

論文

[2027] 異形鉄筋の横ふし間隔および個数が付着特性に与える影響について

正会員○長友克寛（高松工業高等専門学校）

正会員 角 徹三（豊橋技術科学大学）

1. はじめに

異形鉄筋に引き抜き力が加わった場合、初期の段階では荷端（あるいはひびわれ面）近傍での鉄筋周囲のコンクリートの負担する付着力は部材内部のそれよりも当然大きい。しかし、引き抜き力の増加に伴い、この周囲のコンクリートには耐力低下、いわゆる付着劣化が生じ、付着力負担のピークは内部のコンクリートへと移行していく。このような付着力の再分配に影響する因子としては基本的には2つが考えられる。1つは横ふし間隔、1つは横ふし個数（定着長）である。これらの付着特性への影響に関する研究は既に幾つか報告されているが、それらはいずれも部材内部を対象としたものである¹⁾。荷端からの主鉄筋の抜け出しが荷端近傍域の付着特性に大きく支配されることなどを考えると、この領域での詳細な検討が必要となってくる。

本研究は、これらのことを念頭に置いた上で、直角横ふし鉄筋の引き抜き試験を実施し、鉄筋横ふしの間隔および個数の付着特性への影響を部材内の種々の位置と対応づけて検討したものである。また、著者らは²⁾、付着特性解明のための研究の一環として横ふし1個のみをもつ鉄筋の付着特性について報告している。本研究は、それらの結果と一般の多数ふし鉄筋の結果との橋渡しをする目的をも兼ねている。

2. 実験方法

(1) 供試体

図-1に、供試体の形状・寸法を示す。250×250mmの断面を有するモルタル中に図-2に示すような直角横ふしをもつ試作鉄筋（内直径22mm、これを直径Dとみなす）を埋め込み、引き抜き試験を実施した。図-2におけるType IIの鉄筋は、今後実施する予定の繰返し荷重試験への使用を意図したものである。供試筋表面には機械油を塗布し、摩擦の影響を極力除去するよう配慮した。使用したモルタルは、水セメント比45%、単位水量211kgのAEモルタルであり、骨材には砕砂に対して山砂を容積比1:1.15で混合したものをを用いた。全供試体数は45体であり、平均圧縮強度 $fc' = 34.9$ MPa、平均スランプ 8 cm であった。

実験変数は表-1に示すとおりである。荷端と荷端に最も近い横ふしとの距離L（以後、

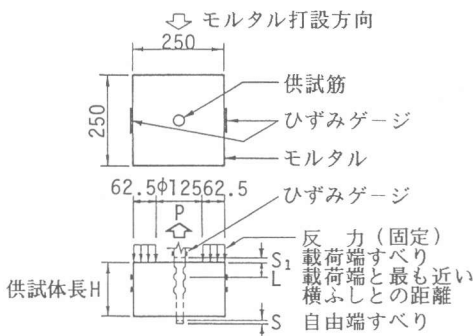
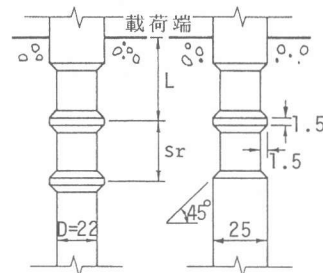


図-1 供試体形状・寸法（単位mm）



(a) Type I (b) Type II

図-2 供試筋表面形状（ $n_r=2$ の場合、単位mm）

横ふし位置と略記)を種々に変化させ、各LにおいてシリーズAでは横ふし間隔 s_r 、シリーズBでは横ふし個数 n_r がそれぞれ付着特性にどのような影響を与えるかを検討した。シリーズCでは、供試体長Hを長くしてLを大きくとることにより、力の流れ方の変化の影響をみた。

(2) 荷重・測定方法

図-3に、荷重・測定方法を示す。荷重は手動中空油圧ジャッキにて行い、供試筋端部にねじを切り、カップラーでテンションバーと連結することにより引き抜き力Pを加えた。その反力は油圧ジャッキと供試体との間に反力鋼板を介し、供試筋の表面から2D以上外側のモルタル部分に圧縮力として作用させた²⁾。

荷重Pを中空ロードセル、自由端すべりSおよび荷重端すべり S_1 を変位計(精度 1/1000 mm)にて測定し、荷重-すべり関係を求めた。供試体表面の横ふし位置および数ヶ所の適当な位置にひずみゲージを貼付し、横ふしのくさび作用によるリングテンションを測定した。

3. 実験結果および考察

(1) 破壊形式

図-4に、本実験で観察された破壊形式を3種類に大別して示す。各供試体の破壊形式は、同図の表題に記した破壊形式の記号を用いて、図-6の図中に表示してある。

シリーズAおよびCの場合、横ふし間隔 s_r 、供試体長Hに係わらず、横ふし位置Lが小さいとき($L \leq 15 \sim 30\text{mm}$)には図(a)のろうと状破壊を示した。Lが大きくと、図(b)の横ふし頂面を連ねる面でのせん断破壊へと移行し、 $s_r=10\text{mm}$ では $L=30\text{mm}$ で既にこの破壊が生じた。

R_{hem} ³⁾は、(ふし高さ)/(ふし間隔) >0.15 でせん断破壊すると報告しているが、本実験ではこれよりも小さい値(=0.075)でも発生したことになる。

横ふし個数 n_r の影響を調べるBシリーズ($H=150\text{mm}$, $s_r=15\text{mm}$)で、 $L=15\text{mm}$ の位置より n_r を増加させていった場合、 $n_r \leq 3$ まではろうと状破壊を示した。 n_r がさらに増加すると、荷重端より2ふし程度内部からろうと状ひびわれが発生し、それより1~2ふし程度内部の領域ではモルタルが片状に砕け、さ

表-1 実験変数

シリーズ名		A	B	C
横ふし間隔	s_r (mm)	10, 15, 20	15	15
荷重端と最も近い横ふしとの距離	L (mm)	15, 30, 45, 60, 75	15, 75	30, 60, 135, 210, 285, 435
横ふし個数	n_r (個)	1, 2*	1, 2, 3, 4, 5, 7, 10*	1
供試体長	H (mm)	150	150	150, 300, 450
供試筋の種類		* 印のものは Type II, その他は Type I (図-2参照)		

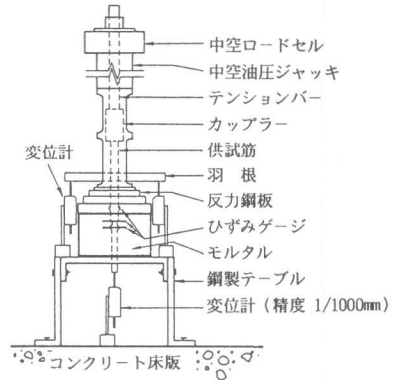
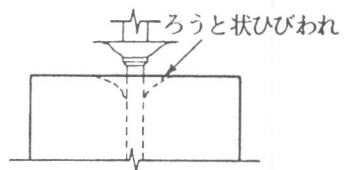
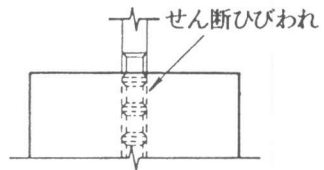


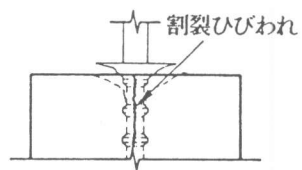
図-3 荷重・測定方法



(a) ろうと状破壊: F



(b) せん断破壊: S



(c) 割裂破壊: Sp

図-4 破壊形式

らに内部ではせん断ずれが生じる複合的な破壊を示した。 $n_r=10$ (供試体長全体に横ふしが配置)においてのみ、図(c)の鉄筋軸に沿う縦びわれによる割裂破壊を生じた。 $L=75\text{mm}$ の位置より n_r を増加させた場合には、 n_r に係わらず全てせん断破壊を示した。

(2) 無次元化付着応力-自由端すべり関係

図-5に、無次元化平均付着応力 $\tau_{av}(\text{MPa})/\sqrt{f_c}(\text{MPa})$ (ここに、 $\tau_{av}=P/(\pi \cdot D \cdot n_r \cdot s_r)$ 、 $\sqrt{f_c}$ を引張強度に対応するものとして応力(MPa)とみなす)と無次元化自由端すべり S/D との関係(以後、付着応力および自由端すべりと略記)に与える各実験変数の影響を示す。なお、今回の実験では自由端すべりと載荷端すべりととの差が非常に小さく、一番差の大きいシリーズBの $n_r=10$ の供試体でも 10^{-2}mm のオーダーであった。そこで、以下ではすべり量を全て自由端すべり S で評価してある。図(a)より、付着強度、その時のすべり、および付着強度到達後の下降部分の付着応力は、横ふし間隔 s_r とともに大きくなる傾向にあることが分かる。

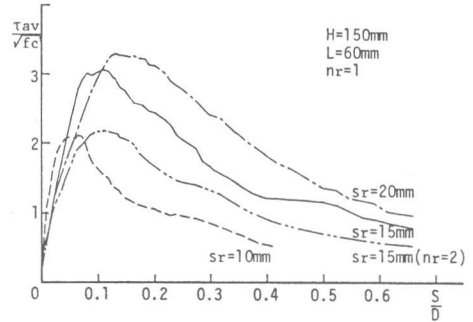
図(b)は、 $L=15\text{mm}$ の位置より n_r を増加させていった場合の影響を示している。ろうと状破壊する場合($n_r \leq 3$)、ろうと状破壊とせん断破壊との複合的破壊の場合($4 \leq n_r \leq 7$)、および割裂破壊する場合($n_r=10$)の3者で、付着特性は大きく変化する。 $n_r \leq 7$ までは、付着強度、その時のすべり、および付着強度後の下降部分の付着応力は n_r の増加とともに増大するが、 $n_r=10$ では逆にそれらは減少している。

図(c)は、横ふし位置 L の影響を示している。 L の増加によるろうと状破壊($L \leq 30\text{mm}$)からせん断破壊($L \geq 45\text{mm}$)への移行に伴い、付着特性はやはり大きく変化している。後者では、3本の曲線はほぼ一致しており、付着特性がフルに発揮されるせん断破壊の場合、付着応力 τ はすべり S のみの関数として表示できることが分かる。

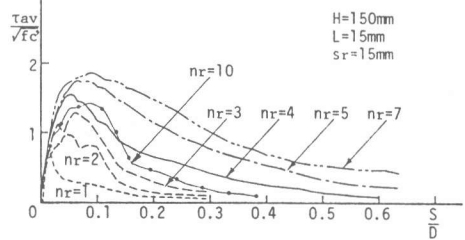
(3) 無次元化平均付着強度

図-6に、無次元化平均付着強度 $\tau_{uav}/\sqrt{f_c}$ (以後、付着強度と略記)に与える各実験変数の影響を示す。図(a)より、付着強度は横ふし間隔 s_r の増加とともに増大するが、供試体内部域($L \geq 60\text{mm}$)では $s_r \geq 15\text{mm}$ でその傾向は大きく鈍っている。JISによれば、D22鉄筋の横ふし間隔の最大値は 15.5mm と規定されている。今回の実験結果は、付着強度の面からみてそれが適当であることを裏付けている。

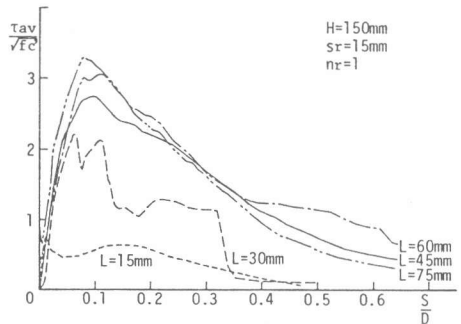
図(b)は、 $L=15\text{mm}$ と $L=75\text{mm}$ の位置より横ふし個数 n_r を増加させた場合の付着強度の変化



(a) 横ふし間隔 s_r の影響



(b) 横ふし個数 n_r の影響



(c) 横ふし位置 L の影響

図-5 平均付着応力-自由端すべり関係

を示している。L=15mmの場合、 n_r の増加とともに付着強度は増大するが、その傾向は複合的破壊を示す $n_r=4$ 付近より鈍り始める。これは、 n_r が小さいほど載荷端近傍の付着劣化が支配的となるためである。割裂破壊する $n_r=10$ では、強度は逆に低下する。L=75mmの場合の付着強度は、 $n_r=1$ より $n_r \geq 2$ の方がわずかに小さい。これらと同様にせん断破壊を起こした供試体に関する $\tau_{uav}/\sqrt{f_c}$ の平均値は、 $L \geq 60$ mmにおいて $n_r=1$ の場合2.80、 $n_r \geq 2$ の場合2.56であった。

図(c)は、 s_r に係わらず、付着強度が横ふし位置Lにほぼ比例して増大することを示している。ただし、 $s_r=10$ mmの場合はL=45mm付近で、 $s_r \geq 15$ mmの場合は既往の研究²⁾と同様L=60~75mm付近で頭打ちになる。上述した様に、 $n_r=2$ の場合の付着強度は $n_r=1$ の場合よりも小さく、 $s_r=10$ mmと15mmの場合の間にある。これは、 $n_r=2$ のような短い定着長の場合においても、厳密には2つの横ふし前面の付着破壊が同時に起こる訳ではないためであると考えられる。

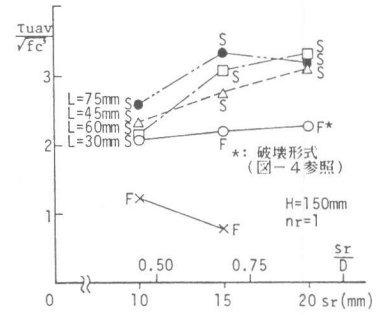
異形鉄筋から周囲のコンクリートに付着力が伝達されると、横ふしからは斜め前方に内部ひびわれが発生し、すべりはこの内部ひびわれによって形成されるくし歯の変形に依存することが報告されている⁴⁾。今回の実験では、載荷端近傍を除く供試体内部においてこのようなひびわれが発生したかどうかについて確認していないが、付着-すべり挙動を支配するほどの内部ひびわれの発達しなかったと考えられる。そのため、付着特性はフルに発揮され、両引き試験などから得られるものよりも高い付着強度を示している。

付着劣化とか内部ひびわれの発生がどの程度部材内部にまで進展するかは、付着力の再分配がどのように行われるかにかかっている。自由端すべりが引き抜き

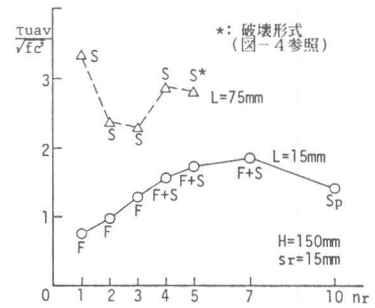
力の小さい段階から生じる定着長の短い試験体のような場合には、鉄筋に沿う付着力はほぼ一様に近くなり、載荷端近傍を除けば、内部ひびわれの発達する領域は非常に短くなり、大半の領域でせん断ずれが起こる。両引きあるいは定着長の長い試験体のように鉄筋全体の移動がその端部で拘束されている場合には、付着力分布は載荷端近傍で急になり、内部ひびわれの発生する領域は将棋倒し式にある程度部材内部にまで及ぶものと考えられる。シリーズAでみられるような横ふし1個のみの鉄筋による実験結果の適用範囲は、載荷端のごく近傍および内部ひびわれの発達の小さな領域に限定されることになる。一方、定着長の短い引き抜き試験体は、通常鉄筋同志の付着特性の比較が主たる利用目的として位置付けられているが、上述のことを念頭に置いて詳細な検討を行うことにより、付着特性に関する有用な情報を得ることも可能であると思われる。

(4) 鉄筋ひずみ分布

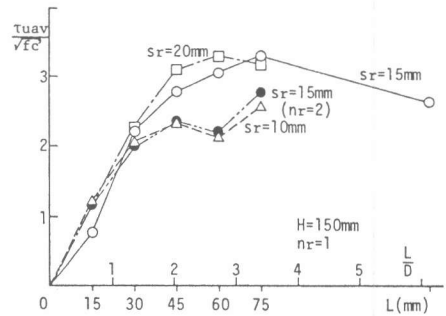
図-7は、ろうと状破壊から複合的破壊への過渡的破壊を示したL=15mm、 $n_r=3$ の供試体につ



(a) 横ふし間隔 s_r の影響



(b) 横ふし個数 n_r の影響



(c) 横ふし位置 L の影響

図-6 無次元化平均付着強度

いて、鉄筋ひずみ分布の変化を示したものである。引き抜き力の小さい段階ではひずみ分布はほぼ直線であるが、 $n_r=1$ の場合の付着強度前後から、載荷端に最も近い横ふしの付着力負担が減少し、内部の2ふしで抵抗するようになる。最終的に、破壊荷重 $P_u/\sqrt{f_c}$ は $L=30\text{mm}$ における $n_r=2$ の場合とほぼ同じにしかならない。

同様に、例えば図-6 (b) の $L=15\text{mm}$ 、 $n_r=7$ の供試体において、付着力の再分配により載荷端側の2ふしが破壊時には有効に働かないとして平均付着強度を求めると2.62となり、明確なせん断破壊を起こした $L=75\text{mm}$ の場合の付着強度の平均値にほぼ一致する。

過去に報告されている付着応力 τ - すべり S (周囲のコンクリートの面外変形も含む) 関係は、割裂ひびわれに対して十分補強されている場合、大きく2種類に大別される。1つは付着強度が 10MPa 以上のもの、もう1つは 5MPa 前後のものである^{1)~3), 5)}。この原因としては、もともになる付着試験を分類してみると、上述の鉄筋横ふしからの内部ひびわれの進展度が大きく係わっていると考えられる。しかし、図-7からも分かるように、付着劣化や内部ひびわれ発生域の進展に伴う付着力の再分配により、局所的な付着特性は大きく影響を受ける。これを部材全体に渡って考慮に入れた上で一般的な形に定量化することは非常に難しい。むしろ、一手法として部材内部を①載荷端のごく近傍域、②それより内部の内部ひびわれ発達の比較的大きい領域、③さらに奥の内部ひびわれ発達の小さい領域、の3つに大きく分割し、各領域ごとに付着特性をモデル化し、それをケースバイケースで用いる方が実用的であるとも考えられる。また、そのモデル化のための実験に関しても、従来のように載荷端近傍域での付着を意識的に切って無視するのではなく、もっと積極的に考慮に入れるべきではないかと思われる。

(5) 付着強度時の無次元化自由端すべり

図-8に、付着強度時の無次元化自由端すべり S/D に与える各実験変数の影響を示す。図(a)より、 n_r の増加とともに自由端すべりは大きくなるのが分かる。 n_r が同一の場合、 $L=75\text{mm}$ の方が $L=15\text{mm}$ よりも大きい、 n_r の増加につれ両者の差は小さくなる。

図(b)より、 L の増加とともに自由端すべりも増大するが、その傾向は $L=60\text{mm}$ 付近で頭打ちになるのが分かる。 s_r が大きいほど、すべり量およびその増加割合は大きい。

著者ら²⁾は、既往の研究において、内径22mmの丸鋼棒に横ふし1個のみを突出させた鉄筋を用いた引き抜き試験をもとに、横方向応力の作用下での付着強度モデルを提案している。そこでは、明確な長さの横ふし前面のモルタルキーを設定して

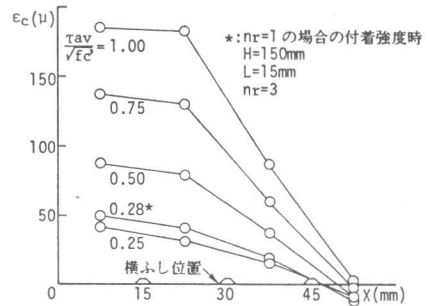
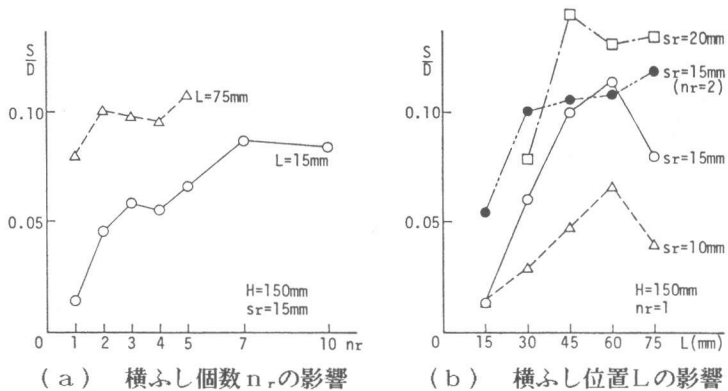


図-7 鉄筋ひずみ分布



(a) 横ふし個数 n_r の影響

(b) 横ふし位置 L の影響

図-8 付着強度時の無次元化自由端すべり

おらず、便宜的に横ふし間隔を15mmと仮定し、供試体内部での付着強度を横ふし純間隔に等しいすべり ($S/D \approx 0.48$) での付着応力としている。今回の実験における $L \geq 60\text{mm}$, $s_r = 15\text{mm}$ での付着強度時すべりの平均値は $S/D = 0.10$ であり、この値で付着強度を評価しなおすと、幾分既往の研究の方が大きいものの、ほぼ定量的に両者は一致する。提案モデル中に含まれる係数 k_1 は、3.0程度に低減する必要があることを付記しておく。

(6) 付着応力-すべり剛性

図-9は、図-5の $\tau_{av}/\sqrt{f_c} - S/D$ 曲線において、付着強度の2/3以下の領域を $\tau_{av}/\sqrt{f_c} = A \cdot S/D + B$ の形に直線近似したときの勾配Aを示している。Aは、付着応力-すべり剛性に対応することになる。同図より、すべり剛性はLの増加とともに減少し、 $L=60\text{mm}$ 付近でその傾向は頭打ちになることが分かる。すべり剛性値およびその減少割合は、 s_r が大きいほど小さい。

(7) モルタル表面ひずみ

図-10に、供試体軸に沿うモルタル表面ひずみの変化の一例として、割裂破壊した $L=15\text{mm}$, $n_r=10$ の場合を示す。図(a)より、ひずみ分布は付着応力の小さい間はほぼ直線的であるが、付着応力の増加に伴い、載荷端側での勾配が急になってくることが分かる。供試体の中央より自由端側では、初期の段階より圧縮ひずみが発生していることは興味深い。載荷端より135mmの位置でのひずみを応力に換算すると、割裂ひびわれ発生時で約2.3MPaであった。

図(b)は、供試体軸に沿う5ヶ所での付着応力-表面ひずみ関係を示している。載荷端近傍では割裂ひびわれ発生前に急激にひずみが増大すること、それに伴い供試体中央部でのひずみが圧縮から引張に転ずることが分かる。同様の傾向は、割裂ひびわれの生じない $n_r=7$ などの供試体でもみられた。

シリーズCの場合、上記(3)~(7)に与える供試体長Hの影響は明確ではなかった。
4. まとめ

本研究では、引き抜き試験を実施し、載荷端近傍域 ($L \leq 60 \sim 75\text{mm}$) において (1) 横ふし個数 $n_r=1$ で横ふし間隔 s_r が増加、(2) 載荷端と載荷端に最も近い横ふしまでの距離Lが増加、(3) 定着長の短い場合で載荷端より横ふし個数 n_r が増加する場合、いずれも平均付着強度およびその時の自由端すべりは増大することなどを明らかにした。

参考文献

- 1) 藤井 栄, 森田可郎: JCI-C5, 1983, pp.37~44
- 2) 長友克寛, 角 徹三: 土木学会論文集, 第402号/V-10, 1989, pp.97~104
- 3) Rhem, G.: Deutscher Ausschuss für Stahl-Beton, Heft 138, 1961
- 4) 後藤幸正, 大塚浩司: 土木学会論文報告集, 第294号, 1980, pp.85~100
- 5) 六車 隼, 森田可郎, 富田幸次郎: 日本建築学会論文報告集, 第131, 139号, 1967, pp.1~8, 1~10

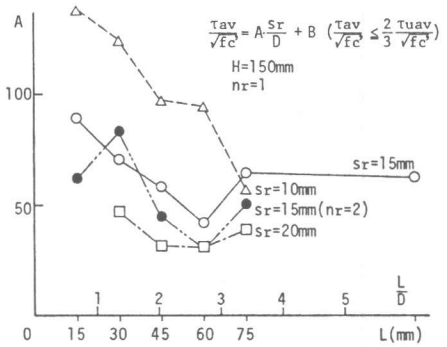
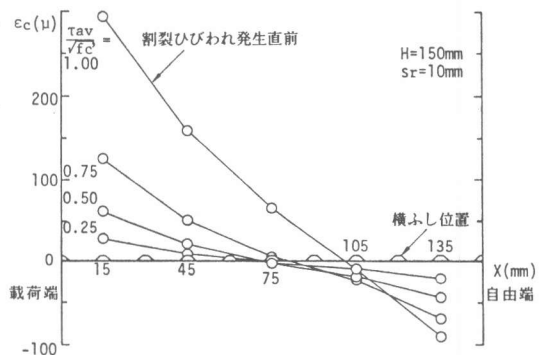
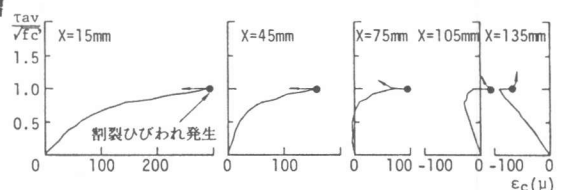


図-9 付着応力-すべり剛性



(a) 表面ひずみ分布の推移



(b) 付着応力-表面ひずみ関係

図-10 モルタル表面ひずみ