

# 論文 斜張力が支配的な RC 梁の剪断抵抗性状に対するダボ作用の影響

柴田拓二\*1・城 攻\*2・後藤康明\*3・横山和明\*4

**要旨:** 斜張力が支配的なRC梁の剪断抵抗はアチ機構とトラス機構の重ね合わせによる事を既往の研究で明かにしてきた。本論文では、梁主筋のダボ作用が剪断抵抗機構に与える影響について実験的に検討した。ダボ作用は剪断初亀裂が発生した時点から機能すると考えられ、最大耐力まではトラス機構内に含まれるコンクリート圧縮束の局部的なスレに抵抗し、最大耐力以降には主筋自身の曲げ抵抗で耐力劣化を防ぐ抵抗要素として働くという結果を得た。

**キーワード:** 剪断抵抗機構、剪断補強筋、付着応力、ダボ作用、アチ機構、トラス機構

## 1. はじめに

斜め圧縮応力場が形成される通常の鉄筋コンクリート(以下、RC)構造部材のアチ機構やトラス機構で構成される剪断抵抗機構に関しては国内及び国外で数多くの研究がなされ、耐力推定式としては当研究室が提案した大野・荒川式の精度が高い。しかし、水平力を受ける高層建築物の端部にある基礎梁では、杭位置で基礎梁の底面近傍、柱位置で基礎梁の上面近傍において引抜力により剪断力が導入される為、斜め引張応力場で剪断力が伝達される事になる。現状では、このような部材でも斜め圧縮応力場を対象とした研究から導かれた既往の剪断耐力式を用いて設計しており、RC構造物の合理的な設計を行うためには適切な剪断耐力式を提案する必要がある。本研究はRC梁試験体を用いて斜め引張応力場が支配的となる加力形式により剪断破壊実験を行うもので、昨年までの成果としてこのような応力状態においても剪断抵抗機構はコンクリートによるアチ機構と剪断補強筋によるトラス機構で構成されることを示し、更に亀裂貫通後の梁主筋のダボ作用を単純累加する事で剪断耐力式を提案した[1, 2]。本論文は剪断伝達要素の一つであるダボ作用を詳細に検討することにより、斜め引張応力場が支配的な場合の剪断力伝達機構を解明することを目的としている。

## 2. 実験計画

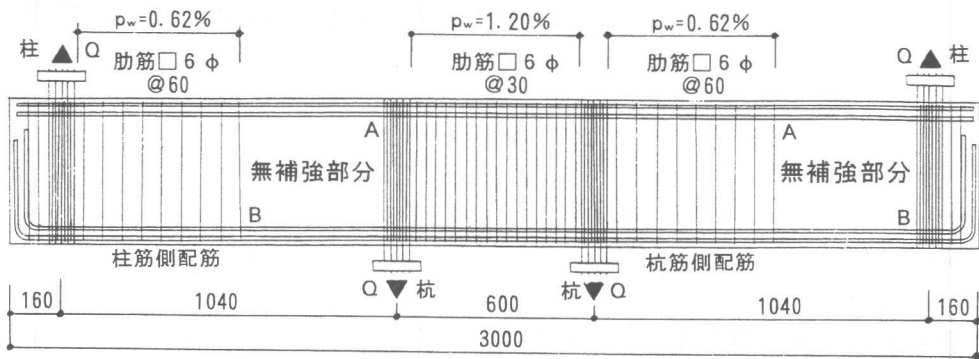
過去の研究により、斜張力が支配的なRC梁において、破壊面となる亀裂貫通位置における梁主筋のダボ作用が剪断抵抗要素として機能している結果を得た。そこで本論文では、圧縮・引張位置の梁主筋ダボ作用を個別に抽出し、剪断抵抗機構におけるダボ作用の影響を実験的に検討した。

表-1 実験変数一覧

試験体	位置	加力方法	ダボ除去	M/Qd	pt (%)	剪断補強筋位置 (p <sub>w</sub> %)
BST-31	西	S式(TT)	—	1.0	0.92	— (0.0)
	東	S式(TT)	圧縮	1.0	0.92	— (0.0)
BST-32	西	S式(TT)	—	2.5	1.63	杭筋側(0.62)
	東	S式(TT)	—	2.5	1.63	柱筋側(0.62)
BST-33	西	S式(TT)	引張	2.5	1.63	杭筋側(0.62)
	東	S式(TT)	圧縮	2.5	1.63	杭筋側(0.62)
BST-34	西	S式(TT)	引張	2.5	1.63	柱筋側(0.62)
	東	S式(TT)	圧縮	2.5	1.63	柱筋側(0.62)
BST-35	—	N式(TT)	—	1.0	0.92	柱筋側(0.62)
BST-34	西	N式(TT)	—	2.0	1.63	— (0.0)
	東	N式(TT)	—	1.5	1.63	— (0.0)

S式:単純梁加力 N式:逆対称加力 M/Qd:シアパン比  
TT:柱・杭引張 pt:軸鉄筋比 剪断補強筋位置は図-1

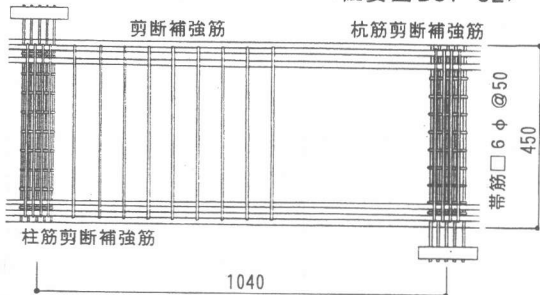
- \*1 北海道工業大学教授 建築工学科、工博(正会員)
- \*2 北海道大学教授 大学院工学研究科社会基盤工学専攻、工博(正会員)
- \*3 北海道大学助教授 大学院工学研究科社会基盤工学専攻、工博(正会員)
- \*4 大林組 工修(非会員)



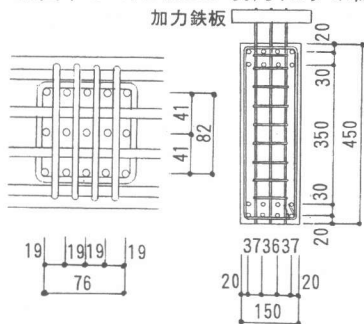
S式(TT)

<概要図BST-32>

※図中のA, BはBST-33, 34のダボ除去位置



<詳細図>



<柱・杭断面図>

<梁断面図>

単位[mm]

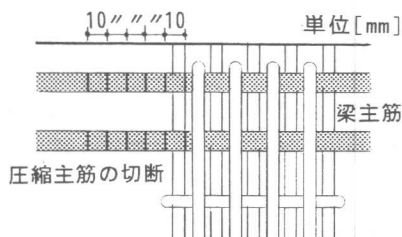
図-1 試験体配筋図

## 2.1 試験体概要

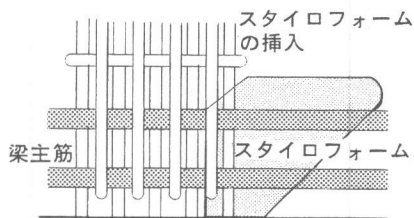
試験体は、水平力により建物の外柱に杭の引き抜き抵抗耐力を上回る引張力を生じて内柱の杭の引き抜き力で抵抗している基礎梁を想定している。実験変数はスパン比( $M/Qd=1.0, 1.5, 2.0, 2.5$ )、剪断補強筋配筋位置( $p_w=0.62\%$ )、無補強部分での圧縮・引張が $\sigma$ 作用の有無を設定し、表-1に示す6体(11試験分)を製作した。試験体は図-1に示すように仮想柱及び杭位置を加力点とし、単純支持梁2点集中加力に準じた(対称)加力方式を用いて梁の全せいに直線定着した柱筋と杭筋を引張加力するもの(S式TT加力)を基準として、逆対称加力方式で柱筋と杭筋を引張加力するもの(N式TT加力)を併せて行った。図-2に圧縮・引張が $\sigma$ 作用の除去方法を示す。

## 2.2 使用材料

梁主筋にD10、D13(SD345、SD700)、柱杭筋にD6(SD835)、梁筋及び柱杭帯筋に6φ(SR295)を使用した。コンクリートの設計基準強度は30MPaとし、細骨材に鶴川産砂5mm、粗骨材に常盤産砕石5~13mmを用い、早強 $\sigma$ ポルトランドセメントを使用して実験室で製作した。

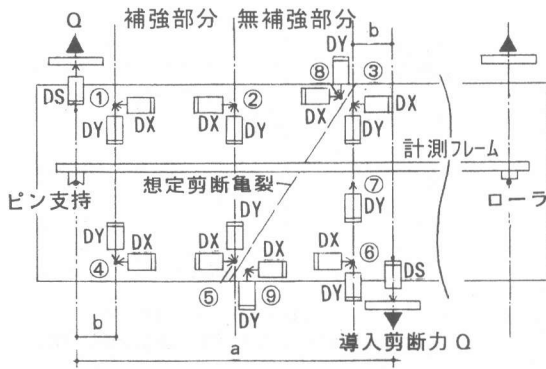


<圧縮ダボの除去>



<引張ダボの除去>

図-2 ダボ除去詳細図



a: シラスパン                      b: 柱(杭)幅の1/2  
 DX: 水平変位                      DY: 鉛直変位  
 [計測フレームから]  
 DS: 抜け出し変位                  Q: 梁剪断力  
 γ: 剪断変形角  
 [表-2の値は①③⑥④の4点の  
 変位から求めた値]  
 ズレ: ③-⑧圧縮ダボ位置  
       ⑤-⑨引張ダボ位置

図-3 計測概要図

### 2.3 加力方法

加力には3000kNクチュエータを用い片振り静的加力を行った。最大耐力までは荷重制御、その後は変形制御によって加力を行った。東西の試験部のいずれかの剪断変形角が $2, 4, 8 \times 10^{-3}$  radに達した時をそれぞれ1, 2, 3サイクル $\pi$ -クとし、それぞれ梁剪断力Qを10kNまで除荷する繰り返し加力を行った。また、単純梁加力形式では東西試験部のいずれかが終局耐力に達しなかった場合には、先に終局耐力に達した試験部分を鋼板により補強し、再実験により残りの試験部の最大耐力を確認した。

### 2.4 計測方法

図-3に変位計測法の概略を示す。梁と両仮想柱の中心線との交点でピンおよび

ローラー支持される計測フレームに対する相対変位で計測し、試験部分の剪断変形角 $\gamma$ は、計測フレームから計測される試験部分各4隅の標点の鉛直・水平相対変位量より求めた。更にダボ作用想定位置でも剪断亀裂を挟む標点の鉛直・水平相対変位量を計測した。また、梁主筋、肋筋、柱・杭筋にはそれぞれ歪ゲージを貼付して歪度を計測した。

表-2 耐力一覧

試験体	位置	$\sigma_c$	剪断初亀裂時			最大耐力時		
			Q	$\tau$	$\gamma$	Q	$\tau$	$\gamma$
BST-31	西	33.3	92.4	1.70	0.66	235	4.31	4.48
	東		92.4	1.70	0.75	267	4.81	16.10
BST-32	西	35.4	60.4	1.11	0.49	119	2.15	7.22
	東		60.4	1.11	-	147	2.67	7.67
BST-33	西	37.3	65.3	1.20	0.27	117	2.12	8.77
	東		45.7	0.84	0.43	166	2.87	3.38
BST-34	西	35.1	40.1	0.74	0.29	88.7	1.59	3.56
	東		40.1	0.74	0.29	118	2.12	2.50
BST-35	-	35.7	71.1	1.31	0.52	163	2.35	5.18
BST-36	西	37.6	55.0	1.01	0.52	179	3.29	25.80
	東		77.0	1.41	0.59	174	3.19	4.71

$\sigma_c$ : 実験時コンクリート強度[MPa]       $\tau$ : 剪断応力度[MPa]

Q: 剪断力[kN]       $\gamma$ : 剪断変形角 [ $\times 10^{-3}$  rad]      -: 欠測

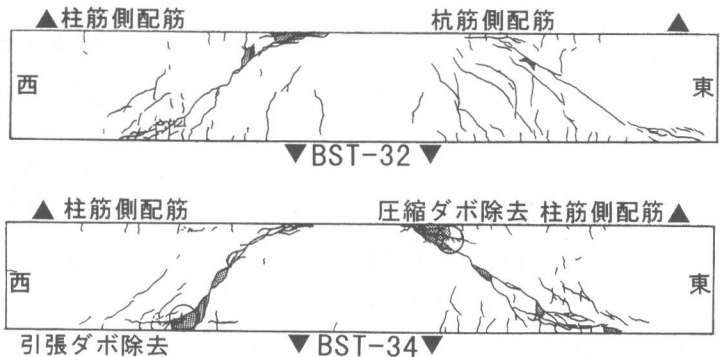


図-4 最終破壊状況

### 3. 実験結果

#### 3. 1 耐力

本年度行った試験体耐力の一覧表を表-2に示す。剪断初亀裂耐力・最大耐力ともに、ツアツが小さくコンクリート圧縮束が水平線となす角度が大きいBST-31が大きな値を示している。亀裂耐力の圧縮・引張ダボの有無による差は見られない。最大耐力は、想定破壊面位置に亀裂が貫通したBST-32、34試験体を比較すると、圧縮・引張ダボを除去した試験体は除去していない試験体に比べて最大耐力が低くダボ作用による耐力差が生じている。但し、BST-33東は想定した無補強部分では破壊せず、補強部分にまで破壊面が進展したので、ダボ除去されていても耐力が大きくなった。

#### 3. 2 亀裂及び破壊性状

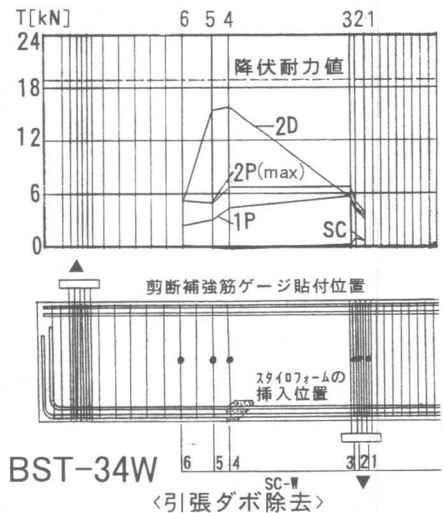
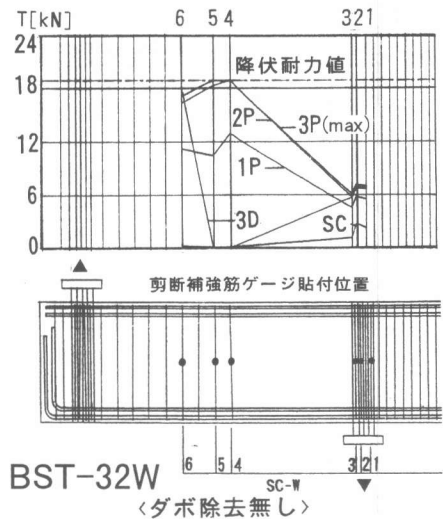
想定亀裂位置に亀裂が貫通した試験体の破壊性状を図-4に示す。S式試験体では、剪断初亀裂が曲げ引張力の大きな杭筋位置下部に発生する。その後、これとは別に支配的な亀裂が無補強部の梁中央に発生し梁の上下端を貫通し、最大耐力に至っている。最大耐力時の圧縮ダボ部では主筋による支圧と破壊面によるスレ変形によりコンクリートが破壊されている。引張ダボ部のコンクリートは初亀裂発生以降徐々に亀裂が拡幅している。

### 4. 考察

ここでは、部材に剪断亀裂が発生した時点から開始する主筋の曲げ変形を「ダボ作用」と定義する。

#### 4. 1 剪断補強筋の挙動

引張ダボを除去した試験体(BST-34W)と除去していない試験体(BST-32W)との亀裂貫通位置における剪断補強筋の鉄筋力分布を図-5に示す。剪断補強筋が主筋を拘束していると、主筋の付着力の存在によりコンクリート圧縮束の応力を剪断補強筋に伝達する事でトラス機構を形成できるが、コンクリートを除く事で引張ダボ作用を除去すると、主筋とコンクリート圧縮束と剪断補強筋が結合する位置にコンクリートが存在しないので、引張主筋の付着力が発生しないことからトラス機構を形成することができない。本試験体では、補強筋の抵抗機構が有効にならないので見かけ上ダボ作用の除去により最大耐力が著しく小さくなったが、コンクリートの欠落が主要因であると考えられる。引張ダボ作用発生位置の剪断補強筋を有効に機能させるためには、亀裂貫通位置に剪断補強筋を密に配筋することにより亀裂の拡幅を抑制することで、主筋と主筋周囲



SC : 剪断初亀裂発生時 P : ピーク時  
D : 最大変形時  
※記号の前の数字はサイクル数

図-5 剪断補強筋力分布

のコンクリートの付着力を保持する必要があると思われる。斜張力が支配的となるこの試験体では柱・杭筋内に配された剪断補強筋が亀裂貫通位置の主筋を拘束している事によって、ダボ作用が有効に機能している。剪断亀裂の貫通位置近傍にある剪断補強筋が主筋の曲げ変形を拘束することがダボ作用の効き方に関係すると思われる。すなわち、亀裂貫通位置近傍の剪断補強筋が主筋を拘束すると亀裂の拡幅が抑制され、更に主筋の曲げ抵抗が低ければ、主筋の曲げ変形が進む。逆に、剪断補強筋による主筋の拘束程度が緩く主筋の曲げ抵抗が高い時は主筋沿いに亀裂が発生・拡幅し、主筋と主筋周囲のコンクリートに付着力が無くなると思われる。

#### 4. 2 梁主筋の挙動

想定亀裂貫通位置の主筋の挙動を検討するために、その近傍の主筋上下面に貼付した歪ゲージの値から各点の、曲率・曲げモーメント・剪断力・軸力を図-6に示す手法で算出した。そのうち曲率と剪断力の推移について圧縮側主筋（外側コーナ筋：BOF-C）を図-7に、引張側主筋（外側コーナ筋：BOF-T）を図-8に示す。

剪断初亀裂発生時から、曲げ圧縮域の梁上端筋も、引張側の梁下端筋も亀裂面に沿った局所的なズレに抵抗するために曲率が増加する。最大耐力時において曲げ圧縮域では、曲率の急激な増加が見られる。これは最大耐力時に亀裂が圧縮域まで貫通したことにより、破壊面に沿ったズレが生じたためである。引張力を受けている下端梁主筋は剪断初亀裂発生以降、周囲コンクリートの亀裂の拡幅と共に徐々に曲率は増大したが、亀裂が梁主筋位置で数本に分散したので周辺コンクリートの損傷が大きくなり、圧縮側に比べ負担抵抗力は小さくなった。

#### 4. 3 剪断破壊時のダボ作用の機能

主要な剪断亀裂が拡幅し、これを挟む2つの自由体がずれて剪断破壊が生じる時には、圧縮域のコンクリート接触面に作用していた摩擦力が一気に梁主筋の曲げ抵抗に負担されることになるため、圧縮側ダボの負担力が大きくなった。これに対して、引張側のダボ作用には破壊時でも負担力の再配分が生じないため大きな力が作用せず、特に本実験のように周辺のコンクリートを除去する方法ではダボの負担力は増大しない結果となった。

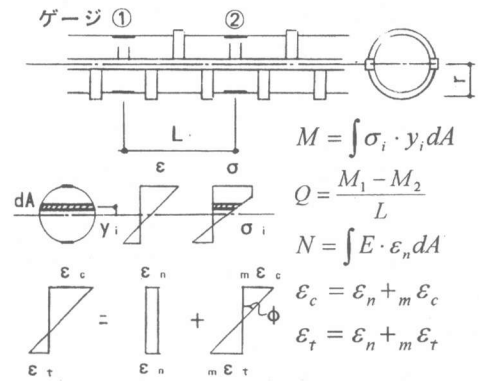


図-6 梁主筋の挙動計測手法

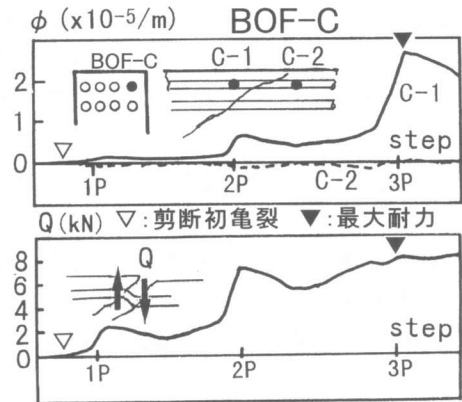


図-7 圧縮部ダボ挙動

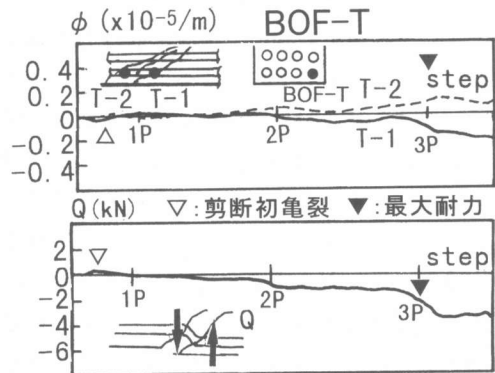


図-8 引張部ダボ挙動

#### 4. 4 剪断応力度-変形角関係における ダボ作用の影響

圧縮ダボ除去試験体(BST-34E)と引張ダボ除去試験体(BST-34W)とダボを除去していない試験体(BST-32W)の剪断応力度-剪断変形角関係を図-9に示す。ダボ作用は耐力値に影響するというよりも、最大耐力後の劣化防止を含む耐力時の変形能(靱性能)を増大させる働きがあることがわかる。

#### 4. 5 剪断抵抗機構におけるダボ作用

図-10に剪断抵抗機構におけるダボ作用の概念図を示す。トラス機構においてコンクリート圧縮束の応力は主筋の付着力の存在により剪断補強筋に伝えられる。最大耐力までのダボ作用は剪断亀裂の発生により小ブロック化されたコンクリート圧縮束同士のズレを局部的に拘束するトラス機構内に含まれる剪断抵抗要素であると考えられる。その後最大耐力に至り、亀裂が貫通し破壊面が形成されると主筋は局部的に付着力を失い主筋自身の屈曲によって剪断力に抵抗する機構となり、最大耐力後においてダボ作用の剪断抵抗機構に占める分担割合は増加するものと思われる。

#### 5. おわりに

斜張力が支配的なRC梁の剪断実験により以下の知見を得た。①ダボ作用は断面に作用する曲げ力の影響を受け、曲げ圧縮域にある主筋では破壊面となる亀裂貫通後のズレによる屈曲であり、引張力側主筋では剪断初亀裂発生以降、徐々に生じるズレに対する抵抗である。②ダボ作用は剪断亀裂の貫通により破壊面が形成されるまではトラス機構内に含有される局所的な剪断抵抗要素と考えられるが、最大耐力以降は、主筋自身の屈曲抵抗で剪断力を負担し、耐力劣化を抑制する働きがある。そのため、ダボ作用の剪断抵抗機構における分担割合は、最大耐力以降に増加するものと思われる。しかし、実際の構造設計においては、破壊面となる剪断亀裂の発生位置を特定することはできないため、亀裂貫通時に剪断補強筋と主筋付着力とコンクリート圧縮束とが有効に機能するように、部材端部とその付近には剪断補強筋を密に配筋することが重要であると思われる。

【参考文献】 [1]島田登志夫ほか:斜張力場における梁の剪断抵抗に関する実験的検討、日本建築学会北海道支部研究報告集、NO. 68、pp. 157-168、1995. 3 [2]佐藤武ほか:斜張力が支配的となるRC梁の剪断抵抗に関する実験的検討、日本建築学会北海道支部研究報告集、NO. 69、pp. 5-16、1996. 3

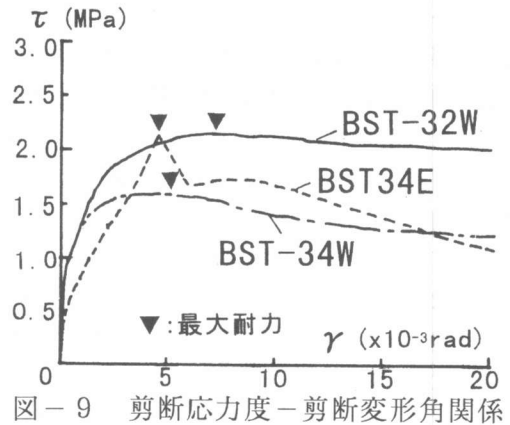
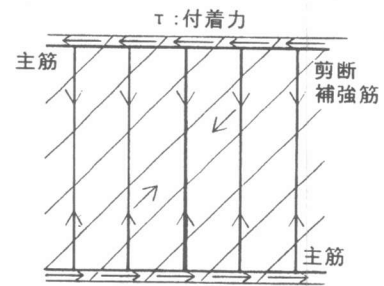
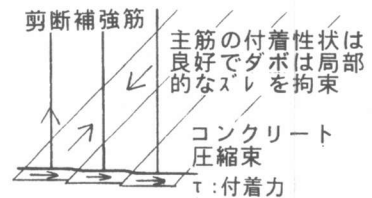


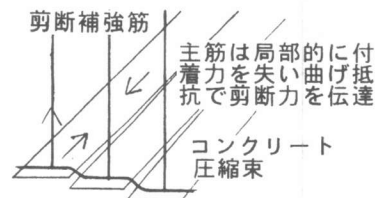
図-9



〈亀裂の発生により  
形成されるトラス機構〉



〈初亀裂から最大耐力まで〉



〈最大耐力以降〉

図-10 ダボ作用概念図