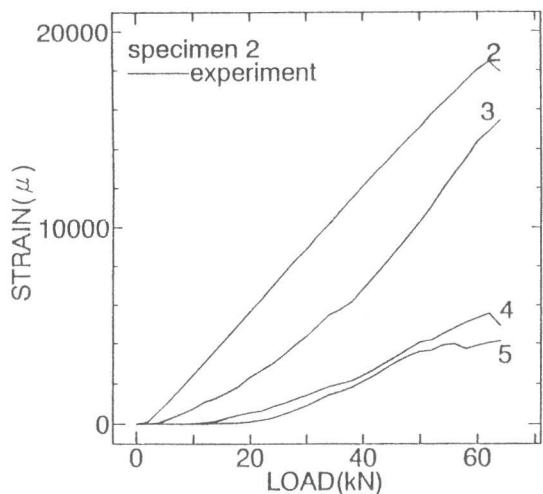
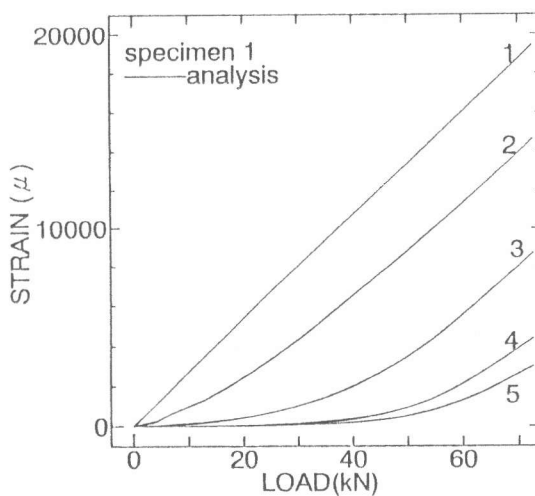
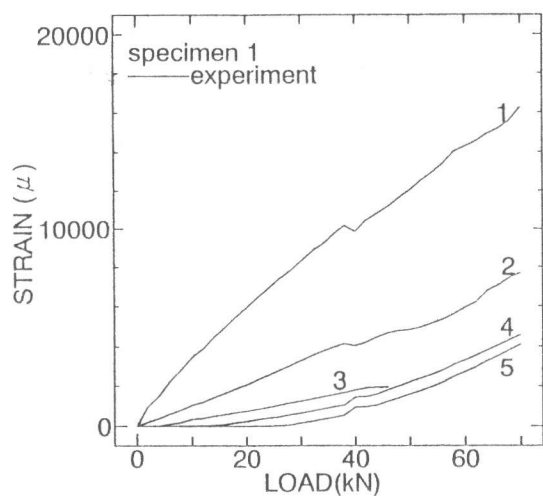


図-7 引張荷重-ひずみ関係  
(実験)

図-8 引張荷重-ひずみ関係  
(解析)

いて実験、解析ともに観察された。直前のひずみ測定点においては内側のひずみ測定値が外側のひずみ測定値に比較して大きく、また直後のひずみ測定点においてはその反対の現象が観察された。その原因は、曲げ成形部の内側と外側とで異なる付着性状を有しているか、もしくは曲げ成形部の内側に作用する支圧応力による影響が考えられる。そこで破壊に大きな影響を与えると考えられる直前のひずみ測定点のひずみの値と引張荷重との関係を図-9に示す。供試体2、3については、解析結果では内側の引張ひずみのみが破壊レベルに至っている。全供試体を通じて解析値に徐々にひずみがあらわれるのに反して、実験値におけるひずみの差は、引張荷重伝達直後から差があらわれはじめ、その比率の変化は一定でおおむね2.5~3倍である。また他のひずみ測定点では、FRPロッドの内側と外側におけるひずみの顕著な差は観察されなかった。

#### 4.2 FRPロッドの付着応力

各ひずみ測定点による値から、それぞれの区間平均付着応力の計算を行った。その結果を区間平均付着応力と引張荷重の関係として図-10に示す。供試体2については付着応力の傾向を非常によくつかんでいるが、供試体3についてはその傾向は異なる。また実験では、曲げ成形部においてすべり変位を測定しているが、すべり量は破断直前までは非常に小さい。とくに、実験3においては破断直前に急激に滑り出している。これは付着切れなどによって急激にすべり破断に至った可能性が考えられる。

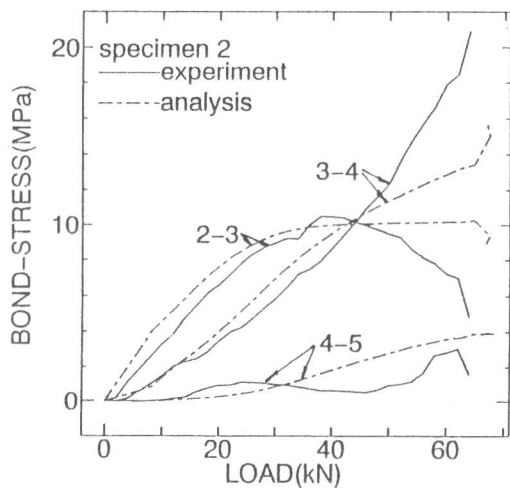
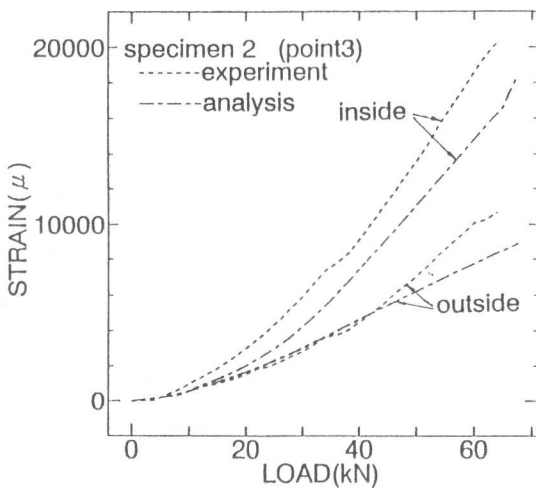
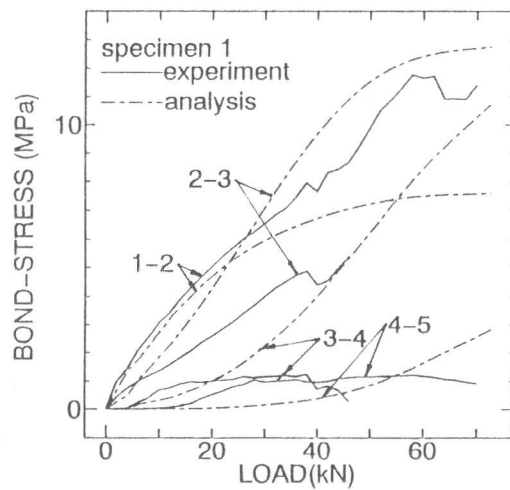
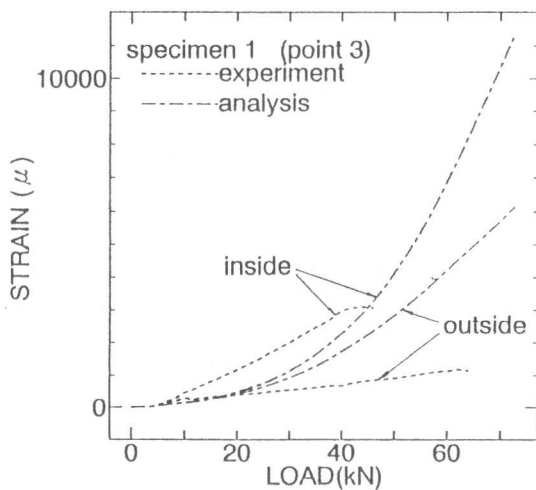


図-9 引張荷重-ひずみ関係

図-10 引張荷重-付着応力関係

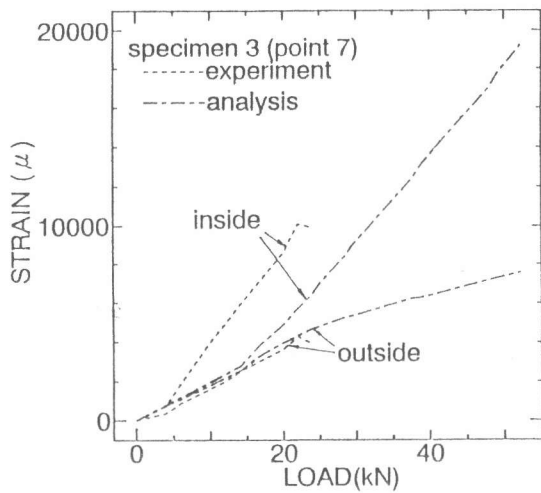


図-9 引張荷重-ひずみ関係

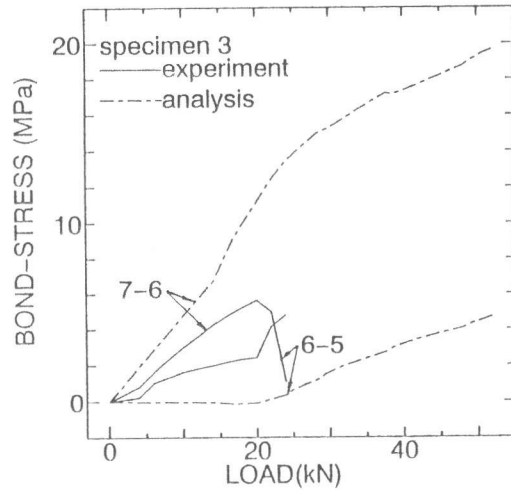


図-10 引張荷重-付着応力関係

## 5. まとめ

本研究より得られた結果を整理すると以下のようなになる。

- (1) 付着すべり関係、材料異方性を考慮した有限要素解析により、曲げ成形部のひずみ分布および付着性状をおおよそ捉えることができたと考えられる。
- (2) 実験および解析を通じて曲げ成形部直前における外側のひずみに比較して内側のひずみが大きい傾向が表れた。しかしながら解析値はその傾向が徐々に表れるのに比べ、実験値ではその差が引張荷重が作用した時点から顕著に表れる。
- (3) ひび割れ交差部とFRPロッドの曲げ成形部との距離が短い場合、付着長さが長い場合と異なり、曲げ成形部直後で破断し、著しい耐力低下が観察された。よって、はり部材中の曲げ成形部の破断は、せん断補強筋と斜めひび割れとの交差位置に大きな影響を受けると考えられる。

## 謝辞

本研究を行うにあたり、徳島大学 島弘助教授、北海道大学 木村勉技官、北海道大学大学院 佐藤靖彦氏には多大な助言、助力を得た。ここに深く謝意を表す。

## 参考文献

- [1] 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、コンクリートライブラリー72、1992
- [2] 丸山武彦・本間雅人・岡村 甫：FRPロッドの曲げ加工部の引張耐力に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 12、pp. 771-776、1990
- [3] 菅 哲治・島 弘・本間雅人：片引き試験による連続繊維補強材の局所付着応力-すべり関係、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 15、pp. 859-864、1993
- [4] 前川宏一・二羽淳一郎・岡村 甫：鉄筋コンクリート用解析プログラム「COMM2」、第2回RC構造のせん断問題に対する解析的研究に関するコロキウム論文集、pp. 79-86、1983
- [5] J.R. Vinson and R.S. Sierakowski : The Behavior of Structures Composed of Composite Materials, Martinus Nijhoff Publishers, 1986