

論文

[1138] 組紐状FRP ロッドによるスパイラル筋を用いたRC 梁の
曲げ・せん断性状

正会員○三上 浩 (三井建設土木技術部)
正会員 加藤正利 (三井建設土木技術部)
正会員 竹内 光 (三井建設技術研究所)
田村富雄 (三井建設技術研究所)

1. はじめに

最近、高強度、軽量で耐食性や非帯磁性に優れた各種新素材を用いたFRPロッドをRC、PC構造物の曲げ・せん断補強に用いる研究が盛んに行われている。筆者らも、組紐状AFRPロッドをPCプレテンション部材へ適用するための基礎的研究¹⁾²⁾を行って来た。本研究はアラミドや炭素繊維製の組紐状FRPロッドをスパイラル状に成形したせん断補強筋をRC梁に適用した時の曲げ・せん断性状について実験的に検討したものである。FRPロッドをRC梁の曲げ・せん断補強筋として用いた研究には寺田他³⁾や辻他⁴⁾の研究がある。これらの研究ではFRPロッドを格子状に成形して使用しており、またロッドとコンクリートとの付着機構およびロッドに用いられた繊維素材等が本研究とは異なるため、曲げ・せん断性状も異なることが予想された。

この種のFRPロッドをせん断補強筋として用いる場合には以下の4つの留意点があると思われる。1つはFRPロッドの破断強度が10000(kgf/cm²)以上の高強度である点、次に弾性係数やコンクリートとの付着追随性が従来の異形鉄筋と異なること、さらに連続繊維を用いるためにせん断補強筋の形状が特異なものとなることである。この中で、高強度鉄筋をせん断補強筋に用いた研究としては福原、黒正⁵⁾の研究があり、高強度鉄筋がある条件下では十分にせん断耐力を増加させることが報告されている。以上の観点から、本研究ではせん断補強筋の材質(鉄筋、アラミド、炭素繊維)と表面状態(異形、FRPロッド表面が砂付き、砂無し)および形状(スパイラル、シングルスターラップ)をパラメータとした供試体を製作し、静的な荷重状態におけるRC梁の曲げ・せん断性状を比較検討した。

2. 使用した補強筋とコンクリートの力学的諸特性

表-1 スパイラル筋の諸特性

2.1 組紐状FRP製スパイラル筋

組紐状FRP製スパイラル筋の諸特性を表-1に示す。スパイラル筋はアラミド繊維製と炭素繊維製の2種類で、内のり寸法は各々200*250mmとし、ロッド表面に5号珪砂を接着させたものと無処理のものがある。表中のSは砂付きであることを示す。なお強度と弾性係数は試験片3本の引張試験結果の平均値であり、試験時のロッドの定着は樹脂定着とした。ロッドの断面形状は繊維の織りかたを従来の円形状の組紐ロッド製作時と変えて平織りとしたため小判型である。これは、スパイラル筋のコーナー部が扁平になり強度上の弱点となるのを極力抑えるためである。また、断面積は比重を基に算出した。

項目	呼称	
	K, KS	C, CS
繊維種別	アラミド	炭素繊維
断面積 (cm ²)	0.18	0.17
繊維含有率 (重量%)	50~52	48~50
引張強度 (kgf/cm ²)	1.46*10 ⁴	1.48*10 ⁴
弾性係数 (kgf/cm ²)	0.72*10 ⁶	1.10*10 ⁶

2.2 曲げ補強筋およびスターラップ 表-2 曲げ補強筋とスターラップの諸特性(単位: kgf/cm²)

曲げ補強筋とスターラップの諸特性を表-2に示す。降伏点と引張強度および弾性係数は試

	材質	断面積 (cm ²)	降伏点	引張強度	弾性係数
曲げ補強筋 D22	SD35	3.87	3.47*10 ³	5.40*10 ³	1.93*10 ⁶
スターラップ D6	SD30	0.32	3.20*10 ³	5.92*10 ³	2.02*10 ⁶

験片3本での引張試験結果の平均値である。ただし、D6の降伏点は引張試験では明瞭に把握できなかったため規格値を示した。

2.3 コンクリート

粗骨材の最大寸法は10mmとし、早強セメントを使用して1週強度が240(kgf/cm²)を目標とした。粗骨材は鬼怒川産で、

細骨材は鹿島産の陸砂である。コンクリートの配合と力学的諸特性を表-3、表-4に示す。

3. 実験概要

3.1 供試体の種類

全供試体の下端筋にD22を3本使用し、せん断補強筋のみを変化させた。せん断補強筋として組紐状FRP製スパイラル筋を用いたものが4体と、D6スターラップで補強したものの1体と、無補強の1体の合計6体である。補強筋のピッチはすべて6.25cmである。表-5に供試体の一覧を示す。

3.2 供試体形状寸法および荷重方法

供試体の形状寸法を図-1に示す。荷重位置は純スパンを3等分した位置での2点荷重とし、加力は一方向単調荷重とした。梁の有効高さ(d)に対するせん断スパン(a)の比は2.0である。なお、荷重点と支点には拘束力が小さくなる様にローラーを挿入した。ここで、供試体の断面寸法、補強筋量、せん断スパン比等は、せん断補強筋の無いN供試体ではせん断破壊、D6スターラップで補強したDでは

曲げ破壊する様に決定した。FRPスパイラル筋でせん断補強した供試体はその補強効果が不明のため、せん断破壊と曲げ破壊の両方の破壊形式が想定される。そこで、本実験計画はNおよびD供試体の試験結果に

基づいて、FRPスパイラルせん断補強筋がRC梁の曲げ性状やせん断性状に与える影響を比較検討できる様にした。

3.3 測定項目と測点数および測定位置

測定項目と測点数は①梁の変位量(14点)②曲げ補強筋のひずみ(13点)③せん断補強筋のひずみ(K, KSで20点, その他で16点)④梁中央のコンクリート圧縮縁のひずみ(2点)⑤せん断ひび割れ幅(4点)である。図-2に梁の変位と曲げおよびせん断補強筋ひずみの測定位置を示す。なお、(c)のせん断補強筋ひずみの測定位置は梁の片側のみについて示したが図中の測点S-1からS-8は軸方向左右対称に設けており、これをS-13からS-20と表す。

表-3 コンクリートの配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	スラブの範囲 (cm)	空気量の範囲 (%)	水比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量(kg/m ³)				
					水 W	セメント C	細骨材 s	粗骨材 G	AE減水剤
10	15~16.6	4~6.7	54	45.2	165	306	813	994	0.76

表-4 コンクリートの力学的諸特性(材令7日~10日)

圧縮強度	弾性係数	引張強度	曲げ強度
180~199	1.79*10 ⁵ ~ 1.88*10 ⁵	17~18	19~21

(*単位はすべて kgf/cm²である)

表-5 供試体の種類

供試体の呼称	補強筋の材質	表面処理状態	補強筋の形状	補強筋のピッチ
K	アラミド	砂無し	スパイラル	6.25cm
KS	アラミド	砂付き	同上	同上
C	炭素繊維	砂無し	同上	同上
CS	炭素繊維	砂付き	同上	同上
D	D6	---	スターラップ	同上
N	無補強	---	---	---

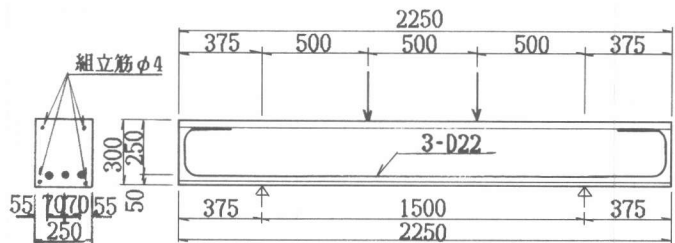


図-1 供試体の形状寸法 (単位: mm)

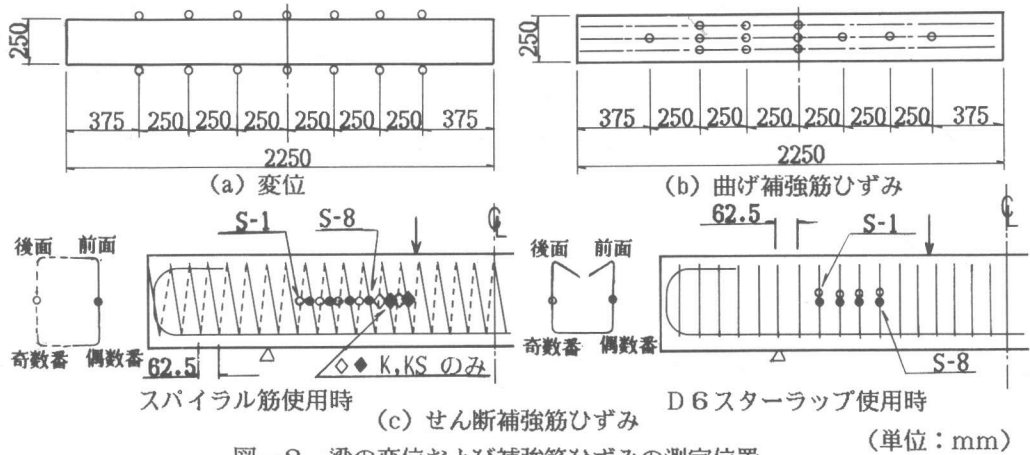


図-2 梁の変位および補強筋ひずみの測定位置

4. 実験結果および考察

4.1 ひび割れ図

図-3に各供試体のひび割れ図を示す。FRP筋の一断面の隅角部でロッドの樹脂が白色を示し脆弱化が見られたKSとせん断補強筋の無いNはせん断破壊した。共に载荷点から約45°の方向に大きなせん断ひび割れが発生している。特に、N供試体ではひび割れが支点を越えて主筋にそって水平方向に大きく進展し、付着割裂の状況を示している。KSではその傾向が顕著ではなく、スパイラル筋で鉄筋およびコンクリートを拘束した効果が出現したものと考えられる。また、曲げ破壊した供試体のせん断ひび割れは主に载荷点から支点を結ぶ方向に進展しており、せん断破壊したKS、Nとは明らかに異なることが判る。次に、KS、Kの曲げひび割れの間隔はCS、C、Dに比べて大きい様に見受けられ、せん断補強筋の違いが曲げひび割れ性状に影響を与えることも考えられる。

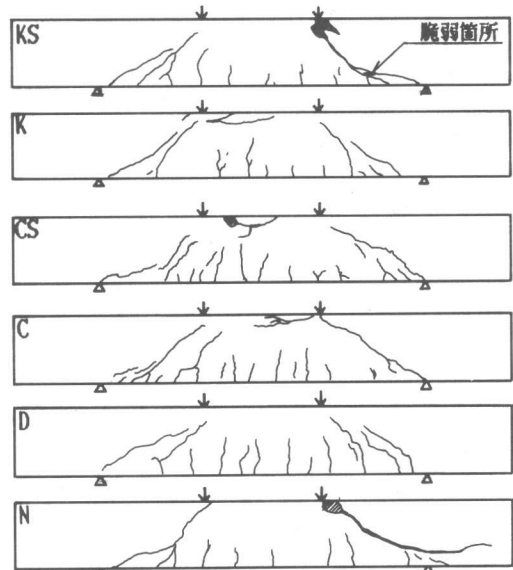


図-3 ひび割れ図

4.2 梁の変位

図-4(a)に示す様に、梁の中央部変位量は曲げせん断ひび割れが発生した14tonf程度から供試体間に差が始める。特に、せん断破壊したNは同一荷重レベルで他の供試体よりも変位量が大きくなり、十分な変形性能を発揮出来ずに脆性的に破壊している。KSも終局時にこの傾向が見られるが30tonf程度までは曲げ破壊したK、CS、C、Dと同様な変位曲線を示し、せん断補強筋の違いはKSの様な場合を除いて梁の中央部変位量に大きな影響をおよぼさないと考えられる。

図-4(b)に示す様に、KS、CS、Dの変位分布は24

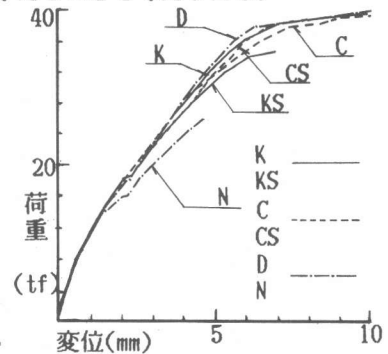


図-4(a) 荷重-変位関係

tonfまでは極めて類似し、せん断ひび割れの発生や進展に起因する変位の偏りが少ない。これに対して、せん断補強筋の無いNではすでに変位の偏りが見受けられ、これはまたKSでも34tonfで見受けられる。なお、各供試体で梁の前・後面における変位量の差を比較した結果、その差は小さく、せん断補強筋の補強角度の差は梁の前・後面の変位差には大きな影響をおよぼさないものと考えられる。

4.3 曲げ補強筋のひずみ分布

曲げ補強筋のひずみ分布を図-5に示す。KS, CS, Dのひずみ分布は低荷重領域から終局近くまで類似し、下に凸の梁中央で軸対称な分布を示している。これに対して、せん断破壊したNでは24tonf時に片側支点付近で大きなひずみを示し、せん断ひび割れの発生および進展によって梁の曲げ性状が大きく変化したことを示している。ただし、KSにも34tonf時にこの傾向が見られる。この様に、せん断破壊した供試体の終局付近の状態を除いてはせん断補強筋の違いが曲げ補強筋のひずみ分布に与える影響は少ないものと思われる。なお、載荷点と支点の間における梁の前面側と後面側の曲げ補強筋のひずみ差はスパイラル筋を使用したものとスターラップを使用したもので大差が無かった。これから、せん断補強筋の補強角度の差は曲げ補強筋のひずみに大きな影響を与えないと考えられる。

4.4 せん断補強筋のひずみ分布

図-6(a), (b)の隣接する測点のひずみ差、すなわち梁の前面側と後面側のせん断補強筋のひずみ差はアラミド繊維では比較的大きいことが判る。これに対して炭素繊維ではその差は小さく、せん断補強筋の弾性係数が小さなものほどせん断補強筋の補強角度の影響が大きいことが判る。なお、D 6スターラップではほぼ一定のひずみが広範囲に発生していることが判る。

次に、図-6(a)から砂を接着させたKSとCSにはひずみが局部的に大きくなる測点が存在することが判る。これに対して図-6(b)の砂を接着していないK, Cのひずみの分布図からはアラミド繊維および炭素繊維使用時でもひずみの局部的集中は見られないことが判った。

せん断補強筋のひずみ量はひび割れ発生位置に対するゲージ貼付け位置によって異なることが予想されるが、本結果からはロッド表面に砂を接着させることは曲げ補強時の様に直線状で使用する時¹⁾²⁾とは異なり、応力が集中する原因になることも考えられる。これは使用したFRPせん

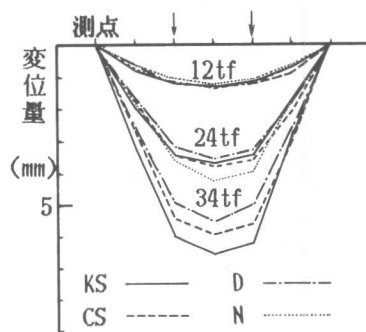


図-4 (b) 梁の変位分布

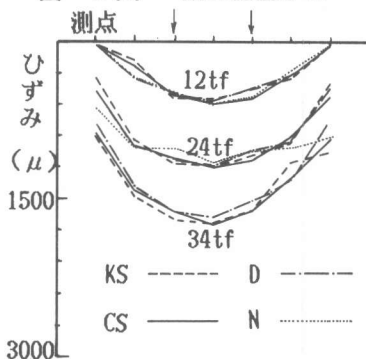


図-5 曲げ補強筋のひずみ分布

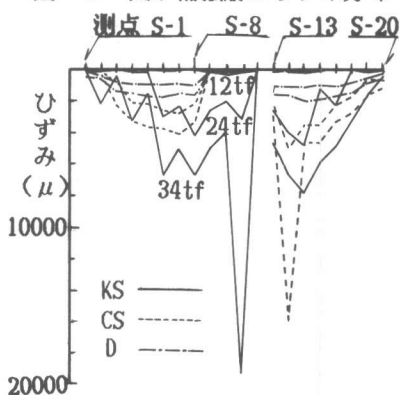


図-6(a) せん断補強筋のひずみ

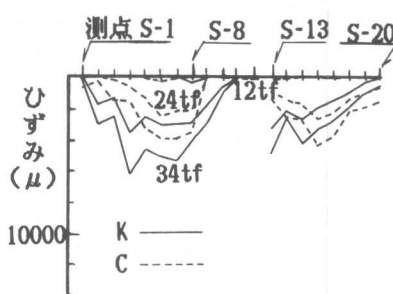


図-6(b) せん断補強筋のひずみ

断補強筋の断面積が $0.17\sim 0.18\text{cm}^2$ と非常に小さく、ロッド表面の付着状態の影響を極めて受け易いことが要因であると思われる。またこれには補強筋の角度とひび割れ角度の関係や曲げ補強材とスパイラル補強筋の定着機構の差異等も関係しているものと推定されるが明確ではなく、今後はスパイラル筋の梁高方向のひずみ分布も調査する必要があると考えられる。なお、補強筋の隅角部で脆弱化が見られたK Sの測点S-15断面の34tonf時におけるひずみは約 7800μ である。

4.5 部材破壊時の各種実験量と破壊形式

部材破壊時における各種実験量と破壊形式の一覧を表-6に示す。表中の *印の値は荷重が34tonf時のもので、

表-6 部材破壊時の各種実験量と破壊形式 (ひずみ: μ)

それ以後ひずみは減少し破壊時には 8620μ であった。表から、曲げ破壊した供試体の終局耐力は $39\sim 40\text{tonf}$ であり、変位量も

供試体の呼称	K	KS	C	CS	D	N
終局荷重 (tonf)	39.4	34.7	39.4	38.9	39.9	26.1
中央部梁変位量 (mm)	10.1	7.4	11.0	8.7	10.4	5.0
中央部曲げ補強筋ひずみ	3000以上	1803	1888	3000以上	3000以上	1261
コンクリート圧縮ひずみ	3954	2052	3253	3242	4106	1275
せん断補強筋ひずみ	8027	17899	6019	*16007	4307	—
せん断ひび割れ幅 (mm)	1.4	2.0	1.9	1.2	0.5	1.4
破壊形式	曲げ	せん断	曲げ	曲げ	曲げ	せん断

$9\sim 11\text{mm}$ と供試体間の差異は比較的少ないことが判る。

また、せん断ひび割れ幅の最大値は同一繊維を使用した場合でも比較的差が大きいので、FRP全体で平均すると 1.6mm 程度となり、D6を使用した梁の値 0.5mm に比べて 3.2 倍大きい。

これはFRPの弾性係数の平均値が鋼材の弾性係数の 45% 程度であることに関連しているものと考えられる。

5. 曲げ耐力とせん断補強効果の検討

表-7で曲げ破壊した供試体の破壊荷重の実測値と計算値を比較した。計算方法は土木学会の標準示方書に準拠したが、コンクリートの圧縮強度と鉄筋の降伏点は表-2と表-4の値を用い、すべての安全係数は 1.0 とした。これより、曲げ耐力の実測値と計算値の比率はFRPを使用した梁で $1.21\sim 1.24$ 、D6を使用した梁では 1.24 であり、せん断補強筋の違いに関わらず同様な精度で曲げ耐力を推定できることが判る。また、これは前述した梁の荷重-変位関係と変位分布および曲げ補強筋のひずみ分布がFRPを使用した梁とD6を使用した梁で類似している点やせん断補強筋の補強角度による梁の前面側と後面側の変位差および曲げ補強筋のひずみ差に有意な差が無いこと等からも想定することが出来る。

表-7 曲げ耐力の比較 (tonf)

呼称	実測値①	計算値②	①/②
K	39.4	31.9	1.24
C	39.4	32.6	1.21
CS	38.9	31.9	1.22
D	39.9	32.2	1.24

次に、せん断力一定区間におけるせん断補強筋の実測平均ひずみ(s-1からs-8の平均)と曲げ補強筋の実測ひずみ差(載荷点と支点)から、せん断補強筋の補強効果をトラス理論に基づいて検討した結果を表-8に示す。検討はせん断補強筋の無いN供試体を除いた各供試体が比較し得る最大の荷重である 34tonf で行った。なお、検討用のせん断補強筋のひずみとしてS-1からS-8を用いたのは測点数と測定位置の違いおよび破壊形式の違いに関わらず、Nを除いた全供試体が極力同一の条件下で比較検討できる様にしたためである。

①はせん断補強筋の実測平均ひずみから求めた平均応力度であり、これから補強筋の形状や表面状態および断面積の違いに関わらず、各供試体のせん断補強筋がほぼ同様な応力状態にあることが判る。次にせん断スパン内における主鉄筋の引張力の差を補強筋のひずみ差②から求めたものが③である。斜め引張力の大きさは上記引張力の差からトラス理論にて求められ、この力をせ

せん断補強筋が負担して①の応力度が発生したと考えると、①の平均応力度を基に斜め引張力の水平方向成分④が求まる。これ

表-8 トラス理論に基づく補強効果の検討

供試体の呼称	K	KS	C	CS	D
せん断補強筋の応力度(kgf/cm ²) ①	2785	2310	2505	2840	2539
曲げ補強筋のひずみ差(μ) ②	738	799	686	766	851
②を基にした引張力の差分(tonf)③	16.5	17.9	15.4	17.2	19.1
①を基にした引張力の差分(tonf)④	16.1	13.4	13.8	15.6	25.7
④/③	0.98	0.75	0.90	0.91	1.35
D供試体の値を基準にした比率 ⑤	0.73	0.56	0.67	0.67	1.00

ら③、④は同じ値になるべきと思われるが、④/③に示す様に、FRPを使用した梁で平均的に0.9程度であるのに対してD6を使用した梁では1.35とその差は大きい。この一因として、ひずみの計測点数や位置の関係で厳密にトラス理論を適用できなかったことが挙げられる。しかし特に、D6において斜め引張力の負担量が大きいものに対して、それが曲げ補強筋のひずみ差に顕著に現れていないことが要因と考えられる。また、同一荷重段階での外力との力の釣り合いから斜め引張力の負担が小さいFRP筋を使用した梁のせん断補強筋のない状態でのコンクリートのせん断耐力VはD6を使用した梁に比べて大きいことが予想される。これは、せん断補強筋の違いにより主筋のダボ効果の出現量が異なることも有ることを示唆しているものと思われる。また、⑤に示す様にDの比率を基準にするとFRP筋を使用した梁では平均的に0.66程度となり、これはせん断補強筋による耐力の増加という観点でのD6に対するFRPのせん断補強効率を示すものと思われる。この大略値0.66がせん断補強筋の弾性係数だけに依存するものと仮定すると弾性係数比(FRPの弾性係数の平均値/鋼材の弾性係数)0.45の約1.5倍に相当する。

6. 結論

- (1) せん断補強筋にFRP筋を使用した梁とD6を使用した梁で、荷重-変位関係、変位分布および曲げ補強筋のひずみ分布はほぼ同様であった。
- (2) 補強筋の角度の差はせん断補強筋のひずみ量に影響を与える。
- (3) 組紐状FRPスパイラル筋に砂を接着すると局部的に応力が集中することも考えられる。
- (4) 鋼材に比べて低いFRPの弾性係数はせん断ひび割れ幅の大きさや主筋のダボ効果の出現量等に影響を与えることも考えられる。

今後は、せん断補強筋量やせん断スパン比およびせん断補強筋と主筋の材質を変化させて、せん断補強筋が梁の曲げ・せん断性状に与える影響を詳細に検討する必要があると考えられる。また、動的な載荷状態におけるせん断補強効果の確認実験も併せて必要であると思われる。

7. 参考文献

- 1) 三上浩, 林寿夫, 田村富雄: 組紐状AFRPロッドのPCプレテンション部材への適用に関する基礎的研究, プレストレストコンクリートvol.30, N0.5, Sept, 1988, pp35~40
- 2) 三上浩, 林寿夫, 加藤正利, 田村富雄: アラミド繊維による組紐状棒材を用いたPCばりの静的耐荷挙動, コンクリート工学年次論文報告集10-2, 1988, pp665~670
- 3) 寺田年夫, 鳥取誠一, 涌井一, 宮田尚彦: FRPをせん断補強に用いたRCはりの破壊性状について, コンクリート工学年次論文報告集10-3, 1988, pp541~546
- 4) 辻幸和, 斎藤等, 関島謙蔵, 小川広幸: FRPで補強したコンクリートはりの曲げおよびせん断性状, コンクリート工学年次論文報告集10-3, 1988, pp547~552
- 5) 福原正志, 黒正清治: 高強度せん断補強筋を用いた鉄筋コンクリート梁のせん断終局強度に関する実験研究, コンクリート工学年次論文報告集, 1980, pp447~480