

マッシブなコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の 定着破壊性状と群効果に関する研究

ANCHORAGE FAILURE AND GROUP EFFECT OF DEFORMED BARS EMBEDDED IN MASSIVE CONCRETE BLOCK

尾坂 芳夫*・大塚 浩司**・満木 泰郎***・小林 茂敏****

By Yoshio OZAKA, Koji OTSUKA, Yasuro MAKI and Shigetoshi KOBAYASHI

Studies were carried out to investigate properties of anchorage failure and group effect of deformed tension bars embedded in a massive concrete block. Pull out test specimens, one or several reinforcing bars were embedded in massive concrete blocks, were used for this experiment. As the results of this experimental studies, it is found that the anchorage strength of a bar embedded with other bars at close spacing in massive concrete are decrease up to 50% compared with those of a bar embedded independently or at wide spacing with other bars. A theory to calculate the anchorage strength of bars in a group is proposed.

Keywords : anchorage failure, conical shape failure, group effect, pull out test

1. ま え が き

鉄筋コンクリート橋脚の躯体脚部の軸方向鉄筋がマッシブなコンクリートフーチングの中に埋め込まれて定着されている場合には、その定着破壊は、縦ひびわれは出ないか、出ても定着部全体が割裂するほど成長せず、異形鉄筋のふし間のコンクリートがせん断されて鉄筋が引き抜ける。このとき、異形鉄筋が引き抜ける直前あるいは鉄筋が降伏した直後に、フーチング上面に沿って生じた横ひびわれの面に定着鉄筋のまわりのコンクリートがコーン状に抜け出すことがある。このコーン状に破壊した領域は、それ以後の鉄筋の定着には全く寄与しない。また、このコーン状の破壊面は、フーチング等の定着部材の形状寸法の影響を受けることがある。

マッシブなコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の性状については、島ら^{1),2)}が引き抜き供試体を用いて鉄筋の付着-すべり-ひずみ関係や鉄筋降伏後の付着性状について研究を行っているが、載荷端近傍におけるコンクリートの拘束の影響をなくすために非付着域を設けているためコーン状破壊を生じていない。Eligehausenら^{3),4)}は鋼

棒の先端1か所に円錐状の頭をもつアンカーボルト(anchor fastenings)の耐荷性状についての一連の研究の中で、コンクリートのコーン状破壊について述べている。Stoneら^{5),6)}は鋼棒の先端1か所にディスク状の頭をもつ引き抜き試験においてコーン状破壊を生ずる際のコンクリートのひずみを実験的および解析的に検討している。また、長友ら⁷⁾は横ふし1個のみをもつ鉄筋の引き抜き試験においてコーン状破壊について述べている。これらはいずれも1個の頭部またはふしをもつ鋼棒を用いた場合のコーン状破壊について述べたもので、実際の異形鉄筋を用いた研究例は少なく不明の点が多い。

昭和61年度改訂の土木学会コンクリート標準示方書の規定でも、柱とフーチングとの接合部においては、柱断面の有効高さの1/2あるいは鉄筋径の10倍だけフーチング内側に入った所を、鉄筋の定着長算定の起点としている。しかし、コーン状に破壊する領域は、鉄筋の埋め込み長さ、本数、直径、間隔、載荷方法、荷重、コンクリート強度、横方向鉄筋などにかかわる種々の因子に影響されると考えられ、これらの条件によっては示方書の規定では十分でないこともあると考えられる⁸⁾。

この研究は、マッシブなコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の定着破壊性状や種々の因子の影響、特に複数本の鉄筋が定着された場合の群効果について明らかにすることを目的としたものである。実験にはマッシブなコンクリートに単数または複数の異形鉄筋を埋め込んだ引

* 正会員 工博 東北大学教授 工学部土木工学科

** 正会員 工博 東北学院大学教授 工学部土木工学科
(〒985 多賀城市中央1-13-1)

*** 正会員 工修 電力中央研究所原子力総合推進室原燃
サイクルグループリーダー

**** 正会員 建設省土木研究所コンクリート研究室長

き抜き供試体を用い、影響因子として埋め込み長さ、鉄筋本数、鉄筋間隔、コンクリート強度などについて検討した。

2. 実験の概要

(1) 実験の直接的目的

本実験の直接的目的は次の事項を実験的に明らかにすることである。

- ① 鉄筋の定着強度
- ② 鉄筋の群効果
- ③ フーチング側面（形状寸法）の影響
- ④ 鉄筋近傍における破壊の進展

(2) 供試体および荷荷方法

供試体は、定着鉄筋が1本の場合には、図-1のように、断層50×90 cm、高さ40 cmで、荷荷の影響を除くために荷荷反力のかかる位置を20 cmだけ低くしてある。したがって、定着部のコンクリート断面は50×50 cmである。定着鉄筋が複数本の場合には、供試体は、図-2および表-1中の図に示す形状寸法のものである。また、内部ひびわれの発生状態を調べるために図-3に示す形状寸法の供試体を用いた。表-1にこれらの供試体の諸元を示す。鉄筋の埋め込み長さ l は、D 16の場合には、定着破壊状況を調べる目的のため、予備実験の結果から、

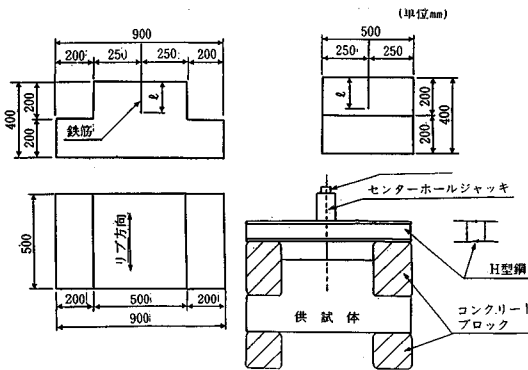


図-1 供試体形状寸法（鉄筋1本）

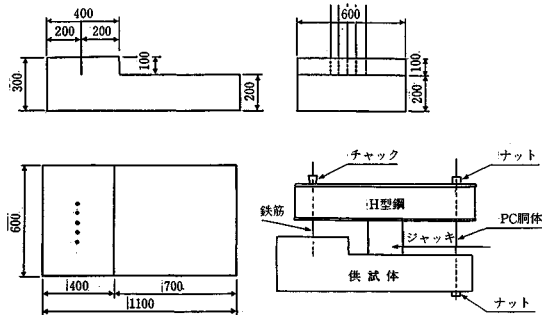
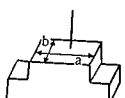


図-2 供試体形状寸法（鉄筋1～5本）

コンクリートの目標強度 200 kg/cm² において鉄筋が降伏する長さ（約 20 cm）を基準として、それより 3～5 cm ずつ段階的に短くした長さを用い、D 22 の場合には、十分長い埋め込み長さにおける内部ひびわれ状況を調べる目的のため 50 cm とした。供試体寸法 a および b は、コーン状破壊のひびわれ先端が供試体上面内に納まる寸法を基準としそれより少し大きい値にした。No.22, 23 および 24 の b の値は、鉄筋本数が無限に多い場合を想定し、そのような場合の破壊性状を調べるために、側面の

表-1 供試体の諸元

| NO | σ_k Kg/cm ² | n | l cm | a x b cm x cm | |
|----|-------------------------------|---|------|---------------|---|
| 1 | 300 | 1 | 10 | 50x50 |  |
| 2 | 300 | 1 | 10 | 50x50 | |
| 3 | 300 | 1 | 15 | 50x50 | |
| 4 | 300 | 1 | 15 | 50x50 | |
| 5 | 300 | 1 | 20 | 50x50 | |
| 6 | 300 | 1 | 20 | 50x50 | |
| 7 | 200 | 1 | 5 | 50x50 | |
| 8 | 200 | 1 | 5 | 50x50 | |
| 9 | 200 | 1 | 7 | 50x50 | |
| 10 | 200 | 1 | 10 | 50x50 | |
| 11 | 200 | 1 | 10 | 50x50 | |
| 12 | 200 | 1 | 13 | 50x50 | |
| 13 | 200 | 1 | 15 | 50x50 | |
| 14 | 200 | 1 | 10 | 40x60 | D 1 6 |
| 15 | 200 | 2 | 10 | 40x60 | |
| 16 | 200 | 3 | 10 | 40x60 | |
| 17 | 200 | 4 | 10 | 40x60 | |
| 18 | 200 | 5 | 10 | 40x80 | |
| 19 | 200 | 5 | 10 | 40x24 | |
| 20 | 200 | 3 | 10 | 80x100 | |
| 21 | 200 | 3 | 15 | 120x140 | D 1 6 |
| 22 | 200 | 5 | 10 | 120x24 | D 1 6 |
| 23 | 200 | 5 | 15 | 160x24 | |
| 24 | 200 | 5 | 20 | 220x24 | |
| 25 | 300 | 1 | 50 | 60x60 | |
| 26 | 300 | 2 | 50 | 60x60 | |
| 27 | 300 | 2 | 50 | 60x60 | |
| 28 | 300 | 2 | 50 | 60x60 | |
| 29 | 300 | 2 | 50 | 60x60 | D 2 2 |

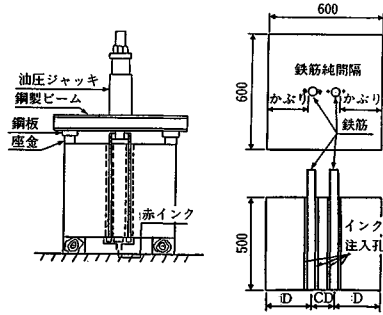


図-3 供試体形状寸法（インク注入）

かぶりを鉄筋の純間隔の1/2としたために他の供試体よりも小さくなっている。

(3) 鉄筋およびコンクリート

使用鉄筋は市販の横ふし異形鉄筋SD35で、鉄筋径はD16およびD22である。

コンクリートは、材令7日における目標強度を200 kgf/cm²と300 kgf/cm²としたものでその配合を表一2に示す。

(4) 測定

測定した項目は、荷重、破壊形状、内部ひびわれ発生状況その他である。内部ひびわれはインク注入法によって観察した。

3. 実験結果および考察

(1) 破壊形状

図一4、5および図一6は鉄筋1本の場合の定着破壊形状を示す。この図からわかるように、鉄筋の埋め込み長さによって、鉄筋が抜け出すときの定着部コンクリートの破壊形状は次の2つの形式に分けられる。

1) 鉄筋の埋め込み長さが短いと、定着された鉄筋の最下端よりコンクリートに上方向に斜めひびわれが発生し、鉄筋最下端を頂点とするコーン状にコンクリートが

破壊する。

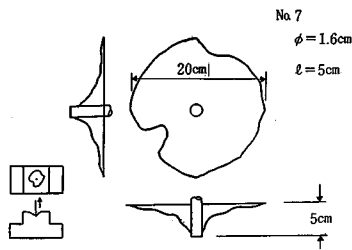
2) 鉄筋の埋め込み長さが長くなると、定着された鉄筋の途中のある点からコンクリートに斜めひびわれが発生し、その点を頂点とするコーン状にコンクリートが破壊する一方、そのコーンの頂点より下方では鉄筋のふしとふしとの間のコンクリートがせん断される。

上記のコーン状コンクリートの頂点の位置は鉄筋の埋め込み長さの増加に伴って浅くなる傾向がみられた。

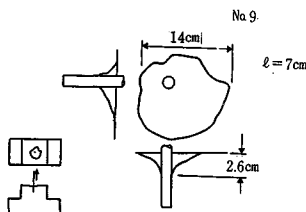
図一7、8および図一9は鉄筋がそれぞれ2本、3本および鉄筋本数が無限に多い場合を想定した供試体(鉄筋本数5)の定着破壊形状を示す。鉄筋の埋め込み長さは10cmであり、鉄筋1本の場合にはその途中からコーン状破壊が生じるのであるが、これらの場合には複数本の鉄筋の最下端を連ねる位置からすべての鉄筋を包含する大きいコーンの形状で破壊が生じる。複数本の鉄筋を定着した場合でも、埋め込み長さがさらに長く15cmに

表一2 配合表

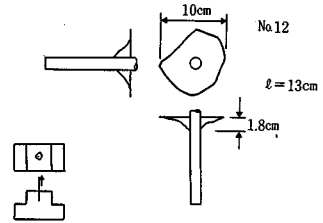
| 目標強度 σ_T kgf/cm ² | スラブ cm | 水セメント比 W/C cm | 単位量 kg | | | | | |
|---|-----------|---------------------|--------|-----------|----------|-------|-----|-----|
| | | | 水 W | セメント C | 細骨材 S | 粗骨材 G | | |
| | | | | | | 5 | 10 | 15 |
| 200 | 7 | 2 | 65 | 185 | 285 | 674 | 388 | 721 |
| 300 | 5 | 2 | 50 | 170 | 340 | 632 | 345 | 804 |



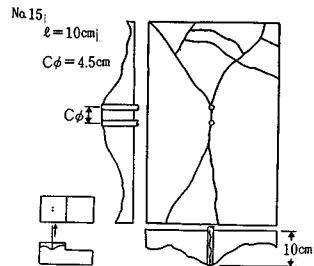
図一4 破壊形状 (鉄筋1本, $l=5$ cm)



図一5 破壊形状 (鉄筋1本, $l=7$ cm)

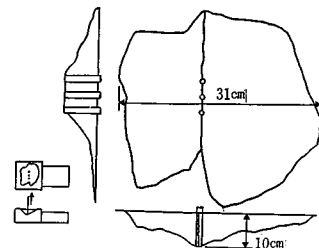


図一6 破壊形状 (鉄筋1本, $l=13$ cm)

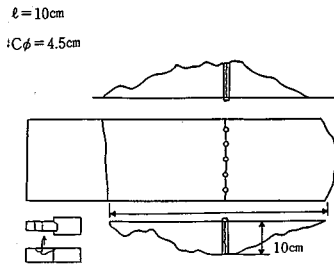
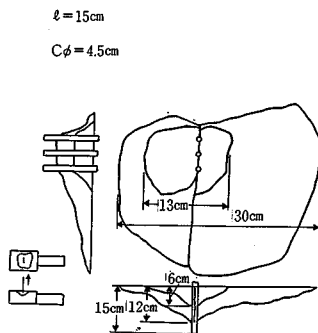


図一7 破壊形状 (鉄筋2本, $l=10$ cm)

$l=10$ cm
 $C\phi=4.5$ cm



図一8 破壊形状 (鉄筋3本, $l=10$ cm)

図-9 破壊形状 (鉄筋 5 本, $l=10\text{cm}$)図-10 破壊形状 (鉄筋 3 本, $l=15\text{cm}$)

なると図-10のように定着鉄筋の途中からコーン状破壊が生じる。このように、鉄筋の本数が増加するとコーン状破壊の生じる位置(頂点)が深くなる。

コーンを形成する斜めひびわれと鉄筋軸とのなす角度は、一般に、鉄筋近くで45度から60度程度であり、鉄筋軸を軸とする対称形に近い。これらのひびわれは、鉄筋の荷重端に近づくにつれて角度が大きくなり、コンクリート表面付近で90度に近くなる。また、図-7にみられるようにフーチング端が近いときには鉄筋の最下端から斜めに発生したひびわれはすぐに水平方向に向きを変えフーチング端面に達する。さらに、鉄筋本数が、無限に多い場合を想定した図-9の場合は、フーチング側面からみたそのひびわれの形状はコーン状であるが、フーチング前面からみるとほぼ水平となっている。これは、鉄筋列の最外側鉄筋からフーチング側面までの距離が小さいためである。

供試体上面からみたコーン状破壊の形状は、フーチング端までの距離が十分大きくなった図-7と鉄筋本数が無限に多い場合を想定した図-9の場合を除いて、鉄筋を中心とするほぼ円形となっている。また、いずれの場合も、複数本の鉄筋を連ねるような縦ひびわれが発生している。

(2) 内部ひびわれ発生状況

写真-1, 2および3はコンクリートブロックに埋め

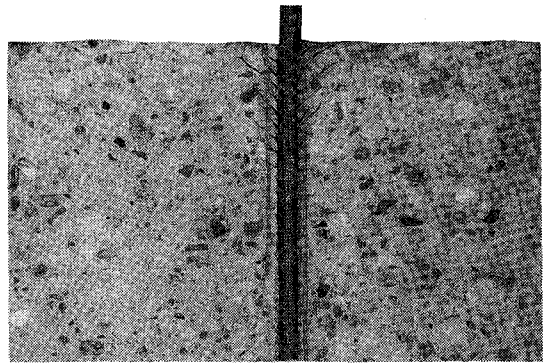
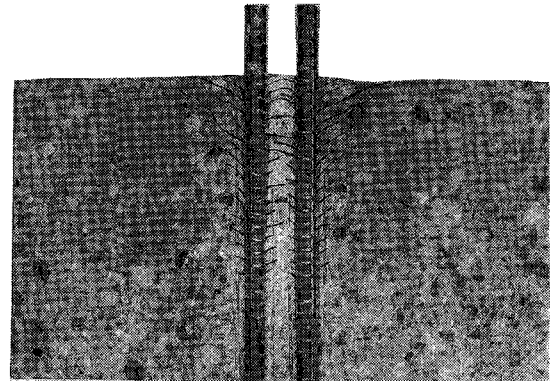
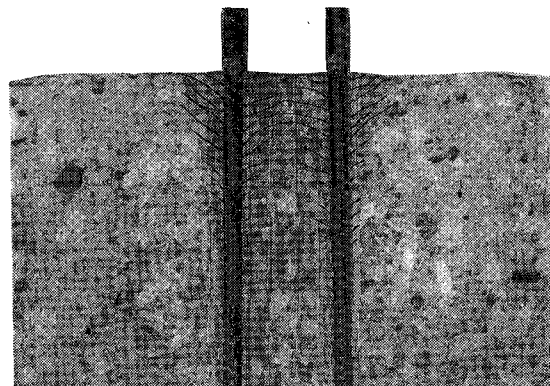


写真-1 内部ひびわれ発生状況 (鉄筋 1 本, D22)

写真-2 内部ひびわれ発生状況
(鉄筋 2 本, D22, 純間隔 3.3 cm : 1.5 D)写真-3 内部ひびわれ発生状況
(鉄筋 2 本, D22, 純間隔 8.9 cm : 4.0 D)

込まれた1本および2本の鉄筋を引張荷重(鉄筋応力度 2500 kgf/cm^2)した際、鉄筋の周りのコンクリートに発生した内部ひびわれの状況を示したものである。これらの写真からわかるように、異形鉄筋のふし部からコンクリートに内部ひびわれが数多く発生している。1本の鉄筋を埋め込んだ場合には、内部ひびわれと鉄筋軸とのな

す角度は鉄筋近くではほぼ45度から60度程度であるが鉄筋から離れるにつれてしだいに大きくなり、コンクリート表面付近で90度に近い角度となっている。このような内部ひびわれが成長してコンクリート表面に達することによって形成されるコーン状コンクリートは、(1)で述べた引き抜き試験の際に発生するものと同一のものと考えられる。

2本の鉄筋を埋め込んだ場合には、鉄筋間隔が十分大きければ当然おのおの鉄筋のまわりに発生する内部ひびわれの形状は1本の場合と同じである。しかし、その鉄筋間隔がある間隔よりも小さくなると、2本の鉄筋の間の部分のコンクリートには両方の鉄筋のふしから発生したひびわれの先端がほぼ中央で手を結ぶ状態となる。このような、両鉄筋を連結するような内部ひびわれの形状は、上に凸なカーブを成しているが、両鉄筋間が小さくなるに伴って、水平に近い形状となり、全体をみれば梯子状といえるようになる。

このような梯子状のひびわれは、両方の鉄筋からコンクリートへ伝えられた力が重なり合成された結果であり、梯子状のひびわれが発生している領域のコンクリートは鉄筋の定着に果たす役割がきわめて小さいと考えられる。

図-11に、鉄筋純間隔と供試体上面から最深部の梯子状ひびわれの位置までの距離との関係を示す。この図からわかるように、両者の関係はほぼ直線状を成し、鉄筋間隔が小さくなるほど、梯子状の内部ひびわれはより深い位置まで発生している。この直線関係から推定すれば鉄筋純間隔が約13cm(鉄筋径の約6倍)程度離れば単独鉄筋と同じ内部ひびわれ状況となると考えられる。すなわち内部ひびわれ発生状況の面からいえば、2本の鉄筋はこの程度純間隔を離さなければ1本の鉄筋と同じ定着効果が期待できないと考えられる。

(3) 有限要素解析による破壊形状の検討

コンクリートに埋め込まれた異形鉄筋に引張荷重を載荷した際、異形鉄筋のふし部から鉄筋軸とある角度をもってコンクリートに内部ひびわれが発生する。この内部ひびわれと鉄筋軸とのなす角度を知ることは、異形鉄筋の定着破壊機構を解明するためにきわめて重要であ

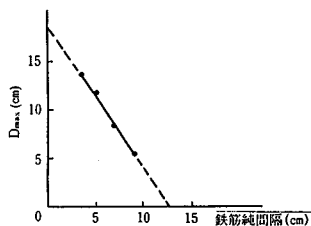


図-11 鉄筋純間隔と梯子状ひびわれ発生位置との関係

る。しかし、その角度は、(2)で述べたようにインク注入法によって実験的に求められているが、骨材の偏在やばらつきのためその値は明瞭でない。そこで、数値解析によってこの内部ひびわれの発生・成長をシミュレートして、実験結果と比較した。

解析では、コンクリートに埋め込んだ鉄筋に引張荷重が作用した場合、コンクリート端面近くでは、比較的低い荷重で鉄筋とコンクリートの肌離れが生じ、それ以降の鉄筋からコンクリートへの力の伝達は、大部分鉄筋のふしによって生じるため、鉄筋とコンクリートの間にスリップ要素を配して、鉄筋は、(2)で述べたインク注入法による実験結果と大略等しいものとした。

また、コンクリートは、引張側では最大引張主応力がひびわれ発生応力に達したときに、その直交する面にひびわれが発生するものとした。ひびわれが発生するとひびわれに面に直交する方向の剛性は元の1%に低下させる。なお、ひびわれ面に直交する方向のひずみか圧縮となったときは剛性は復活するものとした。

解析する鉄筋コンクリートのモデルは、高さ15cm、直径30cmの円柱状コンクリートの中心にD22の横ふし異形鉄筋を埋め込んだ鉄筋コンクリート体を想定し、鉄筋コンクリートの拘束は、コンクリートの上面外周を下方方向に拘束した。図-12は、分割した要素の全体図である。解析に用いた物性値は、表-3に示すとおりであり、これらの値は実測値をもとにして決定した。

解析結果の例を図-13、14および15に示す。これらの図は、鉄筋応力度が234、370および555 kgf/cm²における内部ひびわれの発生成長を示したものである。図中の要素内の短線は、1要素の4分点で計算した、ひびわれ発生箇所とその角度とを示している。これらの結果から、内部ひびわれはかなり鉄筋応力度の低い段階で鉄筋のふし部に発生し、鉄筋応力度の増加とともにコンクリート

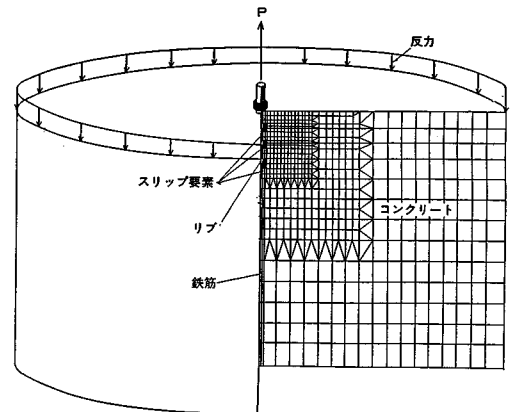
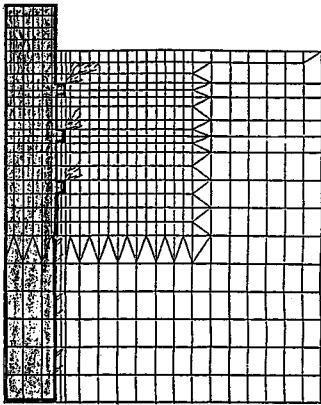
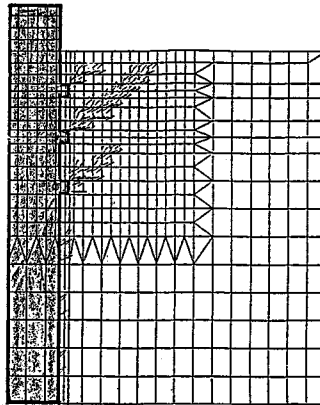


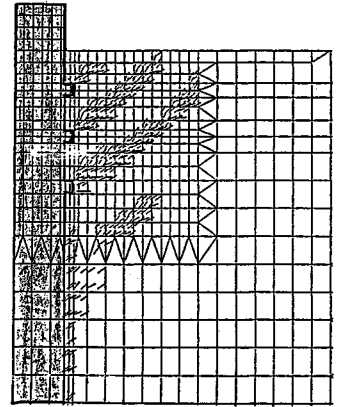
図-12 分割した要素の全体図



図一13 解析で求めた内部ひびわれ
(鉄筋応力度 234 kgf/cm²)



図一14 解析で求めた内部ひびわれ
(鉄筋応力度 370 kgf/cm²)



図一15 解析で求めた内部ひびわれ
(鉄筋応力度 555 kgf/cm²)

表一3 解析に用いた諸物性値

| | コンクリート | 鉄筋 |
|-------------------------------|--------|---------|
| ヤング係数 (kgf/cm ²) | 234000 | 2100000 |
| ポアソン比 | 0.167 | 0.325 |
| クラック応力 (kgf/cm ²) | 29.0 | — |
| 降伏応力 | — | 4000 |
| クラック剛性低下率 | 0.01 | — |
| 圧壊応力 (kgf/cm ²) | ~237 | — |

上端面の方向に伸展することがわかる。このときのひびわれと鉄筋軸とのなす角度は約 47 度であった。この角度は、(2) で述べたインク注入法による実験結果と大略等しいものと思われる。

(4) 定着破壊強度

a) 結果の一覧

表一4 に引き抜き試験の結果の一覧を示す。ここで、全定着破壊強度とは、実験により得られた最大荷重であり、鉄筋 1 本当たりの定着強度とは全定着破壊強度を鉄筋本数で割ったものである。

b) 定着破壊強度と埋め込み長さとの関係

鉄筋 1 本の場合には供試体 No. 7, 9, 10, 12 の結果を、鉄筋 3 本の場合には No. 20, 21 の結果を、鉄筋本数が無限に近い場合を想定した場合には No. 22, 23, 24 の結果をまとめて 1 つのグラフに示すと図一16 のようになる。図中には破壊形状のおおよその形を付け加えてある。この図からわかるように鉄筋 1 本当たりの定着破壊強度は埋め込み長さが大きくなるにつれて増加しているが、その増加の様子が、鉄筋 1 本, 3 本, 無限を想定した場合とでは非常に異なっている。多数本の場合には 1 本当たりの定着強度の増加割合が低下し、特に無限本数を想定した場合には非常に低下している。

表一4 引き抜き試験結果の一覧

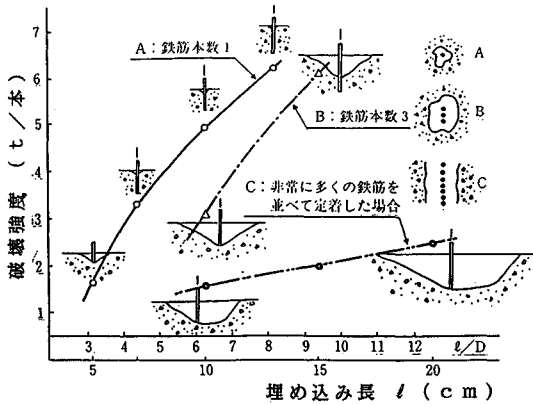
| NO | ℓ cm | n | f'c | T t | T/n t/本 | ℓs cm | 破壊形状 |
|----|---------|----|-----|--------|------------|----------|------|
| 1 | 10 | 1 | 325 | Y | - | - | Y |
| 2 | 10 | 1 | 322 | Y | - | - | Y |
| 3 | 15 | 1 | 325 | Y | - | - | Y |
| 4 | 15 | 1 | 318 | Y | - | - | Y |
| 5 | 20 | 1 | 322 | Y | - | - | Y |
| 6 | 20 | 1 | 318 | Y | - | - | Y |
| 7 | 5 | 1 | 217 | 1.6 | 1.6 | 5.0 | C |
| 8 | 5 | 1 | 190 | 1.4 | 1.4 | 5.0 | C |
| 9 | 7 | 1 | 193 | 3.3 | 3.3 | 2.6 | C+S |
| 10 | 10 | 1 | 217 | 4.9 | 4.9 | 3.1 | C+S |
| 11 | 10 | 1 | 190 | 4.2 | 4.2 | 2.6 | C+S |
| 12 | 13 | 1 | 184 | 6.2 | 6.2 | 1.8 | C+S |
| 13 | 15 | 1 | 193 | Y | - | - | Y |
| 14 | 10 | 1 | 184 | 4.9 | 4.9 | 3.0 | C+S |
| 15 | 10 | 2 | 190 | 7.0 | 3.5 | 10.0 | C |
| 16 | 10 | 3 | 190 | 9.0 | 3.0 | 10.0 | C |
| 17 | 10 | 4 | 190 | 10.4 | 2.6 | 10.0 | C |
| 18 | 10 | 5 | 192 | 12.0 | 2.4 | 10.0 | C |
| 19 | 10 | *5 | 190 | 7.0 | 1.4 | 10.0 | C' |
| 20 | 10 | 3 | 198 | 9.3 | 3.5 | 10.0 | C |
| 21 | 15 | 3 | 198 | 18.3 | 6.1 | 12.0 | C+S |
| 22 | 10 | *5 | 198 | 8.0 | 1.6 | 10.0 | C' |
| 23 | 15 | *5 | 198 | 10.0 | 2.0 | 15.0 | C' |
| 24 | 20 | *5 | 198 | 12.5 | 2.5 | 20.0 | C' |

注) T: 全定着破壊荷重、T/n: 破壊強度 (鉄筋 1 本当たりの破壊荷重)、Y: 鉄筋降伏、*: 無限本数想定破壊 (側面かぶり小)、ℓ: 埋め込み長さ、ℓs: コーン状破壊発生長さ、C: コーン状破壊、S: ふし間せん断破壊、C': 側面コーン状で正面水平破壊

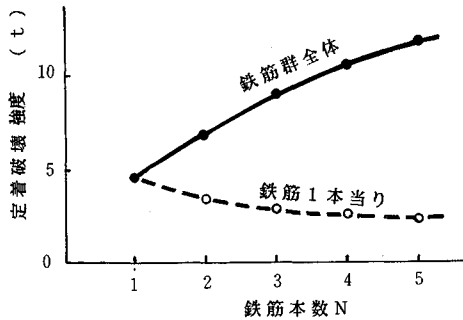
c) 定着破壊強度と鉄筋本数 N との関係

供試体 No. 14 から 18 で得られた結果を用いて、鉄筋本数 N と全定着破壊強度、さらに N と鉄筋 1 本当たりの定着破壊強度との関係を示すと図一17 のようになる。この図からわかるように、鉄筋本数が多くなれば当然全定着破壊強度は増加するが、1 本当たりの定着破壊強度は低下し、無限本数を想定した場合には約 50% になっている。これを鉄筋の定着強度に及ぼす群効果と考えることができる。

d) 定着破壊強度の計算と定着長算定位置



図一16 鉄筋1本当たりの定着破壊強度と埋め込み長との関係



図一17 定着破壊強度と鉄筋本数との関係

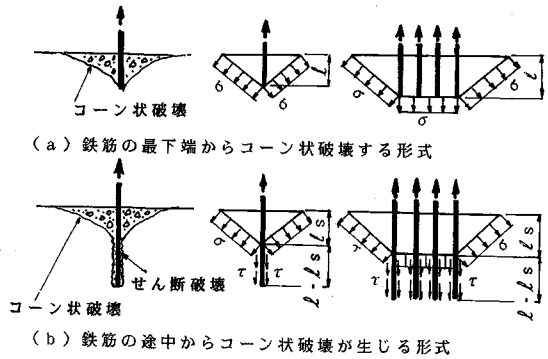
3. (1)で述べたように、マッシュなコンクリートに埋め込まれた1本または複数の異形鉄筋の定着破壊の形式を、図一18に示す(a)および(b)の2つに大別することができる。

(a)は、埋め込み鉄筋の下端からコーン状定着破壊を生じる形式である。この形式で破壊する最大埋め込み長は鉄筋本数の増加とともに増大する。

(b)は、鉄筋の埋め込み長が(a)より長くなると生じるもので、コーン状破壊が埋め込み鉄筋の途中から生じ、それより下部の鉄筋がふし間のコンクリートのせん断によって抜け出す形式である。

鉄筋の埋め込み長がさらに長くなると、コンクリート上面にコーン状破壊が生じることがあっても鉄筋は抜け出すことなく降伏する。

鉄筋の埋め込み長さの大小にかかわらず載荷端近くのコンクリートはほとんどの場合コーン状破壊を生じ、この領域はその後の鉄筋の定着作用には貢献できなくなる。したがって、マッシュなコンクリートに埋め込まれた鉄筋を「確実に定着」するためにはコーン状破壊する領域を除外して、コーンの頂点を起点として定着長を算



図一18 定着破壊の形式の大別と力のつり合い状態

定する必要がある。すなわち、定着長算定位置 l_s はコーンの頂点の位置と考えることができる。

そこで、定着破壊強度と定着長算定位置とを求めるために次のような解析を行った。

まず定着鉄筋の最下端からコーン状破壊が生じる場合について考える。図一18(a)は、破壊が瞬時に起こると仮定して、引き抜き荷重 F_1 と破壊面に作用する引張応力 σ の合力とのつり合い状態を示している。鉄筋軸方向の力のつり合いを考えれば、 F_1 とコーンの全側面を鉄筋軸と直角方向に投影した面積 A_c に σ を乗じた力ががつり合っていると考えることができる。コーンの側面の鉄筋軸となす角度を α とすると鉄筋1本当たりの A_c は次式のようになる。

$$A_c = \{2al \tan \alpha + \pi(l \tan \alpha)^2\} / n \dots\dots\dots (1)$$

コンクリートの引張強度は次式から求める。

$$f_t = 0.5f_c^{2/3} \dots\dots\dots (2)$$

$$F_1 = A_c \cdot f_t = 0.5f_c^{2/3} \{2al \tan \alpha + \pi(l \tan \alpha)^2\} / n \dots\dots\dots (3)$$

ここで、

A_c : コーン全側面の軸直角方向への投影面積を鉄筋本数で除したもの (cm²/本)

F_1 : 鉄筋1本当たりのコーン状定着破壊強度 (kgf/本)

f_c : コンクリートの圧縮強度 (kgf/cm²)

α : コーン側面の鉄筋軸となす角度

a : 鉄筋列の長さ (図一19中に示す) (cm)

l : 鉄筋の埋め込み長さ (cm)

n : 鉄筋本数

実験結果および解析結果から α の値を47度と仮定して、鉄筋1本当たりのコーン破壊強度 $F_1 = A_c \cdot f_t$ を計算した結果と実験結果の鉄筋1本当たりの破壊強度との関係を示すと図一19のようになる。

この図からわかるように、実験値がほぼ原点を通る45度の直線上に乗っていることから、式(3)でコーン状定着破壊強度を計算できると考えられる。

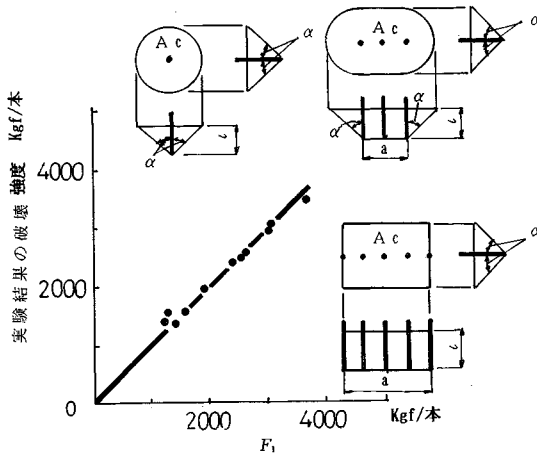


図-19 定着破壊強度と F との関係

次に図-18(b)は、鉄筋のふしを連ねた面でコンクリートがせん断され定着破壊する場合の鉄筋1本当たりの引き抜き強度 F_2 (kgf/本) と付着力との力のつり合いを示している。

$$F_2 = \pi \phi l \tau \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 ϕ : 鉄筋直径 (cm)

F_1 と F_2 とを比較すると、 l の小さいうちは $F_1 < F_2$ であるが、 l がある値を越えると逆転し $F_1 > F_2$ となる。すなわち、 l が小さいうちは鉄筋の最下端からコーン状破壊を生じ、やがてコーン状破壊とせん断破壊とが混在するようになる。埋め込み長さを l とし、この場合そのような2種の定着破壊が同時に生ずると考え、その破壊強度を F (kgf/本) とし、コーン状破壊の生ずる点までの距離を x (cm) とすると次式が成り立つ。

$$F(x) = F_1 + F_2 \dots\dots\dots (5)$$

$$= f_t \{ 2ax \tan \alpha + \pi(x \tan \alpha)^2 \} / n + \pi \phi \tau (l - x) \dots\dots\dots (6)$$

$F(x)$ の極小点を求めるために $F'(x) = 0$ を求めると、

$$F'(x) = f_t (2a \tan \alpha + 2\pi x \tan^2 \alpha) / n - \pi \phi \tau = 0 \dots\dots (7)$$

$$x = (n\pi \phi \tau - 2f_t \cdot a \tan \alpha) / (2\pi f_t \tan^2 \alpha) \dots\dots (8)$$

上式の x 点からコーン状破壊を生じる場合が最も全体の破壊強度が小さいことから(図-20 参照)、実際の定着破壊もこの x 点からコーン状破壊が生じているものと考えられる。また、この式(8)からも x 点の位置は、鉄筋本数や鉄筋直径の増加につれて増大し、コンクリートの強度の増加につれて減少することがわかる。したがって、 x の値が定着長算定位置 l_s であると考えることができる。

コーン状破壊発生位置を式(8)によって計算した結果と実験結果とを表-6に示す。この場合に用いた τ の値は、割裂しないように十分スパイラル鉄筋で補強し、鉄筋のふし間のコンクリートのせん断破壊を生じるように

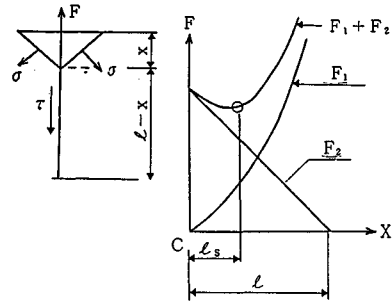


図-20 コーン状破壊起点の算定

表-6 l_s の比較

| n | 計算値 cm | 実験値 cm |
|----|-----------|-----------|
| 1 | 3.5 | 3 |
| 2 | 5.7 | 10 |
| 3 | 7.9 | 12 |
| 4 | 10.1 | 10 |
| 5 | 12.3 | 15 |
| *5 | 17.6 | 20 |

注) *鉄筋無限本数を想定した場合

した引き抜き供試体で得られた付着強度 85 kg/cm^2 を用いた。

両者を比較すると、かなり一致しているといえるが、条件に合った実験供試体数が少ないため十分な比較になっていない。この点についてはさらに検討が必要と考えられる。

以上の結果より、マッシブなコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の定着設計の際は、基本的には、式(8)で求められる定着長算定位置を起点として、式(4)から求められる定着長を取れば良いと考えられる。その際、定着破壊が異形鉄筋のふし間のコンクリートのせん断破壊であることから、付着強度を土木学会の示方書に規定されている値よりも相当大きく取れるものと考えられる。

4. 結 論

マッシブなコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の定着破壊性状と群効果について研究した結果、実験の範囲内で次のことがいえる。

(1) 鉄筋が1本の場合の定着破壊性状は、鉄筋の埋め込み長さによって2つに大別され、埋め込み長さが鉄筋径の約3倍程度より小さければ鉄筋の最下端を頂点としコンクリート表面を底面とするコーン状にコンクリートが鉄筋とともに抜け出し、埋め込み長さがさらに大きければ途中のある位置から上の方はその点を頂点とする

コーン状にコンクリートが破壊する。一方それより下方では鉄筋のふし間のコンクリートのせん断破壊となる。

(2) 複数の鉄筋が比較的狭い間隔に並んでいる場合の定着破壊性状は、埋め込み長さが鉄筋径の約6倍程度より小さければそれらの鉄筋の最下端を連ねる位置からすべての鉄筋を包含する大きいコーン状にコンクリートが破壊し、埋め込み長さがさらに大きければ途中のある位置から上はコーン状破壊、それより下方は鉄筋のふし間のコンクリートのせん断破壊となる。

(3) 鉄筋本数が無限に多い場合を想定し、側面かぶり小さい場合の定着破壊性状は、鉄筋列の側面からみた場合には(2)と同様であるが前面からみると鉄筋の最下端を連ねた破壊線はそのまま水平に側面まで達している。

(4) インク注入実験によると、引張を受ける1本の定着鉄筋の周りのコンクリートには鉄筋のふし部より内部ひびわれが斜め上方に向かって数多く発生しており、それらのいくつかは成長してコンクリート上表面に達している。内部ひびわれと鉄筋軸となす角度は鉄筋近くで45度から60度程度で、上方に向かうにつれて大きくなり、コンクリート上表面でほぼ90度となっている。2本の定着鉄筋の周りのコンクリートには、それらの鉄筋の間隔が鉄筋直径の約6倍程度以上離れていれば1本の場合と同じ状況の内部ひびわれが発生するが、それより狭い場合には両方の鉄筋の間の部分にそれらを連結するような水平に近い梯子状の内部ひびわれが発生する。これらの内部ひびわれの成長によってコーン状定着破壊が生じると考えられる。

(5) 有限要素解析によると、異形鉄筋のふし部のコンクリートにはかなり鉄筋応力度の低いうちから内部ひびわれが発生し、鉄筋応力度の増加につれて成長すること、また内部ひびわれの鉄筋軸となす角度は約47度であり、この値は、インク注入実験の鉄筋付近の値とほぼ同様であった。

(6) 比較的狭い間隔に並んで埋め込まれた複数の鉄筋がコーン状定着破壊を生ずる場合には、群効果を生じ、1本当たりの定着強度が単独であるいは広い間隔で埋め込まれた場合の約50%程度まで減少する。

(7) マッシュなコンクリートに埋め込まれた鉄筋を確実に定着するためには、コーン状定着破壊する領域を無視し、定着長算定位置をそのコーンの頂点の位置とし、それから先の鉄筋がふし間コンクリートのせん断により定着破壊をするとして計算した定着長をとればよいと考

えられる。

参考文献

- 1) 島 弘・周 礼良・岡村 甫：異形鉄筋の鉄筋降伏後における付着特性，土木学会論文集，第378号/V-6，1987年2月。
- 2) 島 弘・周 礼良・岡村 甫：マッシュなコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の付着応力-すべり-ひずみ関係，土木学会論文集，第378号/V-6，1987年2月。
- 3) Ehligehausen, R., Fuchs, W. and Mayer, B.: Tragverhalten von Dübelbefestigungen bei Zugbeanspruchung, Teil 1, Betonwerk+Fertigteile-Technik Heft, 1987.12.
- 4) Ehligehausen, R., Funchs, W. and Mayer, B.: Tragverhalten von Dübelbefestigungen bei Zugbeanspruchung, Teil 2, Betonwerk+Fertigteile-Tekchnik Heft, 1988.1.
- 5) Stone, W.C. and Carino, N.J.: Deformation and Failure in Large-Scale Pullout Tests, ACI Journal, No. 80-46, 1983.
- 6) Stone, W.C. and Carino, N.J.: Comparison of Analytical with Experimental Internal Strain Distribution for the Pullout Test, ACI Journal, No. 81-1, 1984.
- 7) 長友克寛・角 徹三：横ふし1個のみをもつ異形鉄筋の付着特性に関する研究，土木学会論文集，第372号/V-5，pp.177~186，1986年8月。
- 8) 大塚浩司・森 横夫：正負交番荷重を受けるRC柱の主鉄筋定着破壊，土木学会第42回年次学術講演会講演概要集，1987年9月。
- 9) 後藤幸正・植田紳治・満木泰郎：鉄筋コンクリート部材引張部のひびわれに関する研究，土木学会コンクリートライブラリー，第14号，1965。
- 10) Goto, Y.: Cracks formed in concrete around deformed tension bars, Jour. of ACI, Vol. 68, pp.244~251, April 1971.
- 11) 後藤幸正・大塚浩司：引張を受ける異形鉄筋周辺のコンクリートに発生するひびわれに関する実験的研究，土木学会論文報告集，第294号，1980.2。
- 12) 大田 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，土木研究所報告，1980年3月。
- 13) 山尾秀秀ほか：付着応力-すべり関係に関する実験的研究，土木学会論文報告集，第343号，1984年3月。
- 14) 遠藤孝夫・加藤 治・青柳征夫：鉄筋コンクリート耐震壁の非線形有限要素解析，電力中央研究所報告，1987年2月。
- 15) 井上範夫ほか：コリンズ理論に基づくRC弾塑性解析法，第7回コンクリート工学年次講演会論文集，1985年。
- 16) 山田嘉昭：塑性 粘弾性，培風館，1980年12月。
(1989.11.8・受付)