

土 木 研 究 所 資 料

鉄筋コンクリート部材の接合部における
定着鉄筋の終局強度に関する調査報告書

平成3年3月

建 設 省 土 木 研 究 所
地質化学部コンクリート研究室

Copyright © (1991) 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。

鉄筋コンクリート部材の接合部における 定着鉄筋の終局強度に関する調査報告書

コンクリート研究室 室 長 河 野 広 隆
研 究 員 森 濱 和 正
研 究 員 渡 辺 博 志

要 旨

鉄筋コンクリート橋脚の柱とフーチングの接合部は、水平外力が作用した場合曲げモーメントが最も大きくなる箇所であり、柱とフーチングを接合する定着鉄筋の定着方法が適切でないと、地震時などに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、橋脚全体の終局強度が低下する恐れがある。ここでは、定着鉄筋の定着方法と橋脚の耐震性との関係などを明確にし、柱・フーチング接合部の終局状態を考慮した定着鉄筋の設計法を提案する上での資料を得るために、鉄筋の引き抜き試験、ならびに柱フーチング模型の載荷試験を行い、これらの実験結果をとりまとめたものである。

キーワード：コンクリート部材，接合部，付着，定着，終局状態，設計，変形性能，群鉄筋

ま え が き

鉄筋コンクリート橋脚の柱とフーチングの接合部は、水平力が作用した場合曲げモーメントが最も大きくなる箇所であり、柱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、地震時などに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終局強度が低下する恐れがある。

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いる。しかし、これらでは定着鉄筋の群鉄筋効果による定着力の低下を十分には考慮しておらず、また、近年重要視されている、地震時の鉄筋コンクリート柱の変形性能と定着方法あるいは群鉄筋の形態との関係が明確になっていない。

そのため、ここでは、定着方法と橋脚の耐震性との関係などを明確にし、柱・フーチング接合部の終局状態を考慮した定着鉄筋の設計法を提案する上での資料を得るために、鉄筋の引き抜き試験、ならびに柱・フーチング模型の繰り返し載荷試験を行った。

本報告書は、これらの実験結果をとりまとめたものである。

第2章では基礎実験として行った定着強度試験の結果を述べ、接合部定着鉄筋の定着強度、抜け出し量の計算方法について検討し、実験データとの比較検討を行った。

第3章では柱・フーチング模型の繰り返し載荷試験の結果について述べ、定着鉄筋の終局時の挙動が構造物全体に及ぼす影響について考察し、構造物全体の終局強度が定着破壊により低下しないようにするための定着長の確保の方法について検討した。

第4章ではその総括を述べた。

目 次

第1章 概 説	1
1.1 終局時における定着鉄筋の定着強度について	1
1.2 定着鉄筋の伸びだし量の影響について	2
第2章 はり型供試体による鉄筋定着試験	4
2.1 目 的	4
2.2 概 要	8
2.3 はり式鉄筋引き抜き試験方法	8
2.3.1 供試体の諸元および載荷方法	8
2.3.2 計測方法	9
2.3.3 供試体の条件の設定	11
2.4 載荷試験結果	12
2.4.1 引き抜き載荷試験結果	12
2.4.2 定着鉄筋の伸び出し量の算定方法について	34
2.5 まとめ	40
第3章 柱・フーチング供試体の繰り返し載荷試験	41
3.1 目 的	41
3.2 概 要	42
3.3 柱フーチング模型の繰り返し載荷実験	43
3.3.1 供試体の寸法ならびに載荷・計測方法	43
3.3.2 載荷試験結果	47
3.4 定着鉄筋の伸び出しを考慮した柱の変位量に関する定量的検討	52
3.4.1 計算手法の概要	52
3.4.2 解析結果および検討	53
3.4.3 定着鉄筋の必要定着長に関する検討	60
3.5 まとめ及び問題点	62
第4章 まとめ	63
参考文献	64

第1章 概 説

1.1 終局時における定着鉄筋の定着強度について

本調査において、対象としている定着鉄筋の安全性の照査方法については、わが国では道路橋示方書¹⁾で許容応力度法に基づいた手法が定められている。許容応力度法に基づく、定着鉄筋の安全性の照査は、わが国の設計法だけでなく、諸外国の設計法においてもほぼ同様の手法が採用されている。

この設計法の基本的な概念は、定着鉄筋に許容応力度レベルの引張力が作用しているとき、鉄筋定着部分の表面積に許容付着応力度を乗じて定まる定着耐力が引張力より大きくなることを確かめるものである。すなわち、照査式で示すと

$$(\text{鉄筋に作用する許容引張力}) < (\text{鉄筋の表面積}) \cdot (\text{許容付着応力度})$$

↑ ↓

$$\frac{\pi d^2}{4} \cdot \sigma_{sa} < \pi d \cdot l_d \cdot \tau_a$$

ただし、 σ_{sa} ：定着鉄筋の許容引張応力度

d ：定着鉄筋の径

τ_a ：許容付着応力度

l_d ：定着鉄筋の定着長

となる。

柱・フーチング部材の設計を考えた場合、耐震設計など部材の終局状態に関する照査が必要となり、その定着鉄筋においても、当然部材の終局時を対象とした照査を行わなければならない。ところが、上記の設計方法では、定着鉄筋の引張応力レベルを許容応力度に抑えていることから終局状態における照査が行われていないことになる。終局状態について検討した場合、鉄筋に作用する引張応力度は許容引張応力度よりもかなり大きく、終局付着応力度をあえて許容付着応力度に等しいものとして考えた場合、非常に大きな定着長が要求されることになる。このことより、終局時の定着鉄筋の安全性の照査を行うには、定着鉄筋の終局状態を対象としたコンクリートと定着鉄筋間の付着応力の設計値（設計付着強度）を明らかにしなければならない。

一方、土木学会標準示方書²⁾で提案されている定着鉄筋の設計方法では、定着鉄筋に作用する引張応力として、鉄筋の降伏点での応力度を照査の対象としている。提案されている定着鉄筋の安全性の照査式については、必要となる定着長を求める形で表現されている。すなわち、

$$l_d = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \frac{f_{yd}}{4 f_{bod}} \phi$$

ただし、

$\alpha_1 \alpha_2 \alpha_3$ ：係数（ α_1 および α_2 はそれぞれ定着鉄筋の押しぬきあるいは引き抜きの違い、ブリージングによる付着強度への影響を考慮する項でここでは調査対象としない）

f_{yd} : 鉄筋の降伏強度の設計値
 f_{bod} : 付着強度の設計値
 ϕ : 鉄筋の直径

ここで、注意が必要となるのは f_{bod} で採用されている値が、通常許容応力度法で採用されている値とほぼ同じであることである。すなわち、 α_3 による修正係数がない場合非常に大きな定着長が要求される。これを解消するために定着鉄筋のあき・かぶりが十分あり、横方向の補強鉄筋がある場合、段階的に α_3 を低減し、定着鉄筋において最も有利な条件では、上式の係数 α_3 に 0.6 を採用して必要定着長を低減している。ここで、この係数が採用された場合について、 f_{bod} に α_3 が含まれるすなわち、 $f_{bod}' = f_{bod} / \alpha_3$ とみなし f_{bod}' を終局付着強度とみなすと、定着鉄筋の降伏時における照査となるが、 α_3 を f_{yd} に含め、すなわち、 $f_{yd}' = \alpha_3 \cdot f_{yd}$ と考えると、定着鉄筋の引張力を許容応力度レベルに低減させ、かつ許容応力度法で採用されている付着強度に近い値を用いて照査を行っていることになる。このように、係数 α_3 の考え方によっては許容応力度法による照査と同等の照査を行っていることになり、真に終局状態を対象にしたものかが明かではない。

そこで、ここでは、柱・フーチングの接合部における定着鉄筋の終局状態における安全性の照査方法について検討を行った。このためには、まず定着鉄筋の終局時における付着強度を実験的に求めておく必要がある。定着鉄筋の引き抜き試験を行った場合、定着長の長い試験では、鉄筋の降伏が先行したり、あるいは定着鉄筋自由端部付近の付着応力が小さくなり平均付着応力でとらえた場合、付着強度が小さく評価されるなど、定着鉄筋の引き抜き力からは直接終局付着強度を把握することができなくなる。ところが、定着長を短くした試験では、引き抜き力が最大となる、すなわち定着鉄筋が付着破壊モードで終局状態にいたった際、定着鉄筋自由端側の抜け出し量が大きくなり、残留変形が生じ、繰り返し载荷を受けるような場合では、ほとんど定着耐力を持たず必ずしも終局状態とは言えない状況となる。すなわち、定着鉄筋の引き抜き試験より得られる鉄筋の引き抜き力を、定着鉄筋の定着長及び鉄筋の表面積で除して求められる平均付着強度で終局付着強度を表現することはできない。

このため、ここでは定着鉄筋に降伏点を越える塑性ひずみが生じている場合について、定着鉄筋とコンクリートの界面における、相対的なずれ量と発生する付着応力の関係を検討し、これに基づいて定着鉄筋の定着強度を求めることとした。すなわち、引き抜き試験結果で得られる、引き抜き力と定着鉄筋の伸び出し量の関係に適合する、定着鉄筋全体にわたる局所的な定着鉄筋のずれ量と付着応力の関係をもとめ、この結果を用いて定着鉄筋の引張応力と付着応力のつりあい式を用い終局定着強度を算出した。

1.2 定着鉄筋の伸びだし量の影響について

柱・フーチング部材の変形は、太田³⁾によっても示されているとおり、柱の曲げ変形によってもたらされているものと、定着鉄筋のフーチングからの抜け出しによってもたらされる柱の回転変形の両方からなることが分かっている。柱部材の変形性能は、その靱性率を決定する基となり、靱性率は柱・フーチング

部材の耐震性能を左右する重要なパラメータとなる。そのため、これらの変形成分それぞれを的確にとらえ、構造物の全変形量を把握することは、部材の耐震性を評価するうえで、重要となってくる。

柱の曲げ変形については、断面力のつりあいから求められる、曲げモーメント・曲率の関係を用いることによって求める手法が広く一般化され、道路橋示方書にも採用されている。しかし、定着鉄筋の抜け出し量による柱の回転変位に関する算定法については、定着鉄筋が弾性体のうちは概略値が求められるものの、定着鉄筋降伏後は明確にはなっていない。これは、定着鉄筋に生じる塑性域の範囲が明確になっていないためと考えられる。

本調査において検討した定着鉄筋の終局定着強度の算定方法を用いると、定着鉄筋の伸びだし量が併せて算定することができる。ここでは、この照査方法を用いて、定着鉄筋降伏後の鉄筋の伸び出し量を算定し、実験結果との比較検討を行った。この結果に基づき、定着鉄筋の伸び出しにより生じる柱の回転変形の影響について明らかにした。

第2章 はり型供試体による鉄筋定着試験

2.1 目 的

柱・フーチング部材の定着鉄筋の終局強度，およびフーチングからの伸び出し量を計算するためには，定着鉄筋全長にわたる付着応力分布を把握する必要がある，付着応力分布を求めるためには，鉄筋とコンクリートの界面に生じる付着応力を規定する構成式が必要となる。これは次のような理由による。

定着鉄筋に作用する引き抜き力を $P(x)$ としたとき，定着鉄筋の引き抜き力と付着力のつりあい式は，

$$P(x) = \int_0^x \tau(x) \cdot \psi \cdot dx$$

ここで， ψ : 鉄筋の周長，鉄筋の径を d としたとき近似的に πd で表せる。

$\tau(x)$: 位置 $X=x$ に発生している付着応力 (図-2.1 参照)

L : 鉄筋の定着長

上式を x について微分することにより定着鉄筋内の引張応力を σ_s とすると次式をうる。

$$\frac{d}{4} \cdot \frac{d\sigma_s}{dx} = \tau(x)$$

ここで，鉄筋の構成則 $\sigma_s = f(\epsilon_s)$ より

$$\frac{d}{4} \cdot \frac{df}{d\epsilon_s} \cdot \frac{d\epsilon_s}{dx} = \tau(x)$$

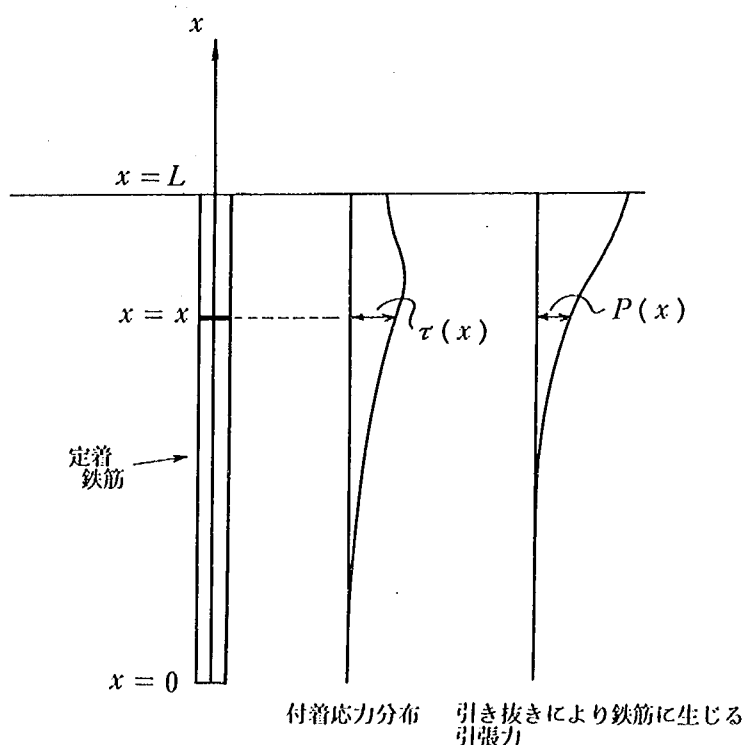


図-2.1 定着鉄筋における座標軸のとり方および付着応力分布の模式図

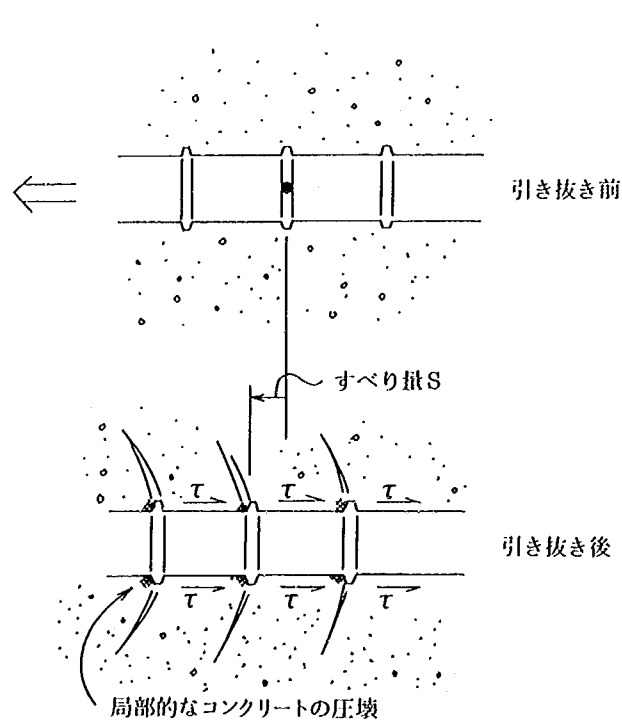


図-2.2 定着鉄筋近傍のコンクリートの状況およびすべり量 S のとり方

鉄筋のすべり量 (図—2.2 参照) を S とすると

$$\frac{d}{4} \cdot \frac{df}{d\epsilon_s} \cdot \frac{d^2 S}{dx^2} = \tau(x)$$

これより付着応力を求めることができるが、 τ を S の関係として表しておかなければならない。よって、コンクリートと鉄筋の界面の挙動を表現する構成式が必要となる。(以後この関係式を τ — S 関係とする。)

定着鉄筋が異形鉄筋の場合、鉄筋のふしとコンクリートとの機械的かみあわせ作用により、丸鋼の場合に比べ付着強度は大きくなる。鉄筋を引き抜いた場合、鉄筋が引き抜き力によりコンクリート内を移動するにつれ、このかみあわせ作用により徐々に付着応力が増大してくる。異形鉄筋では鉄筋とコンクリートの粘着力よりは、主としてかみあわせ作用により付着力が発揮されるが、そのメカニズムは文献4にも示されているとおり、非常に複雑なものとなる。これを微視的にとらえ、異形鉄筋前面に形成されるコンクリートの圧壊部、鉄筋周辺に生じるひび割れなどを考慮し、解析的に τ — S 関係式を導くことは非常に煩雑となり実質的にはほぼ不可能であると考えられる。このため、 τ — S 関係式を求めるには実験的検討により求められなければならない。

このように、 τ — S 関係式は実験的検討により導かれなければならないが、このとき採用すべき実験方法にも注意が必要となる。これは、 τ — S 関係式は定着鉄筋だけではなく、定着鉄筋周辺のコンクリートの応力状態にも大きく左右されるためである。例えば、鉄筋の付着強度試験で表—2.1の①に示す立方体の片引き式の試験法を採用した場合、反力位置が定着鉄筋の近くにあるため、コンクリート供試体内に軸方向圧縮力が作用する。ここで、供試体にスパイラル筋で補強を行えば、リングテンションによる付着割裂ひび割れを防ぐことができ、かなり付着強度は大きくなる。しかし、フーチング内の定着鉄筋周辺に生じる応力状態とは異なるため、このような試験で得られる付着強度はそのまま採用することが出来ないと考えられる。よって、対象とする定着鉄筋の近傍に生じる応力状態にできるだけ近い状態が再現される試験方法により、付着強度試験を行わなければならない。

本調査では、前報でも示した通り、柱・フーチング接合部の定着鉄筋に応用できるような簡易的な τ — S 関係を求めるために、マッシブなコンクリート中に定着された鉄筋の引き抜き試験を行い、その結果から τ — S 関係を提案した。しかし、前報⁵⁾で τ — S 関係を求めるために行った定着強度試験の供試体数は6体のみで、試験条件の設定も限られたものであった。ここでは、コンクリート強度、鉄筋の定着長、定着鉄筋の直径などの条件を変化させた引き抜き試験を行い、前報で提案した τ — S 関係式の妥当性を確認するとともに、これらの試験条件により、 τ — S 関係を規定するパラメタの修正方法を検討した。これらの検討を通じ、定着鉄筋の終局強度ならびに抜け出し量を算定するもとになる τ — S 関係の適用範囲を拡張することを行った。

表-2.1 主な鉄筋の付着試験方法

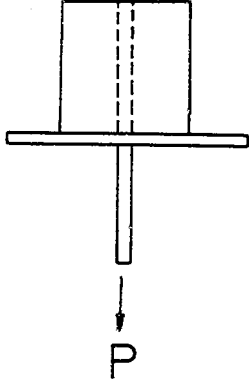
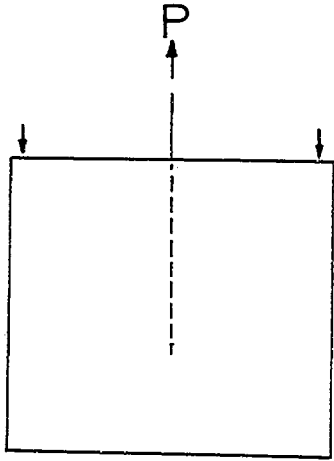
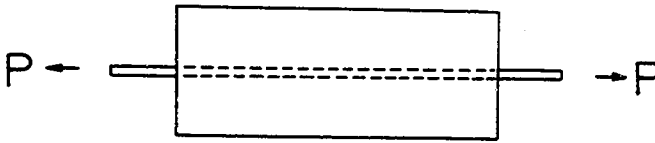
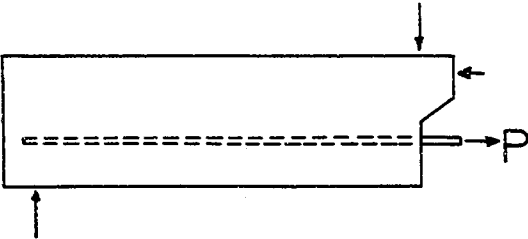
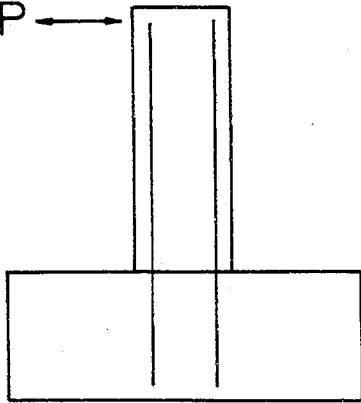
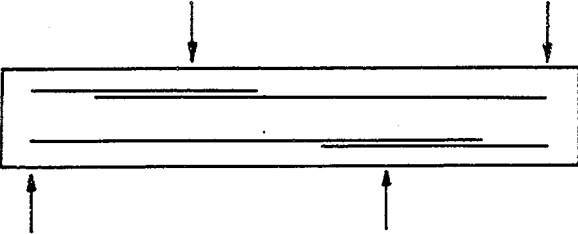
試験方法	供試体寸法	特徴
①片引き付着試験		・供試体寸法が小さくて済む。 ・簡易的な試験である。 ・コンクリート供試体における反力により鉄筋近傍に大きな圧縮応力が生じ、このため付着強度が大きくなる。 ・コンクリート供試体中の応力状態が、フーチング内の応力状態と異なっている。 ・鉄筋周辺に生じるリングテンションによるコンクリートの割裂が生じ易い。
②片引き付着試験		・コンクリート供試体内に生じる応力が実際のフーチングに現れる応力状態に近い。 ・引き抜きの反力の位置を定着鉄筋から離すことが出来る。 ・供試体が大きくなる。 ・一方向の引き抜き試験になりやすい。
③両引き試験		・供試体は小さくできる。 ・鉄筋の歪を測定しなければ付着応力が求められない。 ・コンクリート内には引張応力のみが作用する。 ・一方向载荷のみ

表-2.1 主な鉄筋の付着試験方法

試験方法	供試体寸法	特徴
④偏心引き抜き試験		・鉄筋コンクリートはりの主筋周りに作用する応力を再現できる。 ・RCはりの主鉄筋の重ね継ぎ手長、有効定着長を定めるための試験によく用いられる。 ・鉄筋のかぶり、あきが試験結果を左右する要因になる。 *マスコンクリート中の定着鉄筋の定着強度試験には向かない。
⑤柱・フーチング模型による定着試験		・対象とする問題に最も近い状況を再現しうる。 *供試体は大きくなる。 *柱の載荷により鉄筋が引き抜かれるので引き抜け量の制御は難しい。 *柱部分の配筋状態によって、引き抜きの状況が異なる。 *フーチング部分の拘束状況によりコンクリートの応力状態が大きく異なる。
⑥重ね継ぎ手を有する鉄筋コンクリートはりによる付着試験		・鉄筋重ね継ぎ手部の応力状態を再現しうる。 *供試体は大きくなる。

2.2 概 要

定着鉄筋の定着強度を確認するために、はり型の供試体による定着試験を行った。定着試験は両引き試験、片引き試験、偏心引き抜き試験がある。これらの試験方法の特徴をとりまとめたものが表—2.1である。今回採用した試験方法は、偏心試験を応用したものであるが、フーチングなどのマッシブなコンクリートに定着された鉄筋の定着強度を対象としたものであるため、鉄筋のかぶりは大きなものとなっている。この試験方法を採用した理由としては

- ① 定着鉄筋近傍に圧縮応力が生じない。
- ② 供試体寸法が比較的小さくて済む。
- ③ 複数本の定着鉄筋の引き抜きが容易に行える。
- ④ 引き抜き力の反力を取るための治具を必要としない。

といった長所を有すると考えられたためである。定着鉄筋の引き抜き力は、はり供試体の曲げ荷重により生じることになる。ただし、鉄筋の引き抜き力は直接ロードセルによって計測することが出来ないため、定着鉄筋に貼り付けたひずみゲージにより間接的に求めた。

定着鉄筋の τ — S 関係式を求めるための、最も直接的な方法としては、定着鉄筋内にわずかな空洞を設け、ここにひずみゲージを適当な間隔ではりつけ、この値から付着応力を計算する方法が考えられる。しかし、前報⁵⁾でも検討した通り、この計算は基本的に付着応力を隣接するゲージで計測されたひずみの値の差分から求めるため、計測されたひずみの値のわずかな誤差が、付着応力の計算結果に大きな影響を与えることとなる。とくに、局部的に作用する付着応力を対象とするため、はりつけられるひずみゲージの間隔は小さくなり、この誤差の影響は大きくなる。このため得られる τ — S 関係は非常にばらつきの大きいものとなる。これを防ぐためには、ひずみゲージの間隔を大きくすれば良いが、これによる計算結果はひずみゲージ測定間の平均的付着応力を示すにすぎず、付着応力測定の本来的意味を失うことになる。

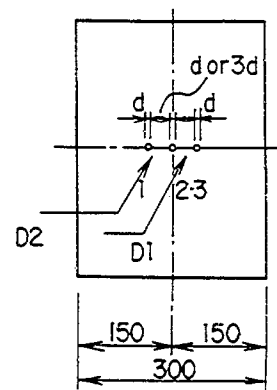
このため、ここでは、試験方法の簡略化を目的とし、あえて定着鉄筋の内部ひずみを計測することは行わず、もっぱら、鉄筋引張力と伸び出し量の関係を計測することとした。この実験結果と、簡易的な τ — S 関係により解析的に求められた結果を対比することとした。

2.3 はり式鉄筋引き抜き試験方法

2.3.1 供試体の諸元および載荷方法

図—2.3 に供試体の寸法を示す。はり供試体の内、図—2.3 中の A—A 断面図左側の部分が試験区間となる。定着鉄筋の定着長は、図—2.3 中の A—A 断面図に示した通り、ゴムホースによって鉄筋とコンクリートを絶縁することにより調節を行った。

載荷位置は図—2.3 に示した通りである。載荷方法は、定着鉄筋引き抜き側の引張ひずみが 0.2% となる範囲で繰り返し載荷を行い、その後供試体の曲げたわみを単調に増加させ、定着鉄筋を降伏させた。



変位計
ここで計測された定着鉄筋の
移動量を自由端での抜け出し
量とする。

(2) 測定位置図

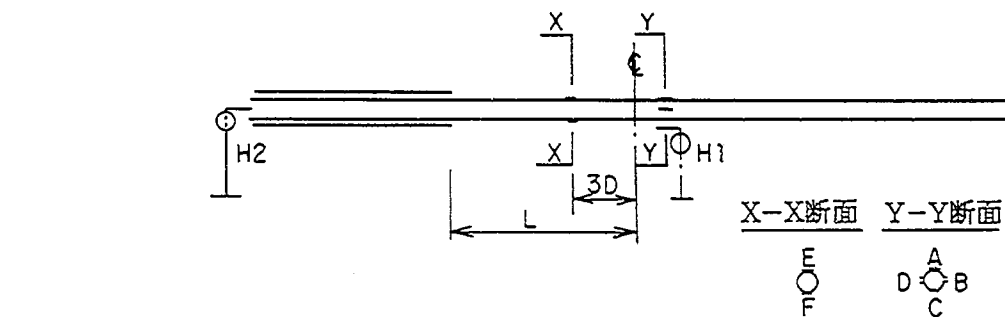
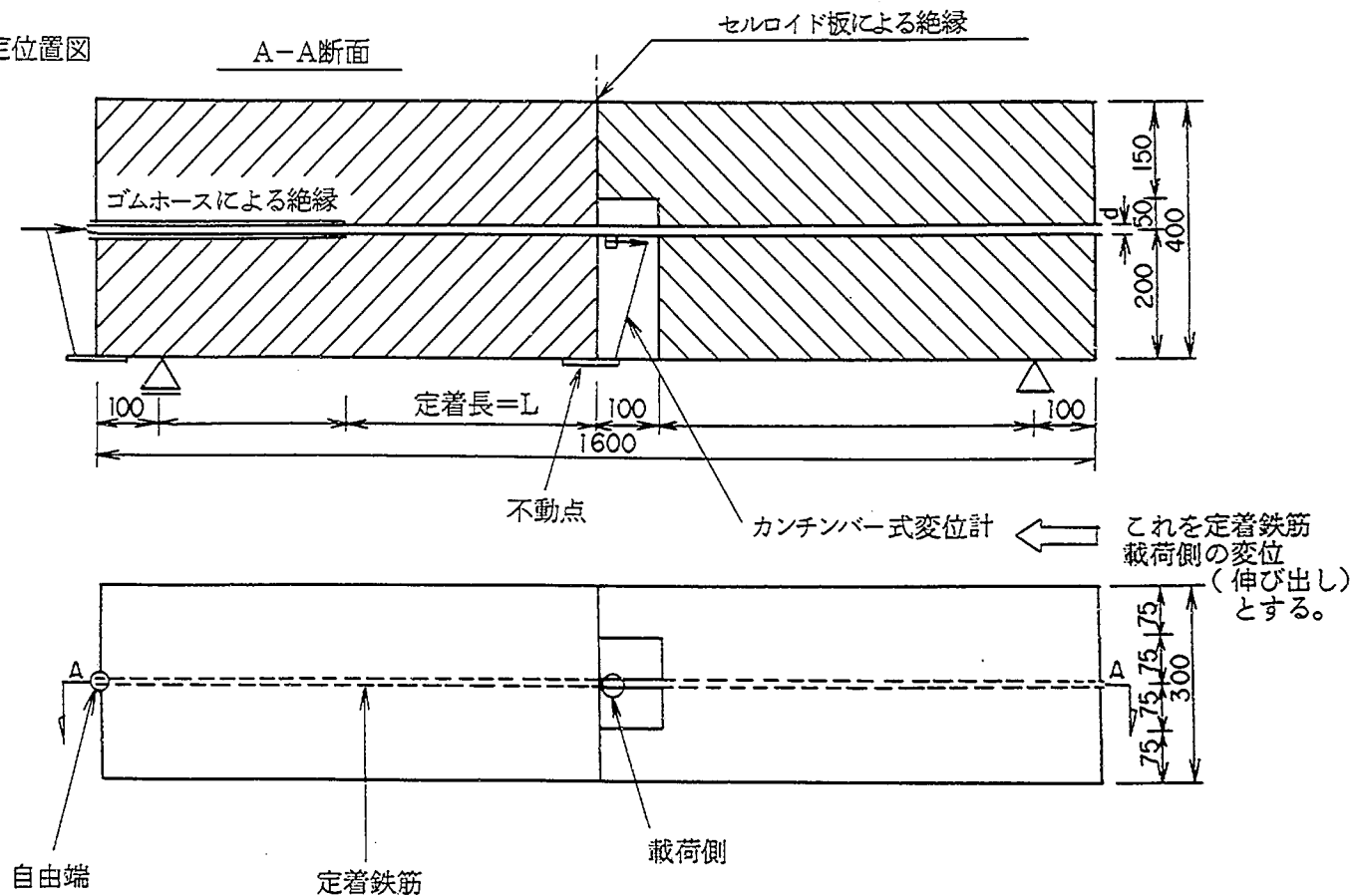


図-2.4 計測位置

※鉄筋の番号は打設面側より3,2,1とする。

2.3.3 供試体の条件の設定

供試体数は全部で11体であり、表—2.2に供試体の定着鉄筋の定着長、あき、コンクリート強度の条件を示す。なお、ここに示したコンクリートの圧縮強度は目標強度であり、この強度になるよう配合を決定したが、実際には目標強度を上回るものとなっている。

鉄筋は全てSD30Aを用いた。

コンクリートおよび鉄筋の強度を表—2.3に示す。

表—2.2 供試体の諸条件

供試体番号	コンクリート強度 目標値 (kgf/cm ²)	定着鉄筋 の径 (mm)	定着長*	定着鉄筋 の本数	定着鉄筋 のあき*
1	300	D10	30D	1	—
2	300	D10	40D	1	—
3	300	D10	50D	1	—
4	180	D10	40D	1	—
5	180	D10	50D	1	—
6	300	D10	30D	3	3D
7	300	D10	50D	3	3D
8	300	D10	50D	3	1D
9	180	D10	30D	3	1D
10	180	D10	50D	3	1D
11	180	D16	30D	1	—

注) *鉄筋の定着長、あきは鉄筋径の倍数で表している (30Dは鉄筋の直径の30倍の意味)

表—2.3 コンクリートの圧縮強度ならびに引張強度試験結果

供試体番号	コンクリートの圧縮 強度 (kgf/cm ²)	コンクリートの割裂 強度 (kgf/cm ²)
1	371	—
2	365	—
3	363	33.0
4	263	—
5	260	28.7
6	333	—
7	376	—
8	347	32.4
9	284	24.6
10	301	30.9
11	295	28.7

2.4 載荷試験結果

2.4.1 引き抜き載荷試験結果

引き抜き載荷試験において、図—2.4に示した鉄筋の伸び出し量（載荷端側）および抜け出し量（自由端側）と定着鉄筋の載荷側の引張ひずみの関係を図—2.5に示す。ここで、鉄筋の引張ひずみはひずみゲージの測定値を平均することにより求めることとした。定着鉄筋が複数本存在するときは、それぞれで計測された変位量の平均値を用いることとした。

今回の実験では、定着鉄筋の引き抜きによるコンクリートの破壊はほとんど見られず、定着部表面のコンクリートがわずかに剝離した程度であった。これは、定着鉄筋が降伏するまで引き抜くのに必要となる引き抜き力に対し、定着力が十分大きく、定着破壊を生じなかったためであると考えられる。コンクリートの剝離状況を図—2.6に示す。複数の定着鉄筋のある供試体については、剝離部分が大きく、鉄筋から放射状に生じる割裂ひび割れも生じていた。ただしこれらのひび割れは、定着鉄筋の載荷側のみに限られ、定着鉄筋の自由端側にはひび割れは生じなかった。

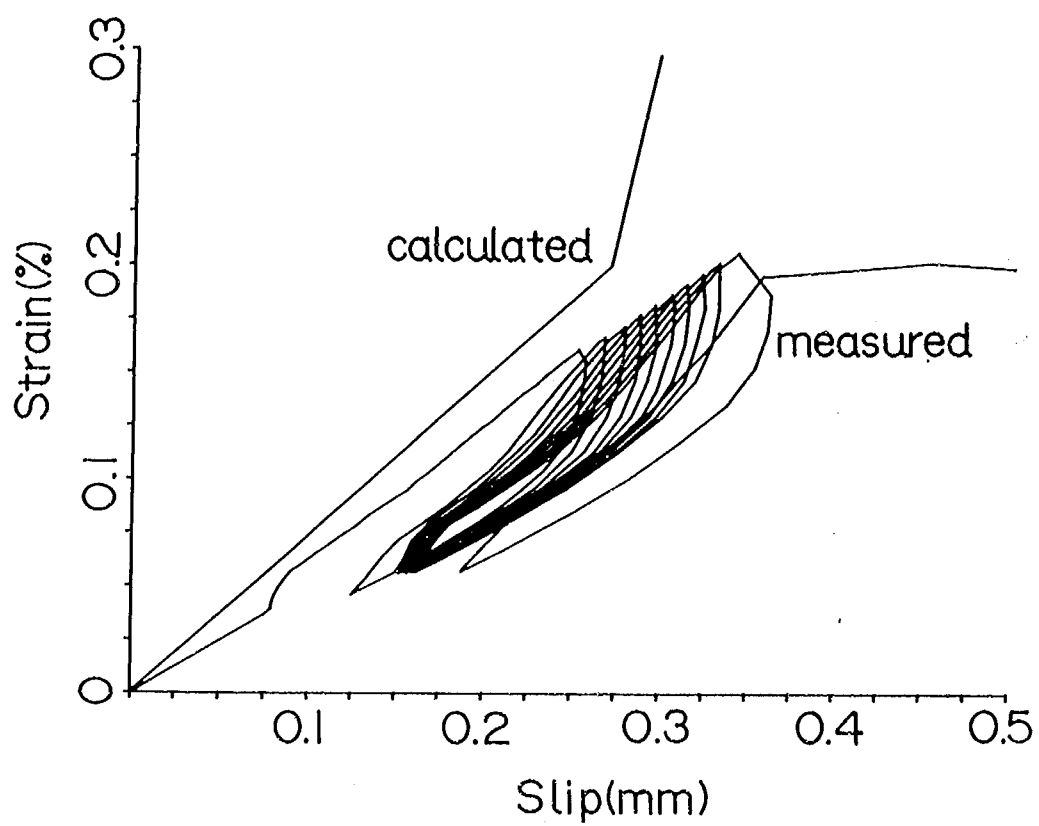
鉄筋の自由端側の変位量はいずれも小さく、鉄筋引き抜きに際して、鉄筋が降伏する以前に鉄筋が引き抜けるようなことはなかった。ただし、供試体6は自由端の抜け出しがやや大きくなっていった。自由端の抜け出しは、引き抜き力を除荷しても回復しないものであり、載荷を繰り返すにつれ抜け出し量は蓄積されている。このことより、繰り返し引き抜き力を与えられた定着鉄筋の付着応力と、定着鉄筋・コンクリートとの界面のすべり量との関係は、図—2.7に示すとおり除荷の際の勾配は非常に大きく、付着応力がゼロになった時点でも、非回復性の残留すべりが生じる形となることが推測される。

定着鉄筋が複数本ある場合は、定着鉄筋の自由端側の抜け出し量が、定着鉄筋1本の場合に比べて、やや大きくなる傾向をもっていた。定着鉄筋の載荷側の伸び出し量は、定着鉄筋が1本のものに比べ、荷重が小さいとき伸び出し量が小さくなったが、この後の定着鉄筋の載荷側の引張ひずみの増加に対する伸び出し量の増加量は、ほぼ同様の結果となった。すなわち、定着鉄筋の載荷側引張ひずみが約0.05%までの間、鉄筋の伸び出しがほとんど記録されなかった。定着鉄筋載荷側の引張ひずみがこれを越えると、定着鉄筋が一本の場合とほぼ同様の傾きで、伸び出し量が増え始めていた。

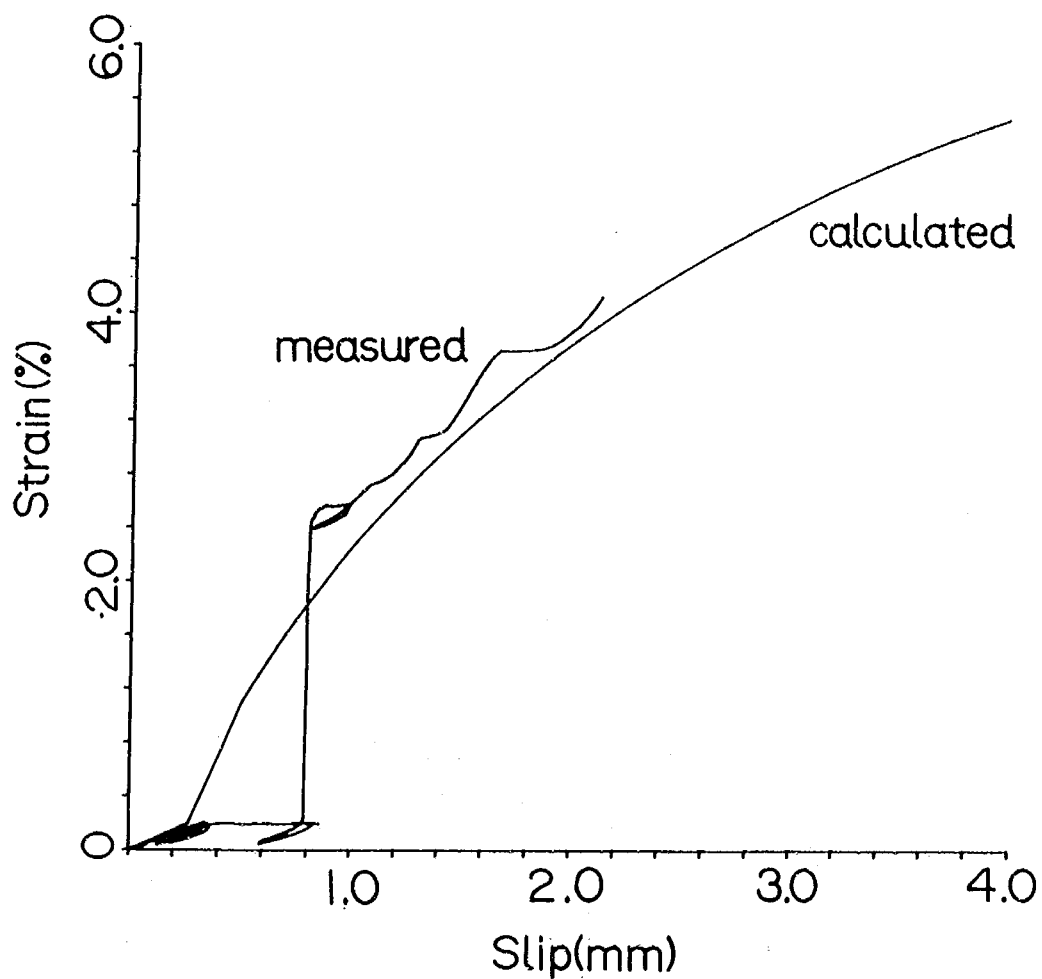
定着鉄筋が複数本ある供試体について、鉄筋のあきを変化させたが、あきの違いによる定着性状の変化はみられなかった。

表—2.4 鉄筋の引張強度試験結果

鉄筋の種類	降伏点 (kgf/cm ²)	引張強さ (kgf/cm ²)	ヤング率 (kgf/cm ²)
D10	3780	5299	1800000
D16	3557	5188	1500000

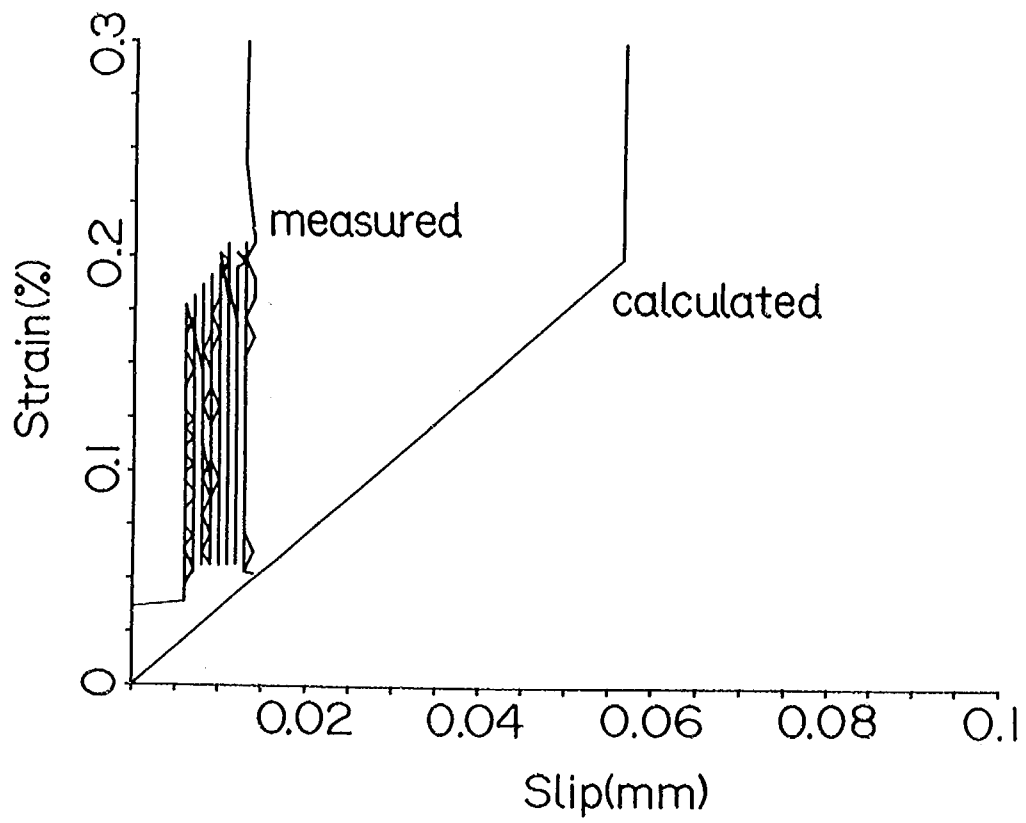


(a) 弾性範囲における伸び出し



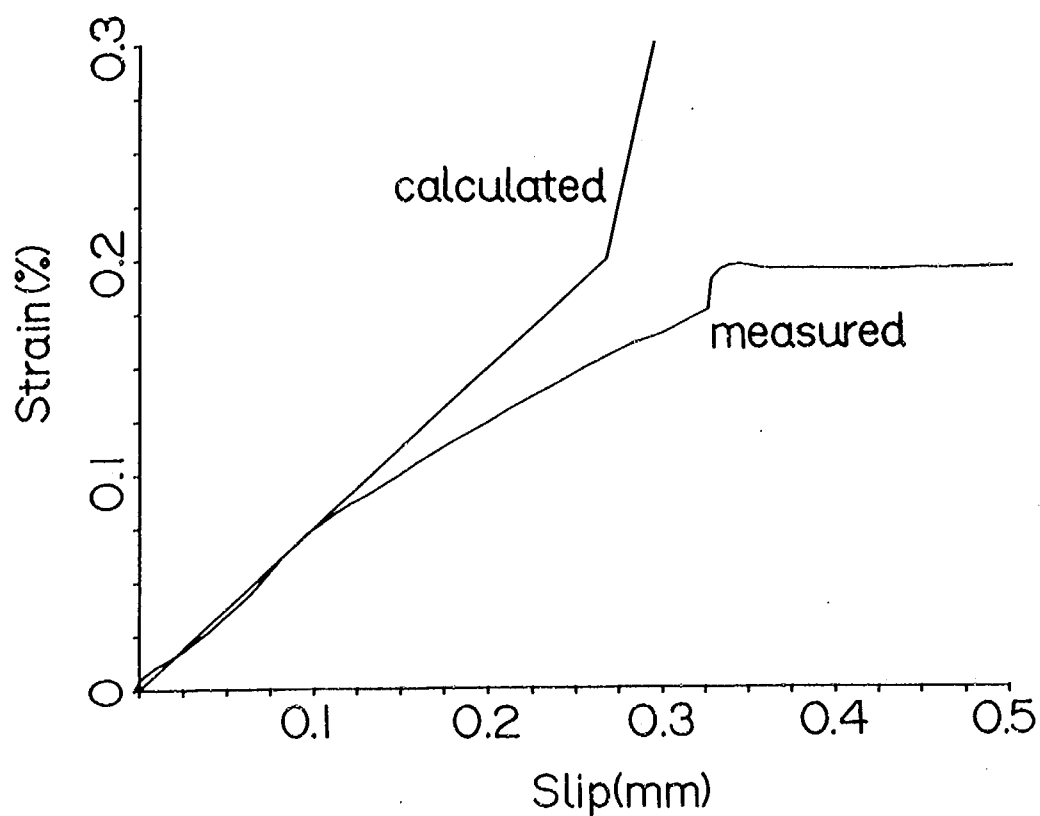
(b) 塑性範囲もふくめた伸び出し

図-2.5 定着鉄筋の引張ひずみと伸び出し量の関係 (No.1)

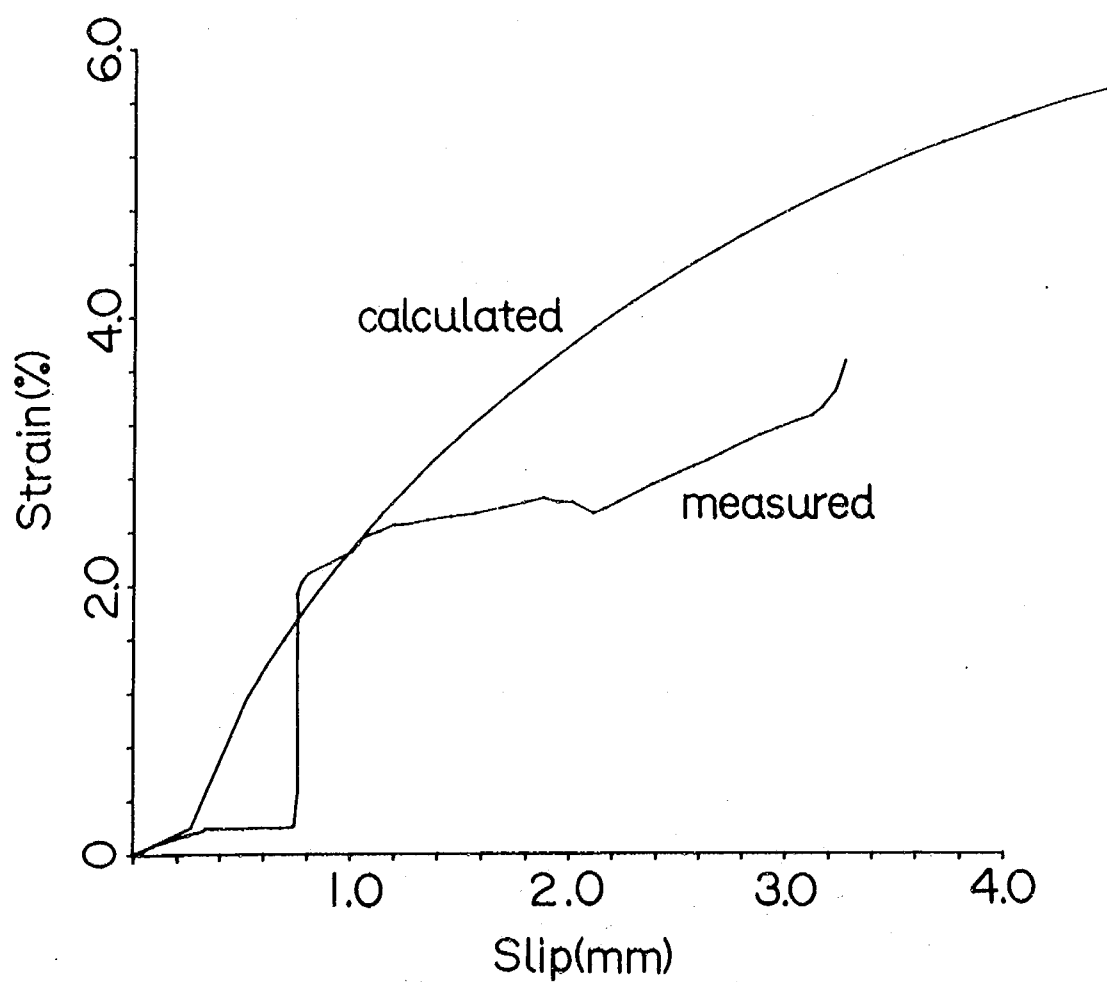


(c) 自由端の抜け出し

図-2.5 定着鉄筋の引張ひずみと伸び出し量の関係 (No.1)

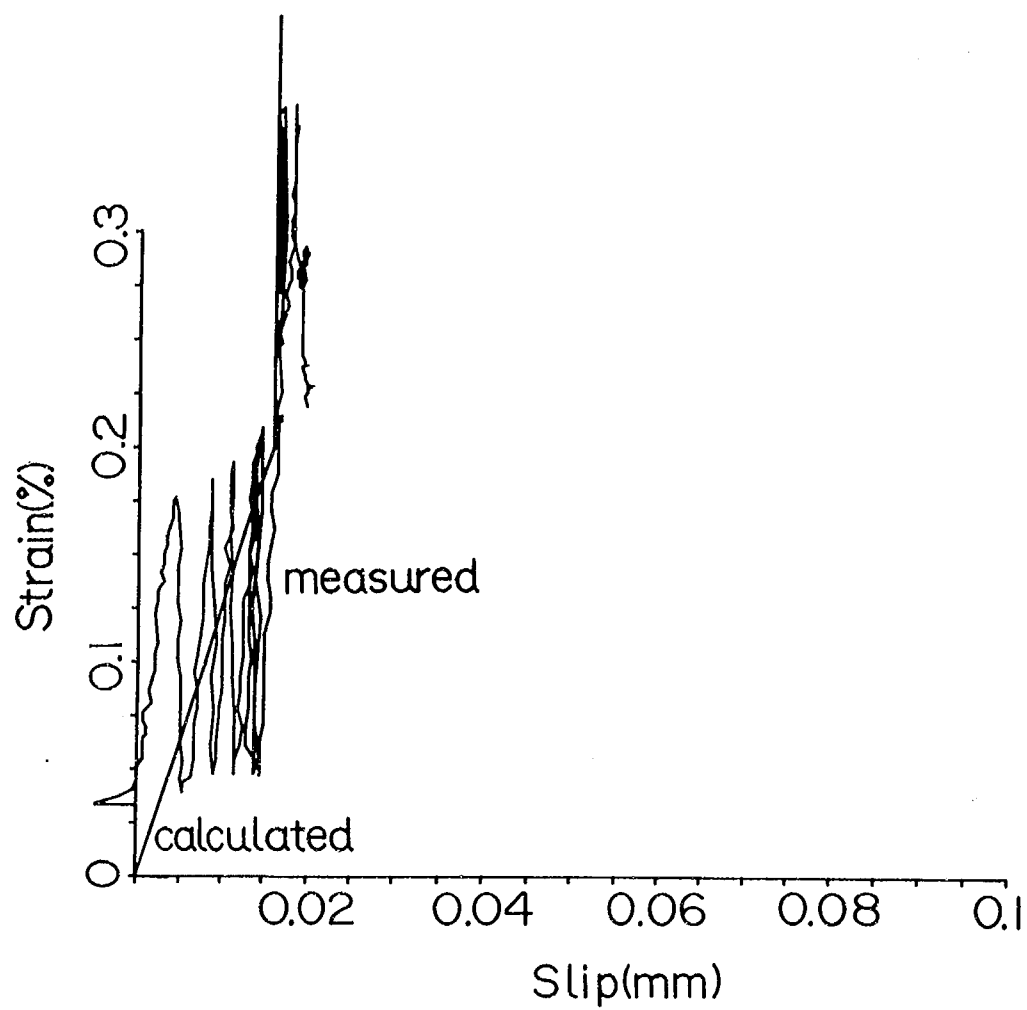


(a) 弾性範囲における伸び出し



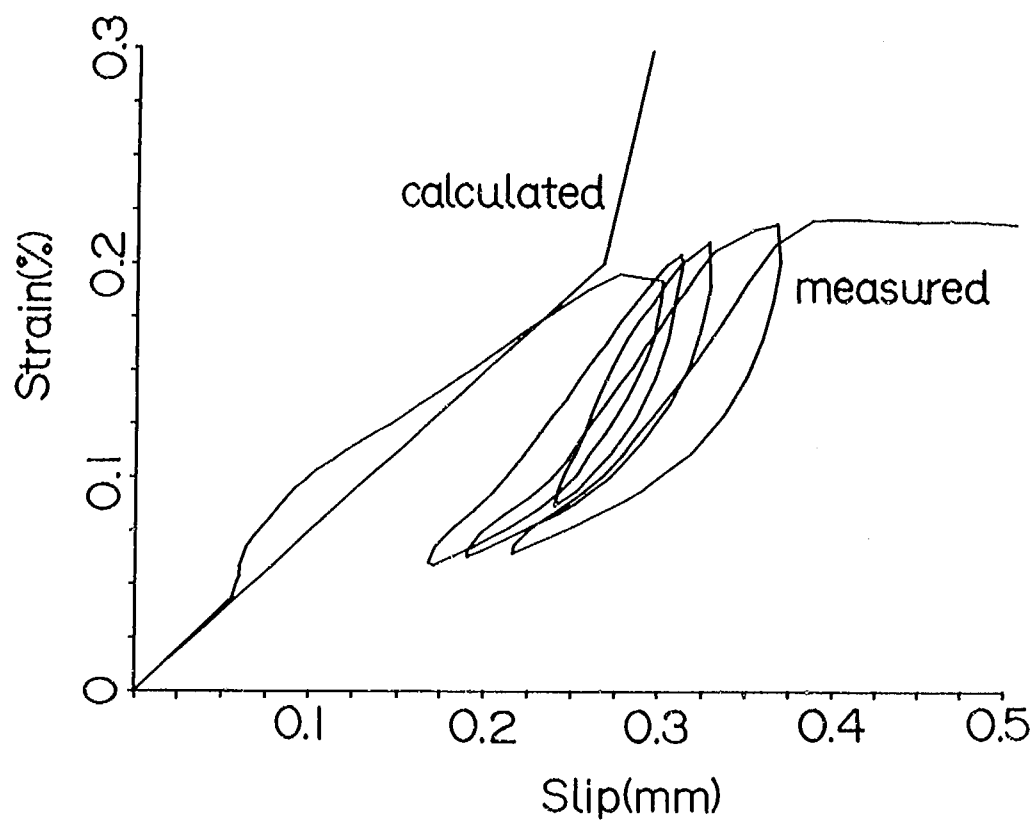
(b) 塑性範囲もふくめた伸び出し

図-2.5 定着鉄筋の引張ひずみと伸び出し量の関係 (No.2)

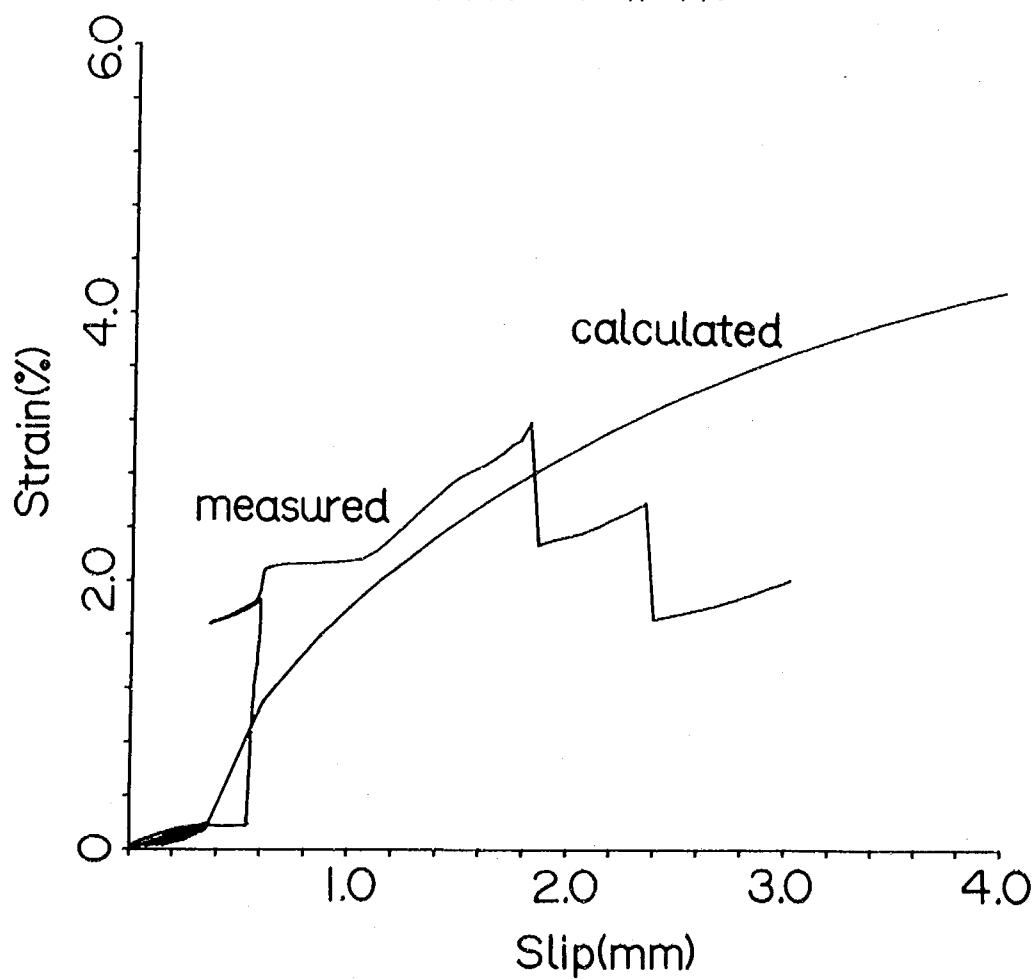


(c) 自由端の抜け出し

図-2.5 定着鉄筋の引張ひずみと伸び出し量の関係 (No. 2)

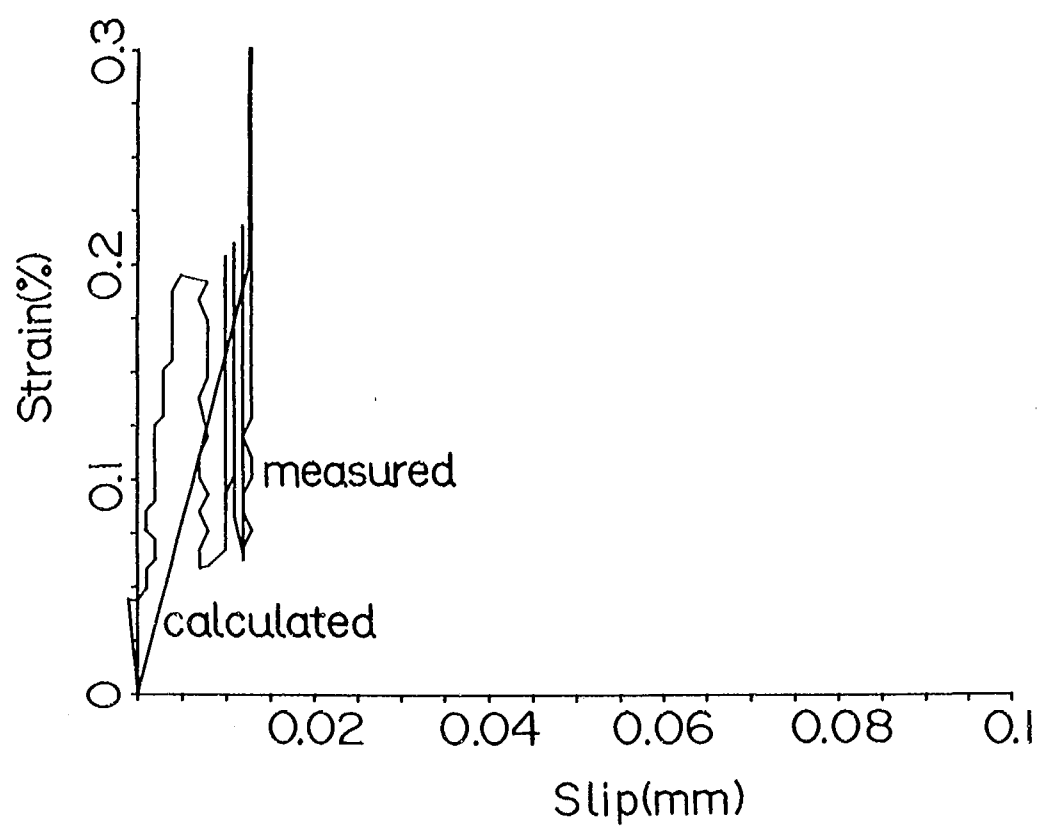


(a) 弾性範囲における伸び出し



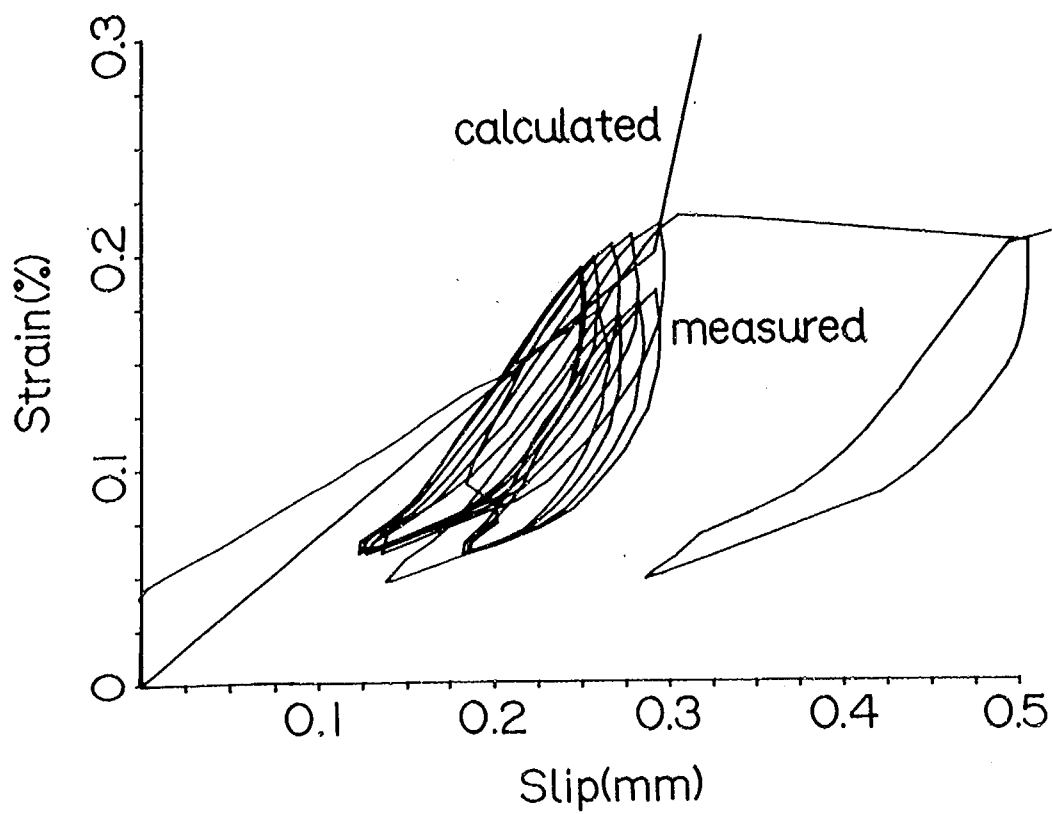
(b) 塑性範囲もふくめた伸び出し

図-2.5 定着鉄筋の引張ひずみと伸び出し量の関係 (No.3)

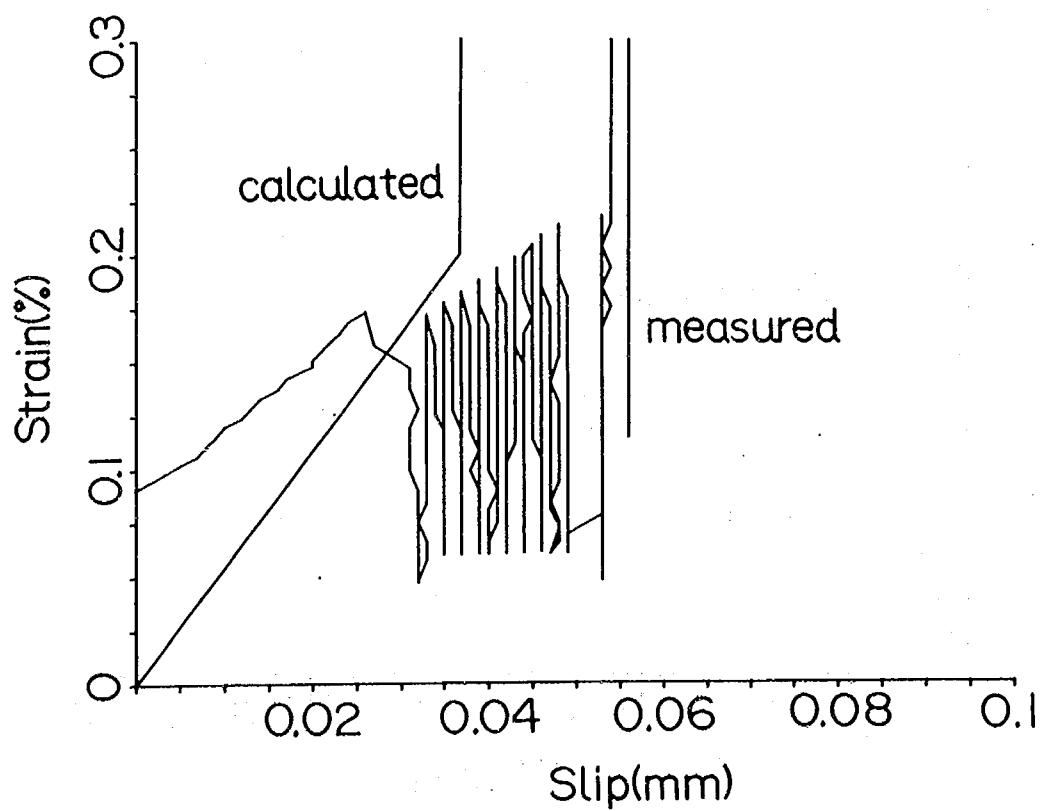


(c) 自由端の抜け出し

図-2.5 定着鉄筋の引張ひずみと伸び出し量の関係 (No.3)

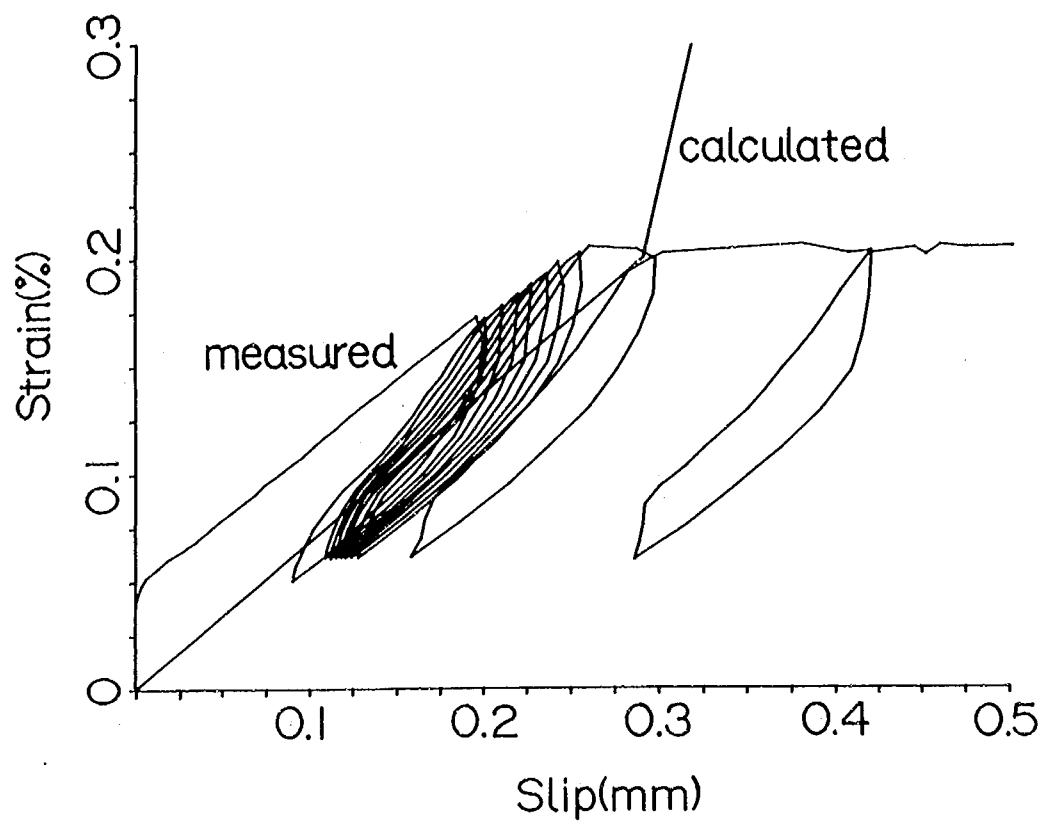


(a) 弾性範囲における伸び出し

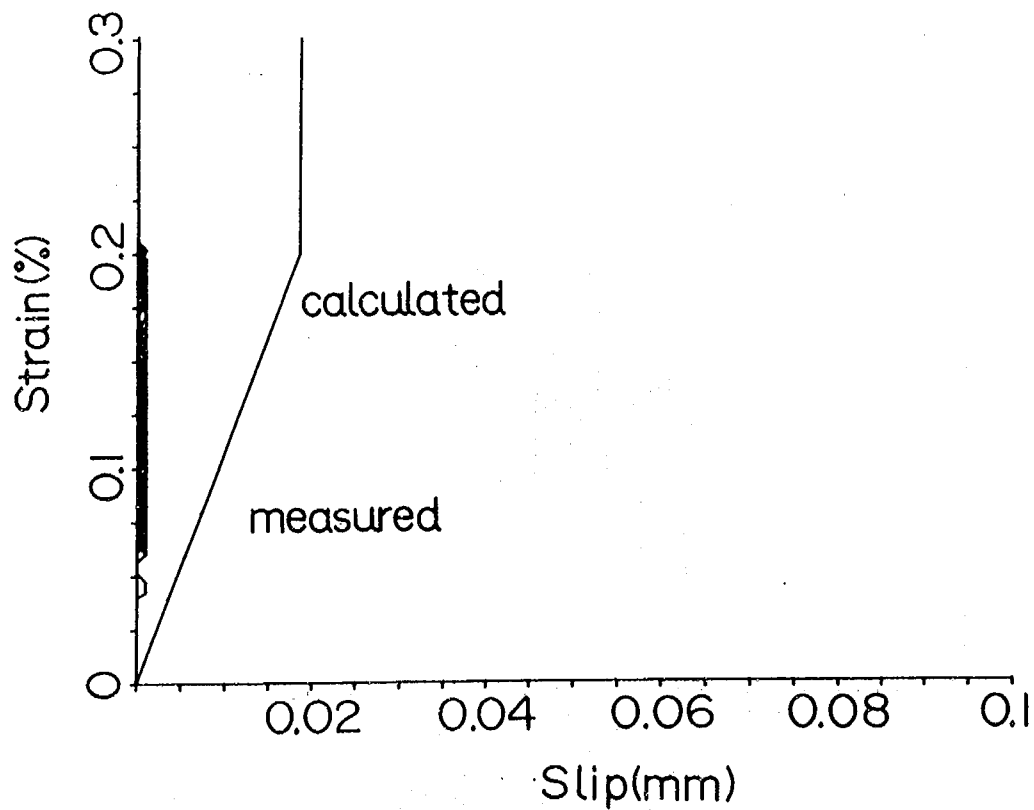


(b) 自由端の抜け出し

図-2.5 定着鉄筋の引張ひずみと伸び出し量の関係 (No.4)

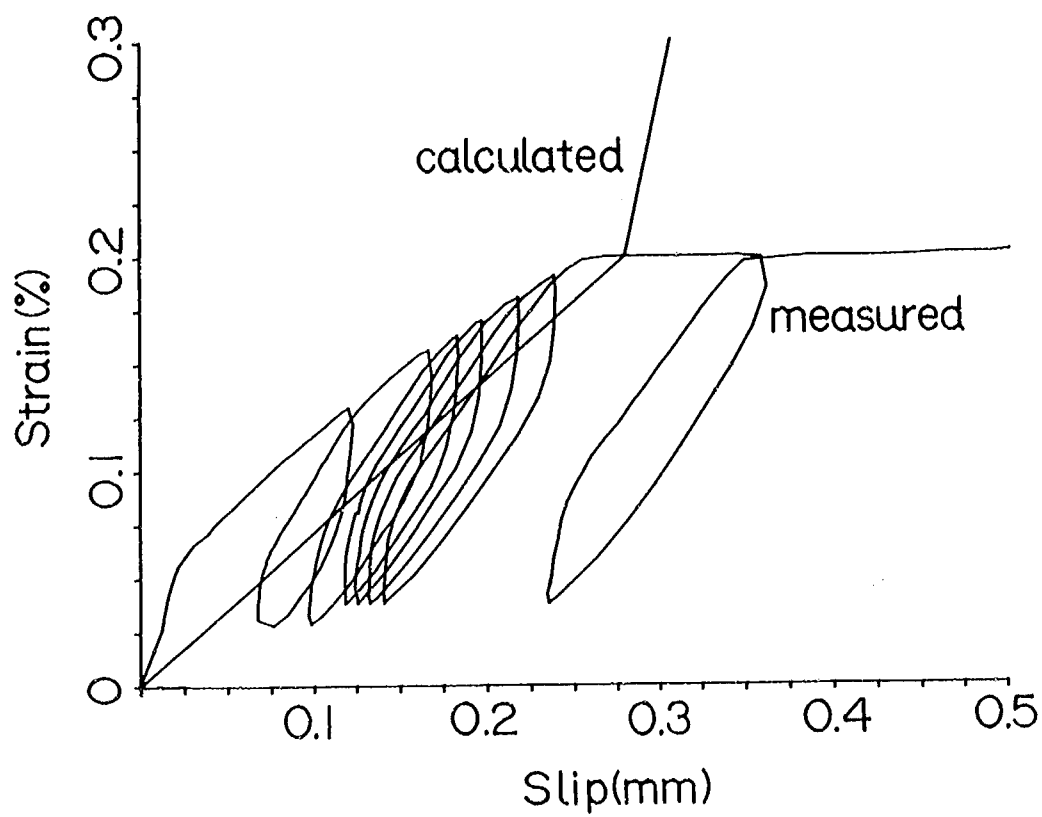


(a) 弾性範囲における伸び出し

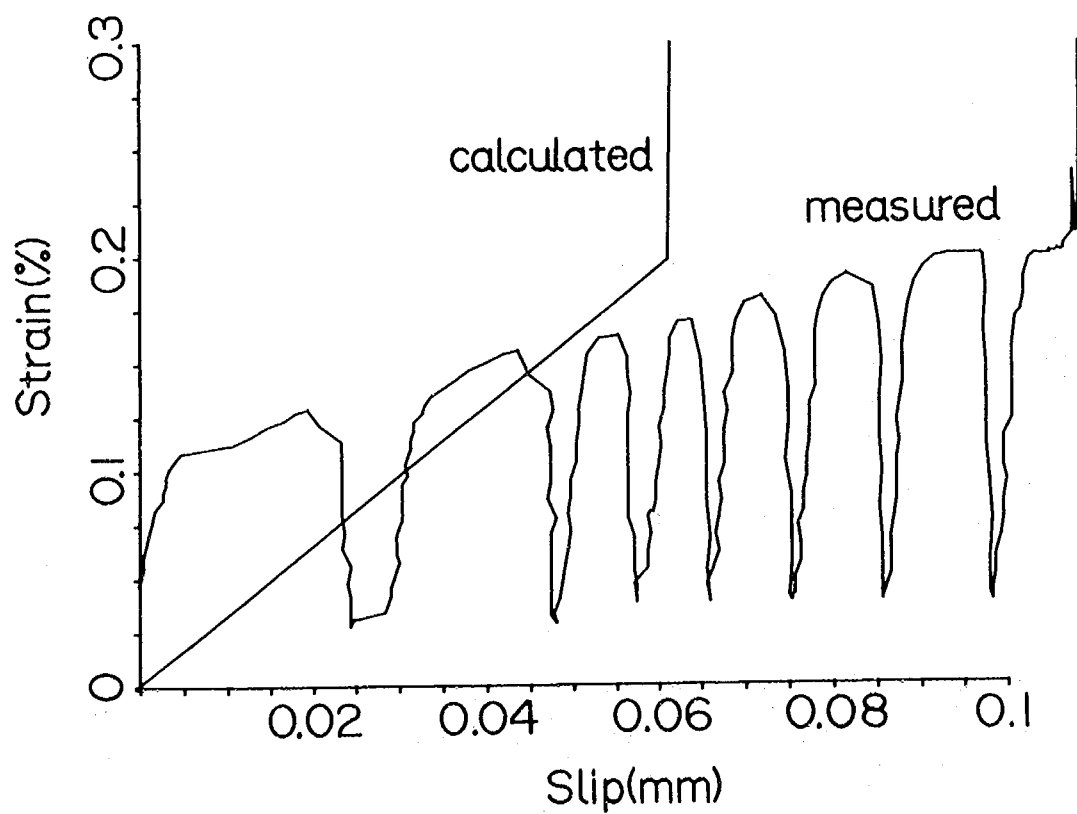


(b) 自由端の抜け出し

図-2.5 定着鉄筋の引張ひずみと伸び出し量の関係 (No.5)

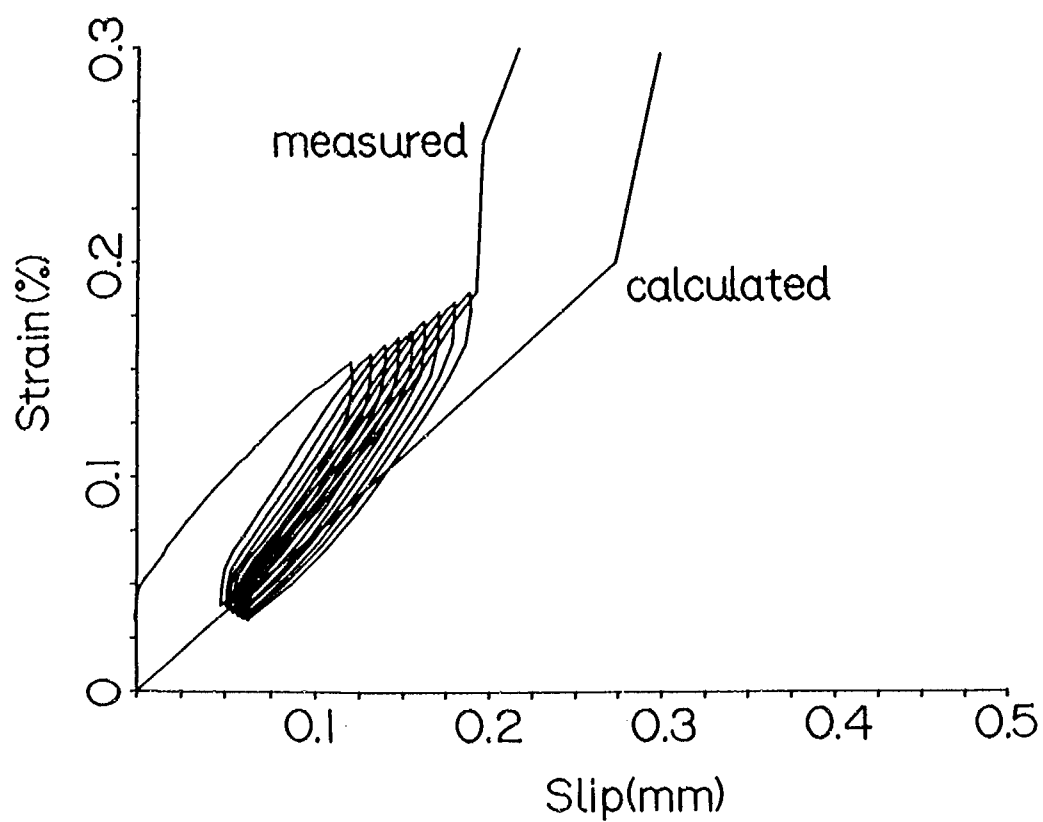


(a) 弾性範囲における伸び出し

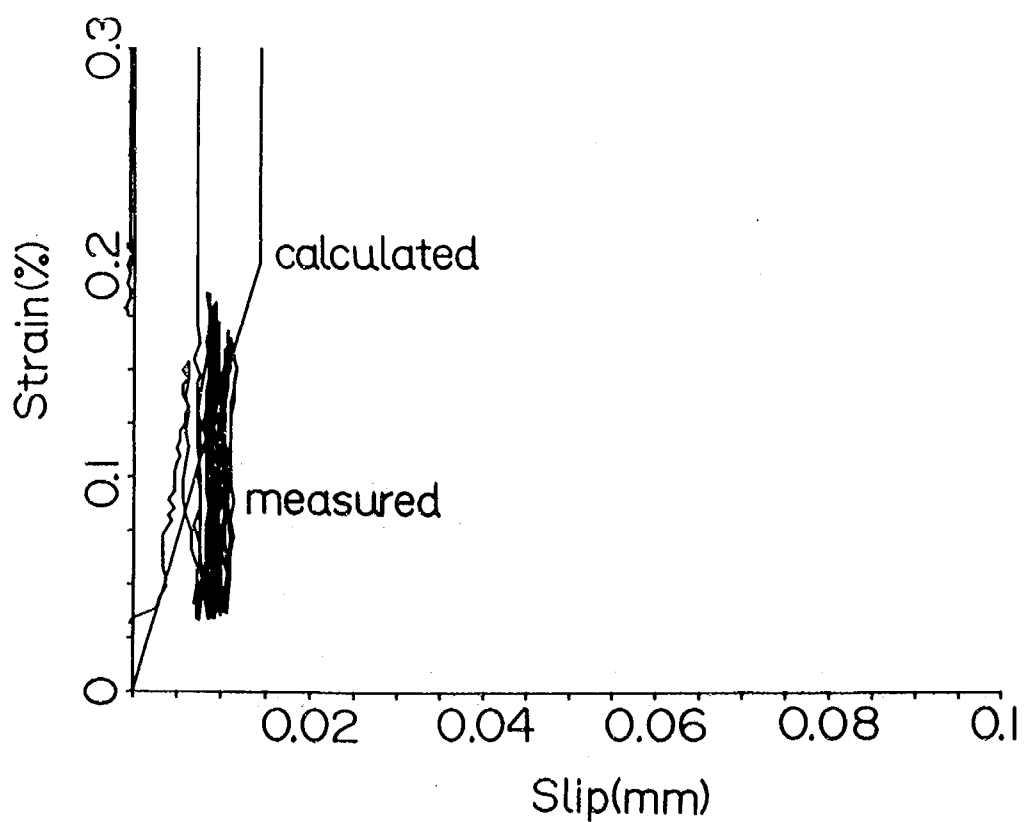


(b) 自由端の抜け出し

図-2.5 定着鉄筋の引張ひずみと伸び出し量の関係 (No.6)

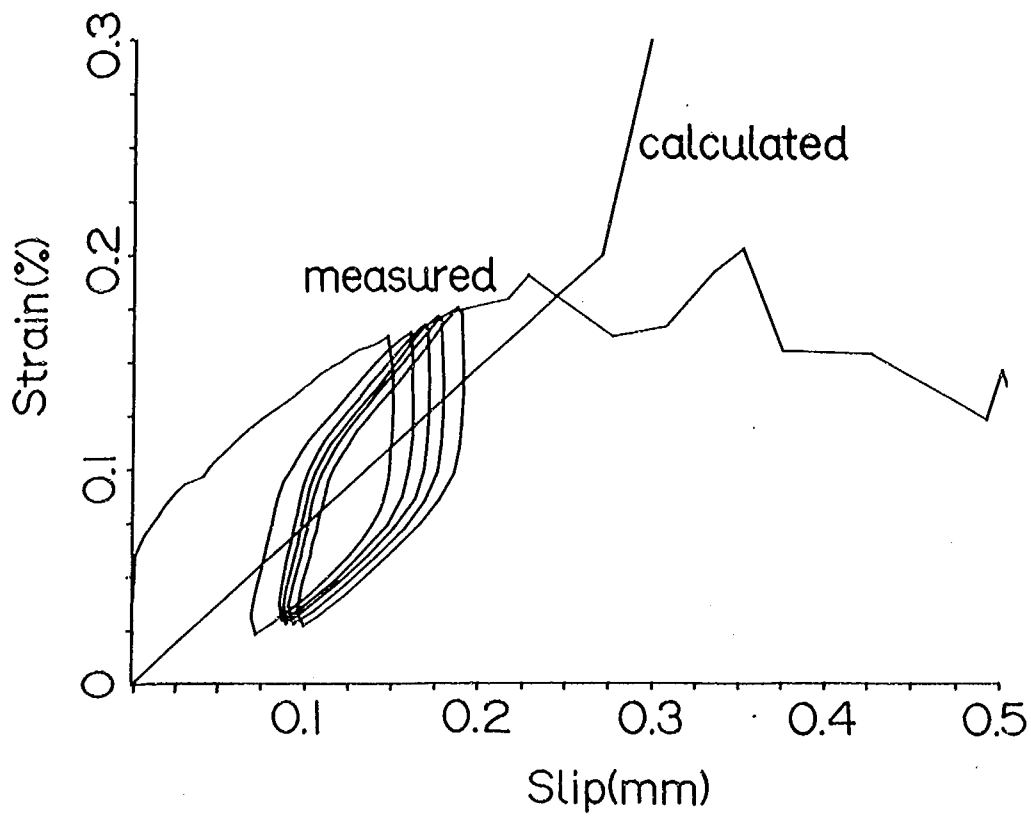


(a) 弾性範囲における伸び出し

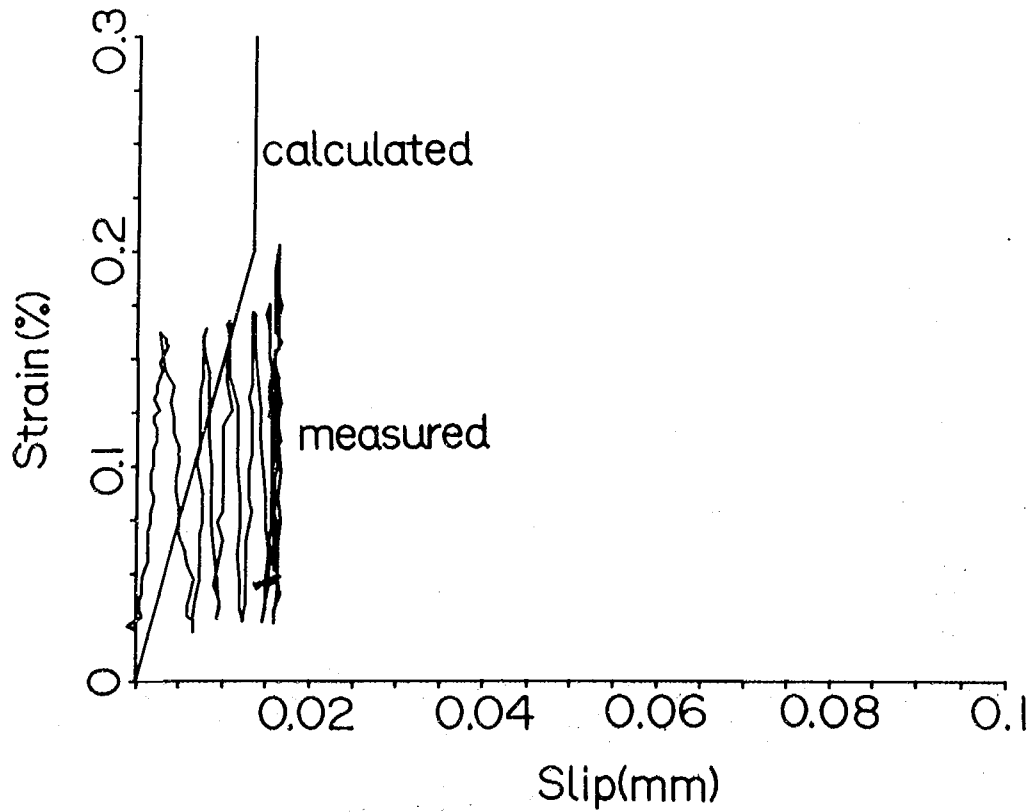


(b) 自由端の抜け出し

図-2.5 定着鉄筋の引張ひずみと伸び出し量の関係 (No.7)

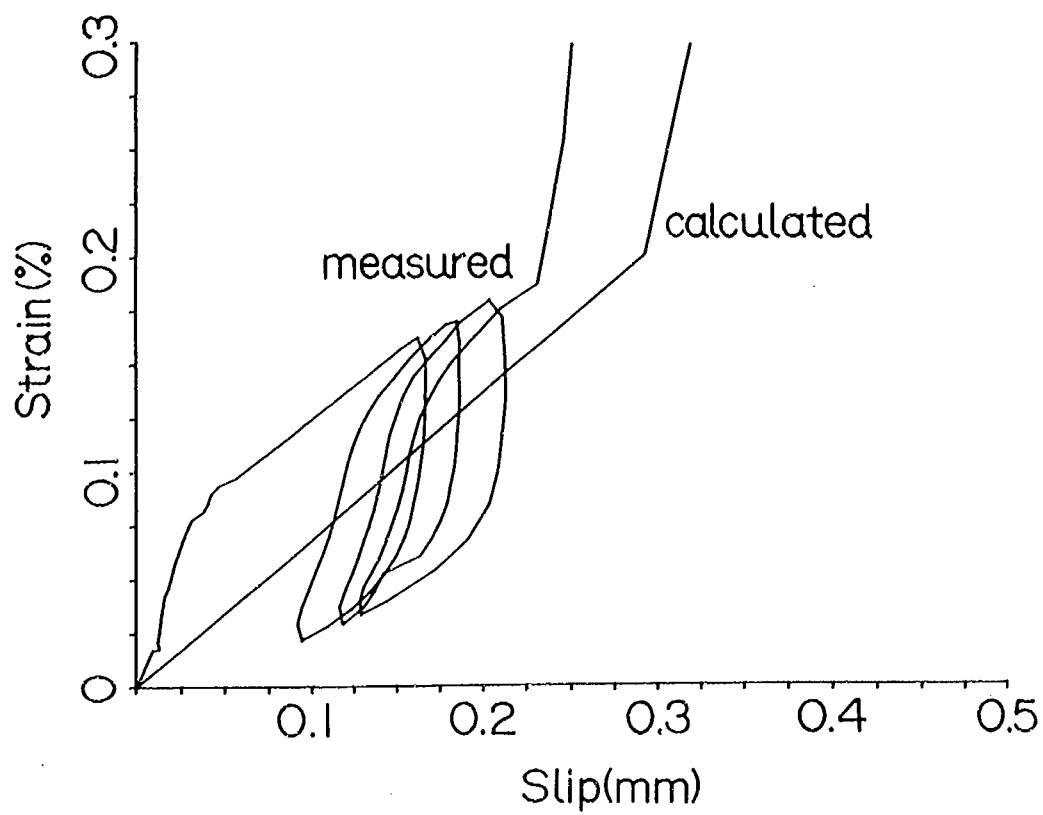


(a) 弾性範囲における伸び出し

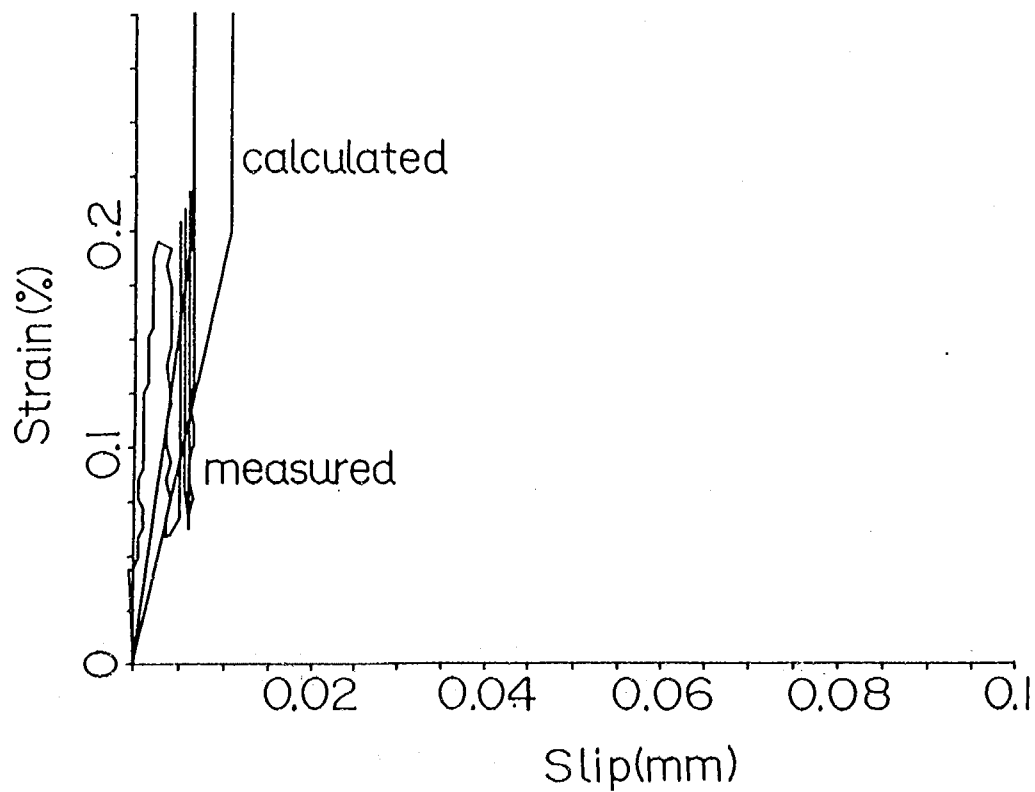


(b) 自由端の抜け出し

図-2.5 定着鉄筋の引張ひずみと伸び出し量の関係 (No.8)

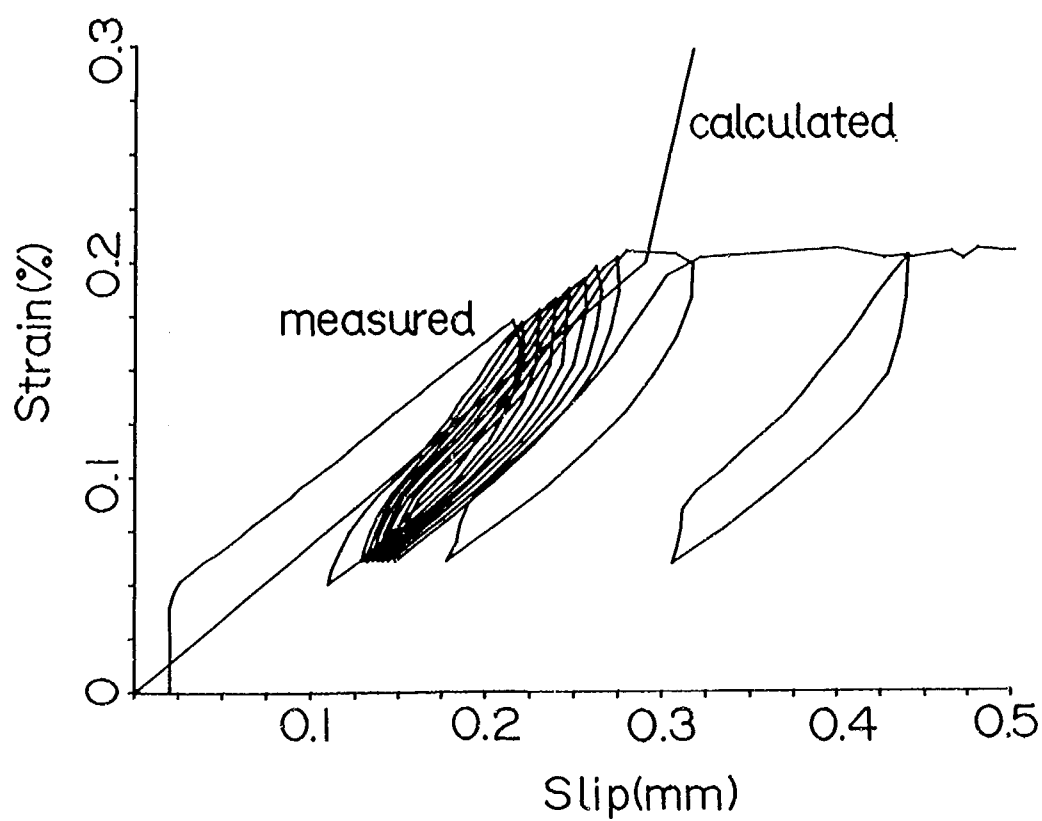


(a) 弾性範囲における伸び出し

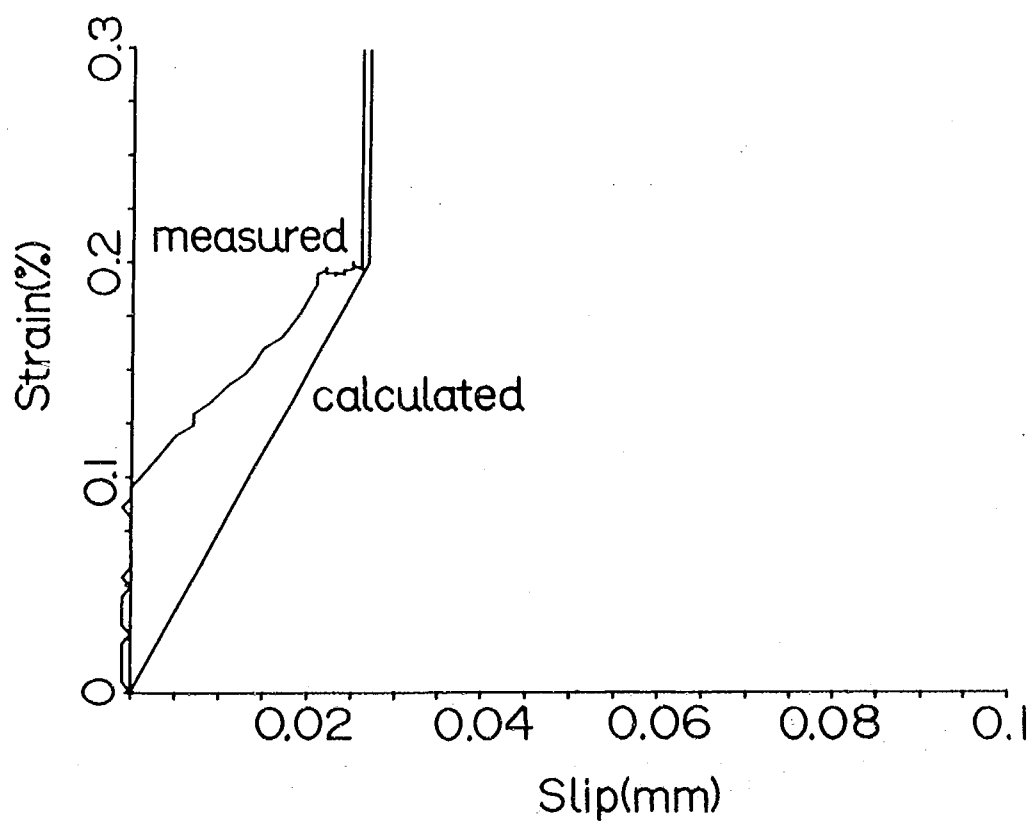


(b) 自由端の抜け出し

図-2.5 定着鉄筋の引張ひずみと伸び出し量の関係 (No.9)

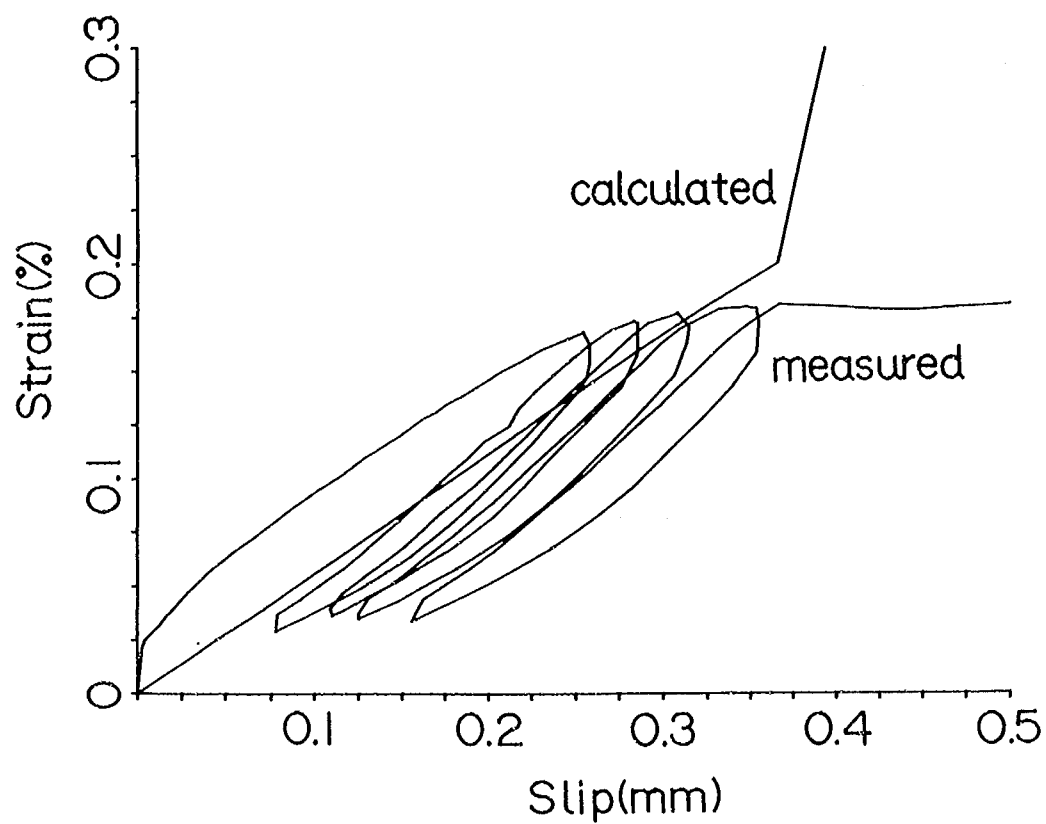


(a) 弾性範囲における伸び出し

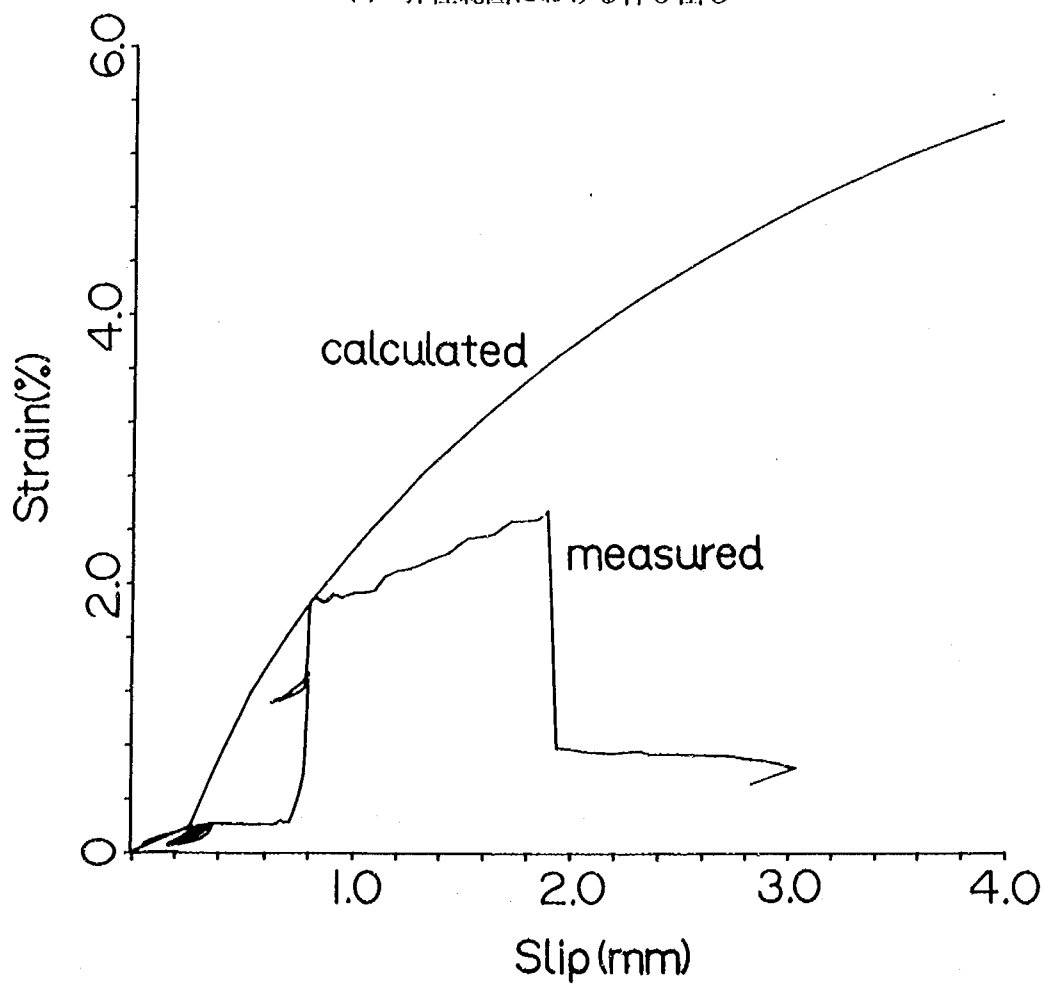


(b) 自由端の抜け出し

図-2.5 定着鉄筋の引張ひずみと伸び出し量の関係 (No.10)

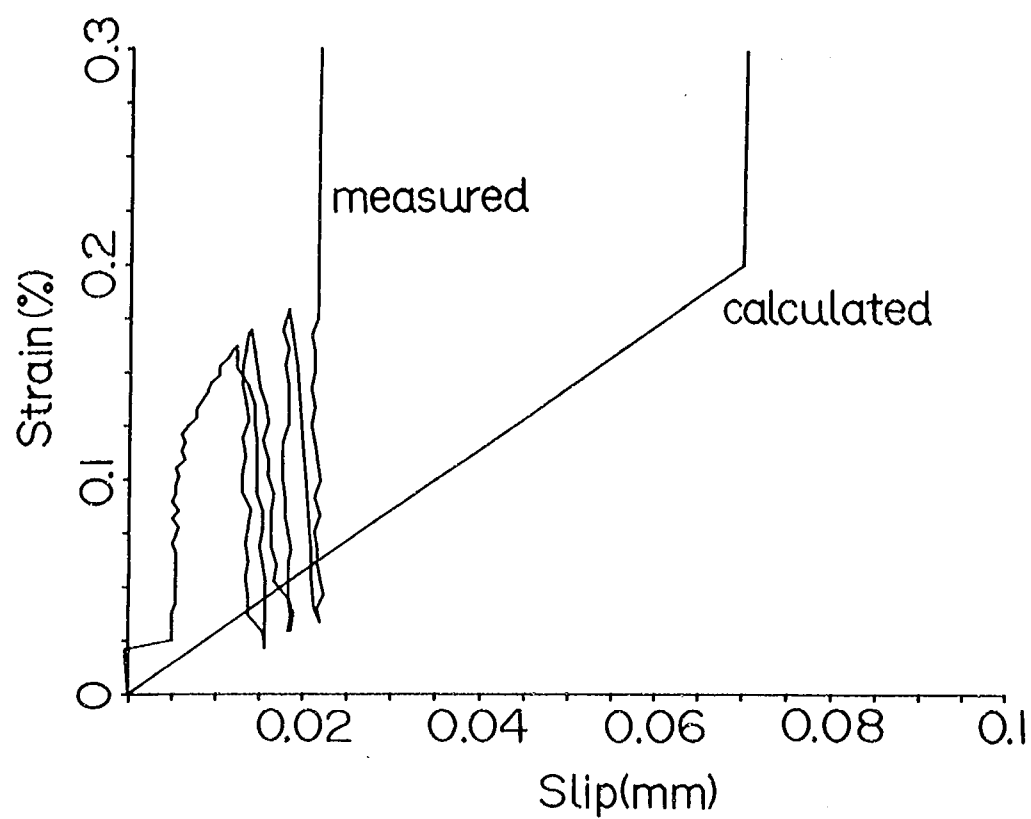


(a) 弾性範囲における伸び出し



(b) 塑性範囲も含めた伸び出し

図-2.5 定着鉄筋の引張ひずみと伸び出し量の関係 (No.11)



(c) 自由端の抜け出し

図-2.5 定着鉄筋の引張ひずみと伸び出し量の関係 (No.11)

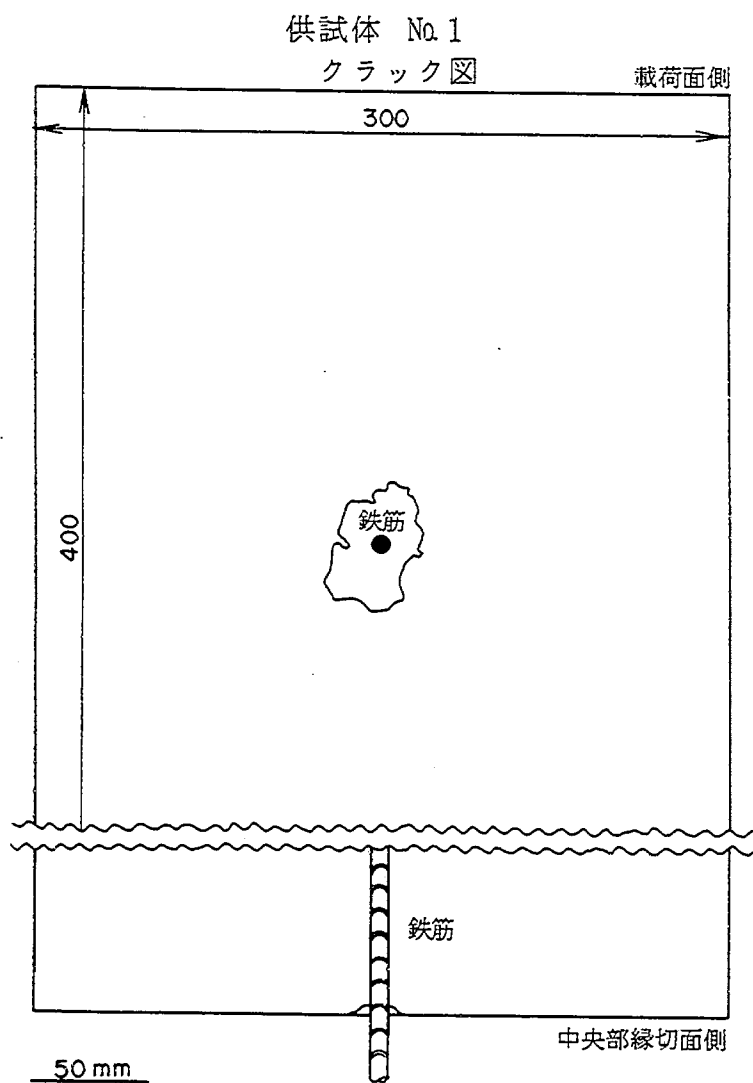


図-2.6 供試体のクラック図 (No. 1)

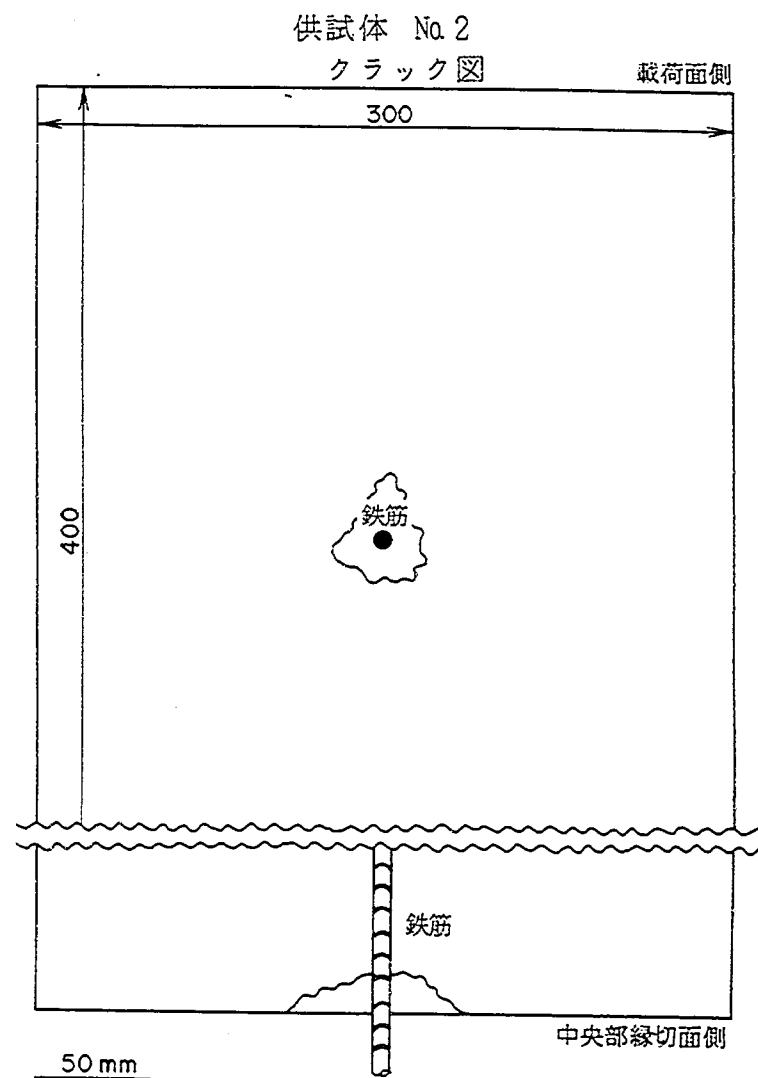


図-2.6 供試体のクラック図 (No. 2)

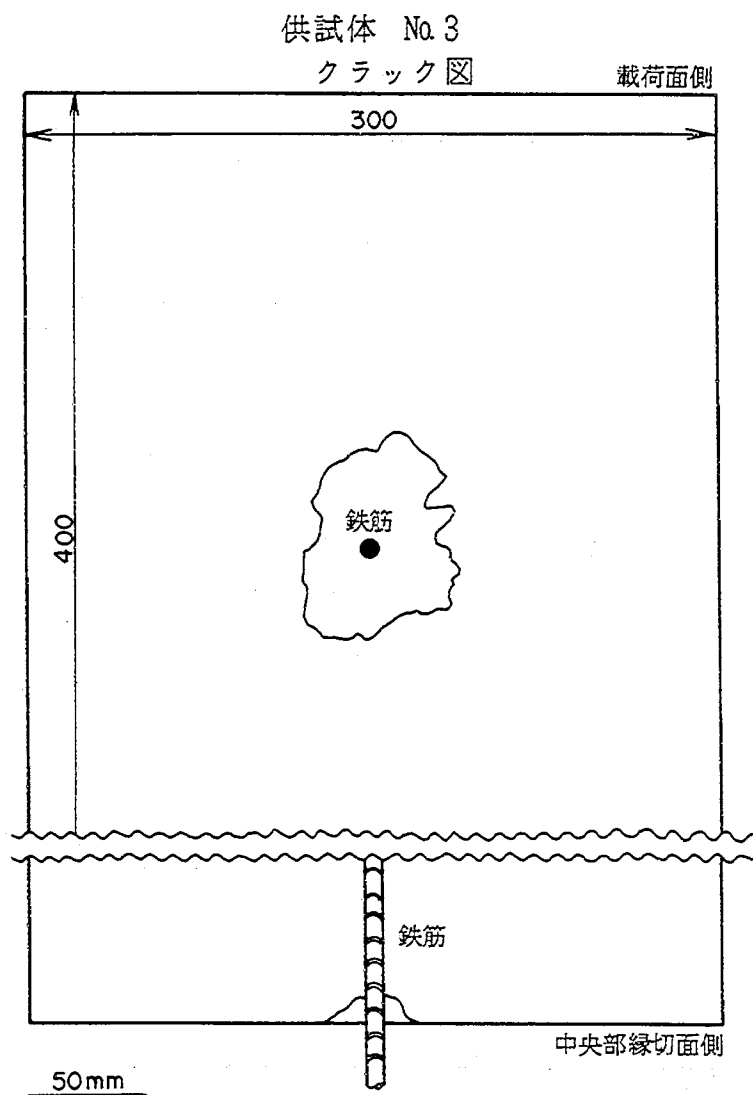


図-2.6 供試体のクラック図 (No. 3)

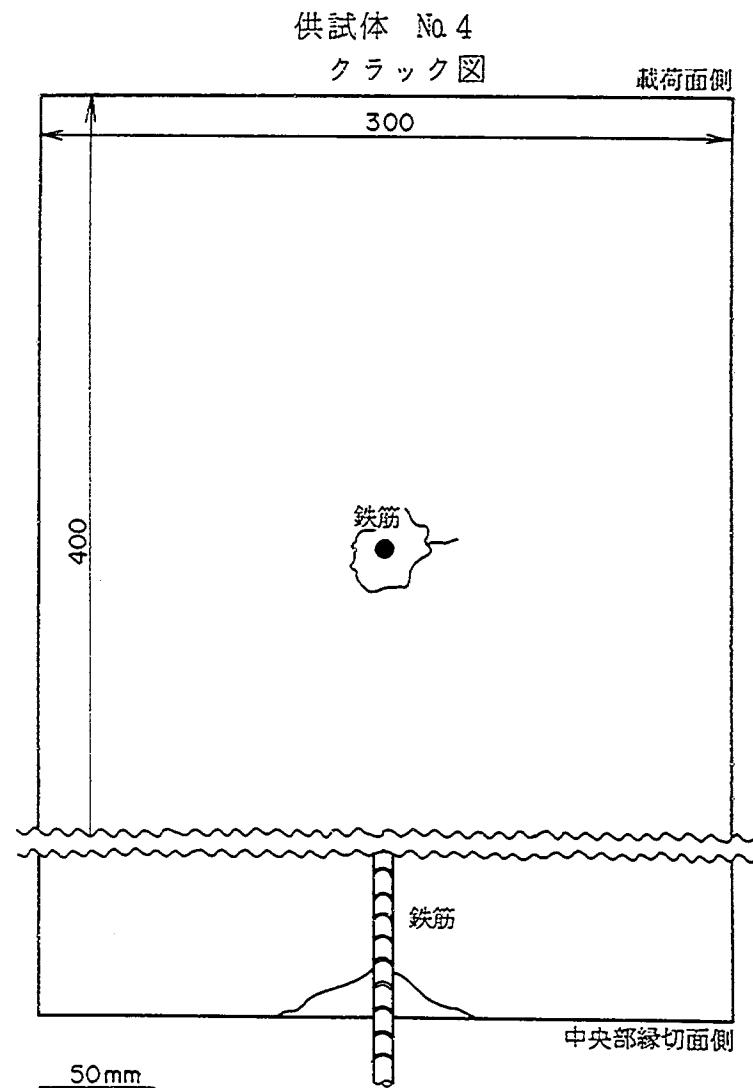


図-2.6 供試体のクラック図 (No. 4)

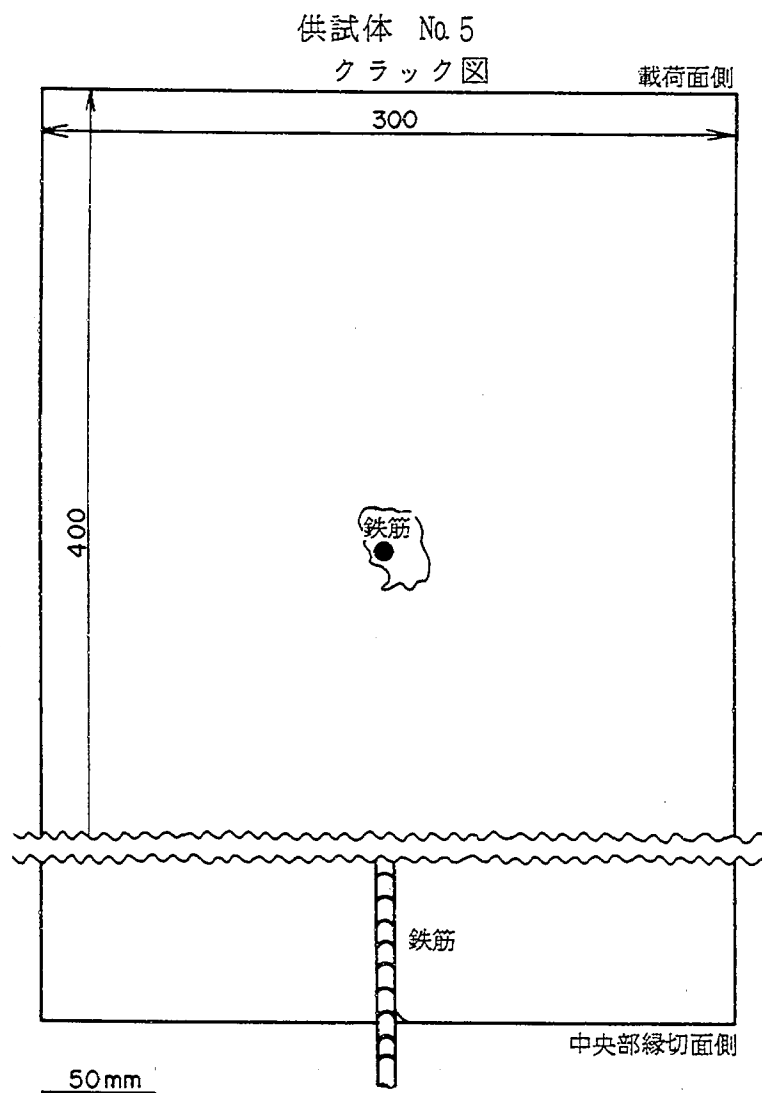


図-2.6 供試体のクラック図 (No. 5)

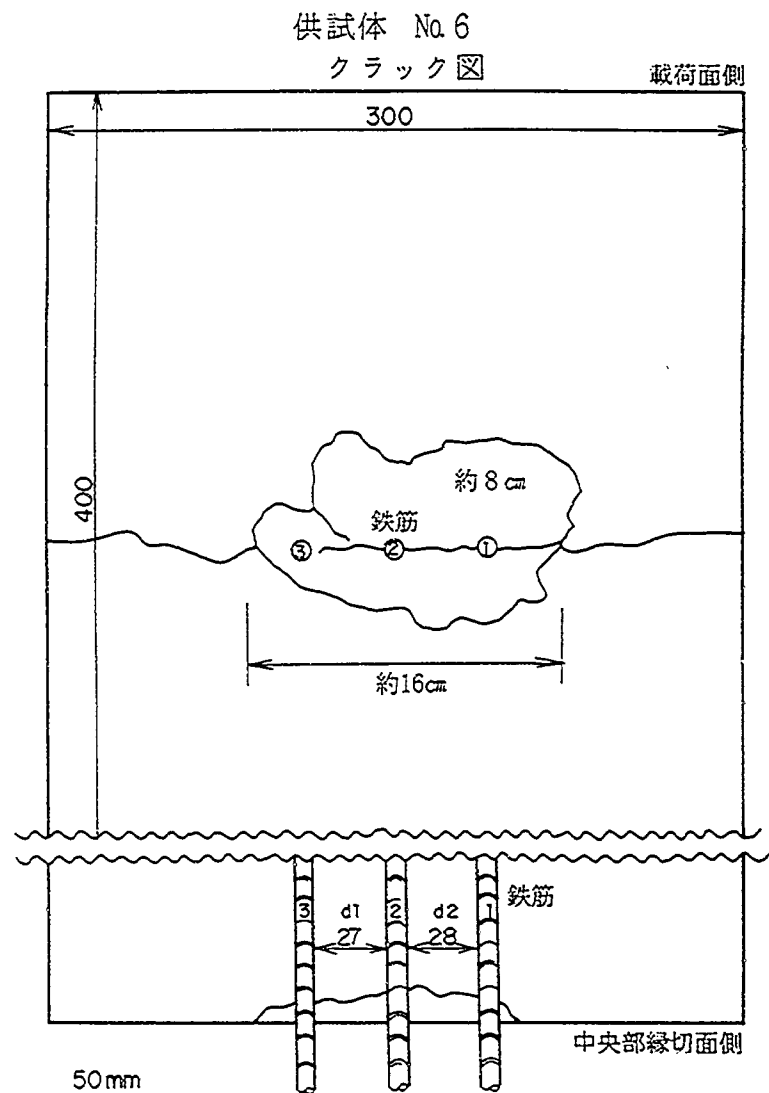


図-2.6 供試体のクラック図 (No. 6)

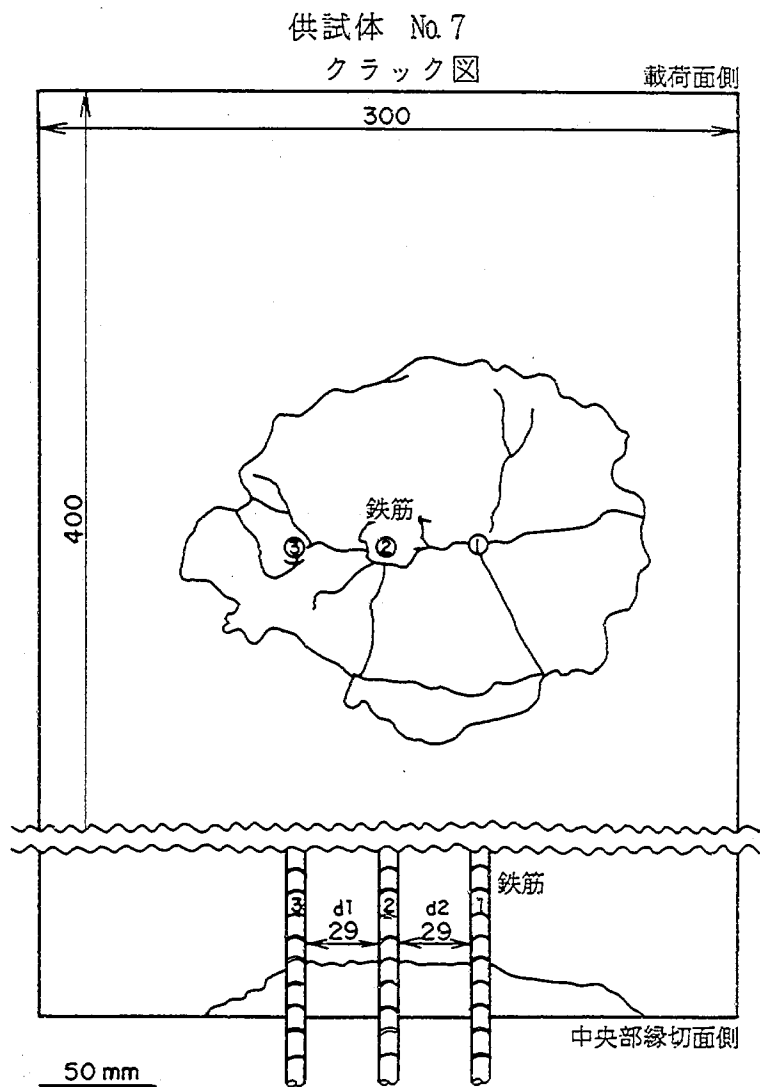


図-2.6 供試体のクラック図 (No. 7)

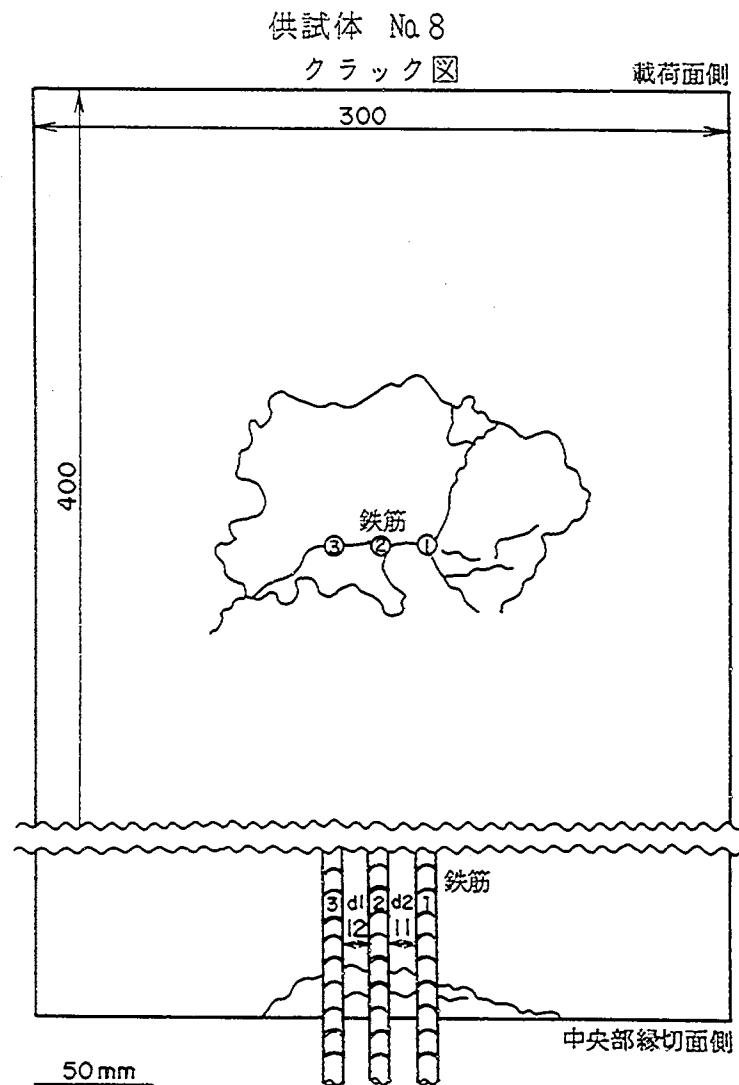


図-2.6 供試体のクラック図 (No. 8)

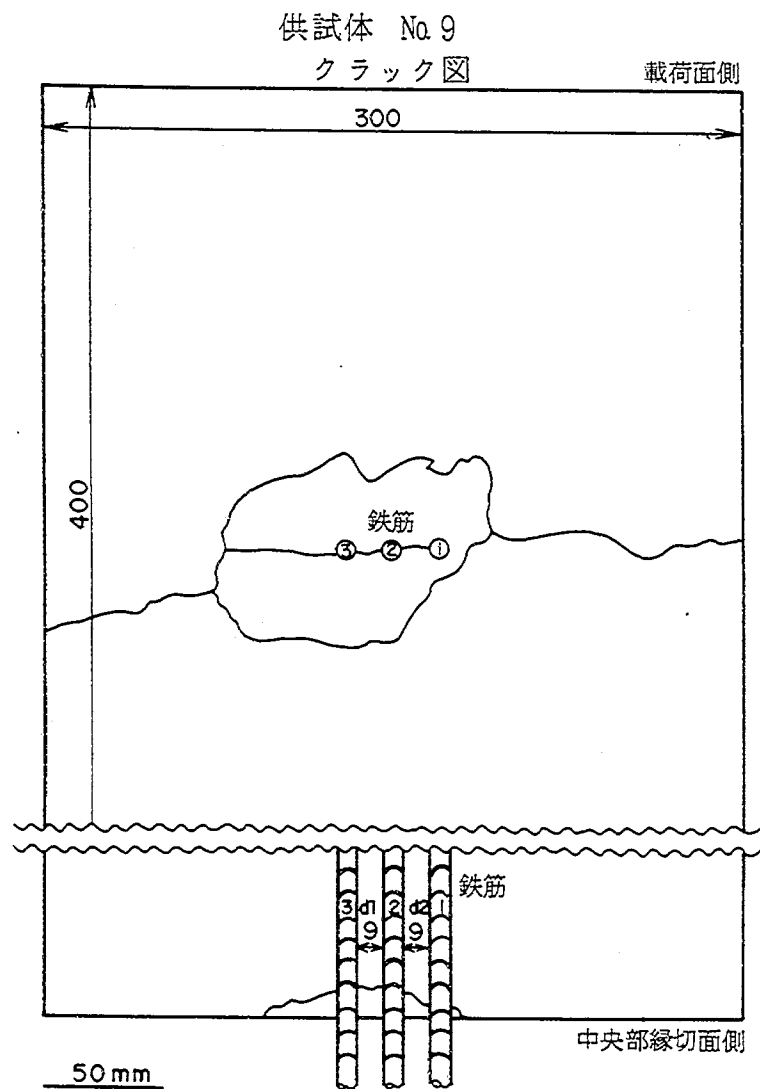


図-2.6 供試体のクラック図 (No.9)

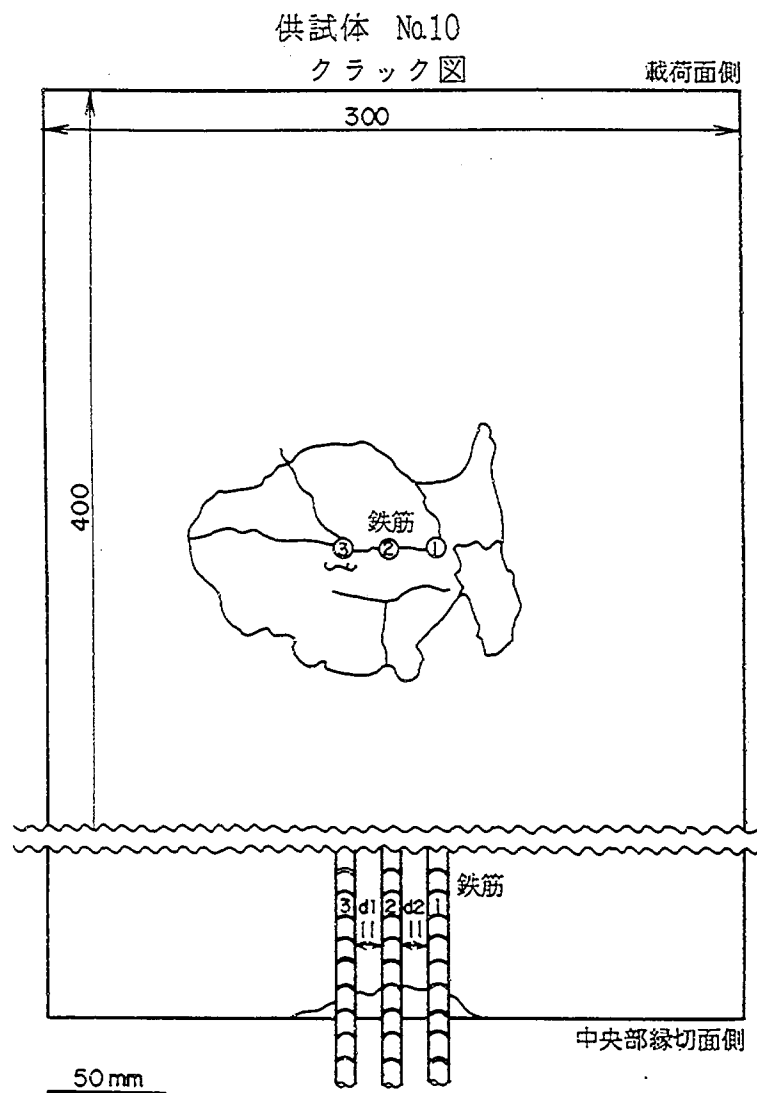
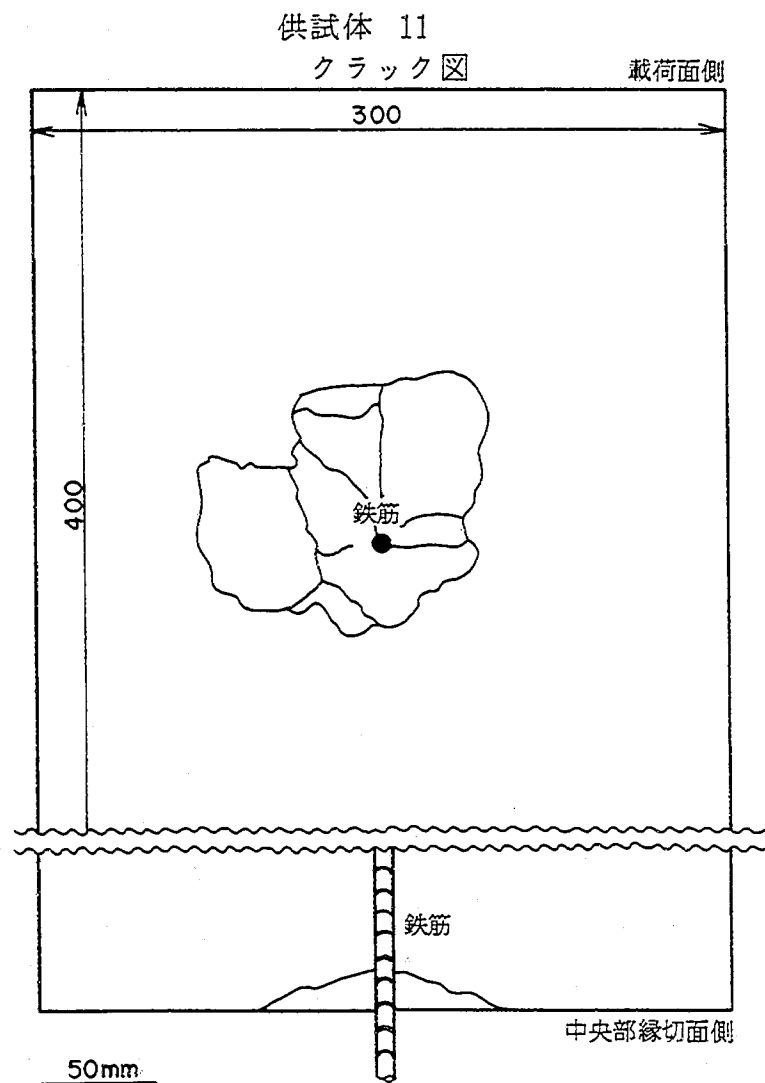
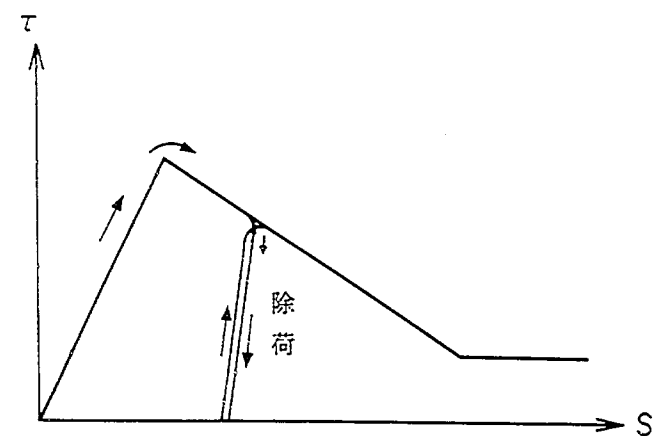


図-2.6 供試体のクラック図 (No.10)



図－2.6 供試体のクラック図 (No.11)



図－2.7 繰返し載荷時の τ －S 関係の概念図

2.4.2 定着鉄筋の伸び出し量の算定方法について

ここでは、これらの実験結果をもとに定着鉄筋の伸び出し量の算定方法について検討を行った。文献5に示した通り、付着力とすべり量の関係を図-2.8のようにモデル化し計算する手法について考えた。この解析方法については、付録-1に詳細を示す。なお、定着鉄筋の応力-ひずみの関係について、図-2.9の様に仮定した。ここで、鉄筋のひずみ硬化が始まるところの引張ひずみを1%，応力-ひずみ関係の勾配については、降伏後は40,000kgf/cm²と仮定した。

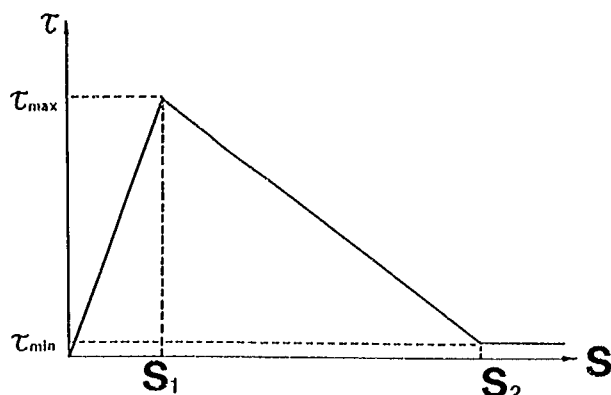


図-2.8 モデル化された $\tau-S$ 関係

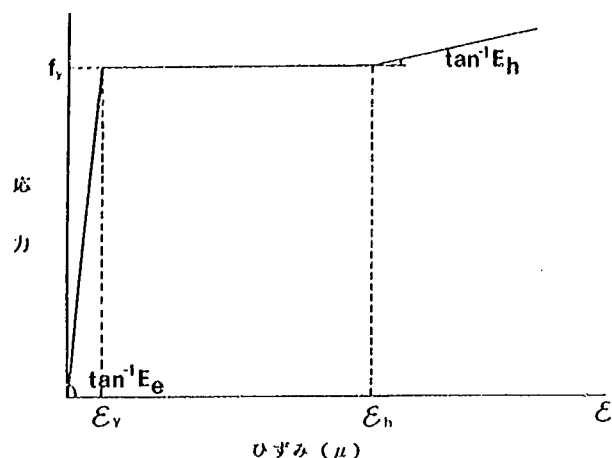


図-2.9 鉄筋の応力ひずみ曲線

また、定着鉄筋の載荷端側が降伏した後は、文献5に示した検討結果から得られた、以下の式に従い、定着鉄筋の載荷端側に付着応力が作用しない（従って、定着鉄筋のひずみ勾配がない）区間をもうけた。これは、定着鉄筋が引き抜かれた際に生じるコーン状の破壊を考慮にいれることを目的として行ったものである。すなわち、定着鉄筋の引き抜きにより、コーン状にコンクリートが剥離するので、この区間の付着強度はゼロとする。この区間の長さを l_c としたとき、 l_c は次式で与えられる。

$$l_c = \frac{d \cdot \tau_{\max}}{2 \cdot \tan^2 \theta \cdot f_{ct}}$$

ここで、 d : 定着鉄筋の直径

f_{ct} : コンクリートの引張強度（ここでは割裂強度に等しいとしている）

θ : $\theta = 60^\circ$ と仮定する。

実際の現象は、鉄筋降伏時に一気にコーン状のコンクリートの剥離が形成されるのではなく、付着応力が大きくなるにつれて、コーンの深さが大きくなるように徐々に進展して行くと考えられ、これに従えば、自由表面の影響により発揮する最大付着力の分布は図-2.10のようになる。しかし、このように深さ方向に、定着鉄筋の位置ごとに、発揮する付着応力の大きさを変化させて考えるのは煩雑であること、さらに、一度コーン状のひび割れが生じると以後の載荷ではこの区間の付着強度は0となることから、上

記のような仮定を行った。

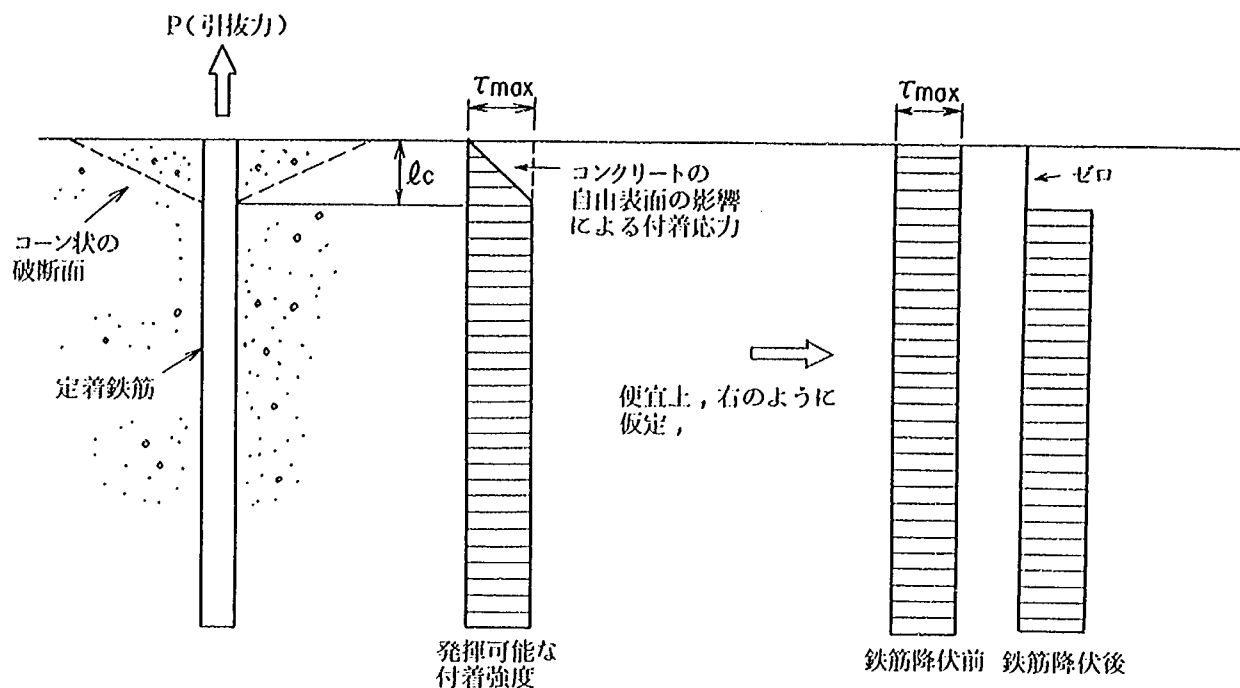


図-2.10 コンクリート表面に生じるコーン状の破壊を考慮したときの付着強度の低減法について

前回の結果⁵⁾では、 τ — S 関係に与えるパラメータとして表-2.5に示した値を採用している。今回の実験では、コンクリート強度ならびに鉄筋径が変化しているので、これらのパラメータの変化に応じて、 τ_{max} をつぎのように変化させた。

表-2.5 前回の調査により明らかにしたパラメータ

供試体の条件	τ — S 関係を規定するパラメータ
定着鉄筋の径：22mm	$\tau_{max}=60\text{kgf/cm}^2$
コンクリート強度：227kgf/cm ²	$\tau_{min}=10\text{kgf/cm}^2$
定着鉄筋の本数：1本	$S_1=0.3\text{mm}$
定着長：50cm, 35cm, 20cm	$S_2=5.0\text{mm}$

τ_{max} の値のコンクリート強度の増加にともなう増加の割合については、文献6に示されているようにコンクリートの圧縮強度の平方根に従って増加すると仮定した。前報で検討した τ — S 関係は定着鉄筋が1本でコンクリートの圧縮強度の平均値が227kgf/cm²であった。よって τ_{max} はコンクリートの圧縮強度により以下の式で与えられるものとして仮定した。この結果を表-2.6に示す。

$$\tau_{max} = 60 * \left(\frac{f'_c}{227} \right)^{1/2} \quad (2.1)$$

ただし、 f'_c ：コンクリートの圧縮強度 (kgf/cm²)

これ以外に、コンクリート強度の $2/3$ 乗に従って増加することを示した研究結果もあるが、今回の調査対象としたコンクリート強度の範囲では両者の差はわずかであり、上記のように決定した。

ここで、上記のように τ_{max} を定めたことについて、その妥当性を供試体 1～3 の実験結果を用いて検討を行った。 τ_{max} の値を前回の調査と同じ 60 kgf/cm^2 に固定した場合と、上式によって算定される τ_{max} を用いた場合

について解析結果と実験結果を比較した。今回の実験供試体は、いずれも定着鉄筋の定着破壊が生じる前に、定着鉄筋が降伏したため、直接的に τ_{max} の差による定着強度の比較を行うことができなかった。ここでは、 τ_{max} の異なる定着鉄筋に、同一の引き抜き力が作用した場合、 τ_{max} の小さい場合では定着鉄筋自由端の抜け出し量が大きくなると予想されるため、定着鉄筋の自由端側における鉄筋の抜け出し量に着目して比較を行った。この結果を図—2.11に示す。これより、 τ_{max} を 60 kgf/cm^2 に固定した場合、付着強度の過小評価のため自由端の抜け出し量が過大になることがわかる。これに対し、(2.1) 式に基づいて τ_{max} を決定した場合、解析解と実験結果の差は小さくなり、より適切な結果を得ている。

一方、 τ — S 関係を決定する S_1 、 S_2 の値については

①鉄筋径との相似則に従うものと仮定する方法

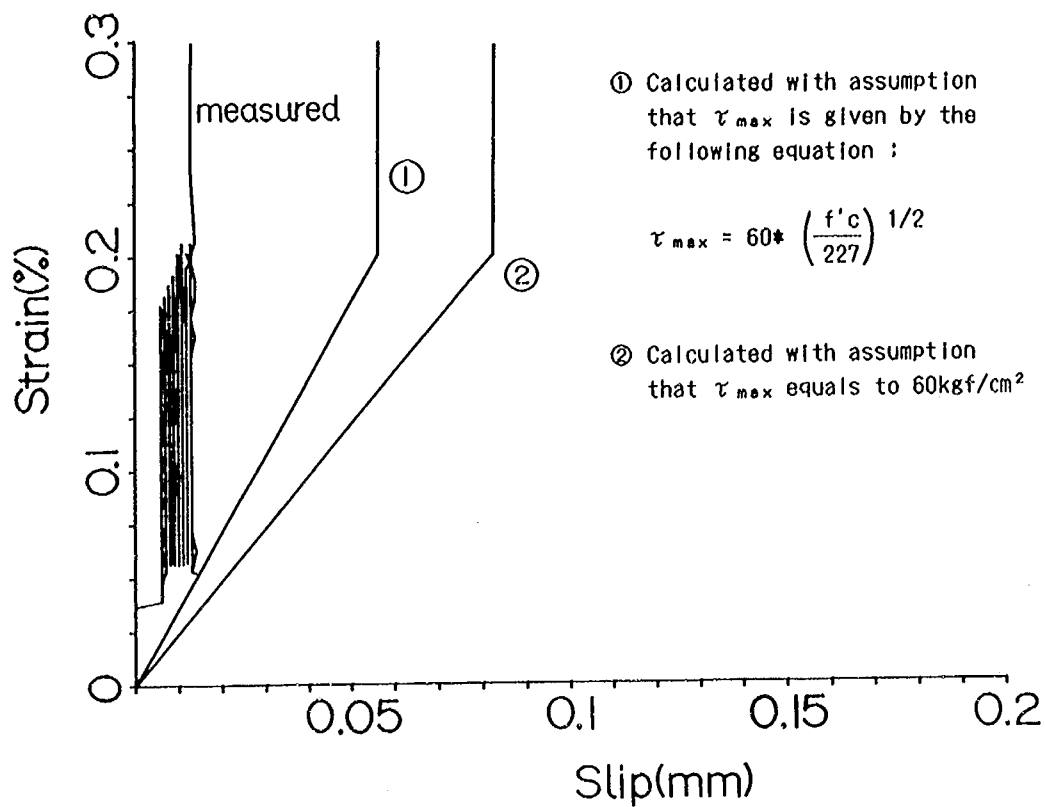
②鉄筋径によらず一定とする方法

の2法が考えられる。ここでは、鉄筋とコンクリートの界面の相対変位を S として採用しているため、鉄筋の径には依存しないものと予想されるが、確認のため供試体 1、および 3 の载荷端の引張ひずみと定着鉄筋の伸び出し量の関係を、上記の①の方法と②の方法に従って計算を行い比較検討を行った。ここで、定着鉄筋の载荷端側での伸び出し量に着目して比較を行った理由に付いて述べる。 τ_{max} の値を固定して、 S_1 の値を変化させると、 τ — S 関係の初期剛性が変化し、このため定着鉄筋の载荷端側での伸び出し曲線の初期勾配も、敏感に反応し影響を受けると考えられるからである。

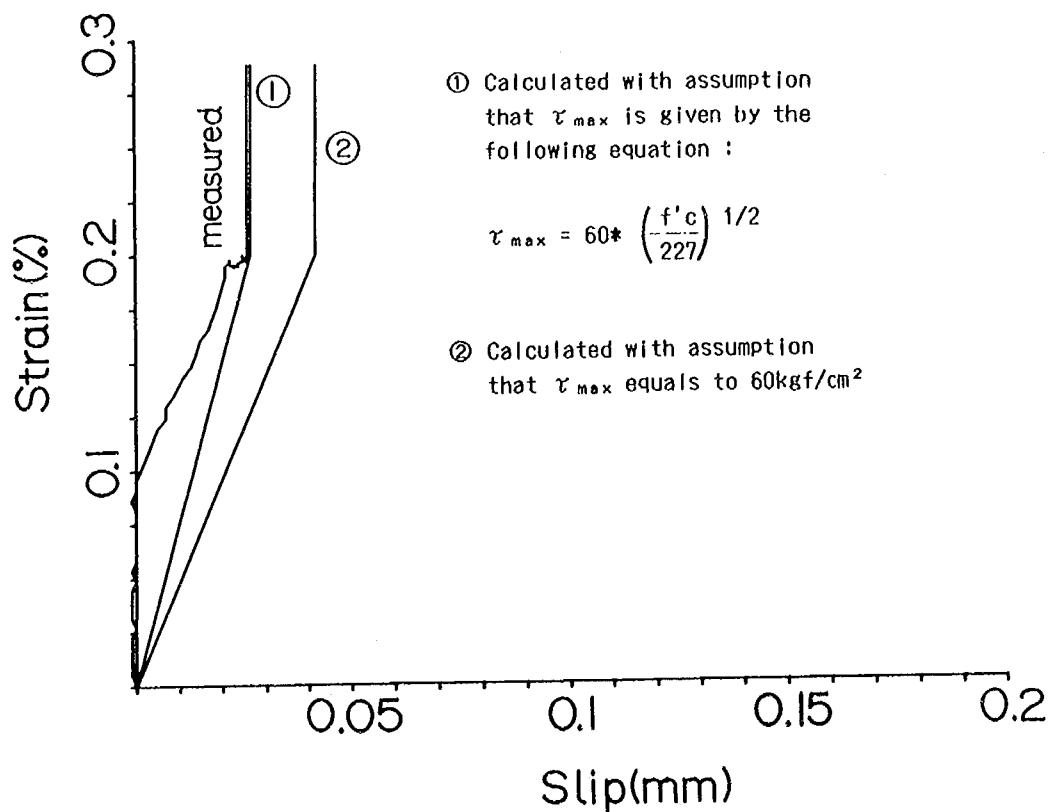
この結果を図—2.12に示す。この結果より次のことがいえる。すなわち、 S の値を鉄筋径の値に応じて比例的に変化させた場合、 $D=10\text{mm}$ の場合 τ — S 関係の初期剛性が大きすぎるため、鉄筋が降伏点に達する地点の伸び出し量が非常に小さくなり、実験結果と大きく相違する。すなわち②による方法が妥当であると考えられる。

表—2.6 定着鉄筋の伸び出し量の計算に用いた τ_{max} の値

供試体番号	τ_{max} (kgf/cm ²)
1	76.2
2	75.6
3	75.4
4	64.2
5	63.8
6	72.2
7	72.0
8	73.7
9	66.7
10	68.6
11	68.0

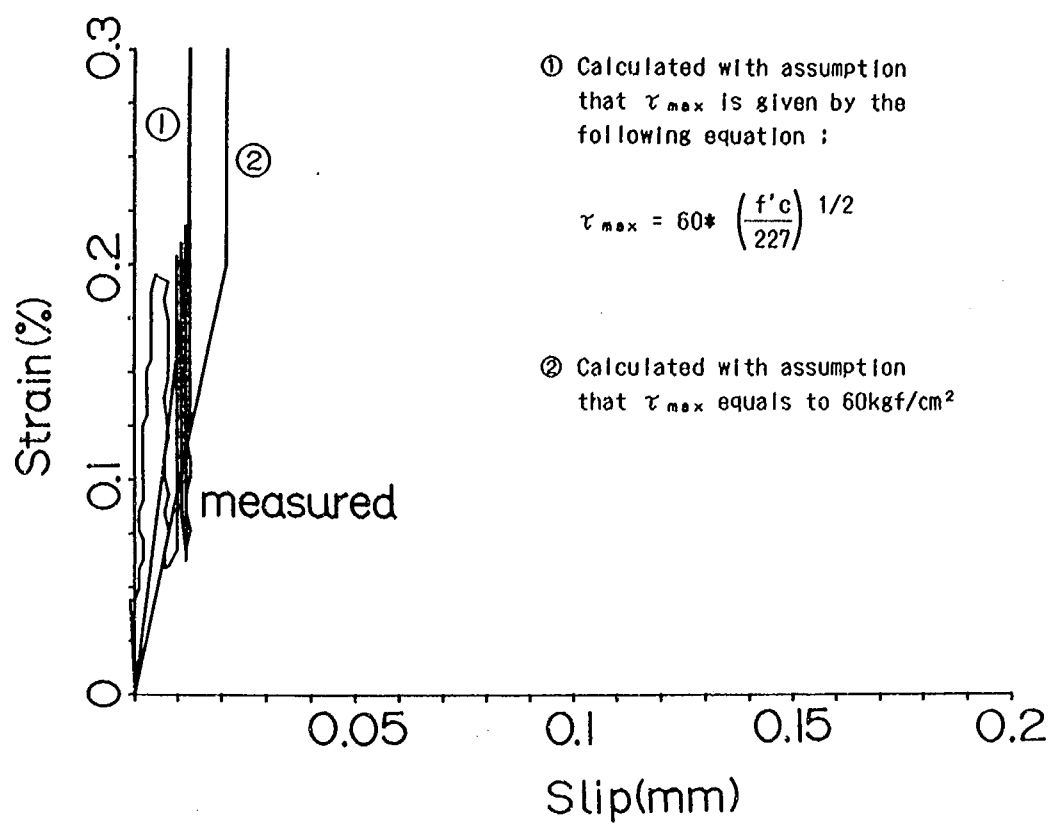


(a) 供試体No.1 での比較



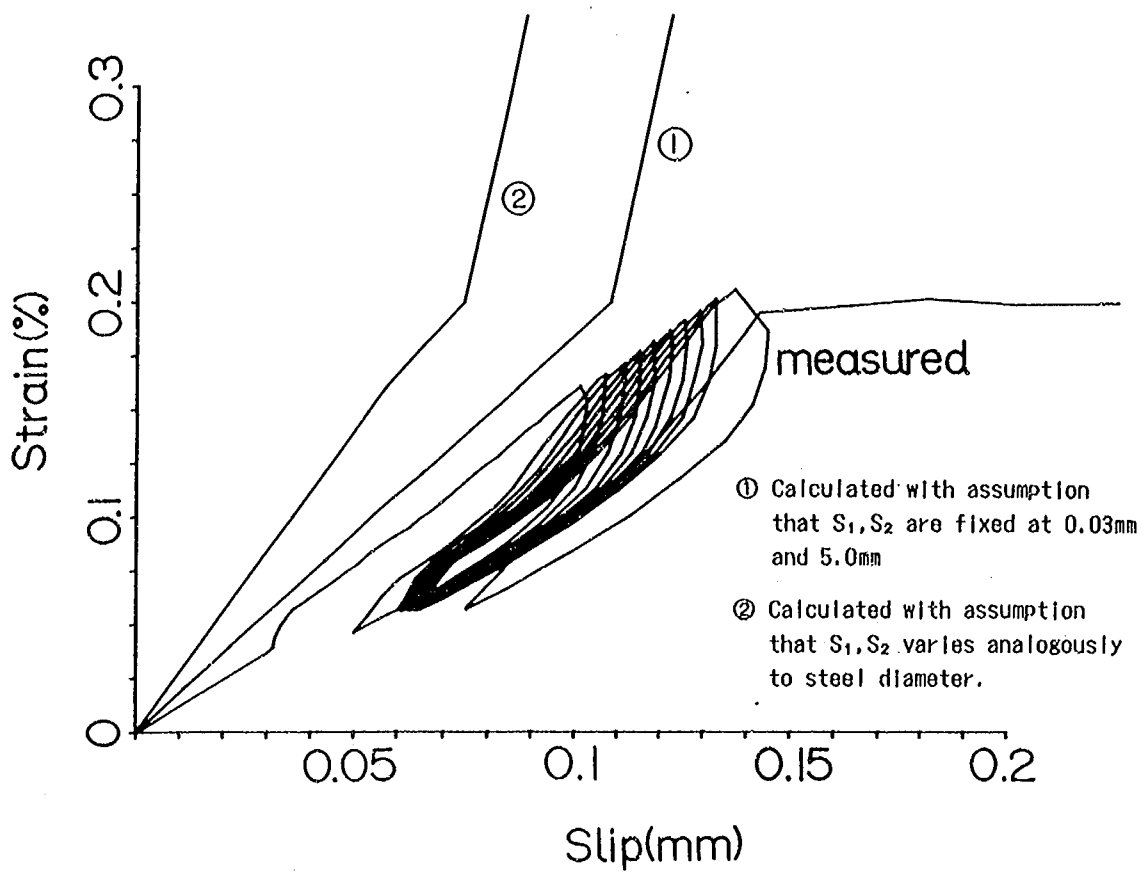
(b) 供試体No.2 での比較

図-2.11 τ_{max} の決定手法の違いによる鉄筋の抜け出し量の違い

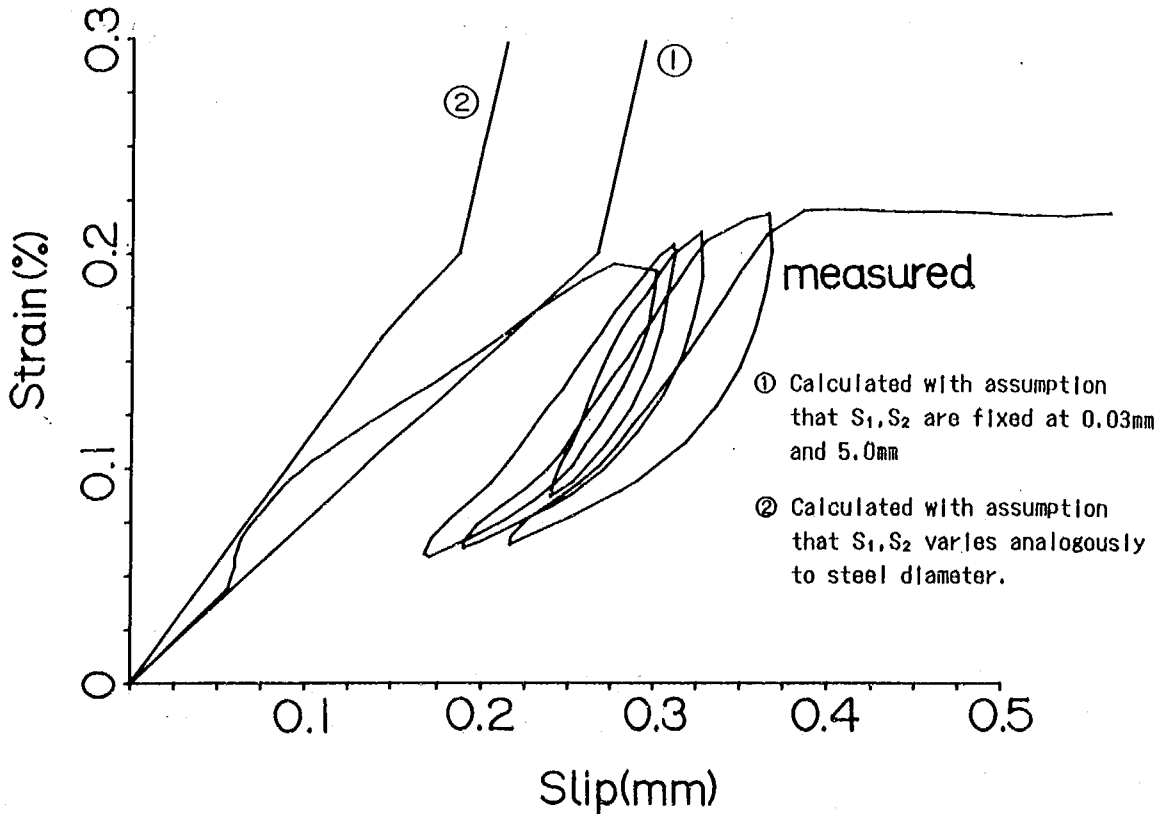


(c) 供試体No.3での比較

図-2.11 τ_{max} の決定手法の違いによる鉄筋の抜け出し量の違い



(a) 供試体No.1での比較



(b) 供試体No.11での比較

図-2.12 S_1, S_2 決定法の違いによる鉄筋の伸び出し量の違い

以上のことから以下の伸び出し量の計算においては $S_1=0.3\text{mm}$, $S_2=5\text{mm}$ と固定し, τ_{max} の値についてはコンクリートの圧縮強度の平方根に比例することと仮定した。

今回の実験において, 定着鉄筋の抜け出し量の解析結果を, 実験結果を示した図—2.5中に合わせて示した。実験結果および解析結果の対応は比較的よくとれており, この τ — S 関係に基づいて定着鉄筋の伸び出し量が計算できることがわかる。ただし, 前項でもふれたとおり, 定着鉄筋の本数が複数の場合, 定着鉄筋降伏までは, 抜け出し量は計算値よりも小さくなっており, この傾向は定着長並びに定着鉄筋のあきにより変化しないものであった。

2.5 まとめ

以上の結果を取りまとめると次のように要約される。

- ① 今回の実験結果に基づき定着鉄筋の定着耐力, 抜け出し量算定のために必要となる, τ — S 関係の妥当性を確認することができた。
- ② 定着鉄筋の径, コンクリートの強度に応じた τ — S 関係を規定することができた。すなわち τ_{max} についてはコンクリートの圧縮強度の平方根に比例して変化させ, S_1 , S_2 についてはそれぞれ 0.3mm および 5mm に固定し鉄筋径により変化しないように決定すれば良いことがわかった。
- ③ この結果, 定着鉄筋降伏後の定着強度ならびに伸び出し量の計算が可能となった。
- ④ 定着鉄筋が複数本ある場合について, 定着鉄筋が引き抜かれたときの自由端の抜け出し量はやや大きくなる傾向があったが, 定着鉄筋のあきの大きさによる影響を見いだすにはいたらなかった。

第3章 柱・フーチング供試体の繰り返し載荷試験

3.1 目的

RC部材の耐震設計のように、終局状態を対象とした設計法においては、その終局強度および変位量を適切に評価することが必要となる。とりわけRC橋脚の耐震設計においては、構造部材の靱性および終局強度が重要視され、許容靱性率および地震時保有耐力を算定しこれを部材安全性の照査項目に含めている。ここで、RC橋脚の定着鉄筋について検討しておくべき問題としては次の2つのことが考えられる。すなわち、

- (1) 定着鉄筋の抜け出しが構造物全体の変位にどれだけ関与しているか
- (2) 柱部分で想定される終局状態に対し、この終局状態を保障しうる定着耐力が存在するか

という問題である。

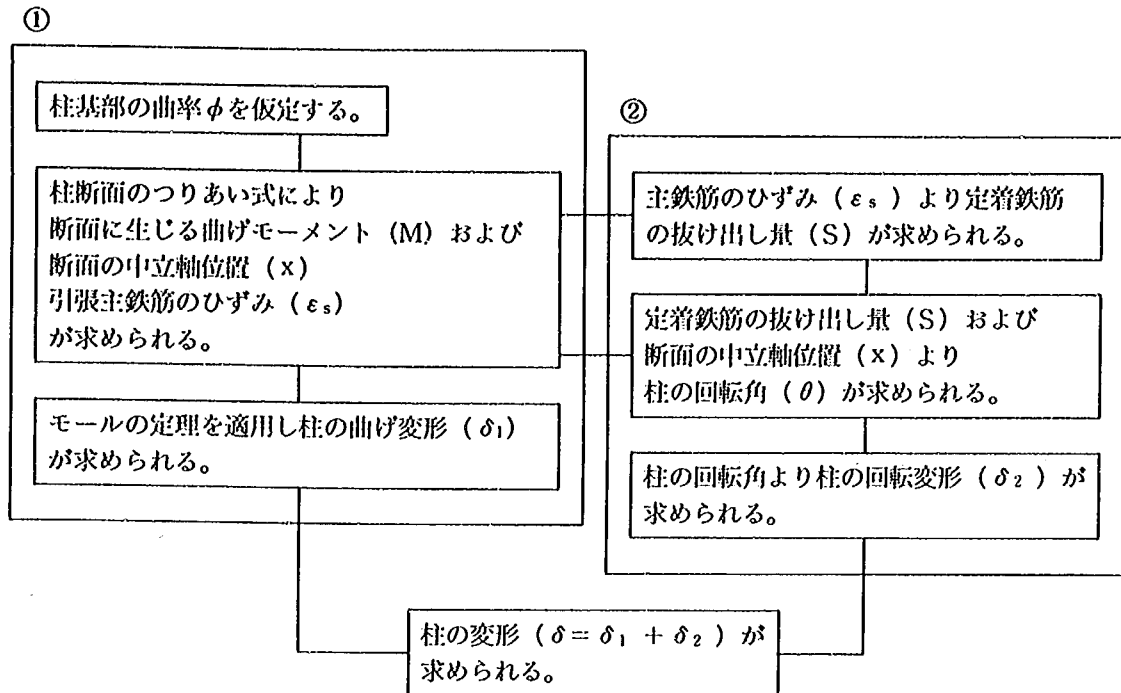
RC橋脚の終局変位は、太田らにも指摘されているように、柱の曲げ変位だけではなく、柱主筋のフーチングからの抜け出しによる柱そのものの剛体的回転変位も含まれている。このため、橋脚の変位量を計算するためには、定着鉄筋の抜け出し量ならびにそれにともなう柱の回転変位を、柱の曲げ変位と関連づけて算定する必要がある。ここで、柱の定着鉄筋の伸び出しによる回転変位の影響度については研究者によってかなりとらえ方が異なっており、この変位成分を重要視するもの³⁾としないもの⁷⁾がある。

定着鉄筋の伸び出しを考慮した柱の変形計算を行う際、柱の曲げ変位と回転変位をリンクさせるのは表—3.1の手順による。現行の道路橋示方書では表—3.1中の①の手順で得られた δ_1 を柱の変位量とし、②の手順で得られる δ_2 は無視している。これは δ_2 の算定手法が確立していないためである。特に、定着鉄筋に大きな塑性ひずみが生じた後は、定着鉄筋の塑性域における引張変形量が非常に大きくなり、この塑性変形が支配的要因となるが、定着鉄筋に生じる塑性区間の長さの算定が困難であり、伸び出し量算定の妨げとなっている。

ここでは、前章で検討した定着鉄筋の抜け出し量の算定方法を応用して、②の手順も含めた解析を行い、柱の全変位 δ をもとめ、この全変位量に占める δ_2 の割合について検討し、さきに述べた(1)の問題の結論をうることを試みた。このための比較対照用のデータを得ることを目的として、柱フーチング模型による繰り返し載荷試験を行った。

次に、手順①で求められた柱終局時の主鉄筋の引張ひずみの値は、かなり大きくなり、特に柱の主鉄筋比が小さな場合では計算上相当大きなものとなっている。このようなひずみ状態では、鉄筋のひずみ硬化により、定着鉄筋に作用している引張力は鉄筋の降伏時の引き抜き力よりもいっそう大きなものとなっており、定着鉄筋の定着破壊の危険性が大きくなっている。ところが、現行の設計法においては、鉄筋の終局時の引張ひずみについての限界値はなく、このことに対する照査は行われていない。ここでは、定着鉄筋に塑性ひずみが生じたときの、定着耐力の照査について検討し、定着鉄筋の必要定着長を求めることもあわせて行った。

表-3.1 柱の変形計算手順



3.2 概 要

定着鉄筋の定着長が不足した場合、柱の荷重変形関係には様々な影響がでることが予想される。定着長が著しく不足した場合には、定着鉄筋の降伏以前に定着破壊が生じるため、柱の強度が低下し主鉄筋降伏以前に強度を失う。定着鉄筋の定着破壊が鉄筋の降伏後に生じるような定着長が確保されている場合でも、定着鉄筋の自由端に大きなすべりが生じるような場合では、柱の荷重変形関係には悪影響がでることが予想される。これは、第2章でも検討した通り、定着鉄筋界面の τ - S 関係が除荷時に大きな残留すべりを生じるためである。定着鉄筋が引張力だけでなく圧縮力も交互に受ける交番载荷が行われた場合、付着力をほとんど生じない状況で、定着鉄筋のすべりが生じることが予想されるためである。

この章においては、前章で妥当性を確認した定着鉄筋の抜け出し量の算定式を応用し、確認のために柱フーチングモデルの载荷試験を行った。载荷試験は、大きく分けて2種類のシリーズからなる。すなわち、フーチング内に生じるせん断力が小さく、フーチング内にひび割れが生じない場合、および、フーチング内にひび割れが生じる場合の2通りとした。これらの実験を通じ、定着鉄筋の伸び出しによる影響、および鉄筋の定着耐力が不足した場合、部材全体の挙動にどのような影響がでるか、検討を行った。

3.3 柱フーチング模型の繰り返し載荷実験

3.3.1 供試体の寸法ならびに載荷・計測方法

供試体数は全部で5体とし、そのうち2体はフーチングに作用するせん断力の小さいもの、3体はせん断力が大きくフーチング内にせん断ひび割れが入る可能性のあるものである。供試体の寸法・計測法を図—3.1に示す。また、各供試体の概略を表—3.2に示す。載荷方法は図—3.2に示すようにいずれもフーチング部分を2本のH型钢を用いて固定し、柱先端近くを載荷点とした。載荷は柱の降伏変位を δy としたとき $\pm \delta y$ を振幅として10回静的繰り返し載荷を行い、次のステップで、変位振幅を $\pm 2 \delta y$ とし、10回繰り返し載荷を行い、順次振幅を δy だけ増加させて載荷を行った。載荷は供試体の強度が大きく低下するまで続けた。 δy の決定は初期に載荷を行った方向において、引張主鉄筋のひずみが降伏点に達したときの柱載荷点におけるたわみをもって降伏変位 δy とした。降伏点に達した後、載荷方向を反転したが、このときの負の方向の降伏変位($-\delta y$)はその絶対値が δy と同じになるように決定した。

載荷速度は最大で1mm/秒以下となるように制御を行った。

次に、供試体の各部分の計測方法について述べる。供試体の柱部分のたわみ、および柱基部のフーチングからの変位、主鉄筋のひずみを計測した。変位の計測はすべて精度1/100mmの変位計を用いて行った。変位計の基準は、フーチングに固定された溝形鋼とした。

表—3.2 供試体の寸法および定着鉄筋の定着長

供 試 体 番 号	1	2	3	4	5
柱 断 面 寸 法	30cm*30cm	30cm*30cm	50cm*50cm	50cm*50cm	50cm*50cm
断 面 有 効 高 さ	25cm	25cm	45cm	45cm	45cm
主 鉄 筋 径・本 数	D22・3本	D22・3本	D16・5本	D22・5本	D29・5本
引 張 主 鉄 筋 比	1.49%	1.49%	0.44%	0.86%	1.43%
ス タ ー ラ ッ プ 径・間 隔	D6@6cm	D6@6cm	D10@10cm	D10@10cm	D10@10cm
柱 高 さ	105cm	105cm	180cm	180cm	180cm
せ ん 断 支 間 比	4.2	4.2	4.0	4.0	4.0
軸 力 の 有 無	無し	無し	無し	無し	無し
鉄 筋 の 定 着 長*	59D	30D	43.8D	31.8D	24.1D
フ ー チ ン グ 寸 法	70cm*120cm	70cm*120cm	70cm*70cm	70cm*70cm	70cm*70cm
フ ー チ ン グ 長 さ	130cm	130cm	70cm	70cm	70cm

注)

*) 鉄筋の定着長は鉄筋径の倍数で示した(Dは鉄筋径)。供試体4, 5はフーチングにひび割れが生じ実質的には表中に示した定着長よりも小さくなっている。ここで、ひび割れの影響を加味した実質的な定着長は供試体4で20.0D、供試体5で15.2Dとなる。

（訂正）

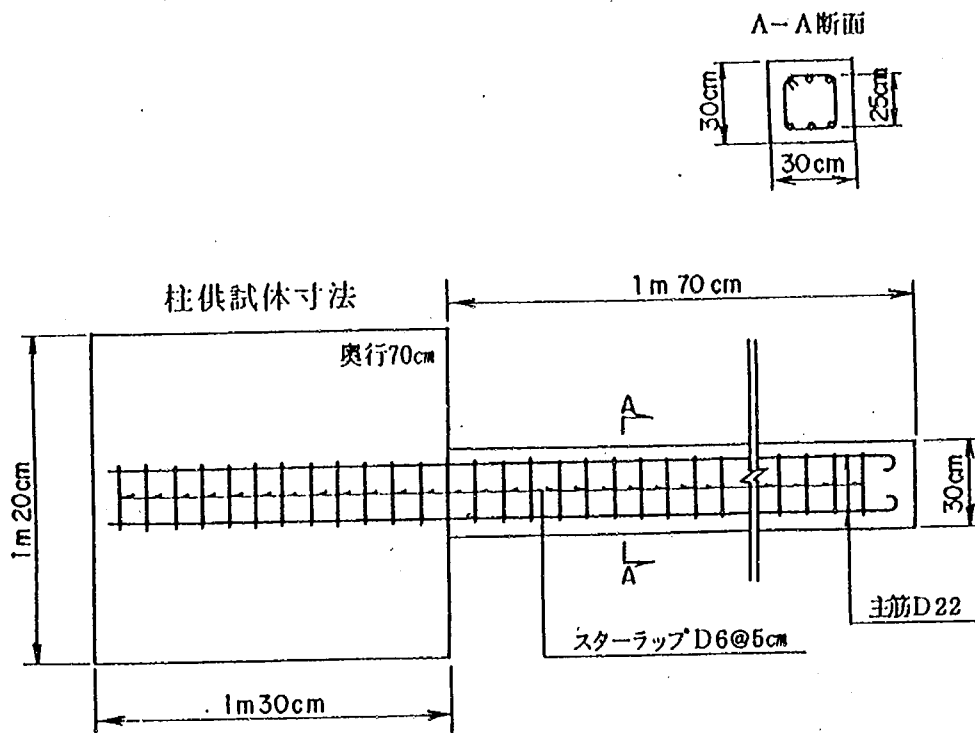


図-3. 1 (a)柱・フーチング供試体1, 2の寸法

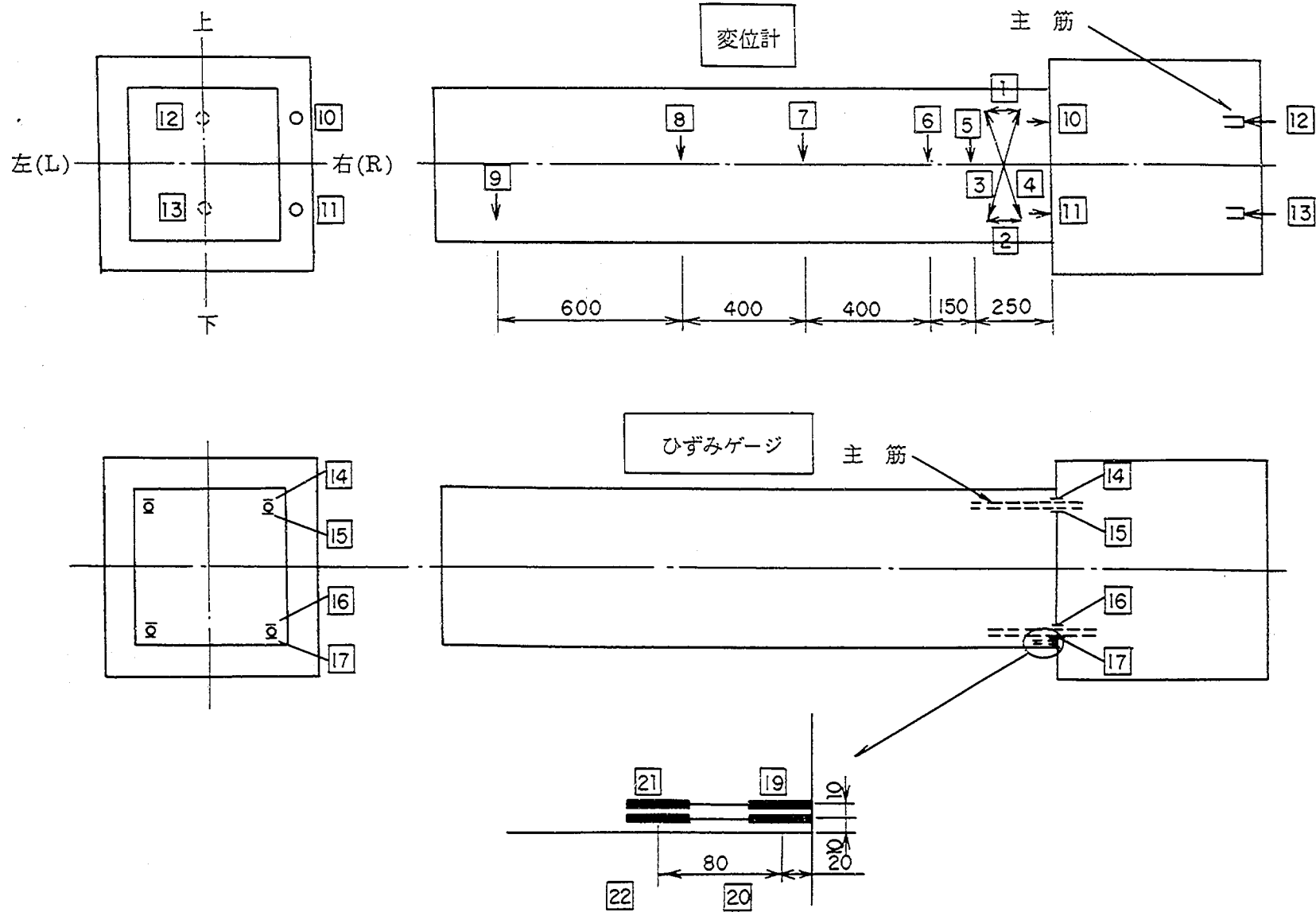
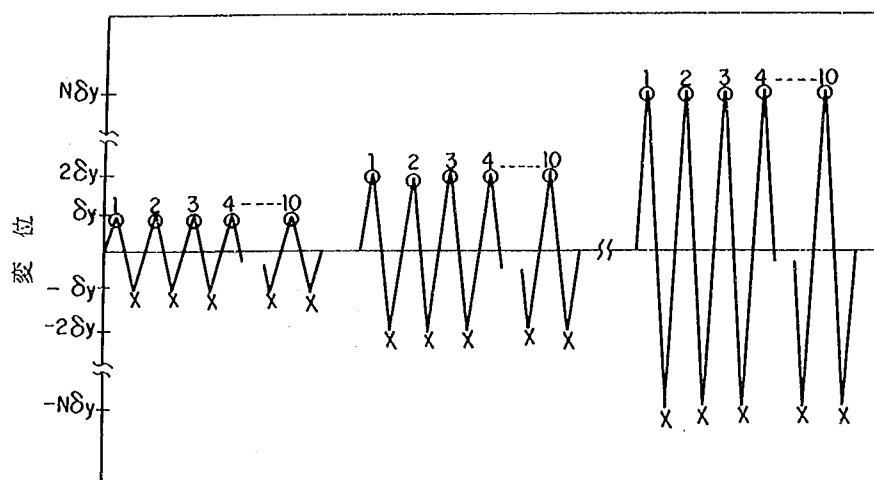
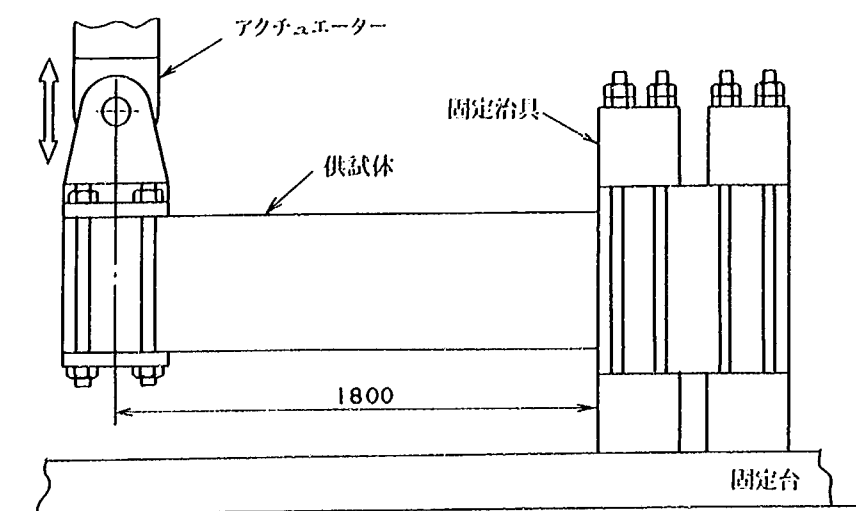


図-3.1 (c) 計測手法



図－ 3. 2 載荷方法

供試体のコンクリートはいずれも呼び強度210 kgf/cm^2 ，最大骨材寸法20mm，スランプ8 cmのレデーマイクストコンクリートである。使用した鉄筋はいずれもSD30A（現行JISではSD295A）である。コンクリートの養生はコンクリート打設後3日間湿布で行った。使用したコンクリートの圧縮強度試験結果を表－ 3. 3 に示す。

表－ 3. 3 使用したコンクリートの圧縮強度試験結果

供試体番号	圧縮強度試験結果 (kgf/cm^2)
1	2 5 2
2	2 3 4
3	3 2 6
4	3 1 8
5	3 2 4

3.3.2 載荷試験結果

1) 供試体の破壊状況

供試体 1 から 3 までは、いずれも柱部分のひび割れが載荷にともなって拡大し、柱部分で、破壊が生じた。供試体 1 および 2 は供試体 3 に比べて、断面に作用する平均せん断応力が大きかったため、柱は、曲げひび割れを生じた後、せん断ひび割れに移行し、柱基部のコンクリートに大きなせん断ひび割れを生じ破壊にいたった。鉄筋の破断は生じなかった。柱の靱性率はともに約 4 であった。(図—3.4)

一方供試体 3 は、せん断ひび割れは生じることなく、鉄筋の破断にいたるまで、かなり大きな変形能力を示した。塑性率は 6 程度を越え 7 になったところで主鉄筋の破断により強度を急激に失った。

供試体 4 および 5 についてはともにせん断ひび割れが柱、フーチング両方に生じた、フーチングに生じたひび割れは供試体 4, 5 とともに同じ位置に生じた。ひび割れの開始点はフーチング上面下面とも、片側は H 形鋼の内側、他方は供試体の端部となっており、X 状にびび割れが生じた。載荷を繰り返して行くうちに、この X 状のひび割れは次第に幅が増加して行き、以後柱部分に生じたひび割れは余り進展しなくなった。

ここで、コンクリートの引張強度を f_t (kgf/cm²) と仮定して、フーチングに発生するひび割れの有無を概算により検討する。(図—3.3) 供試体固定のための H 形鋼 (H 形鋼の底面の幅は 30cm) の配置間隔を x cm, フーチングの幅を b cm とすると、フーチングのひび割れ発生荷重 P' すなわち、

$$P' = f_t \cdot b \cdot x$$

がフーチング固定治具に作用する反力 P'' よりも大きい場合フーチングにはひび割れが生じないと考えられる。ここで、柱載荷位置での載荷荷重を P とすると、

$$P'' = P \cdot H' / x$$

となる。よって、フーチングひび割れ発生時の載荷荷重 P_{cr} は

$$P_{cr} = f_t \cdot b \cdot x^2 / H'$$

である。今回、実験に使用したコンクリートの圧縮強度は 250~320 kgf/cm² 程度であったので、コンクリートの引張強度は 25 kgf/cm² 程度であると考えられる。供試体 1, 2 および、供試体 3, 4, 5 でフーチングにひび割れが生じる限界の曲げ載荷荷重を試算すると、以下の表のようになる。

供試体種類	フーチングひび割れ発生荷重 P_{cr}
供試体 1, 2	166 tonf
供試体 3, 4, 5	15.6 tonf

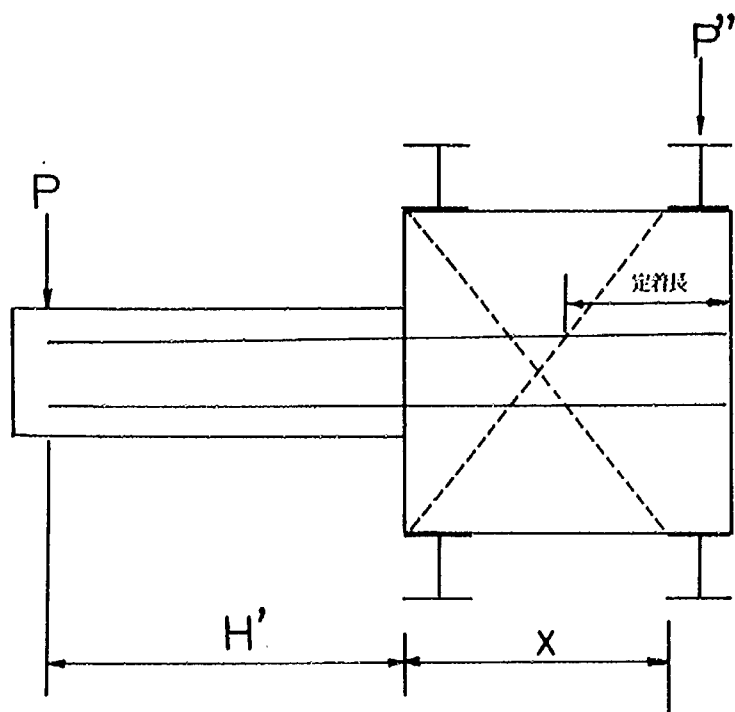


図-3.3 供試体4, 5の定着長のとり方

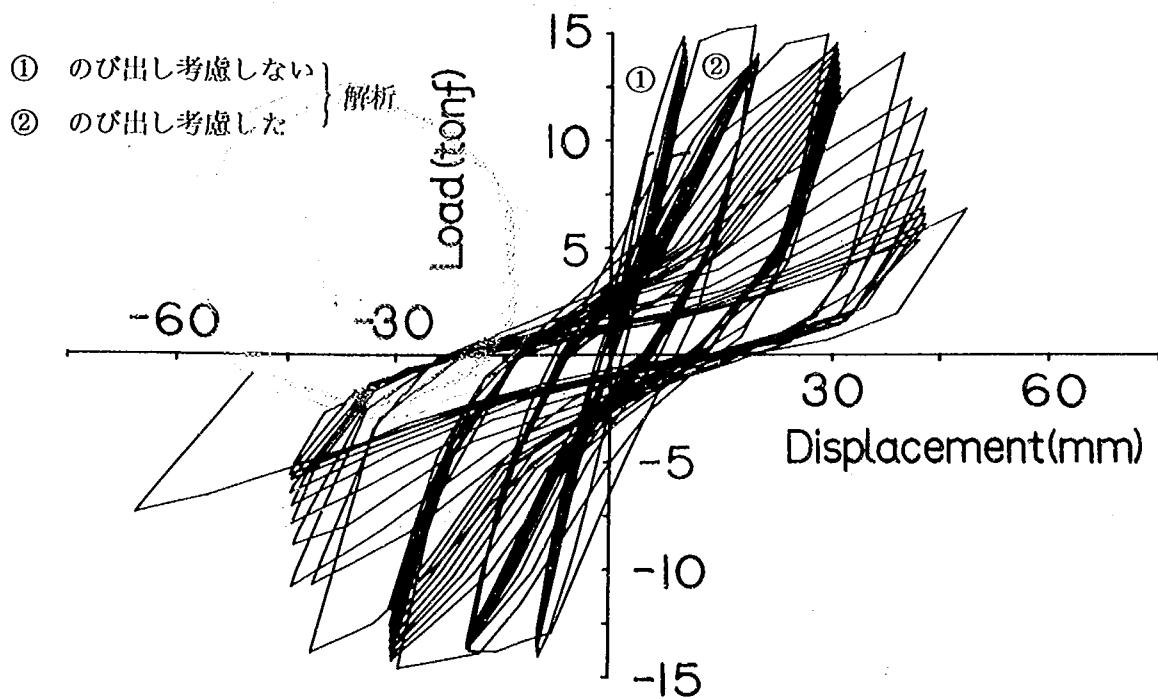


図-3.4 荷重-変形履歴曲線 (No.1)

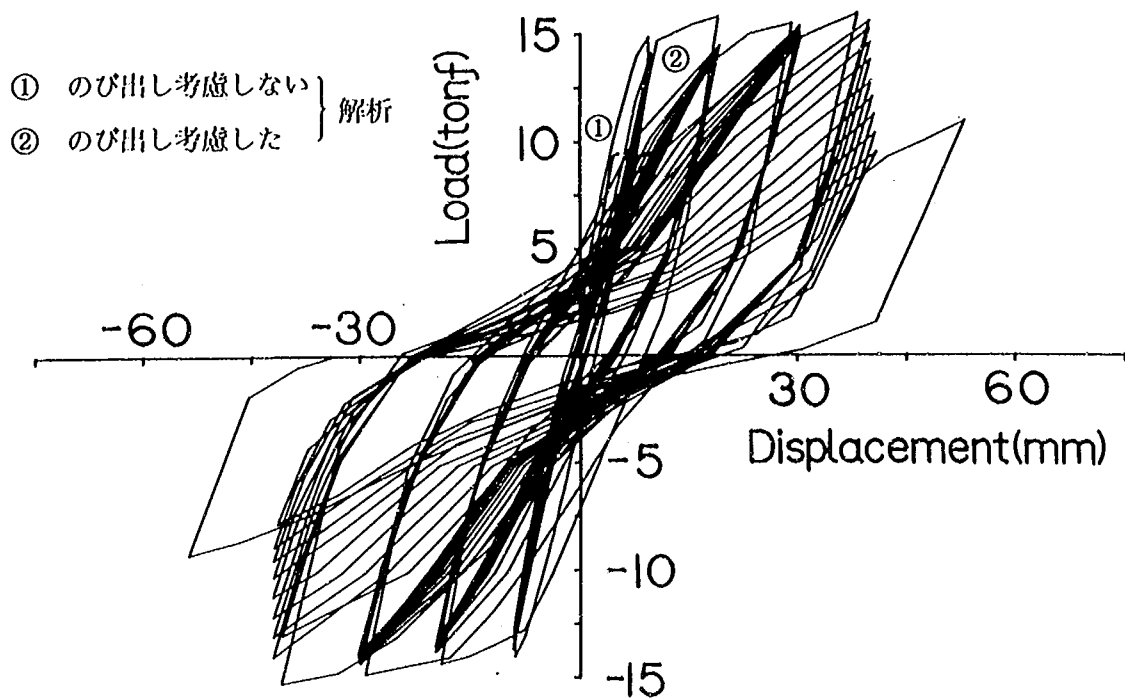


図- 3. 4 荷重-変形履歴曲線 (No. 2)

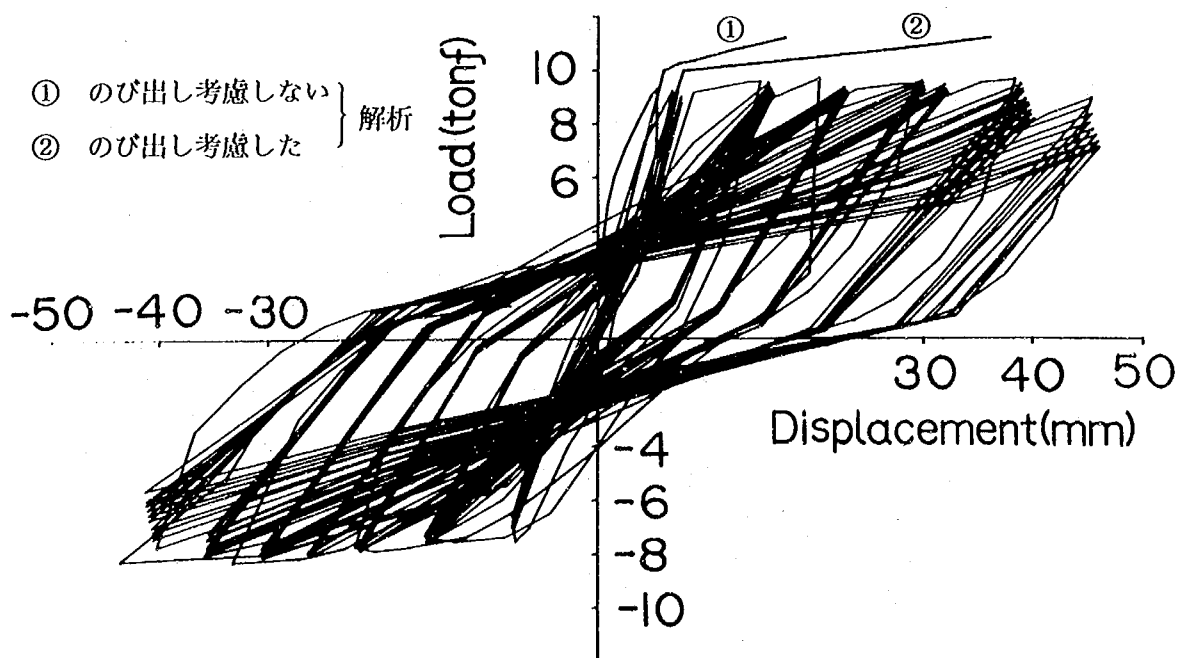


図- 3. 4 荷重-変形履歴曲線 (No. 3)

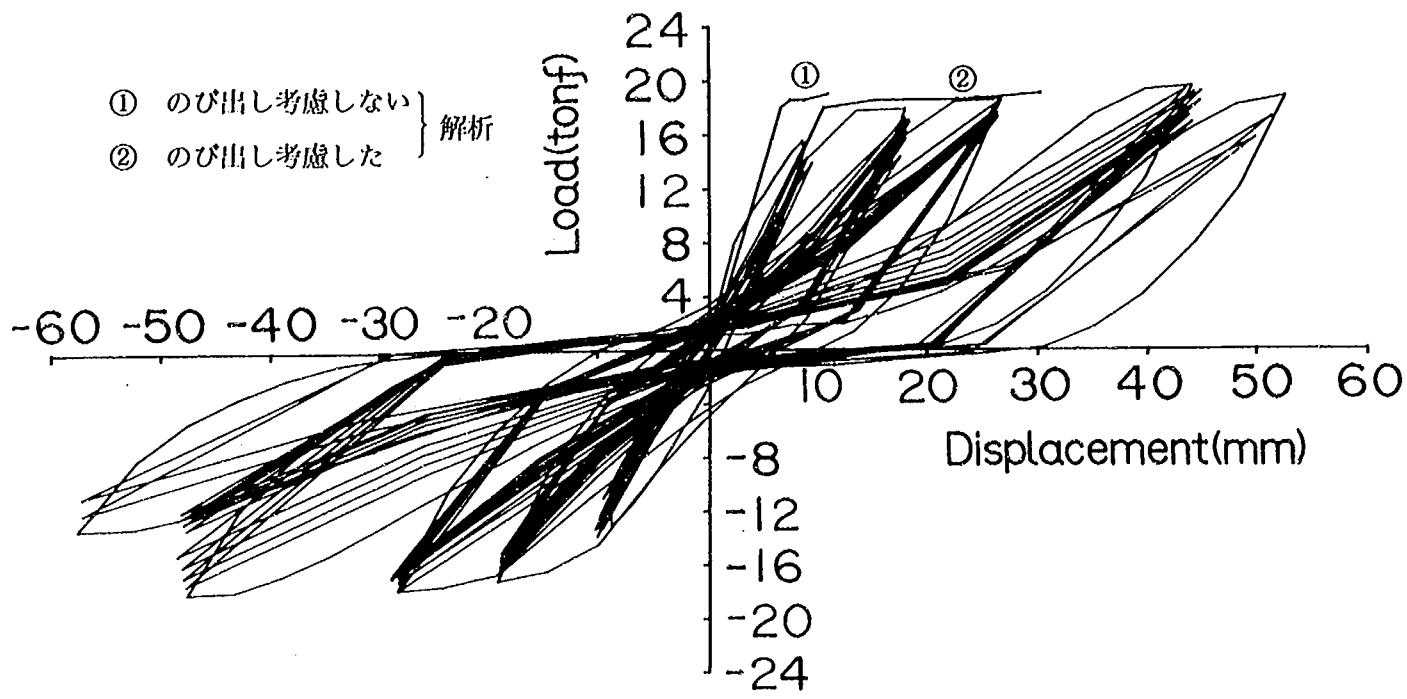


図-3.4 荷重-変形履歴曲線 (No.4)

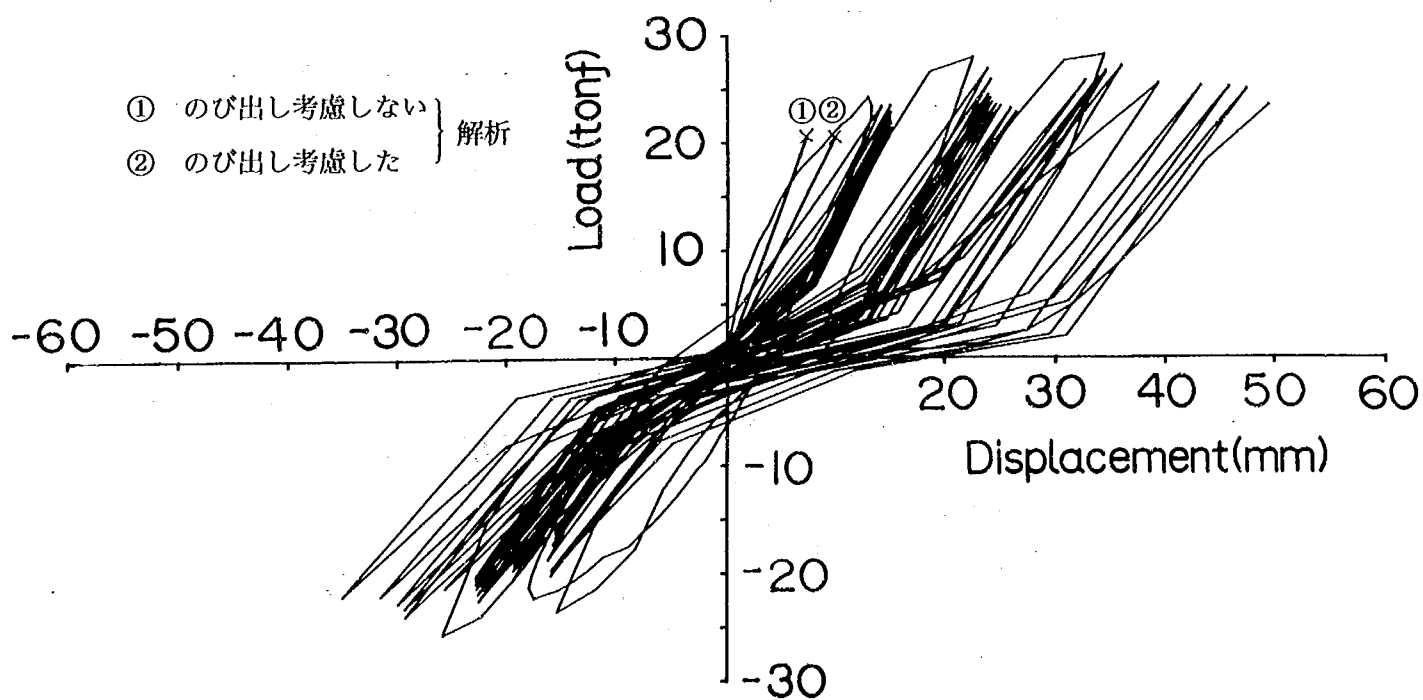


図-3.4 荷重-変形履歴曲線 (No.5)

この概算結果からもわかるとおり両者の供試体の間では、フーチングに作用するせん断力に対する耐荷力が大きく異なっている。各供試体の、柱主鉄筋の降伏時における荷重を表一 3.4 に示す。今回の実験において、供試体 4, 5 は上に示したフーチングひび割れ荷重を上回る荷重の載荷が行われたため、フーチングのひび割れが生じたものと考えられる。

表一 3.4 柱部材の変形及び荷重の実験値と解析値の比較

表中、上段の数字は実験値、中段の数字は定着鉄筋の伸び出しを考慮した解析値
下段の数字は定着鉄筋の伸び出しを無視した解析値を表す。

供試体番号	降伏変位 (mm)	降伏荷重 (tonf)	終局変位 (mm)	終局荷重 (tonf)	靱 性 率
1	9.5	14.8	41.5	13.8	4.4
	7.8	9.1	11.3	9.4	1.4
	4.5	〃	5.8	〃	1.3
2	9.6	14.9	38.4	16.0	4.0
	7.8	9.1	11.3	9.4	1.4
	7.8	〃	5.4	〃	1.3
3	7.9	9.3	46.1	7.2	5.8
	8.0	9.8	45.1	11.4	5.6
	6.1	〃	23.4	〃	3.8
4	8.8	14.7	51.5	17.3	5.9
	10.6	18.0	38.6	19.8	3.6
	6.6	〃	15.1	〃	2.3
5	17.8	23.5	31.6	26.2	1.8
	—	—	12.5	25.7	<1
	—	—	9.2	〃	<1

2) 柱フーチング部材の荷重—変形履歴曲線

図一 3.4 に各供試体の荷重変形履歴曲線を示す。なお、3.4.2 でもふれるが、図一 3.4 には定着鉄筋の伸び出しによる回転変位を含めた、柱の変位の解析結果も示している。供試体 1, 2, 3 はいずれも降伏後、エネルギー吸収量の大きいヒステリシスループが形成されていた。これに対し、供試体 4 はエネルギー吸収量の少ないスリップ形に近くなっていた。いっぽう、供試体 5 はエネルギー吸収量はさらに小さい完全なスリップ形を形成している。この理由として、以下のことが考えられる。

もし柱主鉄筋に大きな塑性ひずみが生じていると仮定すれば、交番載荷にともない各載荷サイクルで、柱基部の主鉄筋はヒステリシスループを描くはずである。交番載荷で、変位が最大値に達した後、載荷方向を反転すると、主鉄筋はこのヒステリシスループに従い、鉄筋に作用する引張応力は急激に減少する。ところが、鉄筋の引張ひずみは回復せず、この結果柱の曲率も、ゼロにはならず、柱の残留変形が残ることになる。この結果、柱の荷重変位曲線は紡錘型のエネルギー吸収量の大きいヒステリシスループが描か

れる結果となる。

一方、定着鉄筋の定着長が不十分で、定着鉄筋の引張ひずみが十分発達しない場合では、鉄筋の残留引張ひずみが小さくなり、この結果除荷時に荷重がゼロになった時点で、鉄筋のひずみはほぼゼロになり、柱基部の曲率もほぼゼロになり、柱の曲げ変位もゼロに近くなる。ただし、2章でも示した通り定着鉄筋の伸び出しは、定着鉄筋の自由端が抜け出すような場合では、その残留すべりによる柱の回転変位がであるため、載荷荷重がゼロになっても、この残留すべりによる柱の回転変位は残り、その結果計測される柱の変位はゼロとはならない。さらに柱の載荷を負の方向へ進めると、圧縮側から引張側に転じた定着鉄筋のすべりが急激に増加し、この結果柱の変位も急激に増加することになる。この結果、柱の荷重変形曲線はスリップ型のエネルギー吸収量の少ないヒステリシスループが描かれることになる。

以上の検討結果を総合すると、柱定着鉄筋の定着長が短く定着鉄筋の自由端の抜け出し量が大きくなるものほど、交番載荷を受けたときに描かれるヒステリシスループはエネルギー吸収量の少ない変形特性になるという結論が得られるものと考えられる。

3.4 定着鉄筋の伸び出しを考慮した柱の変位置に関する定量的検討

ここでは、定着鉄筋の伸び出し量について、第2章で検討した方法を応用して、柱・フーチング部材の変位解析を行った。

3.4.1 計算手法の概要

定着鉄筋の伸び出し量の計算手法は第2章で行ったものとまったく同様の方法を用いた。ただし、鉄筋降伏後の伸び出し量については定着鉄筋載荷端近傍のコンクリートに生じるコーン状の破壊により、この部分がまったく付着強度を持たないものと仮定して（すなわち、この区間では定着鉄筋のひずみが一定）計算を行った。

ここで、コンクリートに生じるコーン状のひびわれの深さは2章で検討したものと同様に、次式によった。

$$l_c = \frac{d \cdot \tau_{bo}}{2 \cdot \tan^2 \theta \cdot fl}$$

ここで、 d : 定着鉄筋の直径 (cm)

τ_{bo} : 鉄筋とコンクリートとの付着強度 (kgf/cm²)

fl : コンクリートの引張強度 (kgf/cm²)

なお、コンクリートと鉄筋の付着強度は式—2.1によることとした。

ここで、 fl はコンクリート圧縮強度の1/10と仮定した。

定着鉄筋の伸び出し量を算定するに当たって、定着鉄筋の最下部すなわち自由端部の、コンクリートとの相対すべり量が S_1 を越えた時点で、定着が破壊したとして、計算を打ち切ることとした。第2章でも示した通り、定着鉄筋の τ — S 関係は、 $S > S_1$ となると、 S の増加に従って付着力が小さくなる。定着

鉄筋最下部ですべり量が S_1 を越えると、定着鉄筋全体が引き抜かれるに従って定着耐力を減少させて行く（すなわち、定着破壊が生じる）ようになるためである。

一方、柱の曲げ変位量は次のような方法で計算を行った。

コンクリートの応力ひずみ関係を図—3.5の様に仮定し、終局圧縮ひずみを0.35%と仮定した。コンクリートの引張強度は無視することとした。このような仮定のもとで、柱部材断面の曲げモーメント—曲率関係を計算し、モールの定理を応用して、曲げたわみ量を計算した。ここで、柱部材の最下断面の圧縮縁におけるコンクリートひずみが0.15%、0.2%、0.25%、0.3%、0.35%、および引張鉄筋のひずみが0.2%となる時点でのたわみ量を計算した。

つぎに、定着鉄筋の抜け出しによる柱の回転変位と、柱曲げ変位のリンキングにおいて計算上の注意点について述べる。

柱最下部の断面の引張鉄筋のひずみ量は、曲げ計算の際に求められているので、このひずみ量に対する伸び出し量を求める。ただし、曲げ計算によって決定される鉄筋の引張ひずみの量

(ϵ_s) は、鉄筋のひずみ硬化開始時の引張ひずみを ϵ_h としたとき、 $\epsilon_y < \epsilon_s < \epsilon_h$ となる場合があるが、このような場合、定着鉄筋の降伏後の抜け出し量計算の仮定より、 ϵ_s に対する

抜け出し量を求めることができない。これは、定着鉄筋において弾性部分から塑性部分に移り変わる位置での鉄筋のひずみ量を ϵ_y から ϵ_h まで不連続的に増加すると仮定したためである。よって定着鉄筋の載荷端での引張ひずみが $\epsilon_y < \epsilon_s < \epsilon_h$ の条件に当てはまるような場合には、 $\epsilon_s = \epsilon_h$ における伸び出し量と $\epsilon_s = \epsilon_y$ での伸び出し量からの直線補完によって求めることとした。

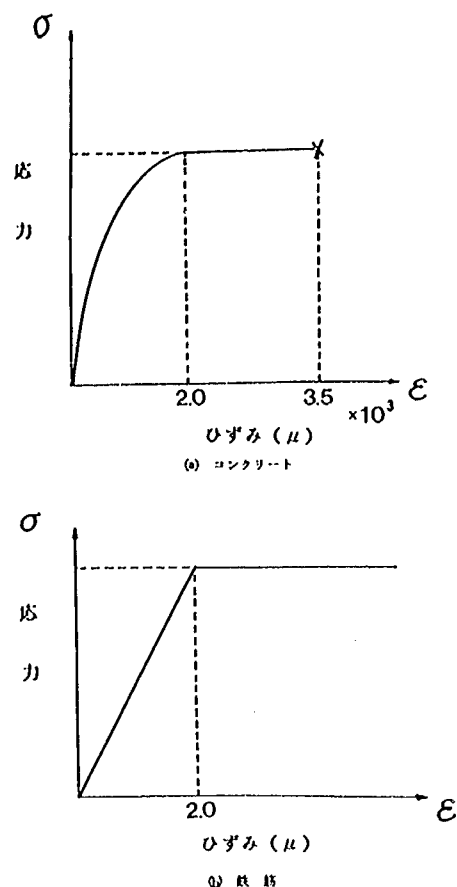
また、フーチングにひび割れの生じた供試体4および5については、定着鉄筋の定着長として、ひび割れ発生位置から自由端までの距離を定着長として採用した。

3.4.2 解析結果および検討

以上の仮定のもとで、柱の荷重変位関係について計算を行い、実験値との比較を行った。この結果を表—3.4および図—3.4に示す。

降伏荷重については供試体4については実験値が解析値を少し下回っていた。終局荷重についてはほぼ実験値が解析値と一致していた。降伏変位については解析値と実験値の対応は比較的良好とれていた。ただし供試体1, 2, 5については降伏変位が実験値の方でやや大きく出ていた。

靱性率の算定結果は、いずれも定着鉄筋の抜け出しを考慮した算定法による方が精度よく算定されていた。このため、靱性率をより精度よく算定するためには、定着鉄筋の抜け出しによる回転変位を含めた方



図—3.5 コンクリート及び鉄筋の応力ひずみ曲線

がよいことがわかる。

次に今回の調査で用いた柱の変形計算手法、特に定着鉄筋の伸び出しによる柱の回転変位の考慮法の妥当性・問題点を明らかにするため、さらに詳細な検討を行った。

定着鉄筋の載荷側の鉄筋の引張ひずみと、定着鉄筋の伸び出し量の関係について表したのが、図—3.6である。実験結果と解析結果の比較は、定着鉄筋の引張ひずみが塑性域まで計測できた供試体1, 3, 5のみについて示してある。図中実線で表された曲線が解析結果で、点で表されているのが実験結果である。実験結果については、各サイクルの正方向の（すなわち図—3.2の○の時点での）ピーク時における定着鉄筋の伸び出し量のみをプロットしている。

この結果から定着鉄筋の弾性範囲内では、良く一致しているが、大きな塑性ひずみが生じているところでは、やや誤差が大きく、全般的に同一引張ひずみに対して伸び出し量が小さめになっている。

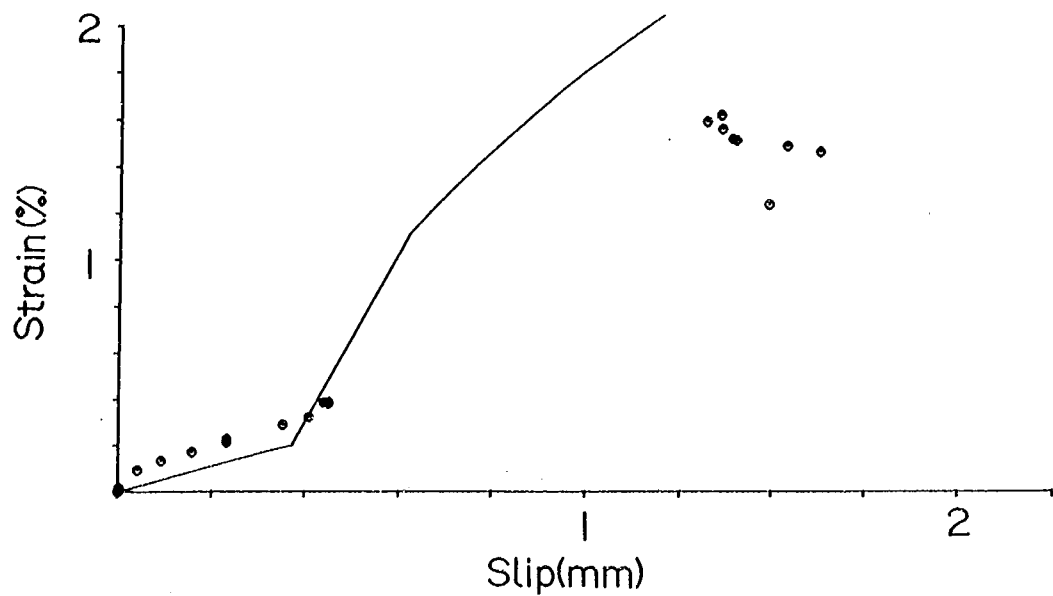
供試体5では、解析結果では鉄筋が降伏する以前に定着破壊を生じていたが、実験においては鉄筋の降伏点を越える引張ひずみが生じていた。ただし、供試体5では鉄筋降伏後のひずみの進展量は少なく、鉄筋の塑性ひずみはほとんど増加せず、伸び出し量のみが増加していた。このことは、定着鉄筋の定着破壊が生じているためたであると考えられ、解析結果でも示されているとおり、定着長の余裕が少なかったことが分かる。

次に、柱の全変位にしめる、定着鉄筋の伸び出しによる回転変位の割合に着目して解析法の妥当性の検討を行い、さらに実際の部材の回転変位の及ぼす影響に関する定量的な把握を行った。すなわち、柱の曲げによる変位を δ_1 、定着鉄筋の伸び出しによる柱の回転変位を δ_2 としたとき、柱の全変位 δ は、

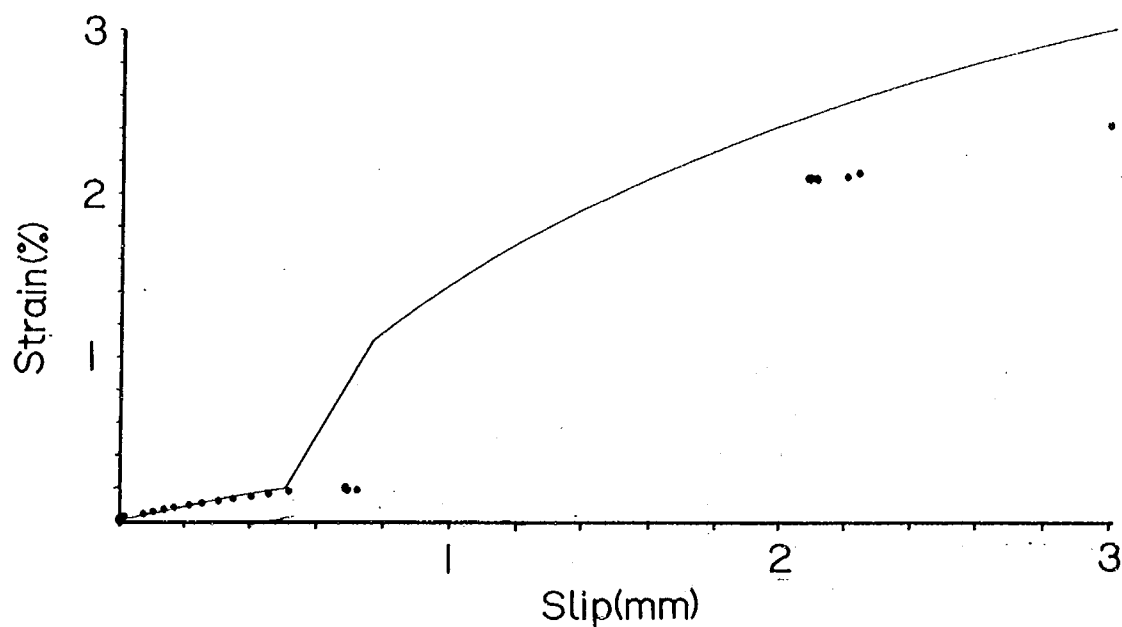
$$\delta = \delta_1 + \delta_2$$

であり、ここでは (δ_2/δ) の比較対照を行った。

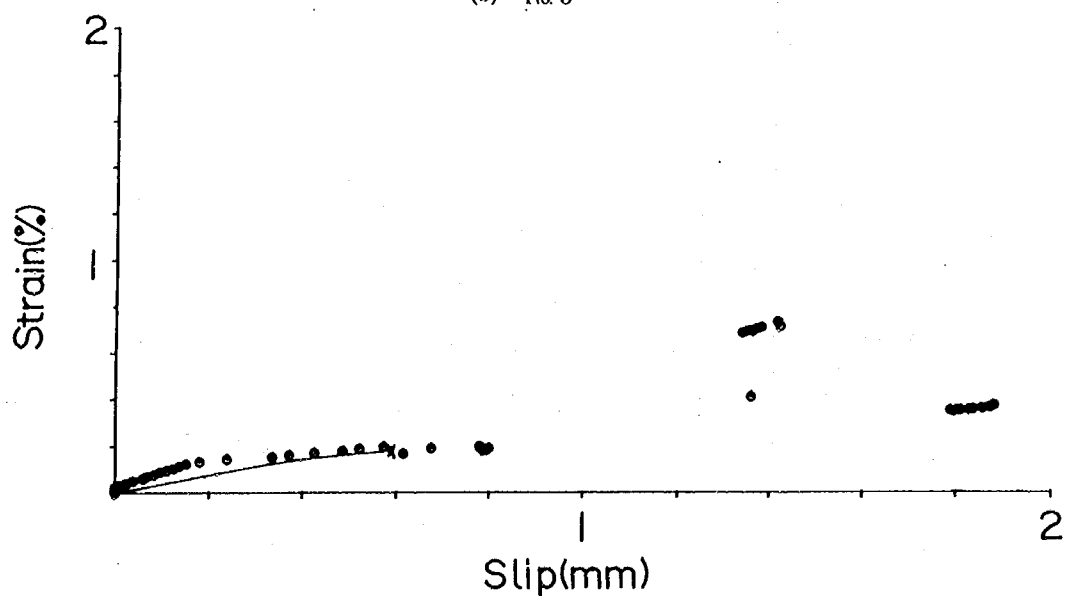
表—3.5には解析結果を示す。ここで、実験値から、定着鉄筋の伸び出しによる回転変位量については以下の方法によった。すなわち、各供試体柱最下部に設置した変位計により柱のフーチングからの浮き上がり量を計測し、これから柱の回転角を算出し、これに柱高さをかけたものを柱の回転変位とした。計測方法を図—3.7に示す。ここでは部材の各塑性率 (δ/δ_y) での (δ_2/δ) の比較を行った。この結果を図—3.8に示す。なお、実験値については各載荷サイクルでの正負のピーク時のみを取り出した。図中解析結果は実線で、実験結果は点（○もしくは×）で表している。ここで、図—3.7中○で表した点は、載荷履歴を示した図—3.2中、○で示した点での δ_2/δ を示している。一方、×で示した点は載荷履歴を示した図—3.2中、×で示した点での δ_2/δ を示している。



(a) No. 1



(b) No. 3



(c) No. 5

図-3.6 各供試体の定着鉄筋の引張ひずみと伸び出しの関係

実線：計算値
点：実験値

表-3.5 柱の荷重変形計算結果

曲げモーメント (kg*cm)	$\delta 1$ (cm)	δ (cm)	荷重 (ton)	$\delta 2$ (cm)	鉄筋歪み	コンクリート歪み	伸びだし (cm)	塑性率 ($\delta / \delta y$)	回転率 (%)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
954000	0.45	0.78	9.09	0.33	2.000E-03	1.070E-03	0.05	1.00	42.14
971000	0.47	0.79	9.25	0.33	3.930E-03	1.500E-03	0.05	1.02	41.14
982000	0.50	0.89	9.35	0.39	6.260E-03	2.000E-03	0.06	1.14	43.86
988000	0.53	0.96	9.41	0.43	8.510E-03	2.500E-03	0.07	1.23	44.89
990000	0.55	1.03	9.43	0.48	1.070E-02	3.000E-03	0.07	1.32	46.31
990000	0.58	1.13	9.43	0.56	1.290E-02	3.500E-03	0.09	1.45	49.13

(a) No.1

曲げモーメント (kg*cm)	$\delta 1$ (cm)	δ (cm)	荷重 (ton)	$\delta 2$ (cm)	鉄筋歪み	コンクリート歪み	伸びだし (cm)	塑性率 ($\delta / \delta y$)	回転率 (%)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
954000	0.45	0.78	9.09	0.33	2.000E-03	1.070E-03	0.05	1.00	42.35
971000	0.47	0.81	9.25	0.35	3.930E-03	1.500E-03	0.05	1.04	42.58
982000	0.50	0.88	9.35	0.38	6.260E-03	2.000E-03	0.06	1.13	43.57
988000	0.53	0.96	9.41	0.43	8.510E-03	2.500E-03	0.07	1.22	44.81
990000	0.55	1.03	9.43	0.47	1.070E-02	3.000E-03	0.07	1.31	46.20
990000	0.58	1.14	9.43	0.56	1.290E-02	3.500E-03	0.09	1.46	49.54

(b) No.2

曲げモーメント (kg*cm)	$\delta 1$ (cm)	δ (cm)	荷重 (ton)	$\delta 2$ (cm)	鉄筋歪み	コンクリート歪み	伸びだし (cm)	塑性率 ($\delta / \delta y$)	回転率 (%)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1760000	0.61	0.80	9.78	0.18	2.000E-03	5.540E-04	0.04	1.00	22.91
1810000	0.76	1.50	10.06	0.74	1.210E-02	1.500E-03	0.17	1.89	49.45
1830000	0.90	1.76	10.17	0.86	1.760E-02	2.000E-03	0.19	2.21	49.04
1900000	1.26	2.74	10.56	1.48	2.250E-02	2.500E-03	0.33	3.45	54.09
1980000	1.74	3.60	11.00	1.86	2.700E-02	3.000E-03	0.42	4.53	51.67
2060000	2.34	4.51	11.44	2.17	3.120E-02	3.500E-03	0.49	5.67	48.14

(c) No.3

表-3.5 柱の荷重変形計算結果

曲げモーメント (cm*kg)	$\delta 1$ (cm)	δ (cm)	荷重 (ton)	$\delta 2$ (cm)	鉄筋ひずみ	コンクリート歪	伸び出し (cm)	塑性率 ($\delta / \delta y$)	回転変形率 (%)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3240000	0.66	1.06	18.00	0.40	2.000E-03	7.620E-04	0.07	1.00	37.40
3340000	0.75	1.53	18.56	0.79	7.820E-03	1.500E-03	0.16	1.98	51.20
3350000	0.81	1.93	18.61	1.12	1.230E-02	2.000E-03	0.24	2.82	57.91
3350000	0.87	2.39	18.61	1.52	1.670E-02	2.500E-03	0.33	3.83	63.50
3430000	1.10	3.03	19.06	1.93	2.080E-02	3.000E-03	0.42	4.88	63.75
3560000	1.51	3.86	19.78	2.35	2.450E-02	3.500E-03	0.51	5.94	60.90

(d) No.4

曲げモーメント (kg*cm)	$\delta 1$ (cm)	δ (cm)	荷重 (ton)	$\delta 2$ (cm)	鉄筋ひずみ	コンクリート歪	伸びだし (cm)	*塑性率 ($\delta / \delta y$)	回転変位率
0	0	0	0	0	0	0	0		
924000	0.18	0.25	5.13	0.07	3.333E-04	1.663E-04	0.11	0.17	26.43
1848000	0.37	0.50	10.27	0.13	6.667E-04	3.327E-04	0.22	0.33	26.43
2772000	0.55	0.75	15.40	0.20	1.000E-03	4.990E-04	0.33	0.50	26.43
3696000	0.73	1.00	20.53	0.26	1.333E-03	6.653E-04	0.44	0.67	26.43
4620000	0.92	1.25	25.67	0.33	1.667E-03	8.317E-04	0.55	0.83	26.43
5544000	1.10	—	30.80	—	2.000E-03	9.980E-04	定着破壊	1.00	—

(e) No.5

全変位に及ぼす回転変位の割合を、柱の塑性率ごとに求めたのは以下の理由による。柱の回転変位については、定着鉄筋の伸び出し量によって決まることから、定着鉄筋の載荷側の引張ひずみの主たる関数として表されるものである。よって、実験値と解析値の比較についても、定着鉄筋の引張ひずみの関数として行われるべきである。ところが、定着鉄筋の塑性ひずみの計測は困難であり、特に今回の実験では、定着鉄筋の引張ひずみの計測は定着鉄筋の表面にひずみゲージを直接はりつけたため、リード線の断線などによりほとんど計測できなかった。このため、定着鉄筋に生じているひずみの大きさを間接的に表現するものとして、柱の塑性率を選んだ。これは、柱の塑性率が大きいほど、定着鉄筋の定着破壊が生じる場合を除いて、定着鉄筋の引張ひずみも大きくなっていると考えられるからである。

各供試体の個々の場合について検討を行う。

供試体 1, 2 では、解析上、コンクリートの圧縮ひずみが 0.35% に達し終局状態となるのが、柱の塑性率が、1.5 程度のときであったため、ここまでの計算値しか得られなかった。この範囲内では、計算値と実測値は比較的良好な対応を示した。それ以上の塑性率では、定着鉄筋の伸び出しによる回転変位のしめる割合は増加傾向にある。

供試体 3 では、解析値は実験値よりかなり大きくなっている。

供試体 4 については解析値と実験値の上限が、よい対応を示している。

供試体 5 については、解析結果では定着鉄筋降伏以前に定着破壊が生じたため、塑性域での比較は行えなかったが、弾性域では実験値をやや下回る結果となった。

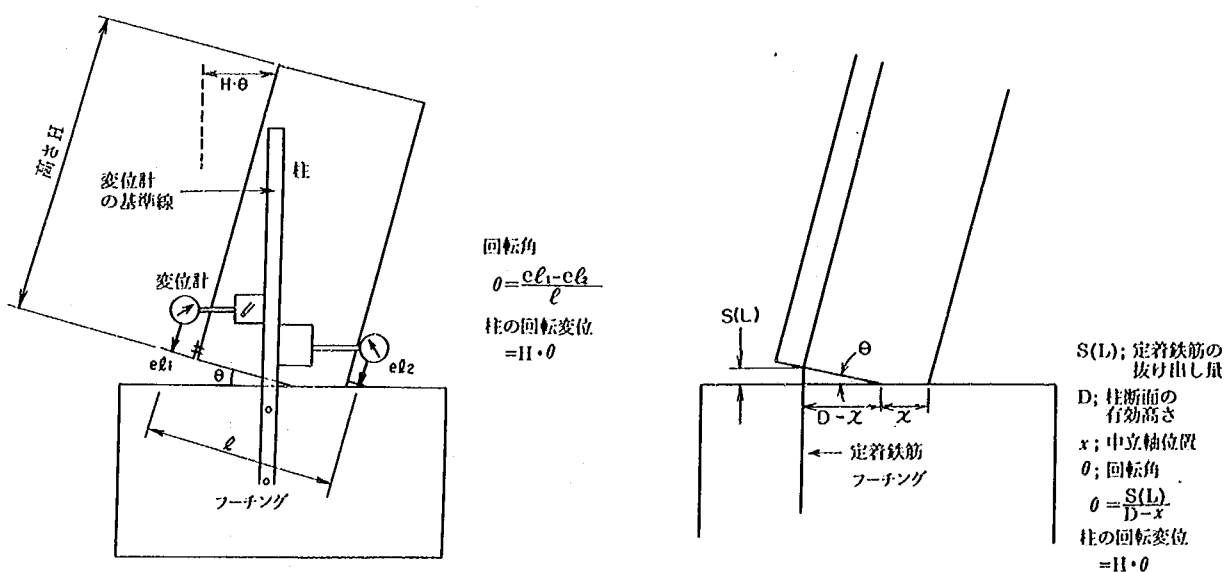
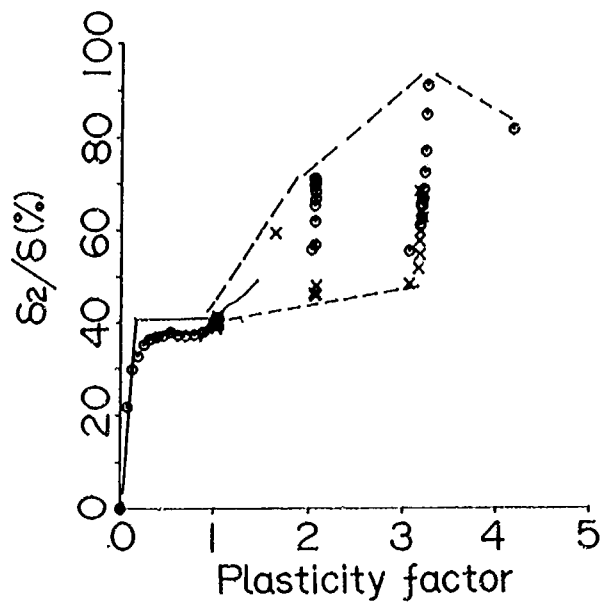
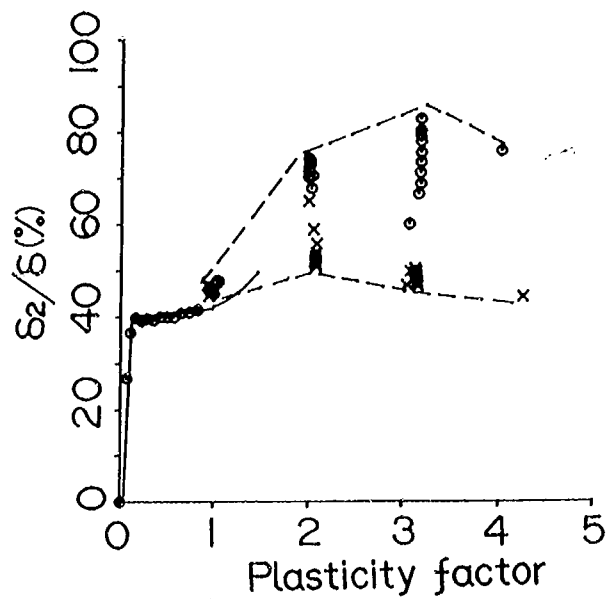


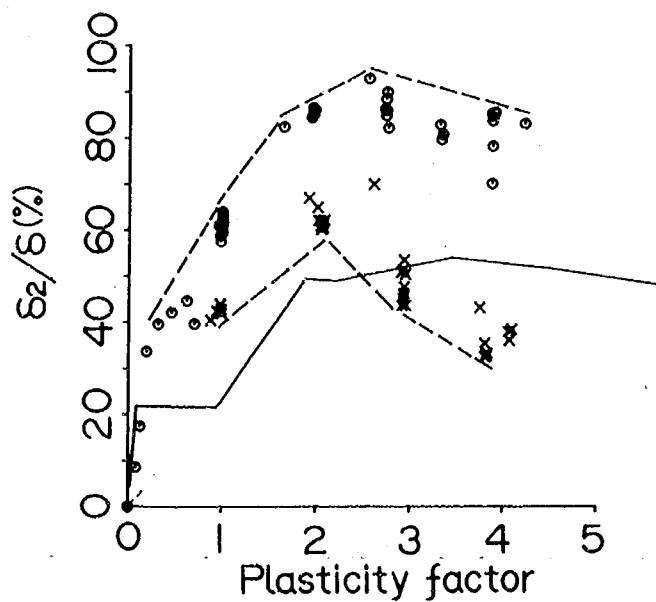
図-3.7 計測による柱の回転変位の求め方



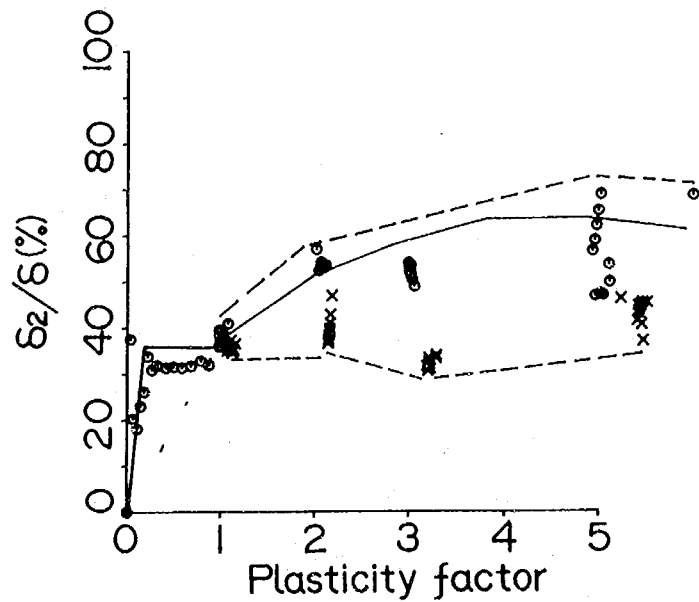
(a) No. 1



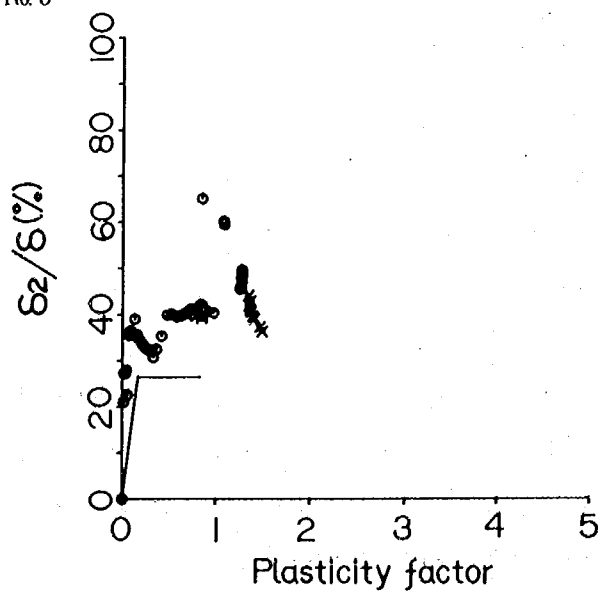
(b) No. 2



(c) No. 3



(d) No. 4



(e) No. 5

図-3.8 各塑性率における回転変位の占めるわりあい

実線：解析値
点：実験値

次に全般的な傾向について検討を行う。

実験値については、柱の塑性率が大きくなるにつれて、全般的に δ_2/δ の値は幅が大きくなる傾向を示していた。 δ_2/δ の上限値はいずれも初期載荷と同じ方向の載荷で得られ、下限値はいずれも初期載荷と反対方向の載荷で得られていた。 δ_2/δ の上限はおおむね塑性率の増加にともなって大きくなる傾向を示したが、下限値は、塑性率の変化によって余り影響を受けず、ほぼ一定であった。また、解析結果はほぼ実験値の上限と下限の間に位置していた。

この結果をもとに、現在の橋脚の塑性率の算定手法について検討を行う。今回の実験結果から考えると、定着鉄筋の伸び出しによる回転変位の影響は、塑性率が大きくなったところでは、上限値は大きくなっているが、下限値はほぼ一定に保たれる。そのため、終局変位を算定するさい、本調査で行った手法で定着鉄筋の伸び出しを考慮して計算を行った場合、平均的には適切な変位量が得られるが、実際にはこの計算結果を下回る回転変位の影響度しか生じない場合、およびこの計算結果を上回る回転変位の影響度が生じる場合がある。すなわち、本調査で採用した柱の回転変位の算定手法を用いて、柱の塑性率を算定した場合、実際の部材における変形状況とは異なった変形状況を計算結果として得ていることになる。しかし少なくとも、定着鉄筋降伏時に生ずる回転変位の影響度は確保されていることになる。

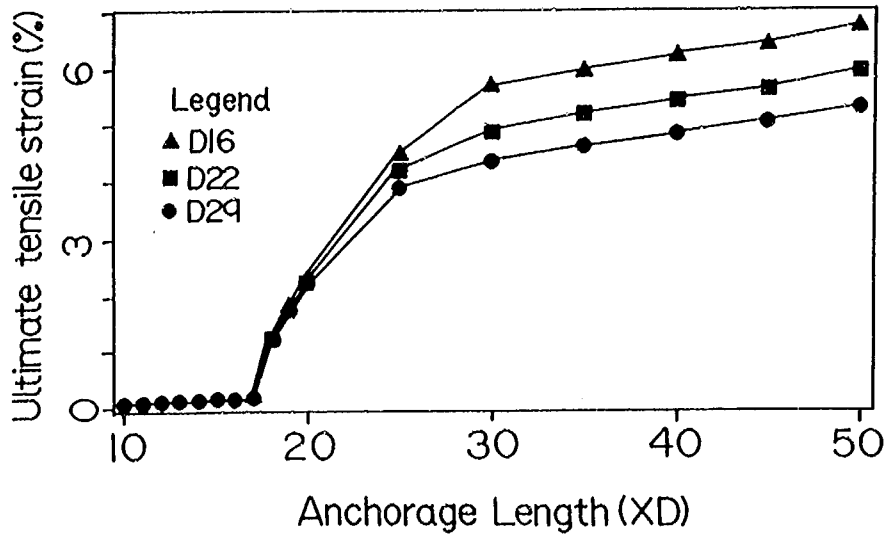
柱の耐震設計においては、終局変位量を過大に評価すると、危険側の算定結果を与えることになるので、定着鉄筋の伸び出しによる回転変位の寄与を小さめに（安全側に）考慮することが望ましい。今回の実験データから判断すると、回転変位の及ぼす影響は、最小値では、降伏時での影響度にほぼ等しくなっている。塑性率は柱の降伏変位に対する終局変位の比で定義されるので、回転変位の影響度を最小として含めた変位量を用いて塑性率を求めても、回転変位を含めずに算定した塑性率の値と変わらない。

以上の検討結果を総合すると、塑性率を算定する際に定着鉄筋の伸び出しによる回転変位の影響の考慮について、本調査で用いた手法で回転変位を算定すれば、より正確な塑性率の値が得られる。一方、定着鉄筋の伸び出しによる柱の回転変位を無視した塑性率の計算を行えば、得られる塑性率の値は安全側の結果を与えるといえる。

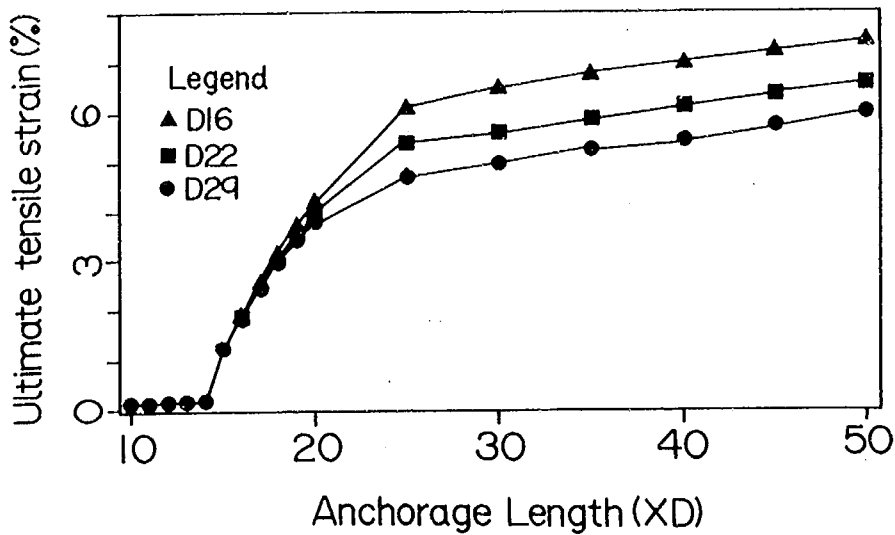
3.4.3 定着鉄筋の必要定着長に関する検討

前項の検討結果より、柱の定着鉄筋の終局状態に関して考えた場合、定着鉄筋にどれだけ大きな引張ひずみを生じさせることができるかが重要になるものと考えられる。ここでは、各々の定着長の鉄筋について、定着破壊生じさせることなくどの程度までの引張ひずみに耐えられるかについて解析的な検討を行った。ここで採用したコンクリート強度は $210\text{kgf}/\text{cm}^2$ 、および $300\text{kgf}/\text{cm}^2$ とした。付着強度は先に示した式 2.1 により計算を行った。

この結果を図—3.9 に示す。定着鉄筋が降伏する以前に定着破壊を生じる場合の定着長は、コンクリート強度が $210\text{kgf}/\text{cm}^2$ のとき $17D$ 以下、コンクリート強度が $300\text{kgf}/\text{cm}^2$ のとき $14D$ 以下であった。この結果より定着長を $20d$ （ d ：鉄筋径）以上取ると、コンクリート強度が $210\text{kgf}/\text{cm}^2$ の場合であっても、鉄筋が降伏に至っても定着鉄筋は定着破壊を生じないことがわかる。



(a) コンクリート強度210kgf/cm²の場合



(b) コンクリート強度300kgf/cm²の場合

図-3.9 各定着長での終局鉄筋引張ひずみ

一方、鉄筋のひずみ硬化により、大きな定着鉄筋の引張ひずみを許容するためにはさらに大きな定着長が必要となることがわかる。ここで、先に述べたとおり、定着鉄筋の必要とされる引張ひずみの大きさは、柱部材が終局状態に達した時の引張ひずみである。引張鉄筋比の小さい柱では、終局時にはかなり大きな引張ひずみが生じると考えられる。よって、柱の主鉄筋の引張鉄筋比により必要定着長を変える必要があると考えられる。ただし、この計算においては、 τ - S 関係において $S_1 > 0.3\text{mm}$ で、 τ が減少すると仮定したが、実際には $S > 0.3\text{mm}$ でもしばらくは $\tau = \tau_{max}$ の部分が存在すること、また、鉄筋のひずみ硬化開始点をやや小さめに仮定したことを考えるとこの計算結果は安全側の値を与えるものと考えられる。

3.5 まとめ及び問題点

以上の結果をまとめると、以下のことが言える。

- ①第2章で検証した定着鉄筋の伸び出し解析法ならびに仮定された付着応力すべり関係を応用することにより、柱の回転変位を算定しうる。
- ②この伸び出し量の影響を加味することにより部材の靱性の算定精度が向上する。
- ③定着鉄筋伸び出しに伴う回転変位の影響度の算定精度は、柱の塑性率が小さいところではほぼ満足しうるものであるが、柱の変形が大きくなり、伸び出し量をやや大きめに計算する場合がある。
- ④コンクリートと鉄筋の付着強度関係を適切に定めることにより定着鉄筋の必要定着長が柱の終局強度を維持する観点から定められる。

一方、問題点としては、

- ①今回の伸び出し量の解析においては、繰返し载荷の影響を無視している。第2章の実験結果からも示された通り、定着鉄筋の自由端まですべりが生じるような状況で繰返し引き抜き载荷を行うと、残留すべり量が蓄積して行き、付着強度を減少させるおそれがあると考えられるが、この効果について今回の研究では調査できなかった。
- ②定着鉄筋端部にフックをもうけた場合について検討できなかった。
- ③コンクリートフーチングにひび割れが生じる場合について、詳細な応力解析が行えなかった。

ことなどがあげられる。特に、③の問題点については、群鉄筋の効果あるいは、定着鉄筋の必要定着長を定めるさいの定着の起点位置を設定することに関連しており今後さらに調査を進めていく必要があると考えられる。

第4章 ま と め

本調査では、コンクリート部材接合部、とりわけ大規模構造物下部構造の柱・フーチング部分の定着鉄筋を調査対象とし、その終局強度について定着鉄筋のみだけではなく、構造物全体の視点からとらえその算定手法、ならびに定着長の算定についての考え方について検討を行った。

調査結果をまとめると、次の通りである。

定着鉄筋の終局時の安全性を照査するためには、定着鉄筋に作用する引張応力度を構造物全体が終局状態になった場合の応力状態を想定して行う必要がある。柱・フーチング接合部の定着鉄筋については、定着鉄筋に降伏ひずみを越えるような、大きな引張力が作用している状態を照査対象としなければならない。このような応力状態に対応する、鉄筋とコンクリート間に作用する付着強度については、これまでの示方書では規定されているものがなく、ここでは、あらたに鉄筋とコンクリートの付着強度試験を行い、その試験結果から実験データに見合う付着強度の検討を行った。

一方、定着鉄筋の終局強度だけでなく、その伸び出し量もコンクリート構造物全体の終局強度ならびに変形量に影響を及ぼすことから、この解析手法についても検討する必要がある。ここでは、定着鉄筋の伸び出し量および、定着鉄筋の終局強度算定のための計算手法として、定着鉄筋とコンクリート界面の相対的なすべり量と界面に作用する付着力の関係（付着界面の構成式）を単純な形でモデル化を行い、このモデルに基づいて計算する手法を提案した。この界面での構成式を規定するパラメータの概略値について、前報告書で妥当と考えられた値について、再度付着強度実験を行い実験データとの妥当性を確認した。

さらに、定着鉄筋の終局強度ならびに伸び出し量の解析手法を応用し、柱・フーチング構造物全体の挙動に及ぼす影響を算定し、柱・フーチング模型の繰り返し載荷試験により検証を行った。この結果、この調査において提案した定着鉄筋の伸び出し量、終局強度算定法により適切に計算できることがわかったが、柱の変形量が非常に大きい場合（塑性率で5以上）では、実験値と解析値の対応がやや悪く安全側の結果を得るためには、伸び出し量を、小さめに修正するのが好ましいことを示した。

なお、本報告書において、定着鉄筋について群鉄筋の挙動を明確にすべく実験を行ったが、その効果は明確な形でとらえられなかったため、定着強度、変位などへの影響について詳細な検討を行うことができなかった。

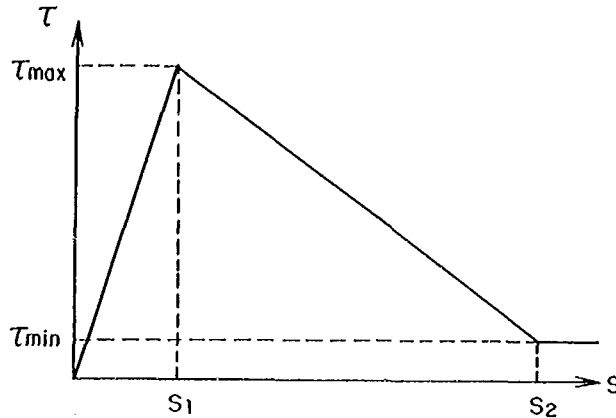
参 考 文 献

- 1) 道路橋示方書・同解説, IIIコンクリート橋編: 日本道路協会, 平成2年2月
- 2) コンクリート標準示方書・設計編: 土木学会, 昭和61年
- 3) 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
- 4) 森田司郎: 「鉄筋とコンクリートとの付着性状」, コンクリート工学, Vol.16, No.10, 1978
- 5) 小林他: 「接合部の定着鉄筋の定着性状に関する調査報告書」, 土木研究所資料第2742号, 平成元年3月
- 6) Orangun, C.O., J.O. Jirsa, and J.E. Breen; "A reevaluation of test data on development length and splices", Jour. of ACI, March, 1977
- 7) 町田篤彦: 「鉄筋コンクリート構造物の耐震設計法に関する研究の現状」, 土木学会論文集, 第366号, V-4, 1986年2月

付録 1. 定着鉄筋の抜け出し量算定法

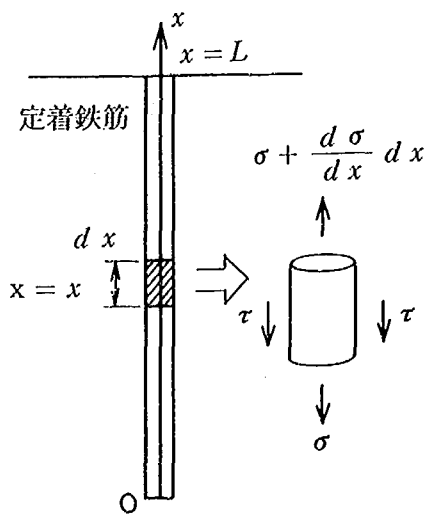
定着鉄筋の抜け出し量の計算方法は、以下の通りである。

定着鉄筋とコンクリートの界面の相対すべり量を S ，作用する付着応力を τ とし，両者の間に下図のような関係が存在すると仮定する。



ここで、 $0 \leq S \leq S_1$ の区間を区間(1)
 $S_1 \leq S \leq S_2$ " (2)
 $S_2 \leq S$ の区間を区間(3) } と呼ぶことになる。

定着鉄筋に生じる引張応力と，界面に生ずる付着応力の間には，力のつり合い式から以下の関係が成り立つ。



$$\frac{\pi d^2}{4} \left(\sigma + \frac{d\sigma}{dx} dx \right) = \pi d \cdot \tau dx + \frac{\pi d^2}{4} \sigma$$

$$\therefore \frac{d}{4} \cdot \frac{d\sigma}{dx} - \tau = 0$$

ここに $\sigma = \sigma(x)$; $X=x$ における鉄筋の引張応力

$\tau = \tau(x)$; $X=x$ における鉄筋に作用する付着応力

①ここで，定着鉄筋が弾性範囲内にあり，かつ，定着鉄筋が全区間内において， $\tau-S$ 関係が，区間(1)内にあるとすると

$\sigma(x) = E \cdot \varepsilon(x)$ ここに E は鉄筋のヤング率

$$\tau(x) = \frac{\tau_{\max}}{S_1} S(x)$$

となる。ここで， $\varepsilon(x) = \frac{d}{dx} \{ S(x) \}$ であるので， $\sigma = E \cdot \frac{dS}{dx}$

$$\frac{E d}{4} \cdot \frac{d^2 S}{dx^2} - \frac{\tau_{\max}}{S_1} S = 0$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{4 \tau_{\max}}{S_1 d E}} \quad \text{とすると} \quad \frac{d^2 S}{dx^2} - \lambda^2 S = 0$$

よって， $S(x) = A \cdot \cosh \lambda x + B \cdot \sinh \lambda x$

となる。なお、上記の係数 A 、 B は境界条件より決定されるが、本研究においては、定着鉄筋端部にフックを設けていないので、 $\varepsilon(0) = 0$ となり、これより $B = 0$ となる。

② 定着鉄筋が、弾性範囲内にあり、かつ、定着鉄筋において、 τ — S 関係が、区間(1)及び区間(2)にある場合について考える。これは、定着鉄筋の定着長が不足している場合に現れるケースである。定着鉄筋において、 τ — S 関係が区間(1)から区間(2)に移り変わる位置を $x = \ell_1$ とする。

領域(2) ($\ell_1 \leq x \leq L$) において、付着応力 τ は、

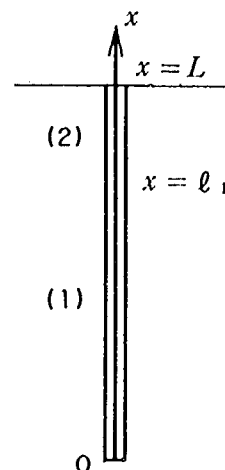
$$\begin{aligned}\tau &= \frac{\tau_{\min} - \tau_{\max}}{S_2 - S_1} \cdot (S - S_1) + \tau_{\max} \\ &= -mS + b \quad (m > 0)\end{aligned}$$

よって

$$\frac{Ed}{4} \frac{d^2 S}{dx^2} + mS - b = 0$$

$$\xi = \sqrt{\frac{4m}{Ed}} \quad \text{とすると}$$

$$S(x) = C \cdot \cos \xi x + D \sin \xi x + \frac{b}{m}$$

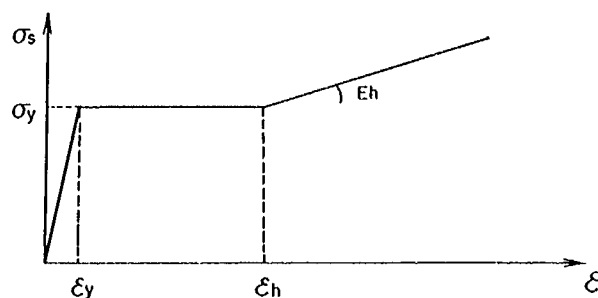


上記の係数 C 、 D は境界条件により決まる。すなわち、載荷端 $x = L$ における境界条件、ならびに、 $x = \ell_1$ において、 $S = S_1$ と 2 つの境界条件が得られる。ただし、 ℓ_1 の値も未知数であるが、 $x = \ell_1$ において、区間(1)及び区間(2)で表現されるひずみが連続することから、さらに条件式が得られ、これより ℓ_1 が定められる。

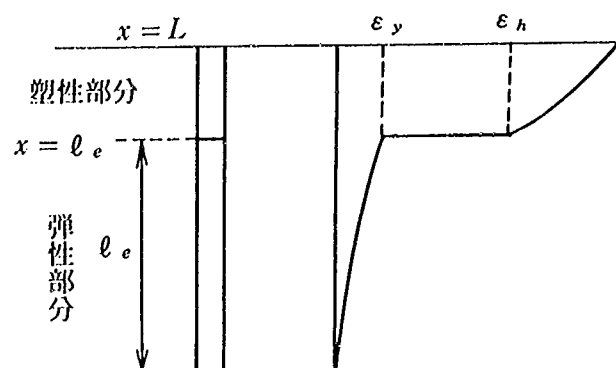
③ 鉄筋が降伏している場合

鉄筋が降伏した場合、鉄筋はひずみ硬化を起こし、徐々に引張強度は大きくなる。 $\varepsilon_s > \varepsilon_h$ において、 $\sigma_s = \sigma_y + E_h (\varepsilon - \varepsilon_y)$ で鉄筋の引張応力が表現されるものとする。これより、 $\varepsilon > \varepsilon_h$ の区間では、

$$\frac{d\sigma}{dx} = E_h \frac{d\varepsilon}{dx}$$



となり、通常のヤング率 E のかわりに、鉄筋降伏後のひずみ硬化の率 E_h を用いれば、鉄筋が弾性体になる場合とまったく同じ扱いで鉄筋のすべり量 S を解くことが出来る。ただし、鉄筋の弾性部分と、塑性部分の境界での条件は以下のように定められる。鉄筋のひずみは下図に示すようにこの境界部でひずみを不連続とする。



すなわち $\epsilon(x) \Big|_{x = \ell_e + 0} = \epsilon_h$

$\epsilon(x) \Big|_{x = \ell_e - 0} = \epsilon_y$

となるように定める。また、 $x = \ell_e$ ですべり量 S は連続と仮定する。

鉄筋コンクリート部材の接合部における
定着鉄筋の終局強度に関する調査報告書

ISSN 0386-5878

土研資料 第2978号

平成3年3月(1991)

コンクリート研究室 室長 河野広隆

研究員 森濱和正

研究員 渡辺博志

要 旨

鉄筋コンクリート橋脚の柱とフーチングの接合部は、水平外力が作用した場合曲げモーメントが最も大きくなる箇所であり、柱とフーチングを接合する定着鉄筋の定着方法が適切でないと、地震時などに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、橋脚全体の終局強度が低下する恐れがある。ここでは、定着鉄筋の定着方法と橋脚の耐震性との関係などを明確にし、柱・フーチング接合部の終局状態を考慮した定着鉄筋の設計法を提案する上での資料を得るために、鉄筋の引き抜き試験、ならびに柱フーチング模型の載荷試験を行い、これらの実験結果をとりまとめたものである。

キーワード：コンクリート部材，接合部，付着，定着，終局状態，設計，変形性能，群鉄筋

○

郵便はがき

3 0 5 - □ □

四十一円切
手をはって
下さい。

建設省土木研究所

コンクリート研究室 行

茨城県つくば市旭一番地

No. 028

No. 029

配布先住所

配布先氏名

○

○

土木研究所資料 第 2 9 7 8 号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏 名 印

○