

028

ISSN 0386-5878

土木研究所資料第2742号

土木研究所資料

接合部の定着鉄筋の定着性状に 関する調査報告書

平成元年3月

建設省土木研究所
コンクリート研究室

Copyright © (1989) by P. W. R. I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P. W. R. I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、土木研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

接合部の定着鉄筋の定着性状に 関する調査報告書

コンクリート研究室室長 小林 茂 敏

主任研究員 河 野 広 隆

研 究 員 渡 辺 博 志

田 村 久

要 旨

橋脚とフーチングの接合部は、曲げモーメントの最大となる箇所、その定着鉄筋の定着方法いかんによっては、部材耐力、変形性能が大きく変動すると考えられる。しかるに、群鉄筋の効果を考慮した鉄筋の定着耐力、変形性能との関係については、十分には明らかにされているとは言えない。本報告書は、鉄筋の定着耐力ならびに橋脚の変形性能との関連性について実験的、解析的検討の結果をとりまとめ、定着鉄筋の合理的な設計法を確立するうえでの資料となるものである。

キーワード：付着、接合部、定着鉄筋、抜け出し

目 次

第1章 まえがき	1
第2章 接合部鉄筋の定着に関する調査	2
2. 1 概 説	2
2. 2 設計における定着耐力の照査方法に関する問題点	2
2. 3 接合部の鉄筋の抜け出し量と、橋脚の靱性の関係	3
第3章 鉄筋の引き抜き試験	6
3. 1 概 要	6
3. 2 試験方法	6
3. 2. 1 供試体諸元及び使用材料	6
3. 2. 2 載荷方法及び計測方法	6
3. 3 実験結果	6
3. 3. 1 載荷荷重と抜け出し量の関係	6
3. 3. 2 定着部鉄筋のすべり分布	7
3. 3. 3 最大付着せん断力	8
第4章 定着鉄筋の抜け出し量、及び、定着鉄筋に関する解析法の検討	15
4. 1 破壊モードの決定	15
4. 1. 1 定着鉄筋が一本の場合	15
4. 1. 2 定着鉄筋が複数で、一列に配置されている場合	16
4. 2 鉄筋の抜け出し量の解析法の検討	17
4. 2. 1 主な既存の解析方法	17
4. 2. 2 τ -S関係のモデルかと抜け出し量の計算方法	18
4. 3 解析結果及びその検討	18
4. 3. 1 τ -S関係の設定と、抜け出し量の関係	18
4. 3. 2 鉄筋の降伏後の抜け出し量の検討	19
4. 4 まとめ	20
第5章 鉄筋の抜け出し量と橋脚の変形の関係	33
5. 1 概 説	33
5. 2 計算モデルの設定	33
5. 3 計算結果の検討	33
第6章 まとめ	39

第1章 まえがき

鉄筋コンクリート橋脚の橋脚躯体と、フーチングの接合部は、地震時においては、曲げモーメントが最も大きくなる箇所であり、橋脚の躯体とフーチングを接合する鉄筋の定着方法が適切でないと、橋脚が大変形を生じたとき、定着耐力を失って、定着破壊を生じ、橋脚全体の耐震性が低下する恐れがある。ここで、定着部の鉄筋の設計方法は、従来より道路橋示方書、土木学会コンクリート標準示方書などで規定されてきた。しかし、定着鉄筋の群鉄筋による効果を考慮しておらず、また、近年重要視されている、コンクリート部材の変形性能との関係が明確になっていない等、改善の余地があるのが現状である。

ここでは、より合理的な定着鉄筋の設計法並びに、橋脚の耐震性との関係などを明確にする上での資料を得るため、実際のフーチングを模した鉄筋の引き抜き試験を行うと共に、定着鉄筋の引き抜き時の挙動を把握するための解析手法について、検討を行った。

本報告書は、実験結果、並びにその解析手法の検討を通じ、定着鉄筋の橋脚の変形性能との関連、並びに、定着鉄筋に大きな引き抜き力が作用したときの挙動についての検討結果を取りまとめたものである。

第2章 接合部の定着に関する調査

2.1 概 説

現行の設計法では、主として定着耐力の照査に主眼がおかれており、道路橋示方書、および、土木学会のコンクリート標準示方書等に規定されている。ここでは、それぞれの規定ならびに、標準的な橋脚の設計例との関係について調査し、現行の設計法において検討を必要とする事項を明らかにすることとする。

2.2 設計における定着耐力の照査方法に関する問題点

定着部の耐力に関する安全性の設計段階での照査法の原則は、いずれの規定においても、定着鉄筋に作用する引き抜き力が、鉄筋とコンクリートとの界面で発揮しうる付着力よりも小さいかどうかで判定されており、界面に生じる付着せん断応力の分布は鉄筋の埋め込み方向に一定であるという仮定に基づいている。界面に作用する付着せん断応力の許容値は、各基準によって似通った値となっているが、CEB-FIPではやや大きめの値となっている。

この値から、必要定着長の算定式は、一般に次式のように与えられている。

$$(\text{定着長}) = (\text{係数}) \times \frac{(\text{鉄筋に作用する引張応力})}{4 \times (\text{許容付着せん断応力})} \times (\text{鉄筋径}) \quad (2.1)$$

*通常は1であるが、土木学会の規準では、群鉄筋の効果、かぶりの効果等に応じ0.6～1.0の値となる。

ここで、鉄筋に作用する引張り応力として、道路橋示方書では降伏強度の約60%（許容引張り応力度）、土木学会コンクリート標準示方書では、降伏強度そのものを用いている。ただし、土木学会の規準には、かぶりの影響、群鉄筋の効果が考慮されており（鉄筋の配置間隔）上式における係数に反映されている。ここで、かぶりが十分にあり鉄筋のあきも十分な場合、係数の値は0.6となり、この係数の値と鉄筋に作用する引張り応力をかけ合わせると、鉄筋の許容応力度にほぼ等しくなる。すなわち、群鉄筋の効果がなく、かぶりも十分ある場合については、土木学会の規準と、道路橋示方書は、かなり近い値を与えることが分かる。ここで、各規準ならびに Orangun, Jirsa らの提案式¹⁾により算定される定着長の値を、鉄筋径と鉄筋あきの関数として、どのように与えられるか計算を行った。計算条件としては、コンクリートの圧縮強度 $f_{ck}' = 240 \text{ kg/cm}^2$ 、あるいは、設計基準強度を 240 kg/cm^2 （ただし、ceb-fip コードによる場合は、C25； $f_{ck}' = 25 \text{ MPa}$ ）、鉄筋は S D35（ceb-fip コードによる場合は、S400； $f_{yk} = 400 \text{ MPa}$ ）とした。この結果を表-2.1に示す。道路橋示方書、ceb-fip では群鉄筋の効果（すなわち、鉄筋のあきの影響）が含まれていないので、一定値となる。

ここで問題となるのは、定着部の設計においては、鉄筋に作用する引張り応力度が、許容応力時を対象としていることである。すなわち、式(2.1)においては、分子にある鉄筋に作用する応力につい

て、鉄筋の許容引張り応力度を代入していることである。しかし、橋脚と、フーチングを接合するための定着鉄筋において、その終局状態を考慮した場合、鉄筋に作用している引張り応力は、降伏時の応力度であり（鉄筋のひずみ硬化を考えると、それ以上の値となる。）、式 (2.1) において、分子の値が大きくなり、より大きな定着長が必要となってくる。すなわち、定着長の算出にあたっては、鉄筋に作用する引張り応力度の許容値を小さくして考えることは、必ずしも安全側の結果を得るとは限らない。

次に問題となるのは、式 (2.1) における許容付着応力度については、安全性を考慮し低く抑えられているが、もしこの値をそのまま用いた場合、鉄筋に作用する引張り応力度として、降伏強度を代入すると、必要定着長が非常に大きくなってしまふことである。これは、先にも述べた通り、鉄筋に作用する引張り応力度を、許容応力度レベルに抑えたためで、表裏一体の関係になっている。すなわち、鉄筋に作用する応力度について、終局時を想定した値を代入する場合、分母となる付着せん断応力度の値も検討を要することがわかる。

また、式 (2.1) には、付着せん断応力が、鉄筋の軸方向に沿って一定に分布する仮定になっていることがわかる。しかし、付着応力分布が鉄筋軸に沿って一定に分布することはなく、この仮定の妥当性を検証する必要がある。

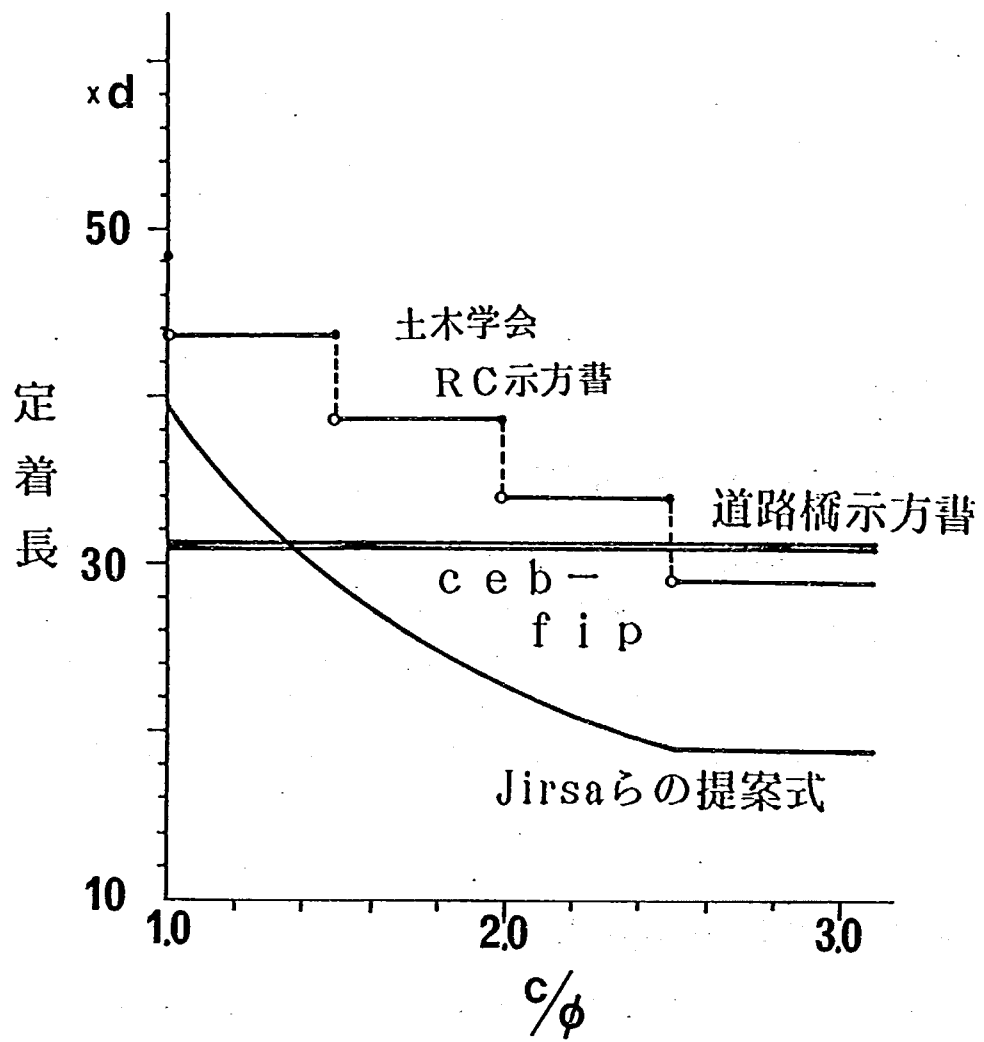
2. 3 接合部の鉄筋の抜け出し量と橋脚の靱性の関係

橋脚の耐震設計において、橋脚の曲げ変形解析を行うに当たって、フーチングからの定着鉄筋の抜け出しは、その計算手法が十分確立されておらず、また、その影響度の評価もまちまちになっている。鉄筋の抜け出し量は、橋脚の剛体的な回転に影響を及ぼし、回転角は、鉄筋の抜け出し量を、中立軸の長さで除して得られるものである。ここで、定着鉄筋に要求される性能は、橋脚が終局状態にあるとき、定着耐力が低下しないことが第一である。橋脚が終局状態にあるときは、定着鉄筋のフーチング上面でのひずみは、計算上かなり大きくなり、鉄筋は明らかにひずみ硬化域にまで及んでいる。このような大きなひずみが生じていると、引き抜き力も相当大きくなっている。このような状態で、なおかつ定着耐力が低下せず、また、脆性的な破壊をしないことが、橋脚の耐震性を確保する上で重要になってくると思われる。さらに、橋脚の接合部において、定着鉄筋が定着耐力を確保した上で、大きな抜け出し量を生じえることが出来れば、橋脚の靱性上好ましい。しかし、従来より、異形鉄筋の抜け出し量の算定方法が十分には確立されていないことから、この観点を設計に反映させていないのが現状である。すなわち、定着鉄筋の塑性域に入ってから抜け出し量、および定着耐力を適切に算定する方法を確立しておく必要がある。

2. 4 まとめ

個々では、定着鉄筋の定着長の設計方法について概略を述べ、定着長の算定に当たっては、定着鉄筋が終局状態にある場合の検討がなされていないことを指摘した。また、定着鉄筋の終局状態について考えるならば、必要定着長を算定するさいに必要となる、付着せん断応力の設計用値も再検討が必要なこと、さらに、柱フーチング接合部の定着鉄筋を対象とした場合、その抜け出し量も考慮する必

要があることを述べた。以下の章では、最大付着せん断応力、及び、定着鉄筋の抜け出し量について、実験的、解析的に検討を加えると共に、単一柱形式の橋脚の軀体について、その抜け出し量と、橋脚天端の変位量の関係についても検討を行い、その結果を取りまとめることとする。



図－2.1 各設計基準の定着長算定法による算定結果

第3章 鉄筋の引き抜き試験

3. 1 概 要

ここでは、マッシブなコンクリート中に埋め込まれた定着鉄筋の引き抜き強度ならびに、鉄筋の抜け出し量がどの程度か把握するために、鉄筋の引き抜き試験を行った。ここで、コンクリートをマッシブなものとした理由は、橋脚とフーチングの接合部における、定着鉄筋の挙動を調査することを目的としているためである。

3. 2 試験方法

3. 1. 1 供試体諸元および使用材料

供試体の寸法を図-3.1に示す。ここで各供試体の、鉄筋の埋め込み長さや定着本数を表-3.1に示す。ここで使用した鉄筋は、D22のネジフジ鉄筋（公称径22mm，SD35）で、鉄筋のひずみが計測できるように、鉄筋を半分に切断し溝を設け、その後に貼り戻した。（図-3.2参照）使用したコンクリートは、早強セメントコンクリートで、スランプ8cm，呼び強度160kg/cm²である。使用したコンクリートの強度試験結果を表-3.2に示す。ここで、コンクリート強度が各供試体毎に若干バラツキがみられるが、これは一供試体毎に打設日を変え、このため計量にわずかつ誤差が出たためであると考えられる。

3. 2. 3 載荷方法および計測方法

載荷は、手動ジャッキで行い、鉄筋が降伏するか、鉄筋が定着耐力を失い、コンクリート供試体から抜け出すまで行った。荷重は、ジャッキと載荷フレーム間にロードセルを挟み込んで計測を行った。定着鉄筋のチャッキング位置は、載荷フレームのヒンジ地点と、手動ジャッキによる加力点のちょうど中点にくるようにした。鉄筋の抜け出し量の計測は、1/200mm感度の変位計で行った。鉄筋にはプラスチックプレートを取り付け、ここに変位計の接点がかかるようにした。一方、供試体下部を不動点とし、ここを変位の測定基準点とした。鉄筋内部には、5cm間隔でひずみゲージをはりつけ、鉄筋のひずみを計測した。ゲージのはりつけのために、鉄筋に設けた溝の寸法は図-3.2に示す。ゲージは、塑性域まで測定できる塑性ゲージを用いた。

3. 3 実験結果

3. 3. 1 載荷荷重と抜け出し量の関係

荷重と抜け出し量の関係を図-3.3に示す。なお、荷重の値は、ロードセルで検出された値を2倍している。定着鉄筋が1本で、定着長が35cm（16D）、50cm（23D）の場合には、最大荷重がほぼ同じであり、定着部コンクリートの付着破壊は生じず、定着鉄筋は降伏した。一方、鉄筋が降伏するまでの

抜け出し量は、鉄筋の埋め込み長の違いの差がはっきり出ており、埋め込み長が長いほど、抜け出し量が小さくなっている。定着長が20cmの場合の定着破壊の状況の概略を図-3.4に示す。定着破壊状況は、鉄筋上部においては、コンクリートにコーン状の破断面が生じ、それより下部においては、鉄筋のふしとふしの間にコンクリートがつまっており、キーせん断型の破壊状況を示していることがわかる。定着長が、35cm、50cmの場合にも、コーン状の破断面が生じており、その形状は、ほとんど同じものであった。

次に、同じ定着長で、定着鉄筋が1本のものと、3本のものについて比較し、定着鉄筋の本数の影響について考えた。鉄筋の定着長が50cm、および20cmの場合は、鉄筋の本数の影響はあまり出ていないが、定着長が35cmの場合、両者の差が出ており、定着鉄筋が3本の場合は、鉄筋が降伏する以前に定着部の破壊が生じ、鉄筋が抜け出していることがわかる。

また図-3.5に示されているように、鉄筋が引き抜き試験中降伏したものは、その抜け出し量は、鉄筋の降伏を境に急激に増加している。このことから、定着鉄筋の抜け出し量について検討する際、定着鉄筋の降伏後の抜け出し量を把握する必要があることがわかる。

3. 3. 2 定着部鉄筋のすべり分布

ここでは、特に1本の定着鉄筋の供試体について、鉄筋のすべり量（変位量）を計算によって算出した。すべり量は、次式によって、算出した。

$$S(x) = \int_0^x \epsilon(x) \cdot dx + S_0 \quad (3.1)$$

ここで、 $\epsilon(x)$ は、 x における鉄筋の歪であり、 S_0 は定着鉄筋の自由端側（ $x=0$ ）のすべり量（変位量）であり、今回の実験では、直接計測を行っていないので、次式により計算した。

$$S_0 = Sd - \int_0^L \epsilon(x) \cdot dx \quad (3.2)$$

ここで、 Sd は変位計で計測した、鉄筋の抜け出し量である。座標のとり方は、図-3.5の通りとする。なお、実際の計算においては、ひずみの値は離散的（5cm間隔）にしか得られていないので、台形公式を用いて積分を行った。なお、ここで計算されるすべり量は、コンクリートの不動点を基準としたすべり量であり、鉄筋表面と、コンクリートとの相対すべり量ではない。この結果を図-3.6に示す。この図からも分かるとおり、定着長が35cmのものと、50cmのものの違いは、 S_0 に大きく出ており、定着長が短いものほど S_0 が大きくなっている。このようなすべりの成分は、除荷しても回復しない残留変位成分であることが知られている。 S_0 を計算によって把握するには、コンクリートと定着鉄筋の間に作用する付着せん断応力と、すべり量の関係（以後、これを τ - S 関係と呼ぶ）を知っておく必要がある。ただし、ここでは、実験結果から τ - S 関係を導くことはしなかった。これは、計測されたひずみの値のわずかの誤差が、付着せん断応力に大きく影響されるためである。今回、公称直径2.2cmの鉄筋に対し、5cm間隔でひずみゲージを貼り付けたが、鉄筋のヤング係数を $1.85 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ と仮定すると 100μ のひずみ計測誤差が約 20 kg/cm^2 の付着せん断応力の計算誤差となってあらわれる。（これ

に対し、すべり量の計算誤差は小さい。) によって第4章において適当な τ - S 関係を仮定し、この τ - S 関係からすべり量を計算し、これが実測値に近くなるようにした。

3. 3. 3 最大付着せん断応力

各供試体の、引き抜き試験における最大付着せん断応力度を求めた結果を、表-3.3に示す。付着せん断応力の最大値は、各供試体について各ひずみゲージで計測されたひずみの差から求めた。これは、先にも示した通りバラツキが大きいものであるため、各区間での付着せん断応力のうち、最大となるものを採用した。ほとんどの供試体で、最大付着せん断応力度は、コンクリートの表面から深さ10cmのところで、生じていた。一方、コンクリート表面から深さ5cm以内の部分で発揮される最大付着せん断応力度は、この値よりもはるかに小さい値となっており、自由表面の影響が表れていることがわかる。

3. 3. 4 供試体の表面の破壊状況

定着鉄筋の引き抜きに際して、コンクリート表面部にはクラックが生じる。ここでは、このクラックの状況を観察し、かつ、供試体の定着破壊状況を調べた。破壊状況は、従来から報告されているように、コーン状の破断面と、定着鉄筋のふしの頂部を連ねて出来る、キーせん断破壊が連成したものとなった。ここで、コーン状の破断面がコンクリート表面に向かって広がり、クラックが、形成されるもので、この広さが大きいほど、コーン状の破断面は深くから生じていることになる。観察結果より、コーン状の破断面は、鉄筋の埋め込み長さには関係なく、鉄筋の本数が3本のものは、一本のものに比べかなり大きくなっている。

3. 4 まとめ

実験結果をまとめてみると

- 1) 定着長のちがいは、定着強度が異なるばかりでなく、伸び出し量も異なり、定着長20cm, 35cm, 50cm供試体で定着長が長いほど伸び出し量が少ないことが明らかとなった。
- 2) 鉄筋の埋め込み本数が異なると、一本の場合と異なる変位挙動をする場合と、差がない場合とがある。異なる場合は鉄筋とコンクリートとの付着以外の破壊メカニズムつまり群鉄筋としての定着強度が問題となり、検討が必要である。
- 3) 伸び出し量には、定着最下端のすべりの影響が大きいですが、伸び出し量から最下端の伸び出し量を差し引いたものは各供試体ともほぼ同じ分布をしている。したがって定着長が十分長い場合には、伸び出し量は一定の値となると考えられる。

表-3.1 供試体の一覧

	鉄 筋	鉄筋本数	定着長cm	鉄筋のあきcm
No.1	D 22	1	20	—
No.2	D 22	1	35	—
No.3	D 22	1	50	—
No.4	D 22	3	20	6
No.5	D 22	3	35	6
No.6	D 22	3	50	6

鉄筋引抜き強度に関する試験

表-3.2 管理用供試体の強度 (kg/cm²)

	圧縮強度 (標準)		圧縮強度 (現場)		引張強度 (現場)	
	材令7日	平 均	試験時	平 均	試験時	平 均
No.1	223	223	150	160	14.4	14.3
	229		164		12.2	
	217		167		16.3	
No.2	231	228	180	171	14.6	14.6
	233		159		15.3	
	220		176		14.0	
No.3	225	231	173	173	17.8	17.4
	228		177		16.3	
	242		169		18.0	
No.4	171	174	104	117	11.6	11.5
	175		117		12.2	
	176		131		10.8	
No.5	191	191	203	194	17.3	17.7
	181		194		18.4	
	201		185		17.4	
No.6	175	178	191	194	19.2	18.1
	178		195		18.3	
	182		196		16.7	

表-3.3 最大付着せん断応力計算結果

供試体番号	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6
鉄筋本数	1	1	1	3	3	3
定着長	20cm	35cm	50cm	20cm	35cm	50cm
最大付着せん断応力	80・	78・	77・	80・	55・	73・

注* 付着せん断応力の単位は、kg/cm²

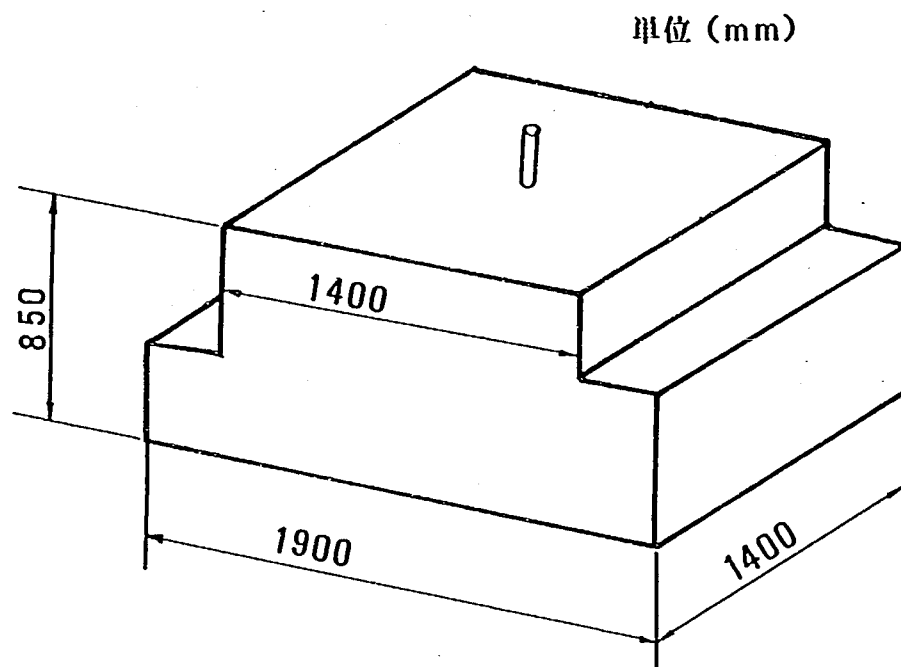


図-3.1(a) 供試体諸元

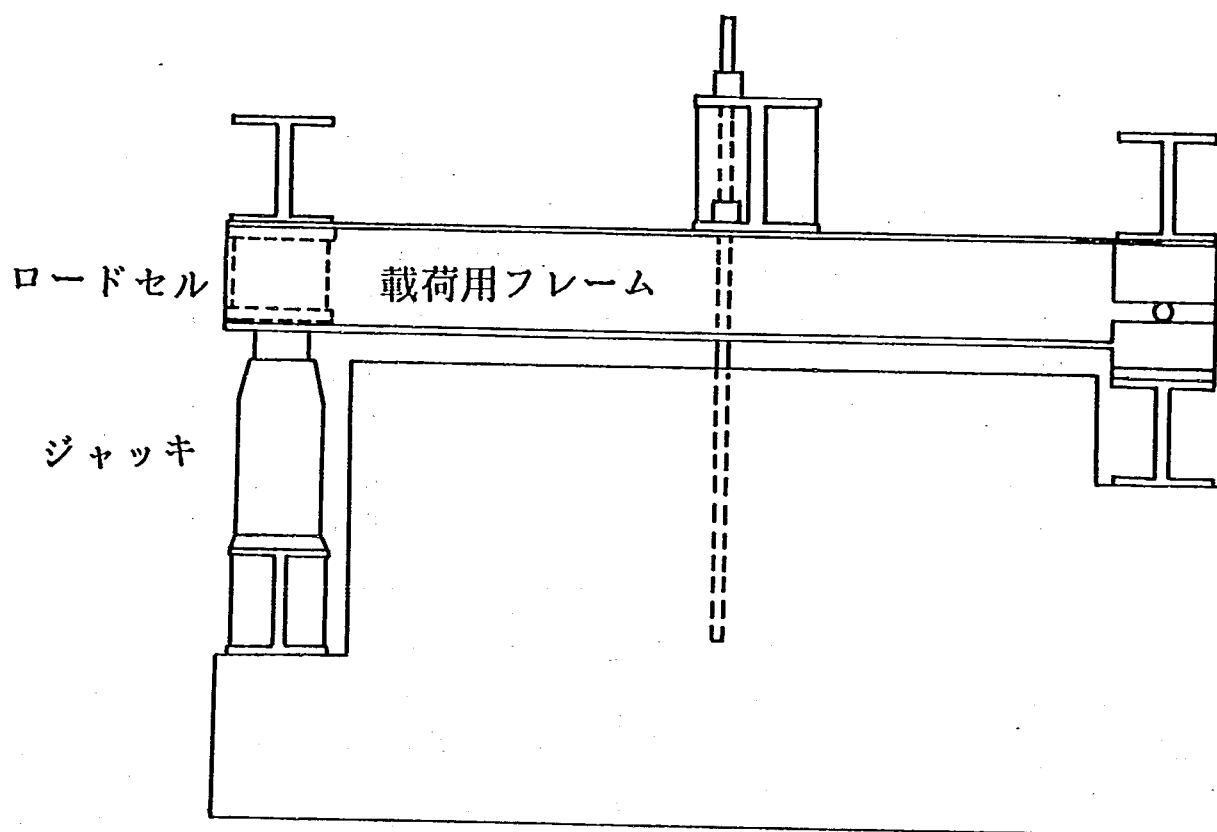


図-3.1(b) 載荷方法

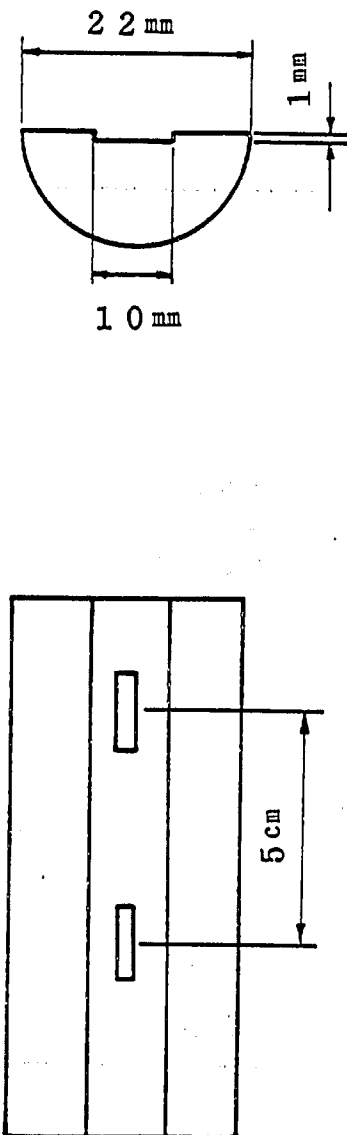


図-3.2 鉄筋加工，ゲージ貼付位置

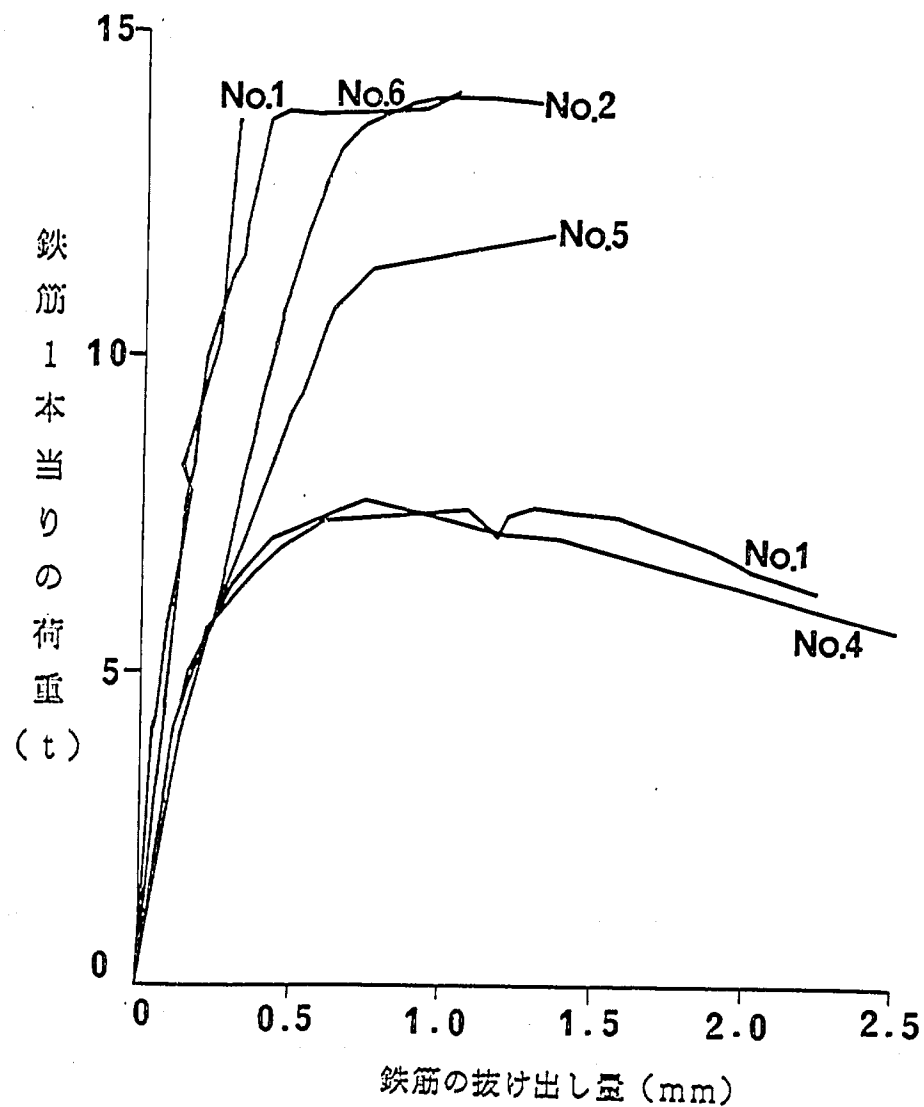
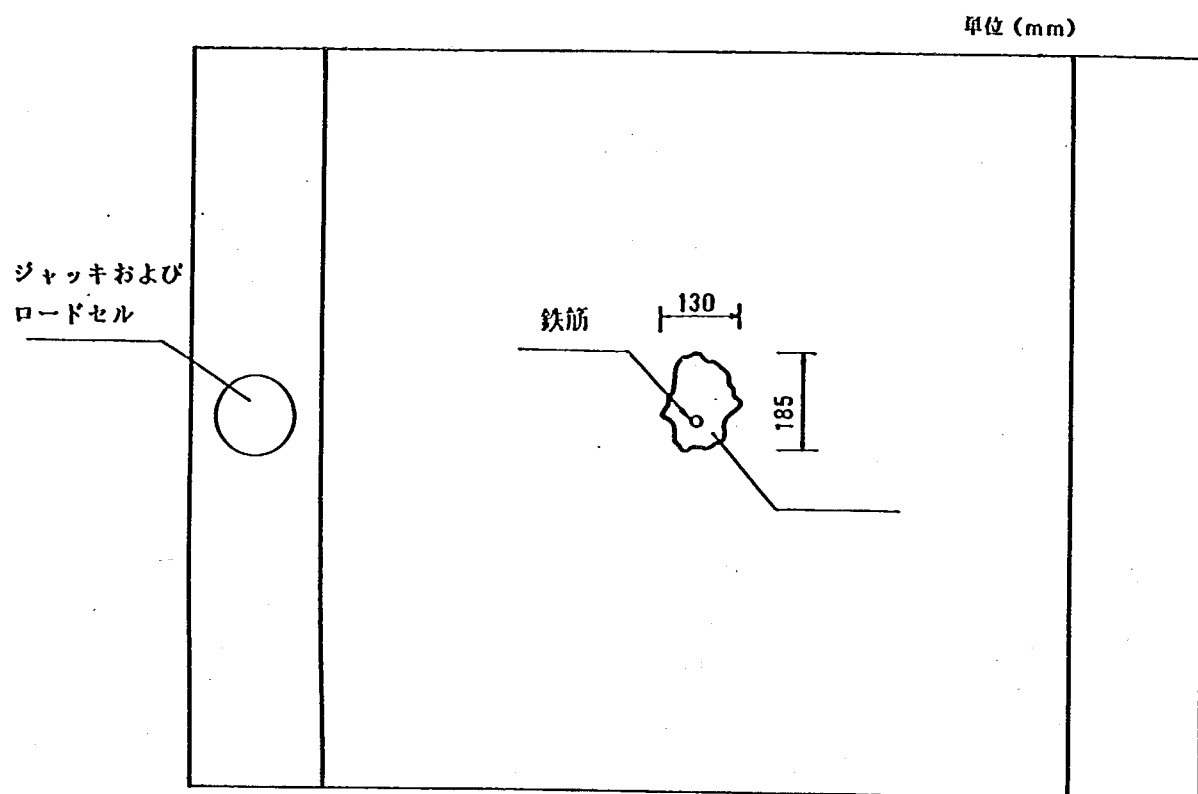
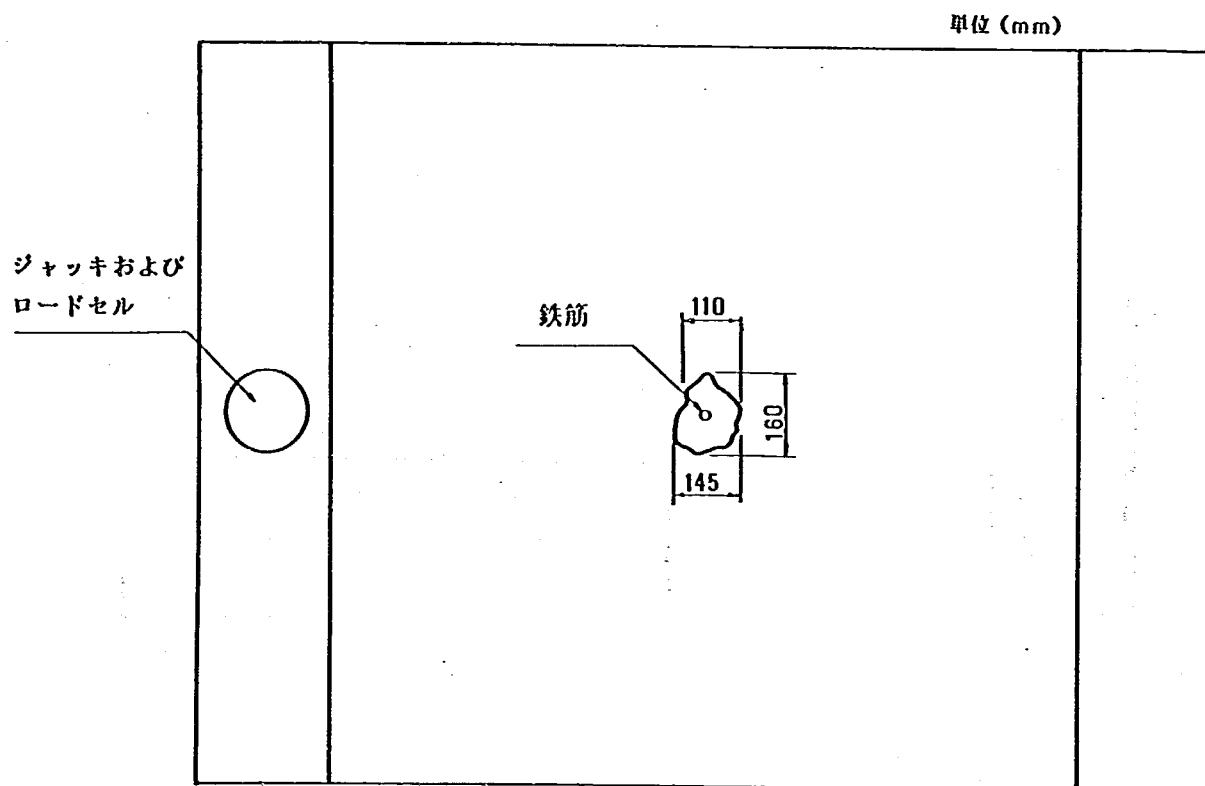


図-3.3 引き抜き試験における荷重-抜け出し量の関係

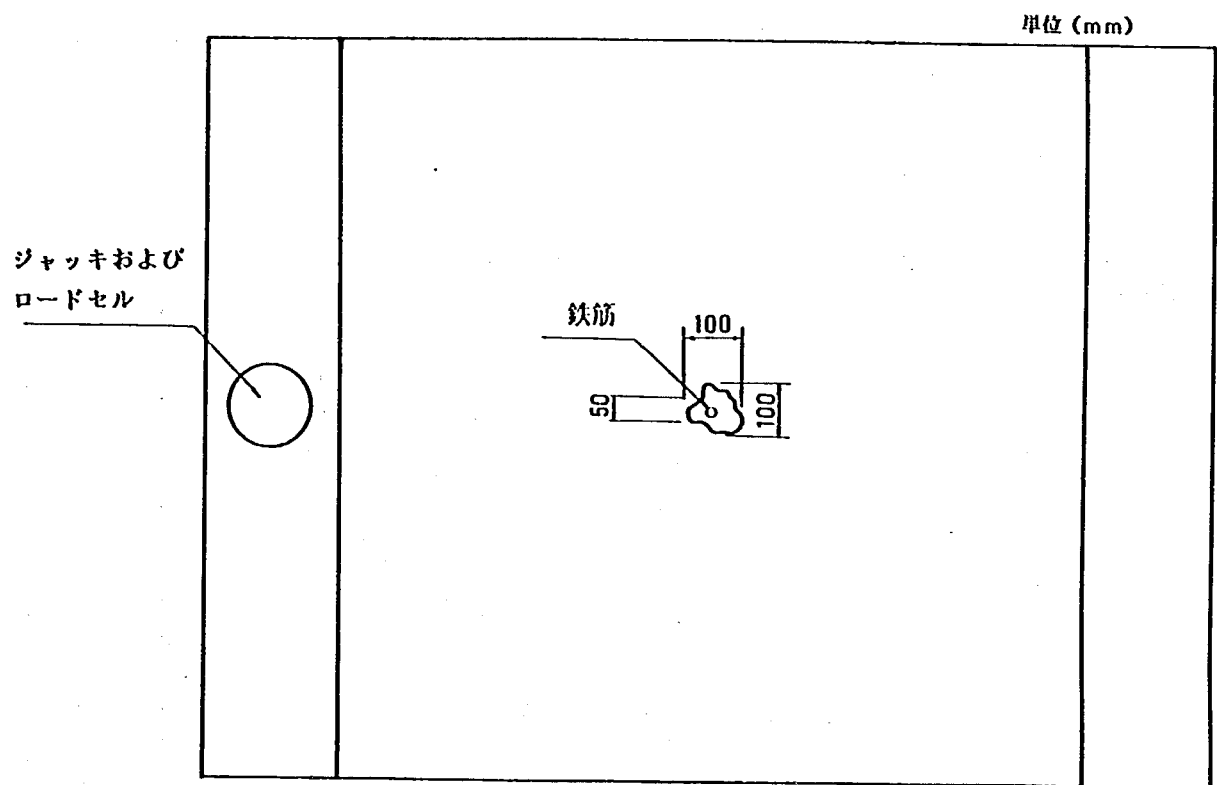


(a) 供試体No. 1

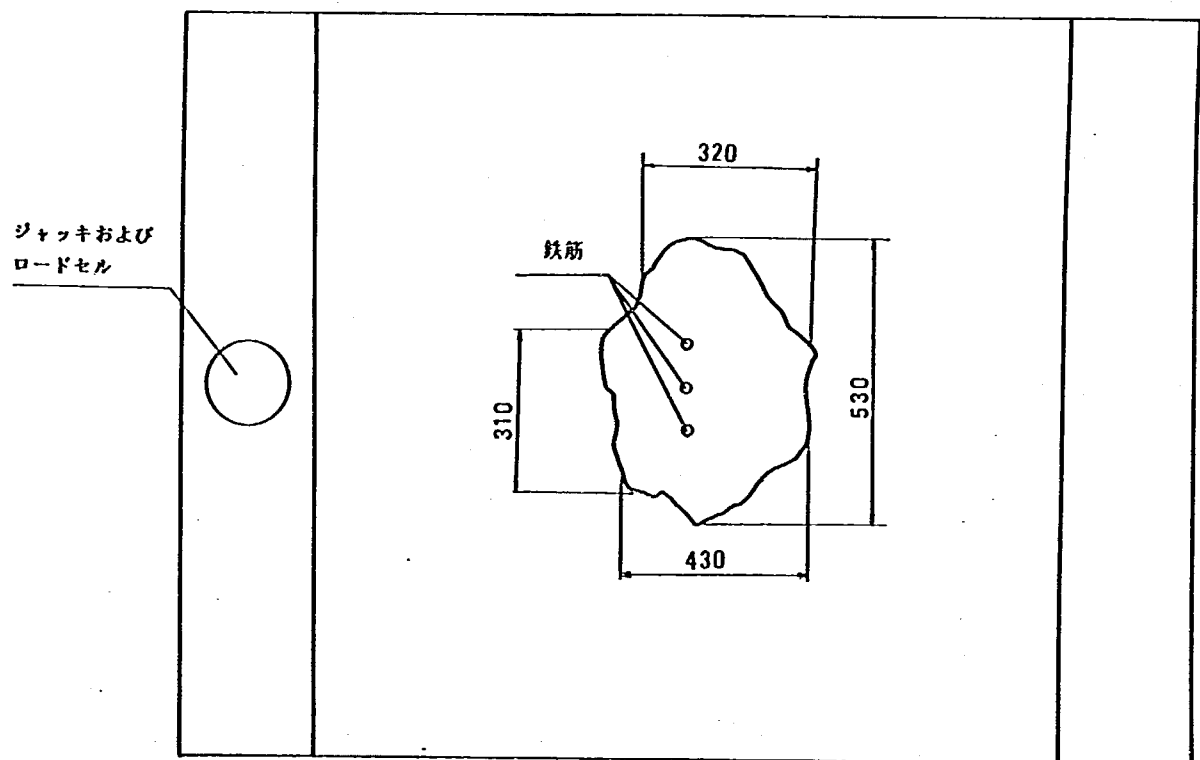


(b) 供試体No. 2

図-3.4 供試体クラック図

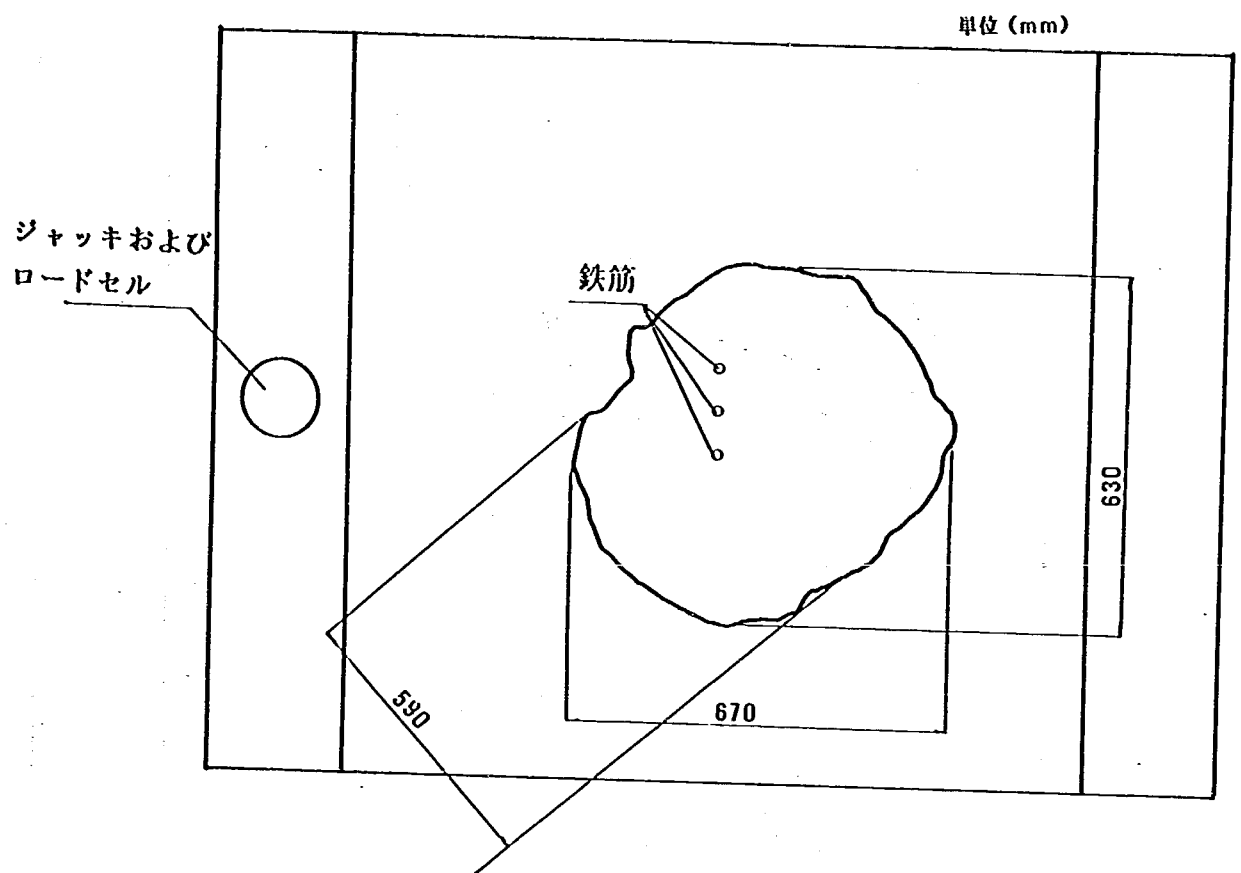


(c) 供試体No 3



(d) 供試体No 4

図-3.4 供試体クラック図 (つづき)



(e) 供試体No.5

図- 3.4 供試体クラック図 (つづき)

第4章 定着鉄筋の抜け出し量、および定着強度に関する解析法の検討

4. 1 破壊モードの決定

4. 1. 1 定着鉄筋が一本の場合

定着鉄筋を一本として引き抜き試験を行った場合、その引き抜き性状は図-4.1のようになるのが一般的である。

この時、コーン型の破断面の深さがどの程度となるかについて、算定することを試みた。ここで、このコーン状の破断面の深さを算定した目的は次の通りである。すなわち、定着鉄筋の定着長が短い場合、このコーン状の破断面の大きさが定着鉄筋の定着耐力を決定する主要因となること、また、定着長が十分であっても、コーン状の破断面が生じている区間内は、付着せん断力が期待できず、ひずみ分布が一定になることが考えられること、そして、定着鉄筋の降伏後の抜け出し量は定着鉄筋内の塑性域の進展状況が大きな影響を及ぼすことが予想されることなどの理由により、重要であると考えたからである。以下に、その方法について示す。

定着鉄筋を引き抜いた場合、鉄筋とコンクリートの界面に付着せん断力が生じるが、これは軸方向成分のせん断応力だけでなく、軸直角方向（鉄筋中心から半径方向）に、鉄筋からコンクリートへの支圧応力も伴って作用することが知られている。これにより、コンクリートに生じる主応力の方向は、

(i) 円周方向に生じる引張力 …………… リングテンション

(ii) 軸方向と角度 θ° をなす圧縮応力

(iii) 軸方向と $90^{\circ} - \theta^{\circ}$ をなす引張応力

の3つとなる。このうち (i) は付着割裂ひび割れを生じさせる原因となる応力成分であり、(iii) がコーン状の破断面を生じさせる原因となる応力成分である。

ここで、定着鉄筋に引き抜き力を作用させた際に、図-4.1の破壊パターンができると考え、深さ x_c の点まで付着応力 τ が発揮され、コンクリート内ではこれが $90 - \theta$ の角をなして引張応力として伝播すると仮定する。付着応力の軸方向成分の総和と、仮定したコーン状破断面に生ずる引張応力の総和の軸方向成分の大小を比較することを考える。ここでコンクリートの引張強度を f_{ct} 、付着強度を τ_{bo} 、深さ x_c までの付着応力の総和を BS 、仮定したコーン状破断面に作用する引張応力の総和の軸方向成分を CT とすると、

$$BS = \pi d \int_0^{x_c} \tau(x_c) dx_c \quad (4.1)$$

$$CT = \pi x_c^2 \cdot \tan \theta \cdot f_{ct} \quad (4.2)$$

ここで、 d は鉄筋径とする。この付着せん断力 (BS) が発揮されるためには、 $BS \leq CT$ でなければならない。 BS と CT がひとしくなる x_c の値を求める。(4.1) と (4.2) を等号で結び、両辺を微分することにより次式が得られる。

$$\tau(xc) = \frac{2 \cdot xc \cdot \tan \theta}{d} \cdot f_{ct} \quad (4.3)$$

$\tau(xc) \leq \tau_{bo}$ であり、この不等式の等号の成り立つ xc の値を lc とすると

$$lc = \frac{d \cdot \tau_{bo}}{2 \cdot \tan \theta \cdot f_{ct}} \quad (4.4)$$

すなわち、この理論に従うと (4.4) で与えるより深い所では、それより上部 (コンクリート表面側) で生じる付着せん断力を発揮するのに見合う引張耐力を有するもので、定着長を l とすると $x < l - lc$ の区間においてのみ $\tau(x) = \tau_{bo}$ となりうるものである。これは、一種の自由表面の影響の表現と考えられる。

ここで、コーン状の破断面を生じさせる引張り応力の鉄筋軸からの傾きを表す θ の値は、通常 45° から 60° 程度になるといわれるがここでは、 60° という値を採用することとした。

(4.4) を見ても分かるとおり、 τ_{bo} は f_{ct} に比べて著しく大きいわけではないので、 lc の値はそれほど大きいものではない。(4.4) 式中の各パラメータに試験値を代入し、 lc の値を試算してみた。ここで、 τ_{bo} の値をいろいろに変化させて、計算を行った。この結果を表-4.1に示す。

4. 1. 2 定着鉄筋が複数で、一列に配置されている場合の破壊モードの決定

定着鉄筋が複数の場合も、定式化に際しての基本的な考え方は、一本の場合と同様である。ただし、複数の定着鉄筋の場合は、さらに鉄筋のあきが検討すべきパラメータに加わる。複数の鉄筋の場合のコーン状の破断面を模式的に示したものが、図-4.2である。ここで、各鉄筋の間の破断面は、図中の点線のようにせず、実線のように仮定した。これは、実際の応力分布は、点線に示したよう複雑にならないと考えられるためである。このような仮定のもとで、付着せん断応力ならびにコーン状の破断面の深さは、次式のように考えられる。

$$\tau(x) = \frac{2 \cdot \pi \cdot x \cdot \tan \theta + 2 \cdot (n-1) \cdot (c+d)}{n \cdot \pi \cdot d} \quad (4.5)$$

$$l_{cn} = \frac{n \cdot d \cdot \tau_{bo}}{2 \cdot \tan \theta \cdot f_{ct}} - \frac{(n-1) \cdot (c+d)}{\pi \cdot \tan \theta} \quad (4.6)$$

ここで、 n は鉄筋の本数

ここで、問題となるのは、 n が非常に大きくなった場合で、(4.5) 式の右辺の分数の分子中、第2項目のみによって決まるようになり、 x の値によらず、深さ方向に一定となる。これは、 n の値が非常に大きくなると、鉄筋は奥行き方向に数多く並ぶようになり、3次元的ではなく、2次元的な状況になる。ここで、 $n=3$ の場合の試算結果を表-4.2に示す。

4. 2 鉄筋の抜け出し量の解析法の検討

4. 2. 1 主な既存の解析方法

これまで、橋脚の耐震設計などにおいて、定着鉄筋の抜け出し量を計算する手法としては、一般に、載荷端側の鉄筋のひずみ量と、平均付着応力度の関係を基にしていた。すなわち、定着鉄筋の載荷端側のひずみから、平均付着せん断応力度を定め、これが、鉄筋の軸方向に一定に分布するものとして、鉄筋の引張りひずみを求め、これを積分することにより、鉄筋の伸び出し量を計算するものである。ここで、鉄筋の引張りひずみと、平均付着応力度の関係は、次式で回帰されている。

$$\tau_m = 0.84 \cdot \sqrt{\varepsilon}$$

ここで、 τ_m は平均付着応力度（単位は、 kg/cm^2 ）

ε は鉄筋の載荷側の引張りひずみ（単位は μ ）

この手法は太田によって提案され²⁾（回帰式は文献4に見られる）鉄筋の抜け出し量が簡易に求められるので他の多くの研究においてもこの方法が用いられている。この方法によれば非常に簡易に計算できるがコンクリート強度が変化した場合、 τ_m と ε の関係がどのように変化するか明確になっていない、また、鉄筋の定着長の違いによる抜け出し特性の変化が分からない等の欠点もある。また、第3章の実験結果からも分かるとおり、鉄筋の抜け出し量は、鉄筋が降伏した後に大きくなるものであるが、降伏後もひずみによらず τ_m は一定として計算している。鉄筋が降伏するとその部分の付着せん断応力はかなり小さくなると予想され、この仮定が妥当といえない可能性がある。

一方、定着鉄筋が降伏した後も抜け出し量が計算できるものとして、松本、出口らの提案した方法がある³⁾。これは、定着鉄筋に蓄えられたひずみエネルギーとひずみ分布長（降伏後は、鉄筋の降伏域）を、次元解析により、定式化し、回帰分析によって係数を決定したものである。この手法によれば、降伏後の計算が合理的かつ簡易に行えるだけでなく、関係式中にコンクリートの圧縮強度も含まれていることから、より汎用性が大きいものであると考えられる。ただし、この手法では付着強度が陽な形で表れないこと、また弾性域区間内、塑性域区間内はすべて、ひずみの値を直線補完しており、付着せん断応力度が一定であることを仮定している。また、定着鉄筋の定着長が短く自由端でのすべりが生じる場合などは、この手法は用いられない。

これらの問題点をすべて解消するものとしては、鉄筋の付着せん断応力と、鉄筋のすべり量の関係（ τ - S 関係と呼ぶ）を定式化して解析を行うものである⁴⁾。近年、鉄筋コンクリートのFEM解析が盛んになるに連れて、このような手法を用いている研究も数多くなっている⁵⁾。この手法で、最も問題となる点は、 τ - S 関係の決定方法が難しいことである。 τ - S 関係は、定着鉄筋周辺の応力状態によって変化するものであり、この、応力状態をある程度含んだ形で τ - S 関係を定める（これは、主として、実験結果から、 τ - S 関係を決定する場合である）ものが一般的である。たとえば、定着鉄筋周辺に生じる内部ひび割れをコンクリートのポアソン比の変化という形で取り扱えるものも提案されている。

ここでは、簡易な τ - S 関係を用いた抜け出し量の解析法について、検討を行った。そして、 τ - S 関係の形が引き抜き荷重と抜け出し量の関係にどのような影響を及ぼすかについて調査した。

4. 2. 2 τ -S関係のモデル化と、抜け出し量の計算方法

ここでは、図-4.4に示したように τ -S 関係をモデル化し、引き抜き荷重と抜け出し量の関係を求めることとした。ここで、 τ -S 関係のモデルを規定するパラメータとしては、最大付着せん断応力度 $\tau_{\max}$ ならびにその付着せん断応力をあたえるすべりの値 S_1 、および付着せん断応力が最大値に達した後に、減少してゆき付着せん断応力がゼロになる点 S_2 とした。一方鉄筋の応力ひずみ曲線は、図-4.5のような形とした。ここで、鉄筋のすべり量を $S(x)$ 、鉄筋のひずみを $\epsilon(x)$ 、付着せん断応力を $\tau(x)$ 、鉄筋に作用している引張応力を $\sigma(x)$ 、とすると、これらの間に成り立つつりあい方程式は次のようになる。

$$\tau(x) = \frac{d}{4} \frac{d\sigma}{dx} = \frac{E d}{4} \frac{d\epsilon}{dx}$$

ここで、 E は鉄筋のヤング率を表し、 E_e 、あるいは E_h となる。ここで $\tau(x)$ は、 S の関数であり ϵ はすべりを x について微分したものであるから、 S に関する 2 階の微分方程式がえられる。すなわち、

$$\frac{d^2 S}{d^2 x^2} - \frac{4 \cdot \tau(S)}{E d} = 0$$

境界条件は、 $x=0$ において、 $\epsilon=0$ 、かつ、 $x=L$ において、 $\epsilon=\epsilon_0$ となる。ただし、定着鉄筋が付着耐力を失い、引き抜き荷重が低下し始めた場合は、 $x=L$ における境界条件はすべり量 S で与えることとする。また、 τ -S 関係はバイリニア型としたので、鉄筋の軸方向に沿って、 $S > S_1$ となる区間と $S < S_1$ となる区間が混在する場合は、それぞれの区間で、方程式の形が異なり、一般解の表現も異なってくる。よって $S=S_1$ となる x の値を見つけ出し、この地点ですべり量、ひずみの連続条件を用いて、2つの解を結合する必要がある。いっぽう、鉄筋の降伏後の計算は次のように行うこととした。鉄筋の軸方向のひずみ分布を図-4.6のように仮定し、塑性域と弾性域の境界部では、ひずみが不連続になるとした。ここで、塑性域から、 x 軸に沿って弾性域に近づいた場合の、境界部でのひずみは、ひずみ硬化が始まる値 ϵ_h となるようにした。

4. 3 解析結果及びその検討

4. 3. 1 τ -S 関係の設定と、抜け出し量の関係

ここでは、さきに示した τ -S 関係の各パラメータを変化させて、抜け出し量の計算を行った。ここで、定着長は、3章の実験結果と対応をとるため、20cm、35cm、50cmとした。ここで、 τ -S 関係を規定するパラメータのうち、変動させたのは、 $\tau_{\max}$ および、 S_1 とした。すなわち、 $\tau_{\max}$ は、30~70 kg/cm²、 S_1 は、0.1mmから0.5mmとした。また、 S_2 の値としては5mmを採用した。この結果を、図-

4.7に示す。また、3章での実験からえられた、抜け出し曲線を、図-3. に示す。ここで、 τ -S関係をトリリニアとして、付着せん断応力が最大値を示した後、一定値とせず、すぐに低下させたため、計算によってえられる抜け出し曲線も、付着せん断応力が最大となった後、すぐに定着力が減少している。これは、定着長が20cmの時、実験結果と解析結果の差として、顕著に現れる。しかし、定着長が35、及び50cmの時は、このことに関する実験結果との差は、現れていない。 τ -S関係を規定するパラメータ τ_{max} および、S 1の2つが抜け出し量の算定結果に及ぼす影響としては、まず τ_{max} は定着耐力そのものを規定し、(τ_{max}/S 1)が抜け出し曲線の立ち上がり勾配を規定している。すなわち、 τ_{max} が大きくても、S 1も大きければ、抜け出し量は大きくなる。定着長が20cmの場合について、その定着耐力が等しくなるよう τ_{max} の値を規定すると、 $\tau_{max}=60\sim70\text{kg}/\text{cm}^2$ 程度となる。これは、3章の実験結果で記録された付着最大せん断力が $70\sim80\text{kg}/\text{cm}^2$ から較べると、ややちいさめ(実験では、やや大きめ)の値であるが、記録されたひずみの測定誤差、並びに、実験データより付着せん断応力を算出する際、隣接する2点のひずみの差を、測定間隔で割って、付着せん断応力を算出したために、計算結果には、誤差が大きくなるものと考えられ、それほど大きな差ではないと考えられる。

一方S 1の値に付いては、0.3mmとした場合が、最も実験結果に近くなると考えられる。よって、この後はS 1の値を0.3mmとする。ここで、この値が他に提案されている τ -S関係と比べてどのようなか検討を行うこととする。今回の実験条件に最も近い応力状態で τ -S関係が岡村らによって提案されている。この τ -S関係にしたがえば、 $S/D*1000$ が15よりわずかに小さいところまで単調に増加し、ここで τ が最大値約 $2/f_c$ に達している。これを、今回の実験条件に当てはめると、 τ の最大値としては約 $70\text{kg}/\text{cm}^2$ 、これを与えるSの値は、0.33mmよりわずかに小さくなり、今回妥当な値として採用した、 S 1=0.3mmとかなり近いことが分かる。

各定着長ごとに検討すると、定着長が50cmの場合は、鉄筋ひずみが 2000μ に達しても、 τ_{max} が $50\text{kg}/\text{cm}^2$ 以上であれば、過大な抜け出し量を与えることはないが、定着長が35cmの場合では、 τ_{max} が $60\text{kg}/\text{cm}^2$ でもかなり大きな抜け出し量となっており、 $50\text{kg}/\text{cm}^2$ となると、鉄筋が降伏する前に定着耐力が減少してしまうことがわかる。また、 τ_{max} が大きい場合(ここでは、 $70\text{kg}/\text{cm}^2$)は、定着長が35cmと、50cmの場合の差は、少なくなっている。すなわち、ある τ_{max} が与えられたとき、定着長に余裕があれば、 τ_{max} の変化は、抜け出し量に余り大きな影響は与えない。一方、ある τ_{max} に対し、定着長に余り余裕が無い場合、そこから τ_{max} に変動があると、抜け出し性状が大きく異なって来る場合がある。今回検討したうちでは、定着長が35cmの場合がこれに相当し、 τ_{max} が $60\text{kg}/\text{cm}^2$ より小さくなると、鉄筋の降伏にさきかけて付着破壊が生じることが解析結果により分かる。これは、実験結果とも対応し、3章で行った実験の供試体Na 2とNa 5の関係に当てはまる。ここで、供試体Na 2では、鉄筋の降伏が定着破壊よりも先行したが、弾性範囲内でも、かなり大きな抜け出し量となり、定着長に余裕が無いことが分かったが、群鉄筋の効果より、最大付着せん断応力が減少すると、鉄筋の降伏よりも、定着破壊が先行し鉄筋の降伏は生じなくなる。また、4. 1でも検討したように、鉄筋の本数が複数であると、その配置間隔により、コーン状に破壊する領域が大きくなり、実質的に定着長が減少することも、原因の一つと考えられる。今回は、鉄筋の配置間隔による τ_{max} の値の変化に付いては、検討できなかったが、今後明らかにする必要がある。

4. 3. 2 定着鉄筋の降伏後の抜け出し量の検討

ここでは、さきに示した通り、問題を簡略化するために、鉄筋降伏後も、同一の τ - S 関係を用いて、鉄筋の抜け出し量の計算を行った。この結果を図-4.8に示す。なお、鉄筋降伏後は、コーン状に破壊した領域は、付着せん断耐力が0になるとして計算を行った。定着長が50cmの場合について $S_1 = 0.3\text{mm}$, $S_2 = 5\text{mm}$, 鉄筋のひずみ硬化が始まる点を1%。ひずみ硬化後のヤング係数を 40000kg/cm^2 として計算したものである。この例からも分かるとおり、鉄筋の抜け出し量は定着長が十分ある場合には、降伏後の成分がほとんどであり、この量を適切に算定する必要がある。今回の実験結果と比較した場合、解析解は定着鉄筋のひずみが2%で1.5mm, 実験結果は、鉄筋ひずみが2%で1.7mmであり、よい対応を見せている。すなわち、このような簡易的な τ - S 関係を用いても、鉄筋の抜け出し量は把握可能であることが分かる。なお、図4.8には松本らの算定方法による結果も示した。この図からも分かる通り、この方法でも、降伏後の抜け出し量が適切に計算できる。

図-4.9は $\tau_{\min}$ の値を10から 30kg/cm^2 まで変化させたものであるが、鉄筋のひずみが大きくなり、抜け出し量が増大するにつれて、 $\tau_{\min}$ の値の影響が大きくなっていく。図4.10は $\tau_{\min}$ の値を 10kg/cm^2 とし、定着長を50cm (22.7d), 88cm (40d), 110cm (50d) と変化させたときのひずみ-抜け出し量の関係を示したものである。50cmと88cmの間には、抜け出し量の差が大きく表れているが88cmと110cmの差は、鉄筋降伏後においてもほぼ変化が無い。すなわち、定着長が40d以上ある時は、自由端のすべりが非常に小さく抜け出し量はその定着長の如何に関わらず、一義的に定まるものであると考えられる。

ただ、ここで問題となるのは、定着長が50cmの場合、鉄筋ひずみが、5%に達したところで、降伏域が進展し、ひずみ硬化により引き抜き荷重も大きくなり、計算上付着破壊を起こしたことである。定着長がこれより大きな時は、それ以上の鉄筋ひずみが生じても、定着破壊を起こすことはない。このように、定着長を定める際には、鉄筋のひずみ硬化による、引き抜き荷重の増加を考慮することが望ましいことが分かる。

4. 4 まとめ

ここでは、鉄筋の抜け出し量に関する解析的な算定方法について検討し、以下のような結果をえた。

- ① τ - S 関係を簡単なトリリニア型でモデル化して、すべりに関する微分方程式を解くことにより、かなり正確な抜け出し量が算定できることが分かった。
- ② 弾性域で得られた τ - S 関係を用いて、鉄筋降伏後の抜け出し量についても、算定可能であることが分かった。
- ③ 鉄筋ひずみがかなり大きくなった場合、鉄筋がひずみ硬化を起こし、引き抜き荷重が増大したときは、鉄筋降伏後に、定着破壊の起きる可能性があることが分かった。

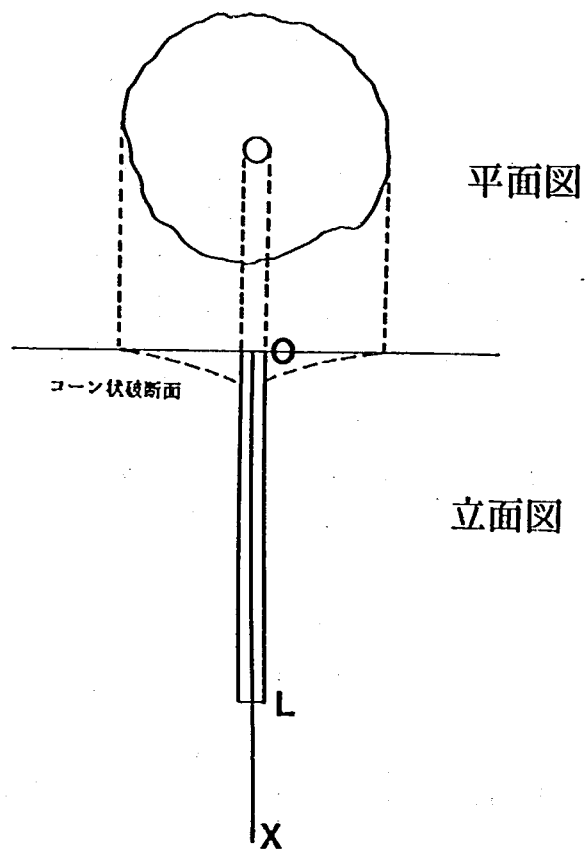
表-4.1 各付着せん断応力に対する、コーン状破断面の深さの試算結果

τ_{bo} (kg/cm^2)	$f_{ct}=14.3(\text{kg}/\text{cm}^2)$		$f_{ct}=14.6(\text{kg}/\text{cm}^2)$		$f_{ct}=17.4(\text{kg}/\text{cm}^2)$	
	$\theta=45$	$\theta=60$	$\theta=45$	$\theta=60$	$\theta=45$	$\theta=60$
40	1.40d	0.81d	1.37d	0.79d	1.15d	0.66d
50	1.75d	1.01d	1.71d	0.99d	1.44d	0.83d
60	2.10d	1.21d	2.06d	1.19d	1.72d	0.99d
70	2.45d	1.41d	2.40d	1.38d	2.01d	1.16d

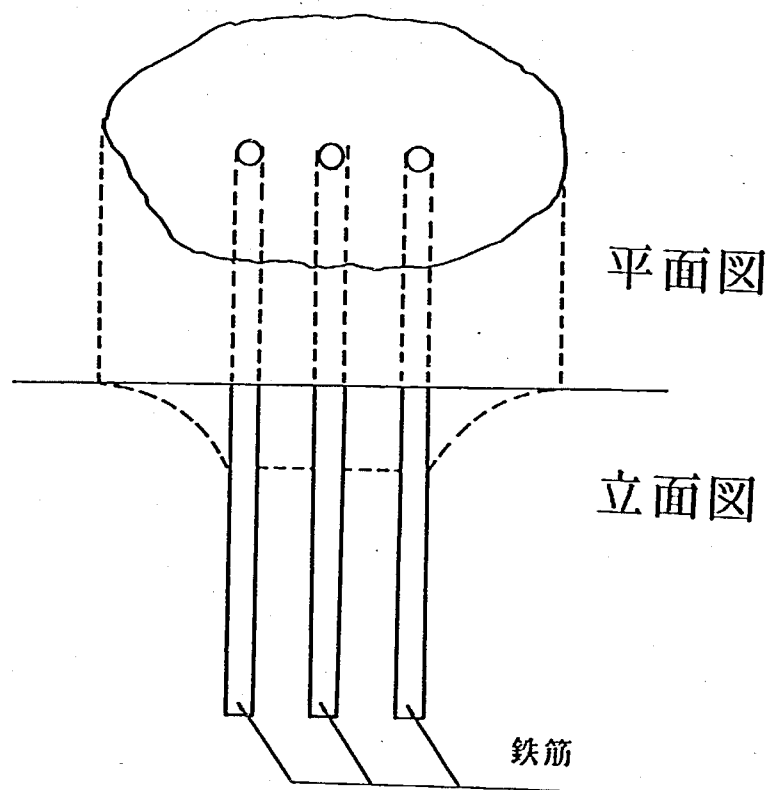
表-4.2 群鉄筋の場合(本数3本)のコーン状破断面の試算結果

τ_{bo}	40 kg/cm^2	50 kg/cm^2	60 kg/cm^2	70 kg/cm^2
l_c	1.28cm	1.74cm	2.70cm	3.70cm

注 計算条件は、鉄筋の径が2.2cm、鉄筋のあきが4cm、コンクリートの引張り強度が20 kg/cm^2 、 $\theta=60^\circ$ とした。



図－4.1 破壊状況の既略及び座標のとり方



図－4.2 複数鉄筋の場合の破断面のモデル図

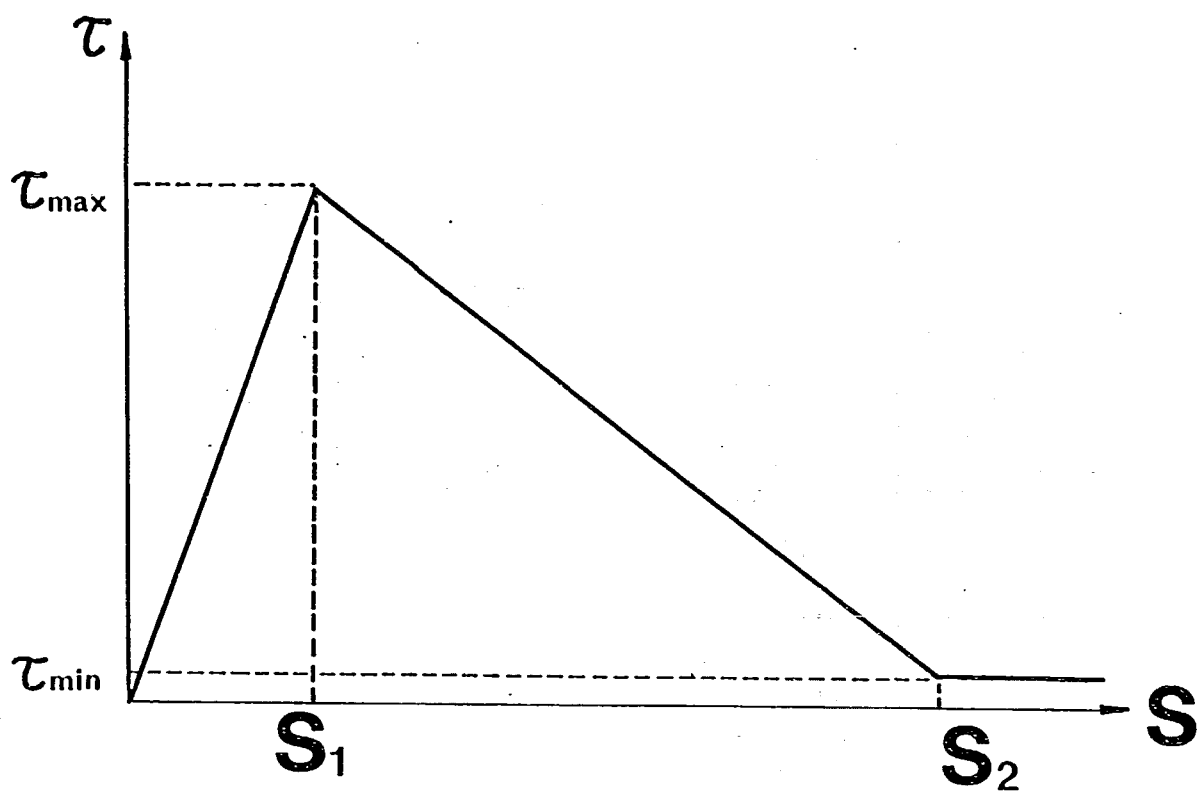


図-4.3 モデル化された $\tau-S$ 関係

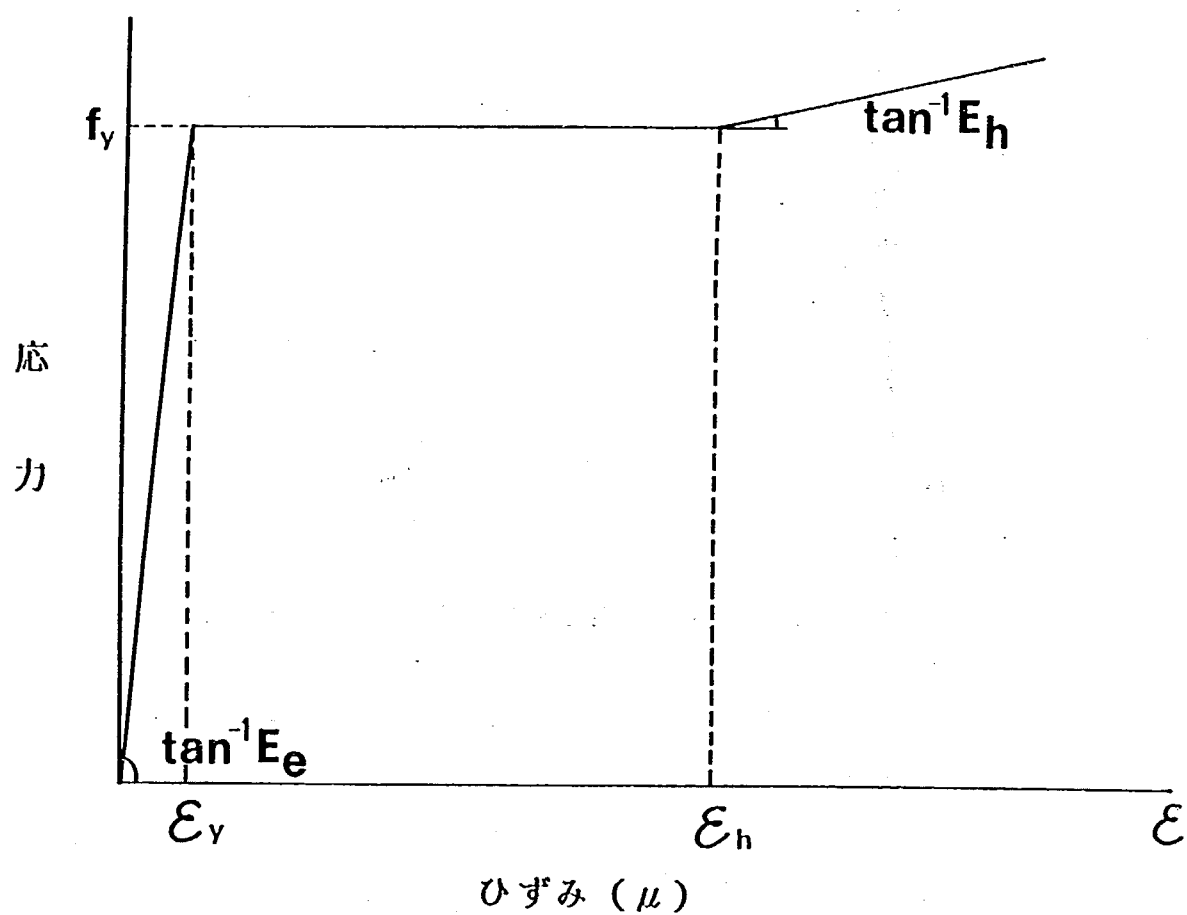


図-4.4 鉄筋の応力ひずみ曲線

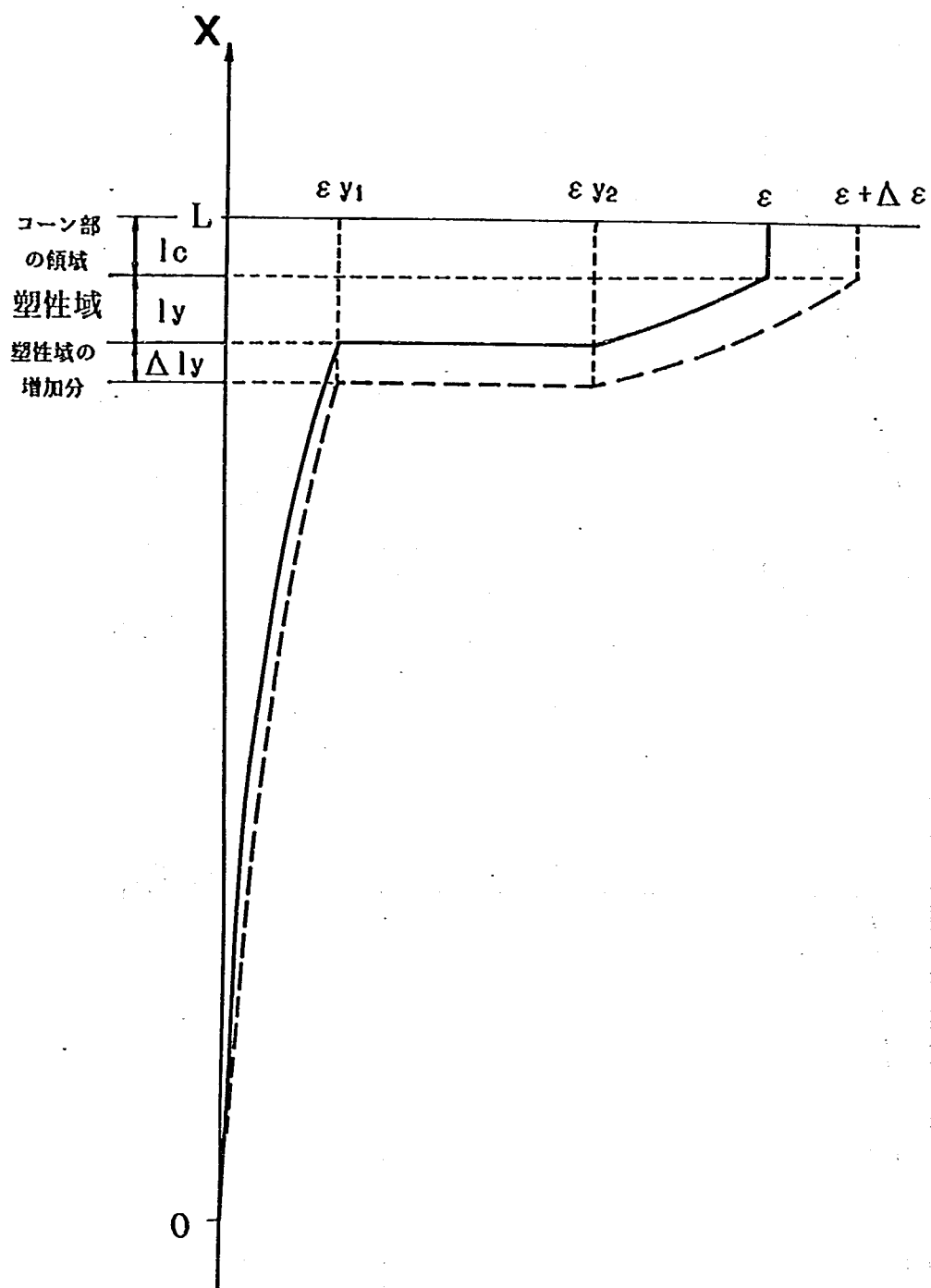
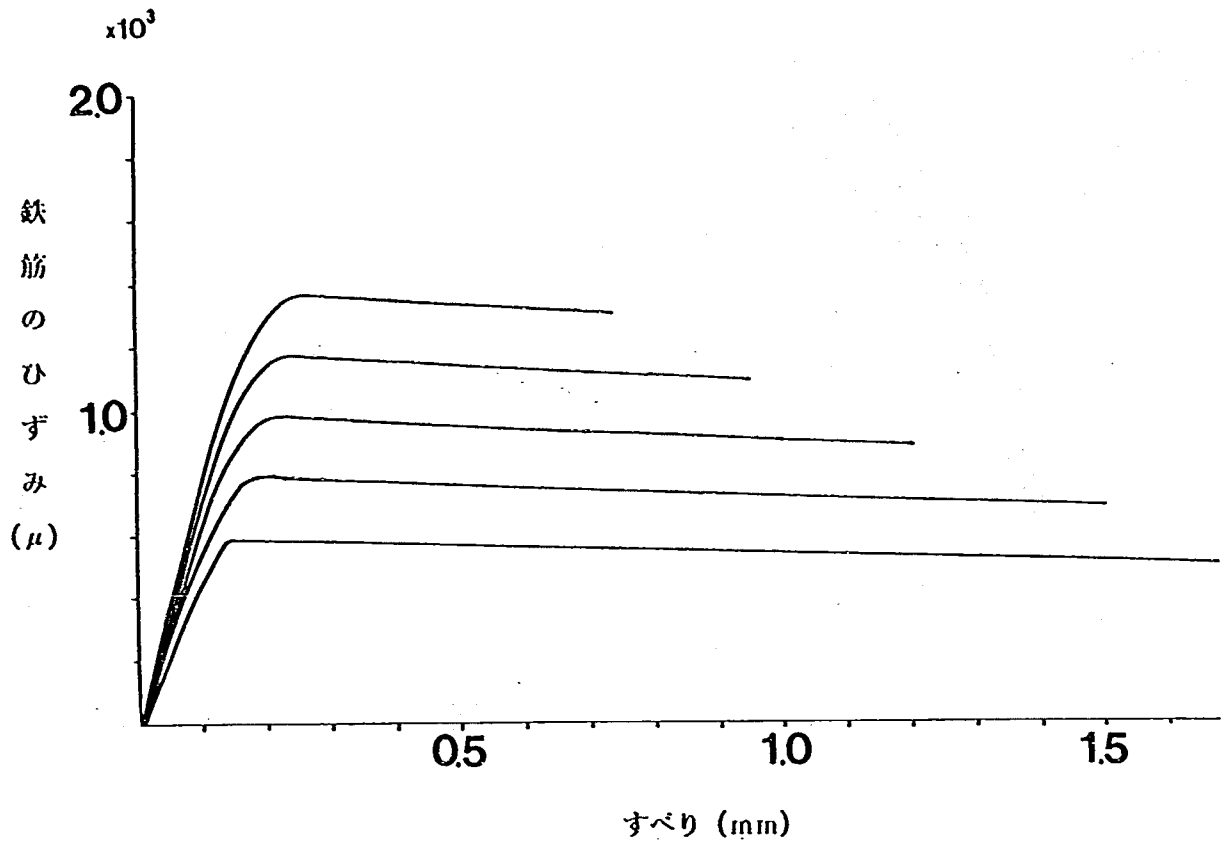
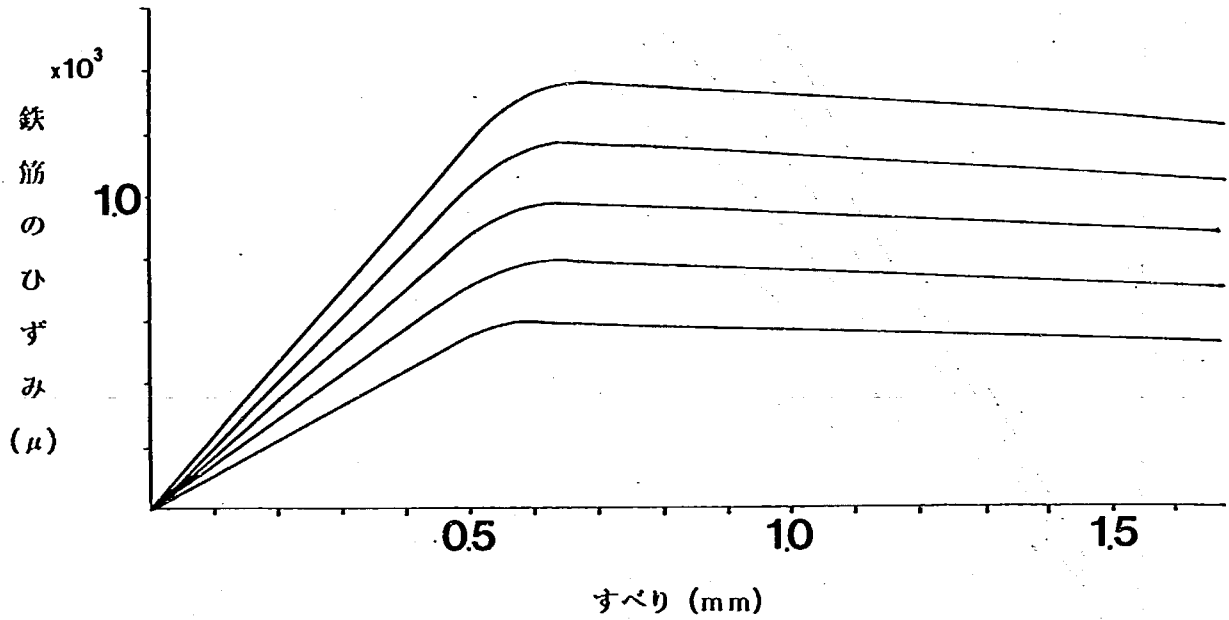


図-4.5 定着鉄筋の引張ひずみ分布

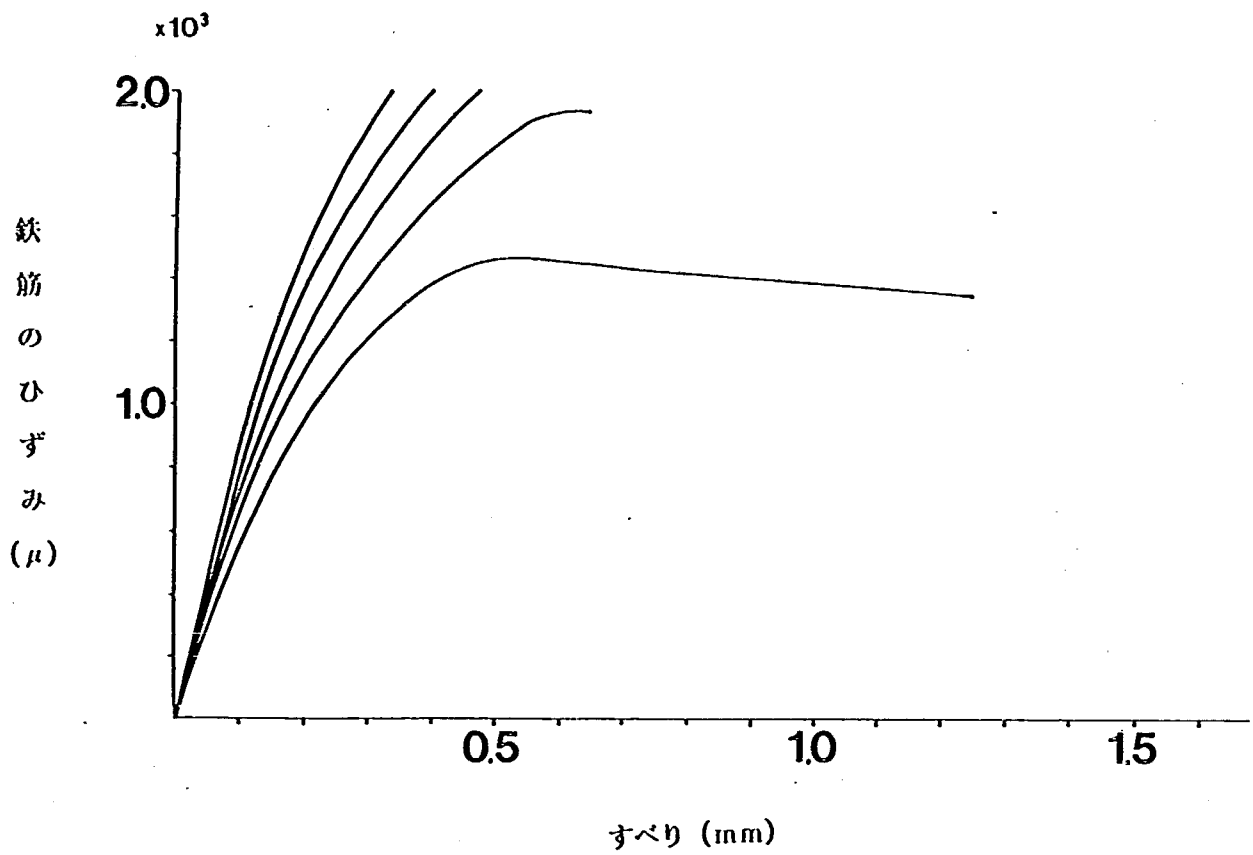


(a) $S_1 = 0.1 \text{ mm}$, 定着長 = 20 cm

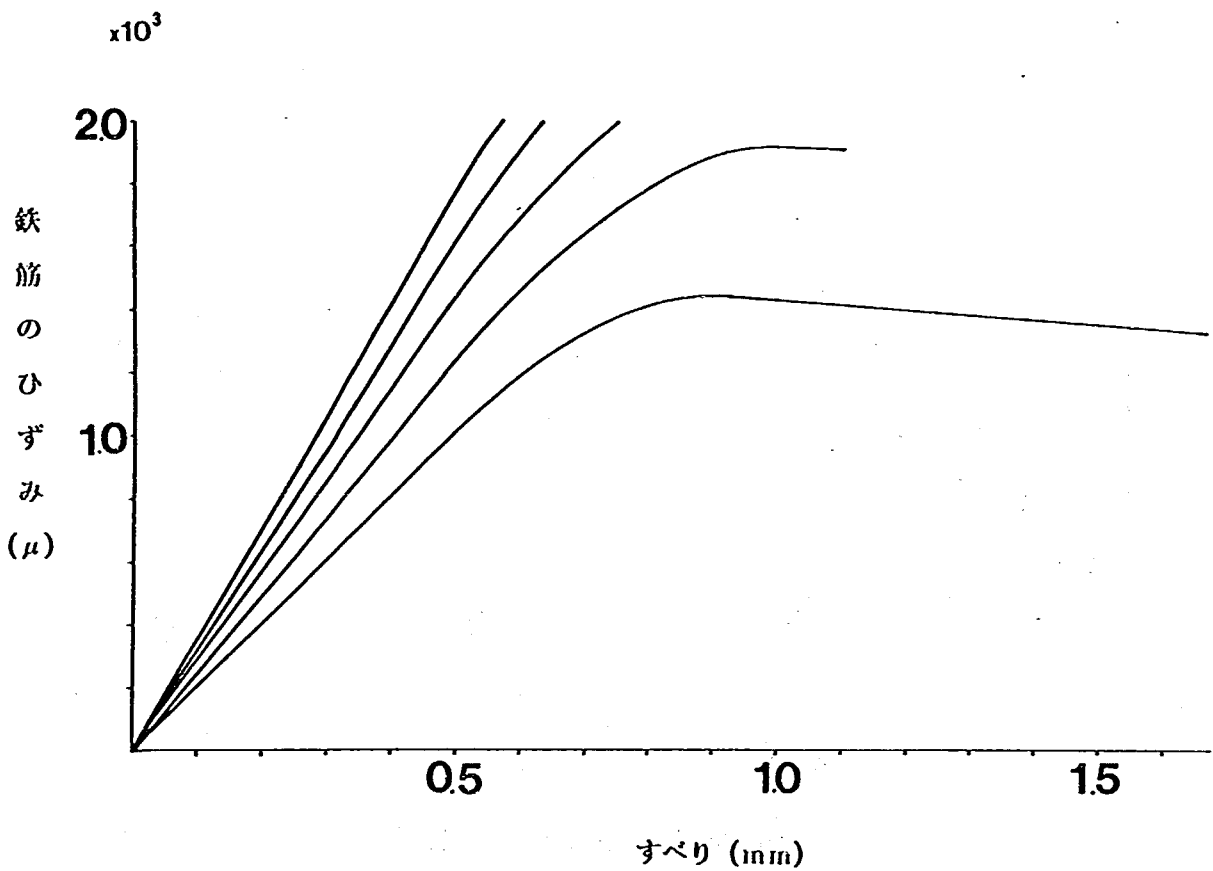


(b) $S_1 = 0.5 \text{ mm}$, 定着長 = 20 cm

図-4.6 弾性範囲内の抜け出し量解析結果

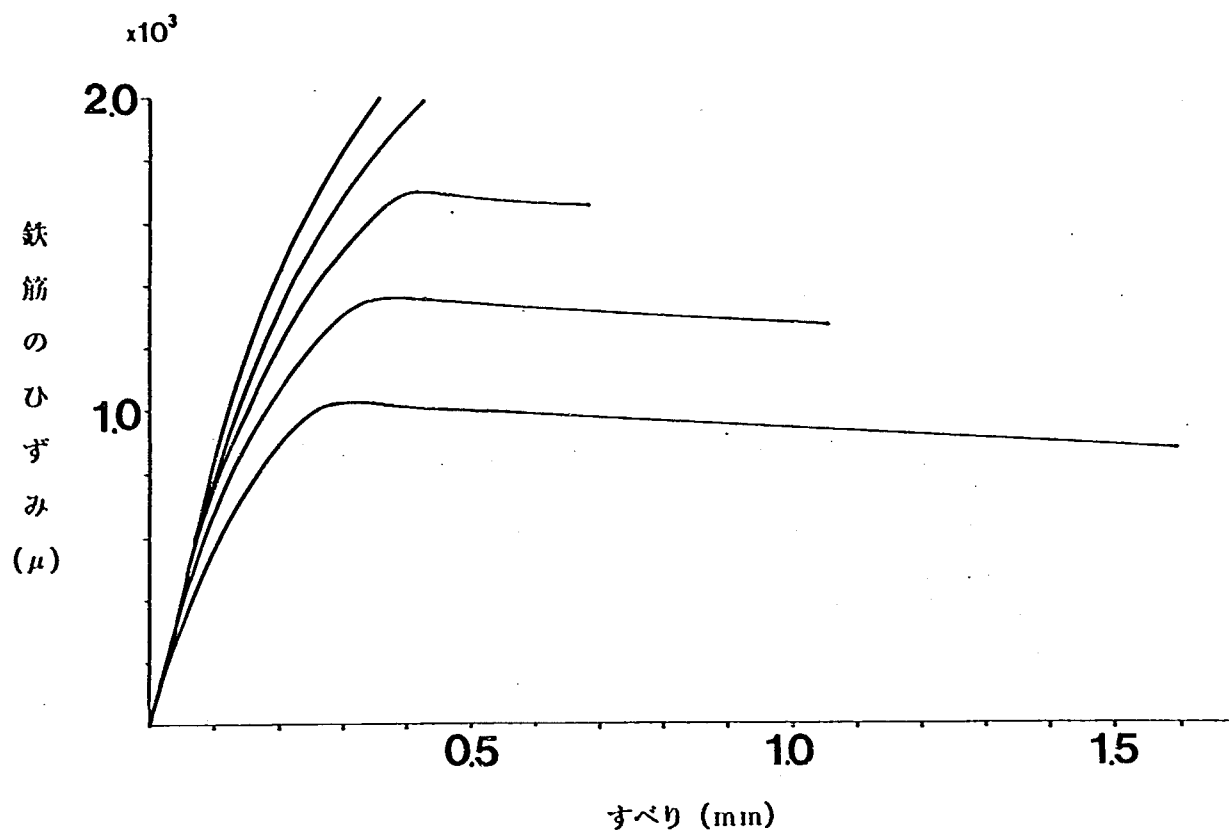


(c) $S_1 = 0.1 \text{ mm}$, 定着長 = 35 cm

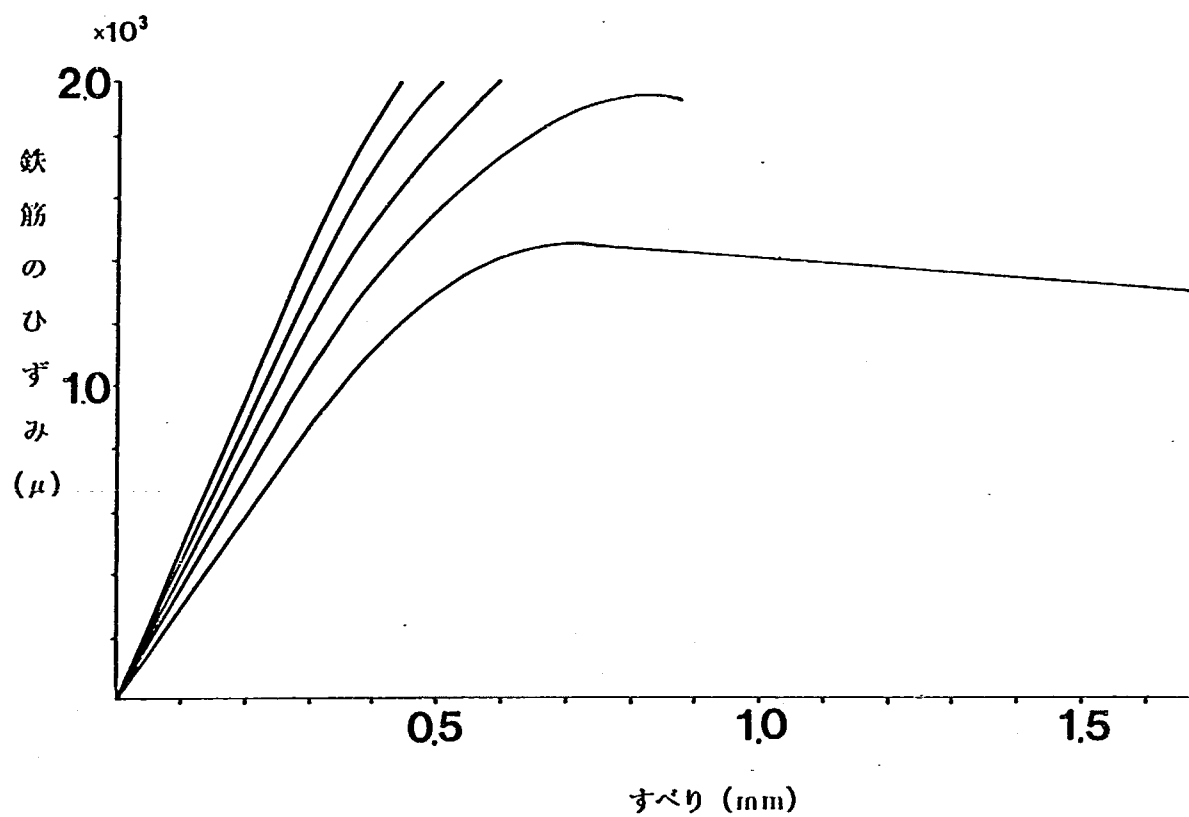


(d) $S_1 = 0.5 \text{ mm}$, 定着長 = 35 cm

図-4.6 弾性範囲内の抜け出し量解析結果 (つづき)

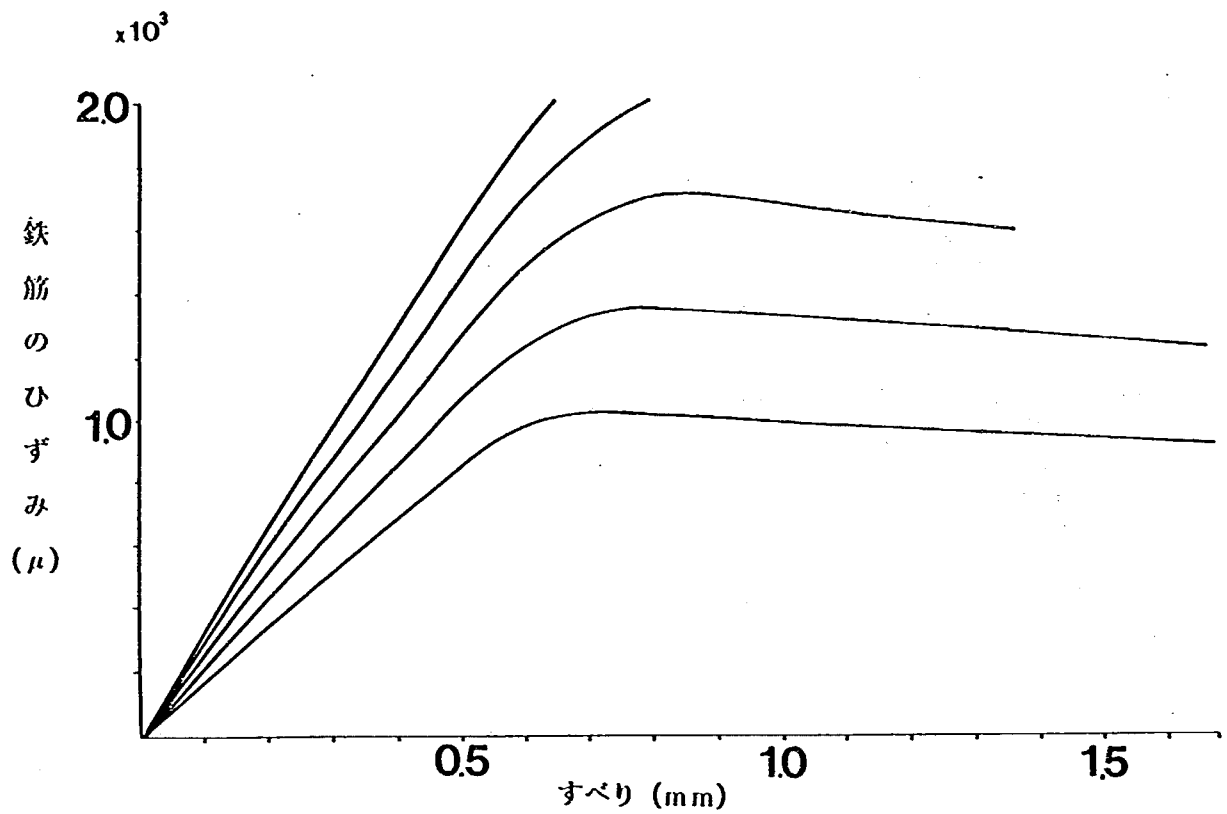


(e) $S_1 = 0.1 \text{ mm}$, 定着長 = 50 cm



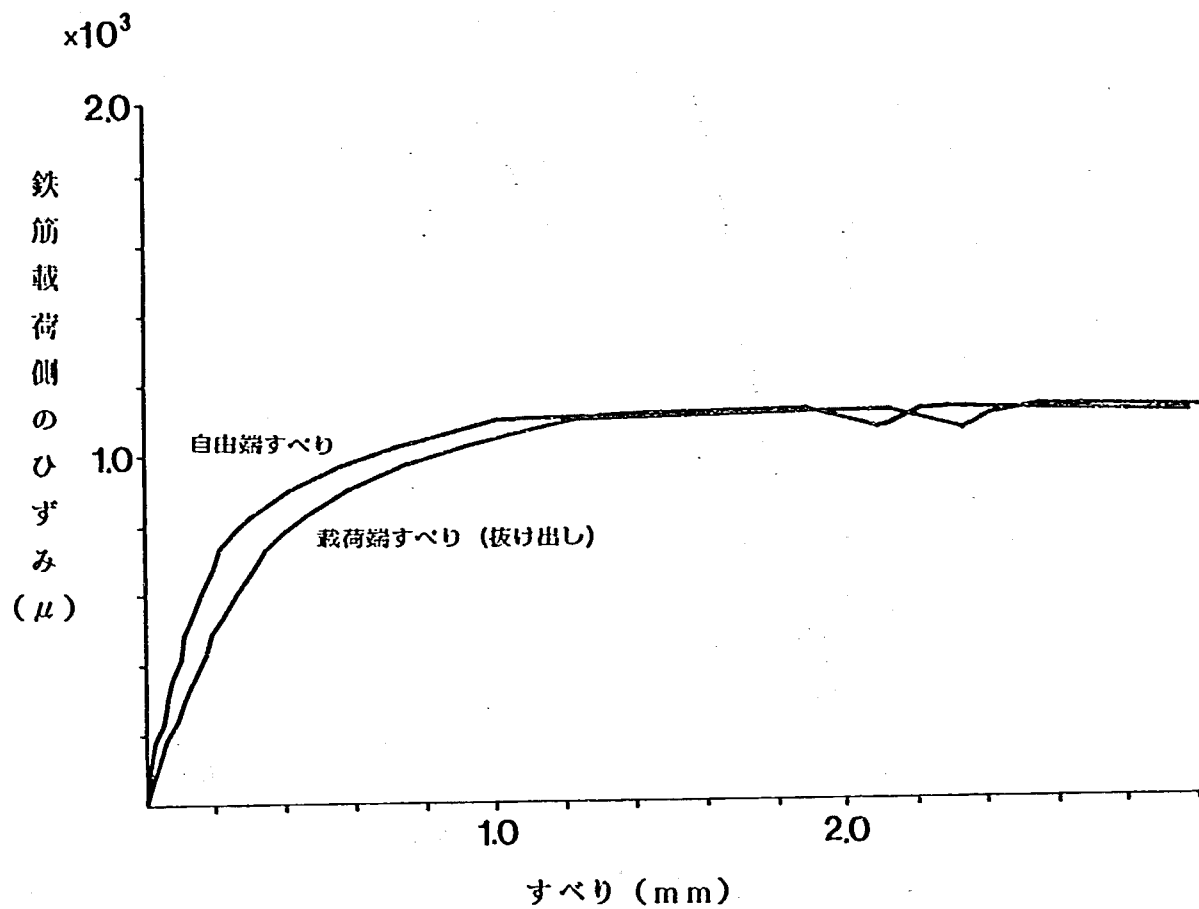
(f) $S_1 = 0.3 \text{ mm}$, 定着長 = 50 cm

図-4.6 弾性範囲内の抜け出し量解析結果 (つづき)

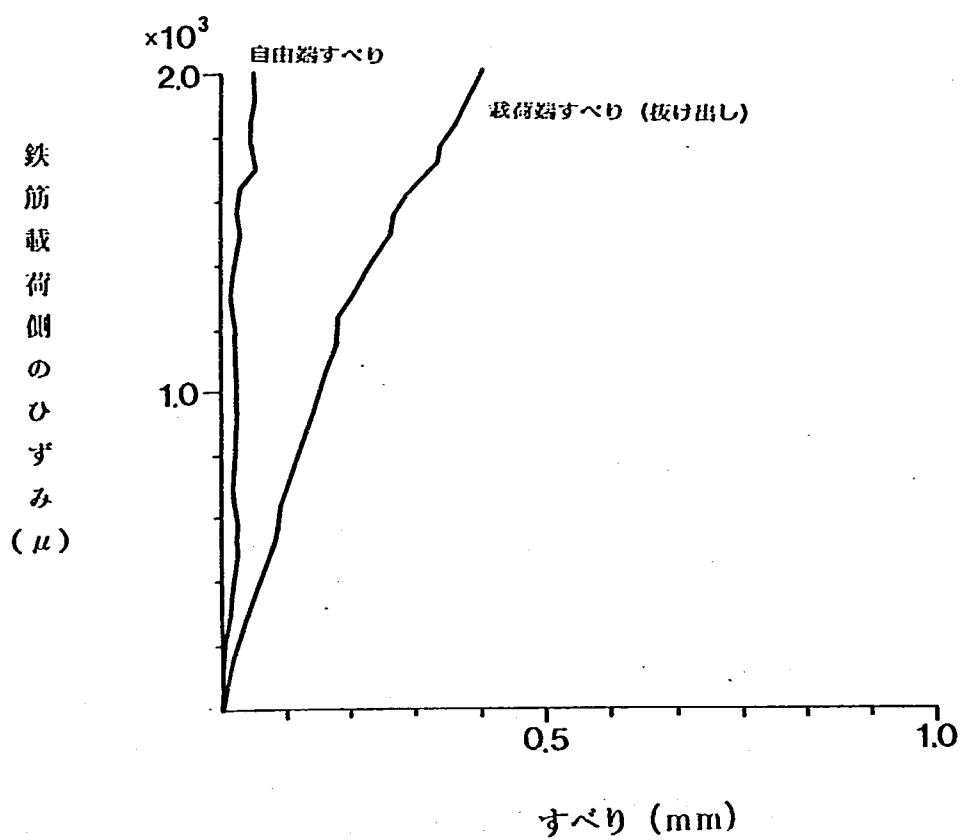


(g) $S_1 = 0.5 \text{ mm}$, 定着長 = 50 cm

図-4.6 弾性範囲内の抜け出し量解析結果 (つづき)

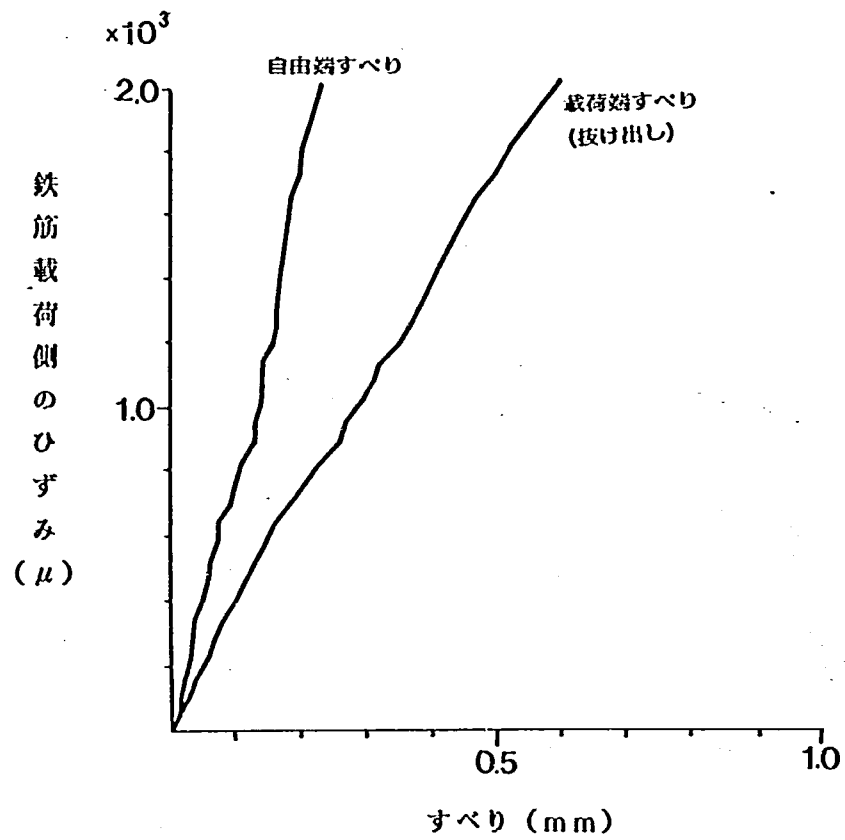


(a) 供試体No 1



(b) No 2

図-4.7 鉄筋ひずみ-抜け出し関係 (実験値)



(c) №3

図-4.7 鉄筋ひずみ-抜け出し関係 (実験値) (つづき)

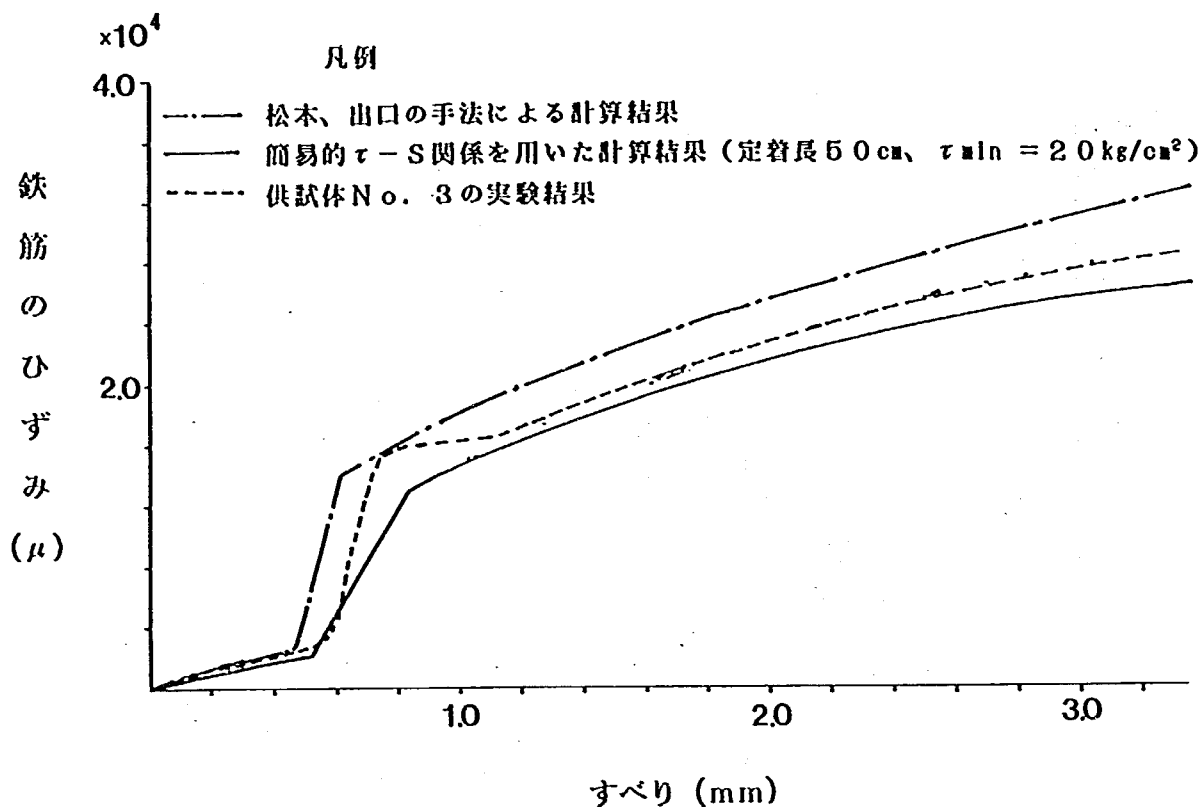


図-4.8 降伏後の鉄筋の抜け出し量

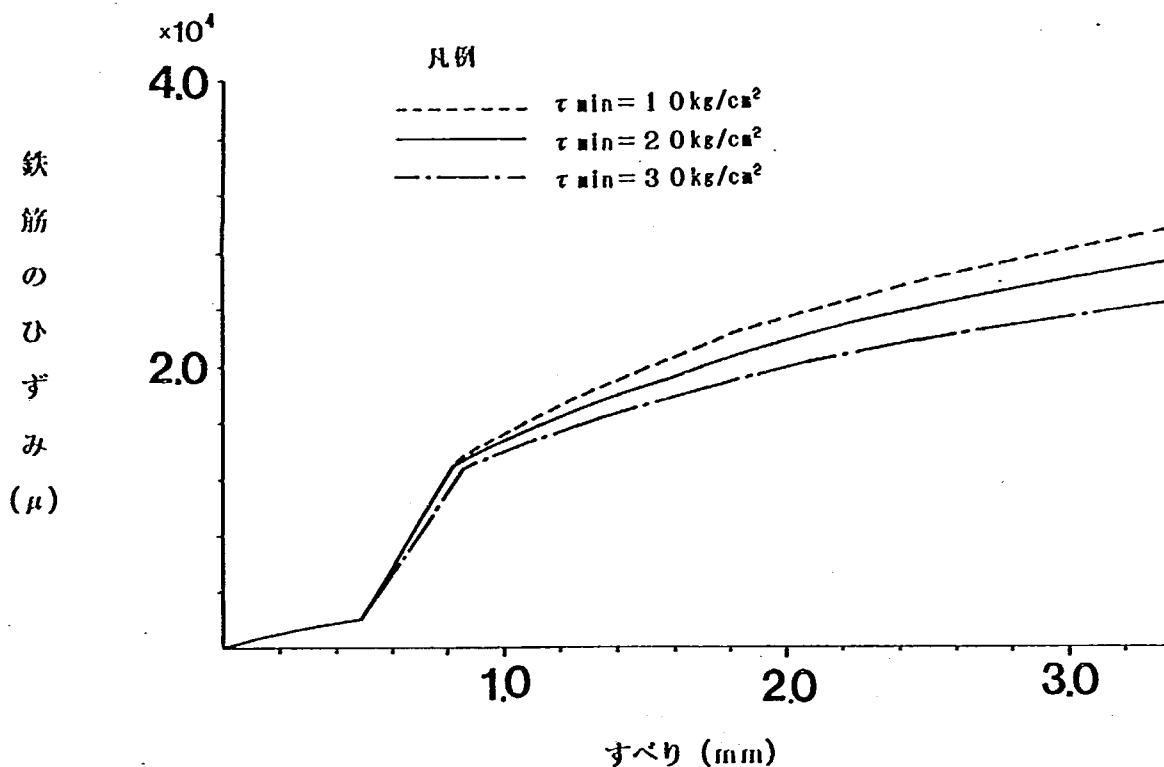


図-4.9 τ_{min} の変化にともなう抜け出し量の変化

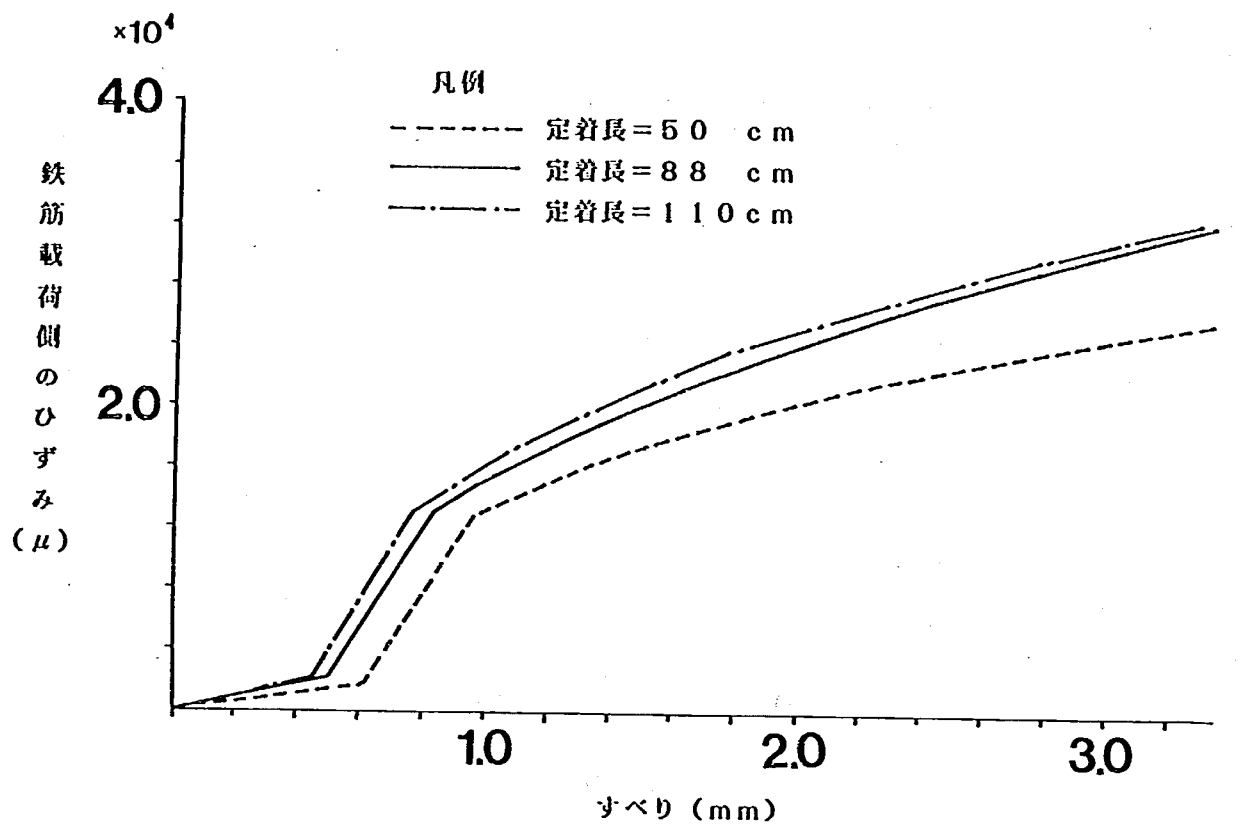


図-4.10 定着長の変化にともなう抜け出し量の変化

第5章 鉄筋の抜け出し量と、軀体の変形の関係

5. 1 概 説

橋脚の変形計算は、従来より鉄筋の抜け出しによる影響は平均付着せん断応力と、鉄筋の引張りひずみの関係に基づいていることは先にも述べた通りである。ここでは、定着鉄筋が降伏したとき、ならびに、橋脚のコンクリート部が圧壊し、終局状態に至った場合について、定着鉄筋の抜け出し量を試算によって求め、橋脚軀体の変形量に及ぼす影響、ならびに、靱性に及ぼす影響について、考察してみた。

5. 2 計算モデルの設定

ここでは、変形計算を行う橋脚のモデルを、標準設計を参考にし、これから、鉄筋量、橋脚高さなどを変化させて水平荷重が載荷された場合の曲げ変形を計算した。ここで、曲げ変形の計算するにあたってのコンクリートの応力ひずみ曲線、鉄筋の応力ひずみ曲線は、それぞれ図-5.1のように仮定した。なお、計算に当たって、コンクリートの引張り応力は無視し、断面の平面保持の仮定を採用した。採用した橋脚は、標準設計より1つ例をとり、これを基本として、鉄筋量、橋脚高さを変化させた。すなわち、橋脚高さとしては、5.1m~7.1m、引張り鉄筋比は、0.169%~0.29%、の間で変化させた。鉄筋は、D19とし、断面内に図-5.2のように配置したものを想定した。コンクリート強度は210 kg/cm²とし、コンクリートひずみが0.2%まで放物線と仮定し、終局ひずみは0.35%とした。抜け出し量の計算においては、単鉄筋の τ -S 関係を基に4章に示したのと同様の方法を採用した。ここで、 $S_1 = 0.3\text{mm}$, $S_2 = S_{mm}$, $\tau_{\max} = 70\text{kg/cm}^2$, $\tau_{\min} = 20\text{kg/cm}^2$ とした。

5. 3 計算結果の検討

設定した橋脚に関して、変形計算を行った結果を表5-1に示す。

これらの値の内、 δ に添え字1がついたものは、橋脚軀体の曲げ変形の計算結果であり、添え字2がついたものは、定着鉄筋の抜け出しによる、回転変形の成分を示している。なお、鉄筋の定着長は、鉄筋自由端に過大なすべりが出たり、鉄筋のひずみ硬化中に、付着破壊が生じ、定着耐力を失うことがないように、鉄筋径の40倍の値を採用した。ここで、降伏後の抜け出し量の計算には、定着鉄筋上部にどれだけのひずみが生じているかを与えなければならない。ここで、このひずみの値としては、橋脚軀体の曲げ変形を行った際の、接合部断面の鉄筋のひずみを与えた。よって、鉄筋量の少ない部材では、断面の曲げモーメントと曲率の関係から、終局状態での引張り鉄筋のひずみは非常に大きくなっている。すなわち、鉄筋量が少なければ、接合部の鉄筋の引張りひずみが大きくなり、このために抜け出し量も大きくなっている。橋脚の回転角については、鉄筋の抜け出し量を、鉄筋位置から中立軸までの距離で除して求めた。ここで、各橋脚高さに関して引張り鉄筋比が変化した際に、橋脚天端の変位内の抜け出しによる回転変位の成分の割合 $[\delta_2 / (\delta_1 + \delta_2)]$ を図-5.2に示す。ここで、図-5.2 (a) は引張り鉄筋が降伏した次点での比を表し、(b) は終局状態での比を表している。こ

の結果、次のようなことが判明した。すなわち、鉄筋が降伏した時点での橋脚天端の変位におよぼす抜け出し量のせいぜい10%程度であり、橋脚高さが高いほど、その影響度合は小さくなる。これは、鉄筋降伏時の鉄筋の抜け出し量は、0.42mmと一定であり、回転角が橋脚高さに関わらず一定であるためである。これは、弾性変形の仮定を用いた概算によっても示すことが出来る。平均付着せん断応力を τ_m とし付着せん断応力が一定に分布すると仮定すると、 $\delta_1 y$ および $\delta_2 y$ の概略値は次のようになる。

$$\delta_1 = \int_0^H \phi(y) \cdot y \, dy \quad H^2 \int_0^1 \phi(y/H) y^1 \, dy^1$$

$$\delta_2 = \frac{\Delta}{(1-k)} \frac{H}{d}$$

ここで H : 橋脚高さ
 Δ : 鉄筋の抜け出し量
 d : 断面の有高さ
 k : 中立軸比
 $\phi(y)$: y の位置における断面の曲率

$$\delta_{1y} = H^2 \int_0^1 \frac{\epsilon_y y^1}{(1-k) d} \, dy^1 = \frac{\epsilon_y H^2}{3 (1-k) d}$$

$$\delta_{2y} = \frac{\frac{E \epsilon_y^2 D}{8 \tau_{\max}}}{(1-k) d} H = \frac{\sigma_y \epsilon_y D H}{(1-k) d 8 \tau_{\max}}$$

$$\frac{\delta_{2y}}{\delta_{1y}} = \frac{3 \sigma_y D}{8 \tau_{\max} H}$$

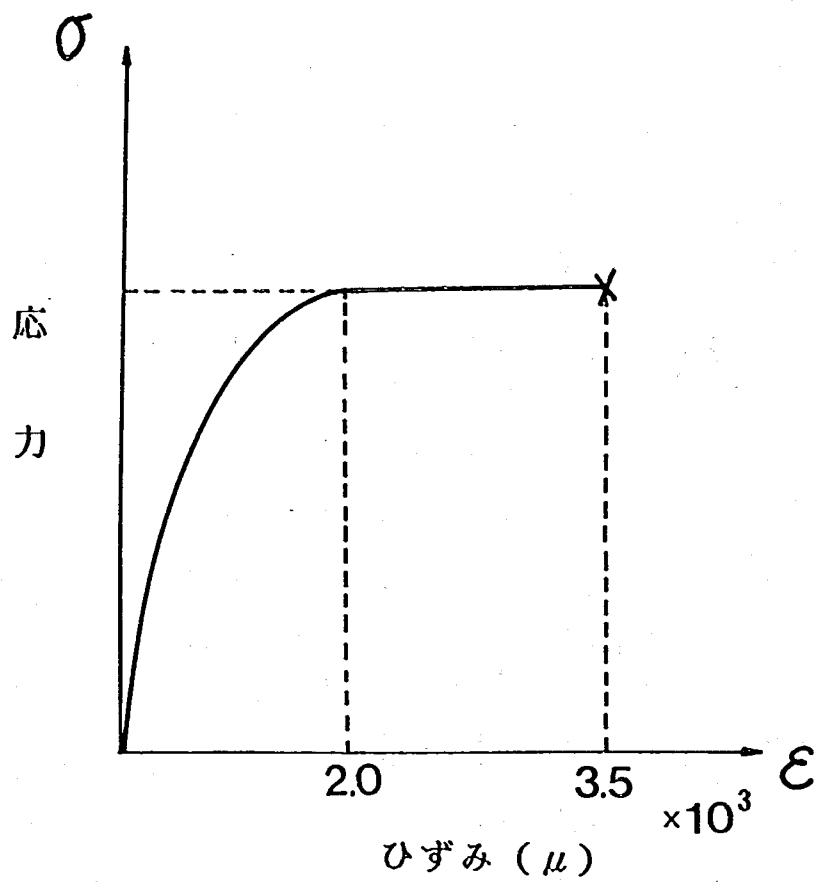
$\tau_{\max} = 40 \text{ kg f / cm}^2$, $\sigma_y = 3800 \text{ kg f / cm}^2$ とすると

この式で $D=1.9 \text{ cm}$ とすると $H=5.1 \text{ m}$ で 11.7%, $H=7.1 \text{ m}$ で 8.7% となる。この式からも分かる通り、橋脚高さが大きくなるにしたがって、定着鉄筋の抜け出しにともなう回転変位の成分は小さくなる。

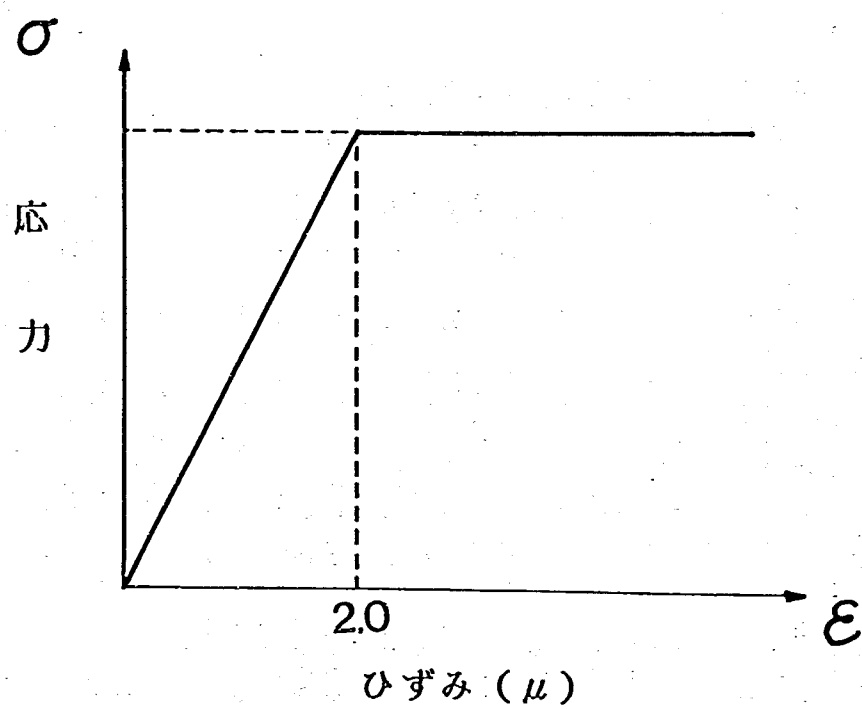
次に、終局状態における抜け出し量の影響について考える。終局状態においては、降伏時に比べ抜け出し量の及ぼす影響は大きくなっている。解析結果からすると、27%から41%にまでわたっている。橋脚高さの影響については、高いほど抜け出しの影響が小さくなっている。また、鉄筋比が大きくなるほど、抜け出しの影響が小さくなっている。ここで、引っ張り鉄筋比が0.29%、橋脚高さが7.1m(せん断支間比が5.1、鉄筋径の橋脚高さに対する比が0.00268)の場合を考えると、定着鉄筋の抜け出しによる回転変位の成分は、全体の27%を占める。なお、鉄筋の抜け出し量は、6.68mmで鉄筋径の35%となった。秋本らの報告によれば、このあたりの橋脚では、終局状態における抜け出しによる回転変位の影響は、ほぼ20%から30%ぐらいであり、今回の結果に近い値となっている。

表-5.1 橋脚の変形計算結果

橋脚高さ	断面の有効高さ	引張り鉄筋比	引張り鉄筋	δly	δlu	終局時ひずみ	鉄筋抜け出し量	$\delta 2y$	$\delta 2u$	δy	δu	$\delta 2y / \delta y$	$\delta 2u / \delta u$
5.1m	140cm	0.169%	D19 X 25	14.7mm	81.1mm	0.0779	15.4mm	1.74mm	58.6mm	16.4mm	139.7mm	10.6%	41.9%
5.1m	140cm	0.182%	D19 X 27	14.8mm	75.4mm	-0.0743	13.5mm	1.75mm	51.4mm	16.6mm	126.8mm	10.6%	40.5%
5.1m	140cm	0.196%	D19 X 29	14.9mm	70.0mm	0.0710	11.5mm	1.77mm	43.6mm	16.7mm	113.6mm	10.6%	38.4%
5.1m	140cm	0.209%	D19 X 31	15.0mm	65.3mm	0.0679	10.3mm	1.78mm	39.5mm	16.8mm	104.8mm	10.6%	37.7%
5.1m	140cm	0.223%	D19 X 33	15.1mm	61.3mm	0.0651	9.3mm	1.80mm	35.5mm	16.9mm	96.8mm	10.6%	36.7%
5.1m	140cm	0.236%	D19 X 35	15.2mm	59.6mm	0.0638	8.9mm	1.81mm	34.2mm	17.0mm	93.8mm	10.6%	36.4%
5.1m	140cm	0.250%	D19 X 37	15.3mm	56.1mm	0.0613	8.0mm	1.82mm	30.8mm	17.1mm	86.9mm	10.6%	35.4%
5.1m	140cm	0.263%	D19 X 39	15.4mm	53.1mm	0.0590	7.4mm	1.83mm	28.7mm	17.2mm	81.8mm	10.6%	35.1%
5.1m	140cm	0.277%	D19 X 41	15.5mm	51.5mm	0.0579	7.2mm	1.84mm	27.8mm	17.3mm	79.3mm	10.6%	35.1%
5.1m	140cm	0.290%	D19 X 43	15.6mm	49.1mm	0.0558	6.7mm	1.85mm	25.9mm	17.5mm	75.0mm	10.6%	34.5%
6.1m	140cm	0.169%	D19 X 25	21.0mm	116 mm	0.0779	15.4mm	2.09mm	70.1mm	23.1mm	186.1mm	9.1%	37.7%
6.1m	140cm	0.182%	D19 X 27	21.1mm	108 mm	0.0743	13.5mm	2.10mm	61.5mm	23.2mm	169.5mm	9.1%	36.3%
6.1m	140cm	0.196%	D19 X 29	21.3mm	100 mm	0.0710	11.5mm	2.11mm	52.1mm	23.4mm	152.1mm	9.0%	34.3%
6.1m	140cm	0.209%	D19 X 31	21.5mm	93.5mm	0.0679	10.3mm	2.12mm	47.2mm	23.6mm	140.7mm	9.0%	33.5%
6.1m	140cm	0.223%	D19 X 33	21.6mm	87.7mm	0.0651	9.3mm	2.14mm	42.5mm	23.7mm	130.2mm	9.0%	32.6%
6.1m	140cm	0.236%	D19 X 35	21.8mm	85.2mm	0.0638	8.9mm	2.15mm	40.9mm	24.0mm	121.2mm	9.0%	32.4%
6.1m	140cm	0.250%	D19 X 37	21.9mm	80.3mm	0.0613	8.0mm	2.17mm	36.8mm	24.1mm	117.1mm	9.0%	31.4%
6.1m	140cm	0.263%	D19 X 39	22.1mm	76.0mm	0.0590	7.4mm	2.18mm	34.3mm	24.3mm	110.2mm	9.0%	31.1%
6.1m	140cm	0.277%	D19 X 41	22.2mm	73.7mm	0.0579	7.2mm	2.19mm	33.3mm	24.4mm	107.0mm	9.0%	31.1%
6.1m	140cm	0.290%	D19 X 43	22.3mm	70.2mm	0.0558	6.7mm	2.20mm	31.0mm	24.5mm	101.2mm	9.0%	30.6%
7.1m	140cm	0.169%	D19 X 25	28.4mm	157 mm	0.0779	15.4mm	2.43mm	81.6mm	30.8mm	238.6mm	7.9%	34.2%
7.1m	140cm	0.182%	D19 X 27	28.6mm	146 mm	0.0743	13.5mm	2.44mm	71.6mm	31.0mm	217.6mm	7.9%	32.9%
7.1m	140cm	0.196%	D19 X 29	28.9mm	136 mm	0.0710	11.5mm	2.46mm	60.6mm	31.4mm	196.6mm	7.8%	30.8%
7.1m	140cm	0.209%	D19 X 31	29.1mm	127 mm	0.0679	10.3mm	2.47mm	54.9mm	31.6mm	181.9mm	7.8%	30.2%
7.1m	140cm	0.223%	D19 X 33	29.3mm	119 mm	0.0651	9.3mm	2.49mm	49.5mm	31.8mm	168.5mm	7.8%	30.8%
7.1m	140cm	0.236%	D19 X 35	29.5mm	115 mm	0.0638	8.9mm	2.50mm	47.6mm	32.0mm	162.6mm	7.8%	30.2%
7.1m	140cm	0.250%	D19 X 37	29.7mm	109 mm	0.0613	8.0mm	2.53mm	42.8mm	32.2mm	151.8mm	7.8%	29.4%
7.1m	140cm	0.263%	D19 X 39	29.9mm	103 mm	0.0590	7.4mm	2.54mm	39.9mm	32.4mm	142.9mm	7.8%	29.3%
7.1m	140cm	0.277%	D19 X 41	30.1mm	99.8mm	0.0579	7.2mm	2.55mm	38.8mm	32.7mm	138.6mm	7.8%	28.2%
7.1m	140cm	0.290%	D19 X 43	30.2mm	95.1mm	0.0558	6.7mm	2.56mm	36.1mm	32.8mm	131.2mm	7.8%	27.9%



(a) コンクリート



(b) 鉄筋

図-5.1 コンクリート及び鉄筋の応力ひずみ曲線

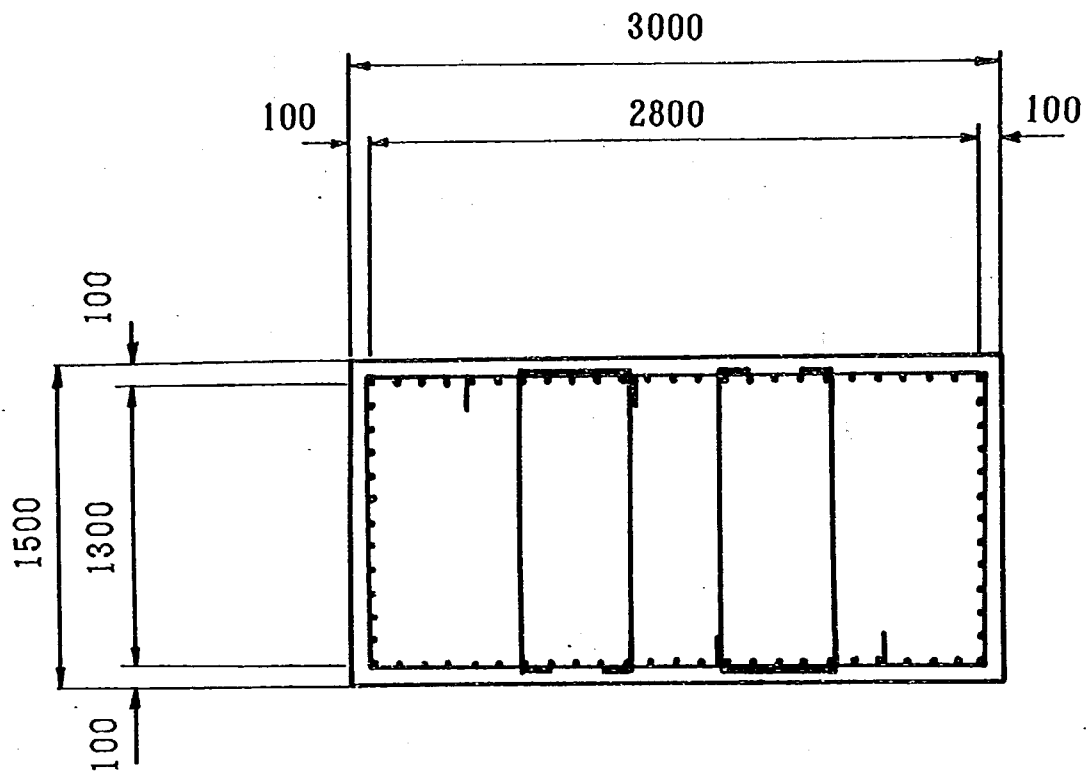


図-5.2 計算を行った橋脚断面

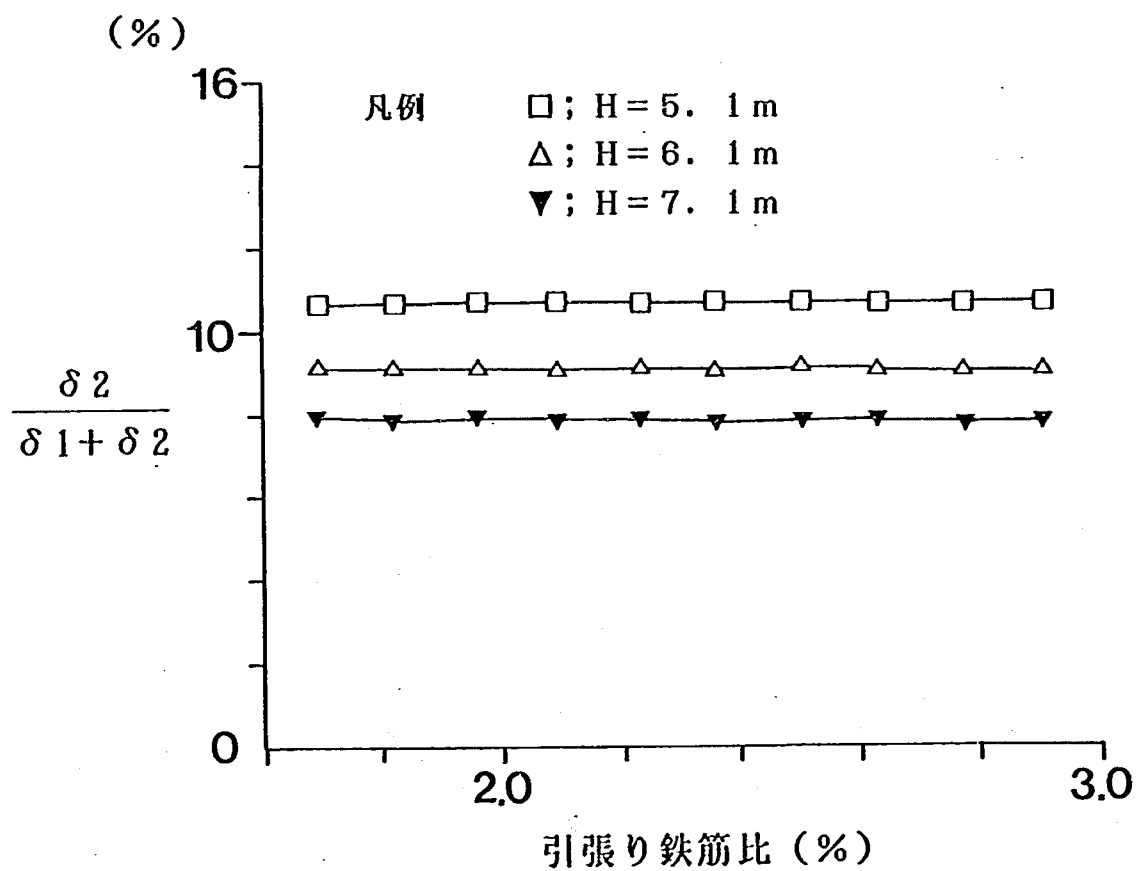


図-5.3(a) 降伏時の鉄筋の抜け出し量の影響

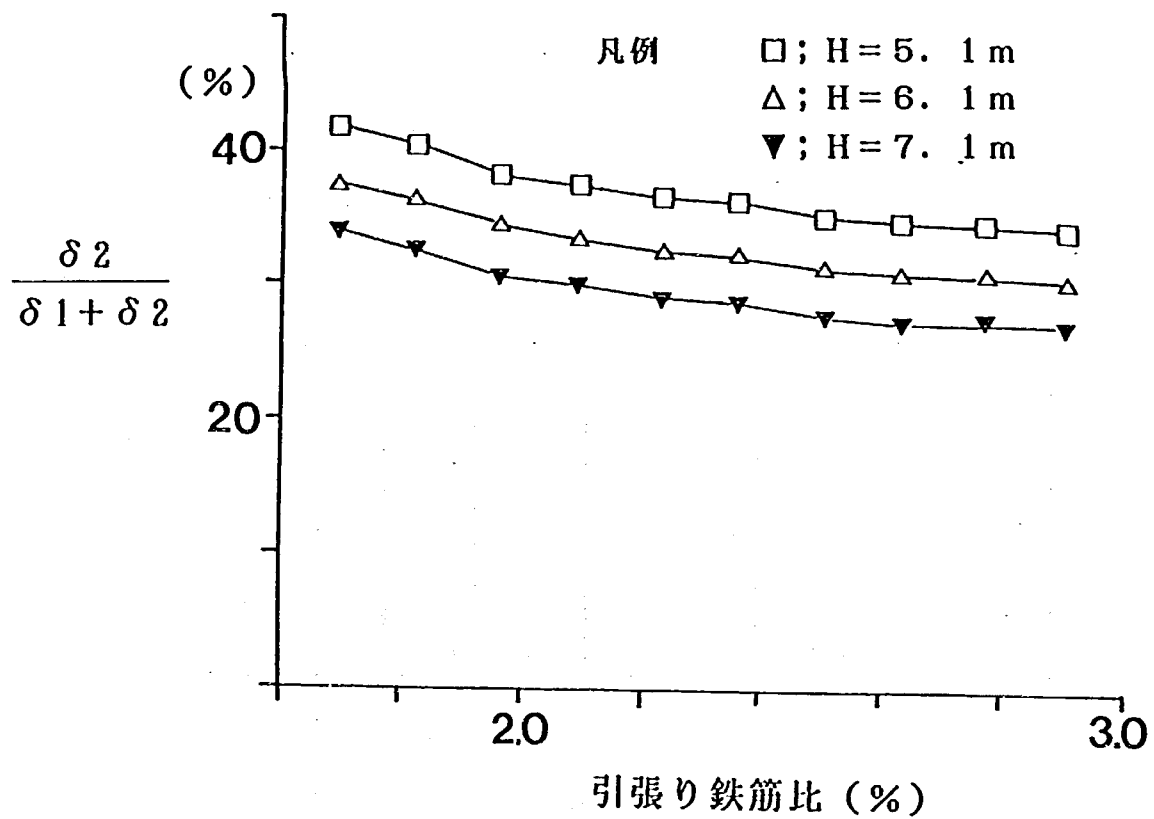


図-5.3(b) 終局時の鉄筋抜け出し量の影響

第6章 まとめ

ここでは、コンクリート部材の接合部として、橋脚とフーチングの接合部を対象とし、その定着鉄筋の定着耐力、抜け出し量に関する、実験的解析的検討を行った。この結果次のようなことが分かった。

まず3章では、鉄筋の引き抜き試験より、鉄筋の抜け出しに伴う破壊性状としては、キーせん断型付着破壊と、コーン状の破断が連成して生じることが分かった。また、鉄筋の抜け出しは、定着鉄筋の降伏後非常に大きくなることなどが示された。

第4章では、この実験結果を説明するための、解析手法について検討し、 τ - S 関係を適切に設定することにより、抜け出し量が適切に算定できることを示した。また、定着長が短く、鉄筋の降伏が生じても、付着耐力に余裕の無いものは、わずかの付着強度の減少により、破壊状況が変化することが分かった。これは、定着鉄筋が複数の場合、(3章に実験では供試体番号が2と、5の関係)注意すべきことが分かった。また、コーン状の破断面の算定方法についても検討した。

第5章では、4章の結果に基づき、鉄筋の抜け出し量が、橋脚の変形性能に及ぼす影響について、解析的な検討を加え、通常の橋脚では、3割以内となることを示した。

今後は、さらに、実験データを蓄積し、本解析手法による検討結果の妥当性を実証すると共に、群鉄筋の影響をより明確にとらえて行く必要があると考えられる。

(参考文献)

- 1) C.O.ORANGUN,J.O.JIRSA,and J.E.BREEN;"A Reevaluation of Test Data on Development Length and Splices",Journal of A.C.I,1977,March.
- 2) 太田 実；「単一柱形式鉄筋コンクリート橋脚の耐震設計法に関する研究」，土木研究所資料第1513号，昭和54年7月。
- 3) 松本 進，出口秀史；「鉄筋コンクリートの相対引抜け量の算定方法について」，コンクリート工学，Vol.24, No8,1986.
- 4) 森田司郎；「鉄筋コンクリートとの付着性状」，コンクリート工学，Vol.16, No10,1978.
- 5) 例えば野口 博；「有限要素法による鉄筋コンクリートの非線形解析」，日本建築学会論文報告集，昭和52年8月。
- 6) 国礼 良，二羽淳一郎，岡村 甫；「マッシブなコンクリート中の異形鉄筋の付着モデル」，第2 R C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，昭和58年10月。

接合部の定着鉄筋の定着性状に
関する調査報告書

ISSN 0386-5878
土木研究所資料第 2742 号
平成元年 3 月 (1989)

要 旨

橋脚とフーチングの接合部は、曲げモーメントの最大となる箇所で、その定着鉄筋の定着方法いかんによっては、部材耐力、変形性能が大きく変動すると考えられる。しかるに、群鉄筋の効果を考慮した鉄筋の定着耐力、変形性能との関係については、十分には明らかにされているとは言えない。本報告書は、鉄筋の定着耐力ならびに橋脚の変形性能との関連性について実験的、解析的検討の結果をとりまとめ、定着鉄筋の合理的な設計法を確立するうえでの資料となるものである。

キーワード：付着、接合部、定着鉄筋、抜け出し

郵便はがき

3 0 5 - □ □

40 円 切手
を は っ て
下 さ い。

茨城県つくば市旭一番地

建設省土木研究所
コンクリート研究室 御中

№ _____

№ _____

配布先氏名

配布先住所

土木研究所資料第2742号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住 所)

氏 名

印