

スタッドを取り付けた太径異形棒鋼の付着特性

前野裕文*・後藤芳顕**・小畑 誠***・
松浦 聖****

大型鋼構造物のコンクリートフーチングへの定着方法の一つとして、スタッド付き太径異形棒鋼を用いその付着力により直接定着する方法が考えられる。本研究では、スタッド付き異形棒鋼の材料特性である付着特性を、異形棒鋼節突起による付着力とスタッドによる付着力の協同作用という観点から明確にした。あわせて周辺拘束されたスタッド付き異形棒鋼の付着特性についても考察している。

Keywords : bonding characteristics, deformed bar, headed stud, anchorage

1. はじめに

大型鋼構造物のコンクリートフーチングへの定着方法としては、アンカーフレーム方式を用いるのが最も一般的である^{1),2)}。しかしながら、構造物の大型化に伴い、現行の設計法の下では、アンカーフレームの厚板化、高材質化、および溶接量の増大が避けられず、さらに、アンカーフレーム自体が大型化し、輸送・架設上の問題も生じている。このような現状を踏まえ、著者らは定着構造の一つの合理化の方向として、上記アンカーフレーム方式とは別に、 $\phi 100 \sim 180$ mmの突起付き太径異形棒鋼³⁾をアンカーボルトとして直接用い、主としてその付着力によりコンクリートフーチングに定着する直接定着方式を検討している⁴⁾。そしてこの定着構造を実用化させるための一連の研究として、太径異形棒鋼の付着特性、フーチングコンクリートに埋め込まれた場合の定着特性のみならずフーチングならびに上部構造の接合部を含めた定着構造システムとしての力学特性の検討を進めている。

太径異形棒鋼に限ってみると、都市市内での鋼脚柱定着部の寸法制限を満足するためには定着ボルトとして許容応力度いっぱい設計となることが大半であるが、フーチング寸法の制約から、埋め込み深さが不十分な場合も比較的多くある。このような場合に対応するため、何らかの補助手段により太径異形棒鋼の付着強度を増大させる方法を検討しておくことが少なくとも必要となる。なお、基本的に異形棒鋼を許容応力度の限界まで使うため

には、棒鋼が太径化すると定着長は増大する傾向にあり、実際の構造物での適用には制限を受けることが多い。このようなことから、太径異形棒鋼の付着力を増大させる手段を検討することは一般的にも重要な問題と言える。

異形棒鋼の付着強度を向上させ得ると考えられる一つの容易な方法として、スタッドを取り付ける手法が挙げられる。周知のように異形棒鋼のみの付着特性に関しては多数の成果が報告されており⁵⁾⁻⁷⁾、フーチングコンクリート内における定着特性についても、異形鉄筋については研究がなされている^{8),9)}。また、スタッドについても平鋼板に用いた場合については多くの研究成果がある¹⁰⁾⁻¹⁵⁾。しかしながら、突起付き鋼板に取り付けたものに至っては近年検討が始められたばかりであり^{17),18)}、今回のように、太径異形棒鋼にスタッドを取り付けたものについてはほとんど検討が行われておらずその特性は知られていない。

このような観点から、本論文ではスタッドを取り付けた太径異形棒鋼の基本的な付着特性について詳細に検討する。異形棒鋼にスタッドを取り付ける場合の節突起とスタッドの協同作用を論ずる上で、それぞれ単独の付着に対する効果をどの程度まで累加できるかと言う問題は設計上重要であり、まずこの点を明らかにする。次に、フーチング内では曲げによる応力や厚みの大きいコンクリート中に埋め込まれていることにより異形棒鋼は拘束を受けるが、この拘束によりスタッドを取り付けた異形棒鋼の付着特性がどのように変化するかを調べる。

2. スタッド付き太径異形棒鋼

スタッドを取り付ける太径の異形棒鋼としては $\phi 100 \sim 180$ mm のものを目標としているが、今回の研究では試験装置の制約と実験での取扱いを容易にすることから、縮尺率約 1/2~1/3 の異形鉄筋 D 51 に相当する公称直径 51 mm の異形棒鋼を用いる。このような縮尺さ

*正会員 工修 名古屋高速道路公社 工務部 設計課
(〒460 名古屋市中区丸の内 1-16-15)

**正会員 工博 名古屋工業大学教授 工学部
社会開発工学科

***正会員 Ph.D 名古屋工業大学講師 工学部
社会開発工学科

****正会員 工博 名古屋工業大学教授 工学部
社会開発工学科

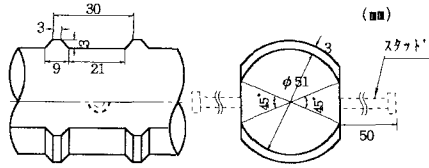


図-1 异形棒鋼 AD 51の形状

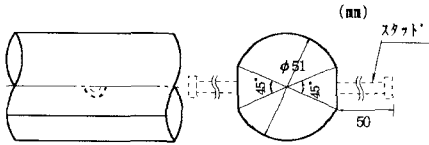


図-2 丸鋼 AR 51の形状

れた异形棒鋼を用いて実物の付着特性に関する定量的な議論を行うのは必ずしも十分ではないが少なくとも定性的な検討はできるものとする。异形棒鋼の形状としては、スタッドを溶植し得る平坦面を有する太径异形棒鋼として現在入手可能なものを図-1に示す³⁾。図-1からもわかるように、この异形棒鋼の形状は従来のねじ鉄筋の範疇に入っている。なお、今回の実験では鋼材自体の材料非線形挙動が関与しない弾性範囲の実験であること、利用し得る鋼材の種類から、丸鋼 (S 45 C) および、SM 50 クラスの鋼板を用い削り出し機械加工によって図-1, 2に示す形状で製作した。棒鋼の表面粗さはいずれも JIS B 0031 による 25 S (25 μm) 以下である。

取り付けるスタッドについては、道示¹⁹⁾を参考に定めた実大棒鋼に取り付ける頭付きスタッドの約 1/3 の縮尺率を持つ 6×50 mm を用い异形棒鋼の両側の平坦面に溶植した。スタッドの材質については、JIS B 1198 相当の化学成分を持つ SS 41 相当のものを使用した。一部のスタッドにおいて加工による影響もあり引張強度が JIS の規定に比べ少し高めている。しかし、この程度のスタッド材料自体のばらつきではコンクリート中のスタッドの静的強度に及ぼす影響は小さい¹³⁾のほどは問題がないと考えられる。

3. スタッド付き异形棒鋼の付着実験の概要

(1) スタッドと异形棒鋼節突起の協同作用検討のための付着実験

付着実験には、JIS 原案²⁰⁾の引張荷重載荷端にアンボンド部を設けた立方体型供試体を基本にフープ筋で補強し、スタッドピッチとの関係より定着長を若干長くした図-3に示す供試体 (H) を用いる。ここに、アンボンド部は引張荷重端近傍のコーン破壊を防ぎ、付着挙動をより均一化するためのものである。また、フープ筋で補強する理由としては、寸法の小さい JIS 原案の供試体

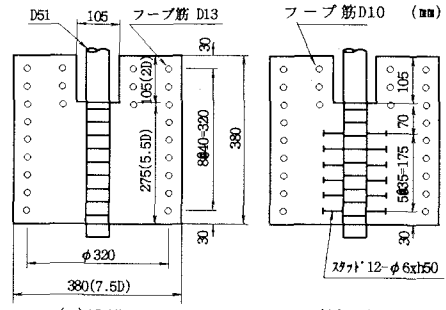


図-3 フープ筋で補強した供試体 (H)

表-1 スタッドの協同作用検討用の供試棒鋼の種類

供試体	仕様	l_p/D
ADH51	図1に示す异形棒鋼	—
ADSH51-1	同上にスタッドを22mm間隔で両側18本設置	3.7
ADSH51-2	同上にスタッドを35mm間隔で両側12本設置	5.8
ADSH51-3	同上にスタッドを59mm間隔で両側8本設置	9.7
AUSH51-1	図2に示す丸鋼にアンボンド処理をし平坦面にスタッドを35mm間隔で両側12本設置	5.8
AUSH51-2	図2に示す丸鋼にアンボンド処理をし平坦面の埋め込み部中央にスタッドを2本設置	—

l_p :スタッドピッチ、D:スタッド直径

では低荷重でコンクリートの割裂き破壊⁷⁾が生じ、大きいコンクリートフーチング内に埋め込まれた棒鋼の付着特性を正しく反映できないと考えたからである。なお、异形鉄筋について、鉄筋の降伏点近傍での軸ひずみの付着への影響に関する議論があり^{8),9)}、异形棒鋼の付着特性の定量的な把握に対してもこの点を検討することは重要と考えられる。しかしながら、先に述べたように今回の研究の主眼は异形棒鋼の節突起とスタッドとの協同作用に対する定性的な検討にあり、また実験での棒鋼軸ひずみも降伏点よりかなり低い範囲に限られている。したがって、この影響についてはここでは考えない。

立方体型供試体に埋め込まれる供試棒鋼としては表-1のものを用いる。表中 ADSH 51 シリーズはスタッド付き异形棒鋼の付着特性に対するスタッドピッチの影響を検討するものであり、35 mm ピッチでスタッド 12 本を用いる場合を図-3 (b) に示す。ADH 51, AUSH 51 はそれぞれ异形棒鋼の節突起とスタッド単独による付着特性を把握するものであり、ADSH シリーズとの比較により節突起とスタッドとの付着特性における協同作用を評価する。ここに、AUSH 51 は図-1に示す异形棒鋼 AD 51 の節突起を除いたもの (AR 51) に既製のアンボンド処理ワックスを棒鋼表面に塗布することでアンボンド処理を施し平坦面中央の対面する位置に図-2に示すようにスタッドを一對溶植したものである。なお、ADSH 51-1~3 のスタッドピッチとしては、実際に用いられる範囲でかつ上下段のスタッドの位置を固定するこ

表-2 スタッドの協同作用検討用供試体の材料定数

コンクリート	圧縮強度：300kgf/cm ² 引張強度：24.6kgf/cm ² 弾性係数：2.62×10 ⁵ kgf/cm ² ポアソン比：0.19 粗骨材最大寸法：25mm
スタッド 6×50mm	降伏強度：33.4kgf/cm ² 引張強度：46.5kgf/cm ² ，伸び：28.5%
棒鋼(SM50)	降伏強度：28.1kgf/cm ² 引張強度：54.3kgf/cm ²

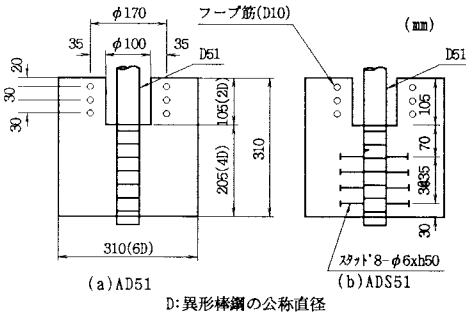


図-4 JIS 原案の立方体型供試体 (J)

とを前提に可能な3種類のものを選択する。本供試体の各材料定数についてはまとめて表-2に示す。ここで、コンクリートの打込みは実際の場合と一致させるために、異形棒鋼を鉛直に立てて行った^{16), 21)}。

供試体への加力は通常棒鋼の片側に荷重を与える「引き抜き」載荷で行われるが、この場合付着応力分布は載荷荷重の小さい段階では一様とならず、材料特性と考えられる付着特性を調べる試験としては必ずしも適当ではない。したがって、ここでは供試体内での付着応力分布をより一様にするため、コンクリートの打込みと反対方向に棒鋼の両端に絶対値の等しい荷重を与える「押し引き」載荷で行った。

(2) 拘束力下の付着実験

拘束応力下の異形棒鋼の付着試験を実施した例は必ずしも多くないが、Untrauer-Henry²²⁾、Robins-Standish²³⁾、長友-角²⁴⁾らのものが挙げられる。これらの研究では、いずれも箱型供試体の一方からの側圧を加えて側圧ならびに側圧載荷板とコンクリート界面の拘束により、供試体に拘束力を与えるもので、実験方法としては比較的簡単である。しかしながら、Robins-Standishが指摘しているようにこの方法では、側圧載荷板とコンクリート界面に生ずる拘束力の付着特性に対する影響が大きいいため、全体の拘束力と付着特性の関係を定量的に把握するのは難しい。このように従来の実験には問題点はあるものの、本研究はスタッド付き異形棒鋼に関する周辺拘束力と付着特性の定性的な関係を検討することを主目的としていることと、この実験法の簡便さと既知データの存在などを考慮にいて、ここでは従来の実験方法を採用

表-3 拘束力下での付着試験用供試棒鋼の種類

供試体	仕様
AD51	図1に示す異形棒鋼
ADS51	同上にスタッドを35mm間隔で8本設置
AR51	図2に示す平坦面を有する丸鋼(φ51)
ARS51	同上にスタッドを35mm間隔で8本設置

表-4 拘束力下でのスタッド付異形棒鋼の付着試験用供試体の材料定数

コンクリート	圧縮強度：286kgf/cm ² 引張強度：28.1kgf/cm ² 弾性係数：2.58×10 ⁵ kgf/cm ² ポアソン比：0.16 粗骨材最大寸法：25mm
スタッド 6×50mm	降伏強度：58.9kgf/cm ² 引張強度：66.3kgf/cm ² ，伸び：14.8%
棒鋼(S45C)	降伏強度：53.3kgf/cm ² 引張強度：82.8kgf/cm ²

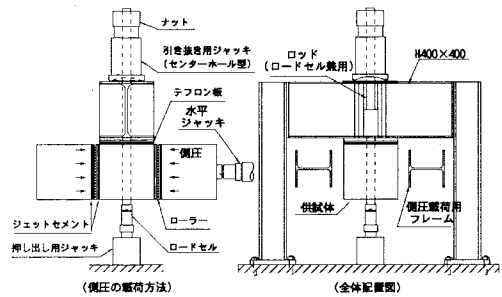


図-5 供試体の載荷方法

する。

供試体として(1)で述べたフープ筋で補強したものをを用いると、側圧がフープ筋に分担され、棒鋼表面に作用しない可能性がある。したがって、本実験では(1)の供試体と異なりアンボンド部を除きフープ筋で補強しない図-4のJIS原案の供試体(J)²⁰⁾を用いる。立方体型供試体に埋め込まれる供試棒鋼としては、表-3のものを用いる。異形棒鋼に取り付けるスタッドとしては、将来アンカーボルトとして使用する太径異形棒鋼の材質が50キロ鋼、直径が120~150mmの範囲と想定されたこと、スタッド軸径として道示の規定から19, 20mmと予想されたことおよび、従来の設計法で決まるフープ筋厚さを変えないという条件を前提に、実用的で使用頻度が高いスタッドピッチ・スタッド径比を選択した。これらを基にADS51は異形棒鋼にスタッドを35mmピッチで8本取り付けしている。また、AD51, AR51は、それぞれ異形棒鋼と異形棒鋼と同様の平坦面を持つ丸鋼単体で、ARS51はこの丸鋼の平坦面にADS51と同じ要領でスタッドを取り付けたものである。これらは、ADS51との比較において組合せ応力下での節突起とスタッドの付着特性における協同作用を評価するためのものである。また、ARS51については直接定着方式で用

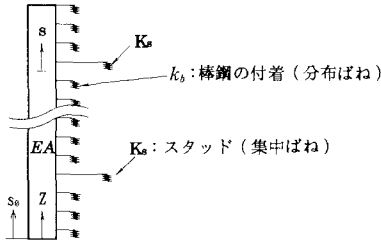


図-6 スタッド付き棒鋼の力学モデル

いることが考え得るアンカーボルトのもう一つの形式でもあることから、ここではその付着特性についても検討する。

本供試体の製作方法は(1)の供試体と同様で各材料定数については表-4にとりまとめている。

組合せ荷重は図-5の治具を用い载荷する。棒鋼への加力は、(1)と同様の理由から「押し引き」载荷を用いる。側圧の大きさについては、フーチングコンクリートの平均的な許容圧縮応力度を若干越える $\sigma_{ca}=100 \text{ kgf/cm}^2$ を上限にその50%および引張り側圧として -5 kgf/cm^2 を考慮した。加力については、図-5の水平ジャッキを用い、側圧を一定に保つように調節を行うとともに、載荷面にはローラを設置し、拘束力が鉛直方向に作用しないように配慮している。ただ、引張り側圧については、基本的には文献24)と同様の方法で供試体側面の載荷板に長さ100mmの异形鉄筋D13を25本取り付け、异形鉄筋の付着力を用いて引張り側圧を载荷した。側圧は一方から作用させるが异形棒鋼の場合、図-1に示すように断面形状に方向性がある。したがって、両極端の場合の付着特性を把握する目的からスタッドを取り付ける平坦面と平坦面に対して90°回転した節突起面を側圧載荷面を選ぶ。また、スタッドを取り付けた場合にはスタッド取り付け面のみを側圧載荷面とした。

4. 実験結果および考察

(1) 付着に対する异形棒鋼節突起とスタッドとの協同作用

a) 「付着ばねの累加」と「最大付着応力の累加」の定義

异形棒鋼にスタッドを取り付けた場合の節突起とスタッドの協同作用において、両者を単独に用いた場合の付着に対する効果をどの程度累加できるかということは設計上重要であり、この観点から主に検討を行う。これに先立ち、以下の本文で用いる「付着ばねの累加」および「最大付着応力の累加」について定義しておく。

异形棒鋼節突起とスタッドの付着ばねの累加を定義する力学モデルとして図-6のようなものを導入する。図中、 k_b は异形棒鋼節突起の付着特性を表す非線形特性

を有する分布ばねで、 K_s は棒鋼長手方向の同位置に対面して溶植される2本のスタッドを表す非線形特性を有する集中ばねである。これらのばねは、作用付着下の棒鋼あるいはスタッドとコンクリート界面のすべり、ならびにコンクリートの変形を含めた剛性を表すもので基本的には文献24)と同様のものである。なお、界面のずれと、コンクリートの変形を分離し、より現象に即して考えるモデル化^{25),26)}もあるが、それぞれのばね定数の適正な評価が難しく主として実験的なアプローチを用いる場合には、今回のようなモデル化の方が適していると考えられる。 k_b 、 K_s を用いると异形棒鋼に作用する付着応力 τ およびスタッドでの集中付着力 T と棒鋼の軸方向変位 s との関係は次のようになる。

$$\tau\pi D = k_b(s) \cdot s \quad T = K_s(s) \cdot s \dots\dots\dots (1a, b)$$

ここに、 $k_b(s)$ 、 $K_s(s)$ は s の関数であることを示す。また、 D は异形棒鋼の公称直径である。

このモデルにより、付着ばねが累加可能であるということは、 k_b および K_s がそれぞれ异形棒鋼のみの付着試験体(ADH 51)およびアンボンド処理をした丸鋼の中央部に一對のスタッドを溶植した付着試験体(AUSH 51-2)から独立に評価し得ることを意味する。

他方、最大付着応力の累加が可能であるということは、异形棒鋼(ADH 51)とアンボンド処理をしたスタッド付き丸鋼の試験体(AUSH 51-2)より得られる個々の最大付着応力の単なる和としてスタッド付き异形棒鋼の最大付着応力が表せることを意味する。

累加できないということは、异形棒鋼にスタッドを取り付けた場合、節突起とスタッドの両者の相互作用で、ばね剛性、最大付着応力に関して低減が生ずることを意味する。

b) 付着ばねの累加特性

まず k_b 、 K_s の特性を τ - s および T - s の関係としてとらえ、それぞれをADH 51、AUSH 51-2に関する付着試験から求める。异形棒鋼のみの供試体(ADH 51)の場合、 k_b は長手方向に一樣であるという仮定を導入すると、載荷荷重 F と棒鋼下端変位 s_0 の関係は補遺に示す手続きを経て次のように表される。

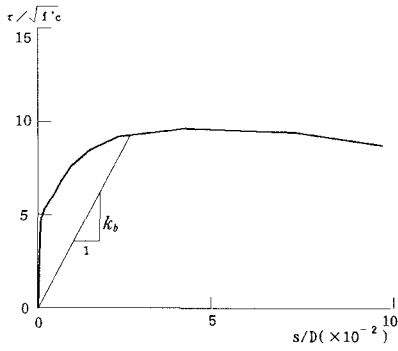
$$s_0 = F \left\{ \frac{1 + \cosh(\sqrt{k_b/EA}l)}{2EA\sqrt{k_b/EA} \sinh(\sqrt{k_b/EA}l)} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

一方スタッドのみの供試体(AUSH 51-2)の場合、棒鋼とコンクリートの付着は無く、棒鋼の中央($z = \frac{l}{2}$)に定数 K_s の集中ばねが配置されたモデルとなるため容易に次の関係が得られる。

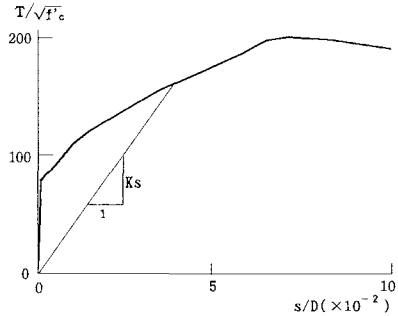
$$s_0 = F \left(\frac{1}{K_s} + \frac{l}{4EA} \right) \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 EA は棒鋼の軸方向の剛性を示す。

各実験より求まる F - s_0 の関係から式(2)、(3)を



(a) 異形棒鋼節突起の分布付着ばね特性



(b) スタッドの集中ばね特性

図-7 異形棒鋼節突起とスタッドの付着ばね特性

表-5 供試体 (H) での最大付着応力の累加特性

供試体	実験値	付着ばねの累加	最大付着応力の累加
ADSH51-1	1	1.05	1.05
ADSH51-2	1	1.02	1.02
ADSH51-3	1	1.00	1.02

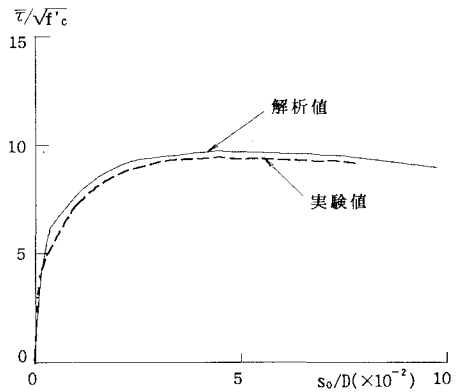


図-8 ADH 51 の平均付着応力-棒鋼下端変位

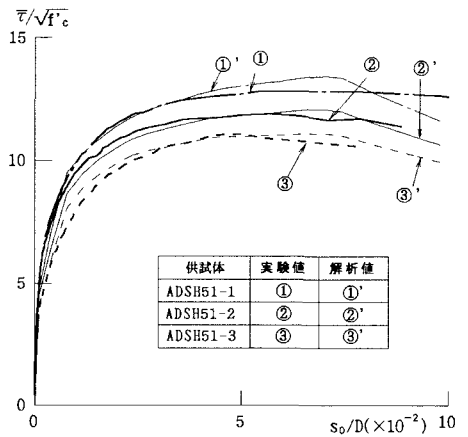


図-9 ADSH 51 の平均付着応力-棒鋼下端変位

用いて k_b , K_s を逆算し, 付着応力 τ および集中付着力 T をコンクリート圧縮強度 f_c の平方根で正規化した $\tau/\sqrt{f_c}$, $T/\sqrt{f_c}$ と変位 s を棒鋼の公称直径 D で無次元化した s/D とを用い $\tau/\sqrt{f_c} - s/D$, $T/\sqrt{f_c} - s/D$ の関係として付着特性を表現すると図-7になる. ここで付着応力を $\sqrt{f_c}$ で正規化するのは ACI の規定によりコンクリートの強度の影響を除くためである²⁷⁾. 以下の図では全てこのような正規化した付着応力と無次元化した変位を用いて表現する. k_b , K_s の算定では, 各実験で得られた載荷荷重 F と棒鋼下端変位 s_0 の関係を表す $F-s_0$ 曲線上に代表点をそれぞれ 11, 14 点とり, この点で k_b , K_s の値を式 (2), (3) を用いて正確に計算し, 代表点の間は線形補間を行った. k_b を求める際, 上述したように長手方向に一樣という仮定を導入したが, 厳密には k_b が長手方向に変化する. したがって, この仮定を用いて求めた図-7 の k_b の妥当性を検討するために, 図-6 のモデルで長手方向への k_b の変化を考慮して ADH 51 の実験を解析した. このとき棒鋼埋め込み部を有限要素に分割し, 各要素内では k_b は一定とした. こ

こでは解の収束性を考慮し常に十分な分割数として 200 の一様要素分割を採用した. 結果を載荷荷重 F を棒鋼の埋め込み部の公称周面積で除した平均付着応力 $\bar{\tau}$ と棒鋼下端変位 s_0 の関係として図-8 に示すが, 実験値と解析値はよく一致しており, ばね k_b の評価の仮定に問題はないものと考えられる.

付着ばねの累加の可否は次のようにして検討する. すなわち, ADSH 51-1~3 に対し, 図-7 の特性を持つばね k_b , K_s を直接図-6 に用い, いわゆるばねの累加を仮定したモデルを設定する. このモデルによる解析値と実験値を比較することで付着ばねの累加の可能性を調べる. このとき, k_b の長手方向への変化を考慮するため ADH 51 の解析と同様, 埋め込み部を 200 に要素分割した. 図-9 には棒鋼下端変位 s_0 と平均付着応力 $\bar{\tau}$ の関係について, 付着ばねの累加が可能であると仮定した解析と実験値を比較する形で示す. これからわかるように, 解析値と実験値とはいずれも良く一致しており, 本検討の範囲のスタッドピッチにおいては, 「付着ばねの累加」ができると言える. さらに, 図-10 にはスタッド位置

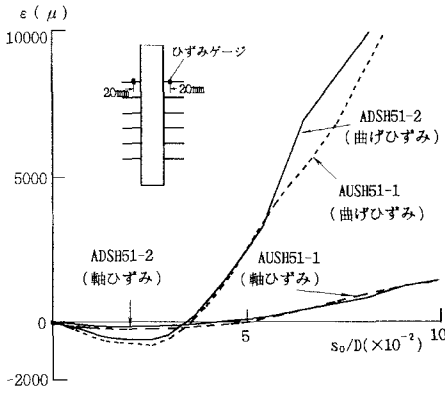


図-10 スタッドのひずみと変位

での棒鋼ずれ変位とスタッド実測応力との関係を異形棒鋼にスタッドを取り付けた場合 (ADSH 51-2) ならびにアンボンド処理した丸鋼に取り付けたスタッドのみの場合 (AUSH 51-1) について表示しているが、いずれも同様の挙動を示している。したがって、この事実からもスタッドと異形棒鋼節突起間の相互作用はほぼなく、ばねの累加の可能性が検証できる。これは異形棒鋼の場合、節突起とスタッドとが図-1 の様にほぼ 90° の角度をなす異なった平面に存在しているため、相互作用が小さいことによると考えられる。

c) 最大付着応力の累加特性

表-5 は、最大付着応力の実験値を 1 とした場合、「付着ばねの累加」、「最大付着応力の累加」を仮定した場合の値を示している。これより、最大付着応力の累加を仮定した場合も付着ばねの累加を仮定した場合ならびに実験値とほぼ一致しており、このような単純な累加でスタッド付き異形棒鋼の最大付着応力の評価ができることになる。最大付着応力の累加が可能な理由としては先に述べたようにスタッドと異形棒鋼節突起の相互作用が小さいことと図-7 のばね特性に見られるように、スタッドの集中ばね特性と異形棒鋼の分布ばね特性に極端な差がないことによると考えられる。

(2) 拘束力下での付着特性

a) 異形棒鋼および丸鋼

側圧を負荷することによる周辺拘束で鉄筋の付着特性が向上するのは良く知られた事実であるが^{22)~24)}、ここでは、周辺拘束がスタッド付き異形棒鋼の付着特性にどのような影響を与えるかを検討する。

まず、棒鋼の付着に関する基本的な周辺拘束の影響を検討することと、既存の鉄筋に関する同様の実験結果と比較し本実験の妥当性を検証することを目的として、スタッドを取り付けない異形棒鋼と節突起を除いた平坦面付き丸鋼の拘束力下での付着挙動について調べる。異形棒鋼と丸鋼に対し、実験結果から得られた平均付着応力

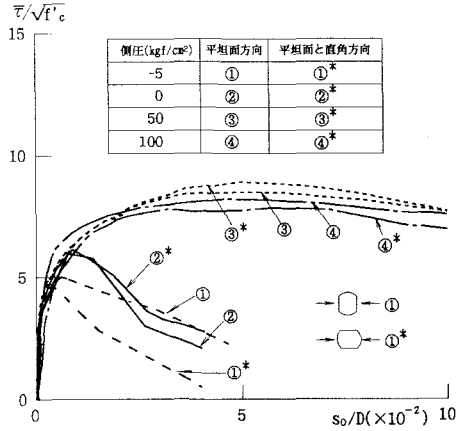


図-11 異形棒鋼 (AD 51) の各側圧下における平均付着応力-棒鋼下端変位

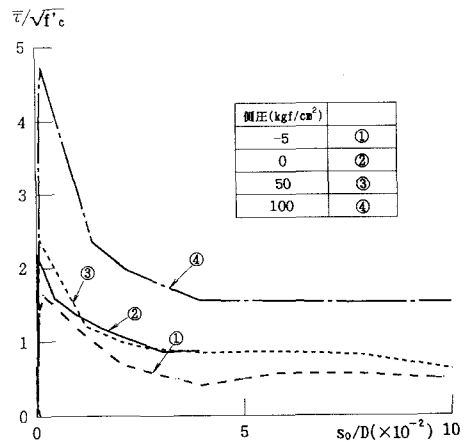
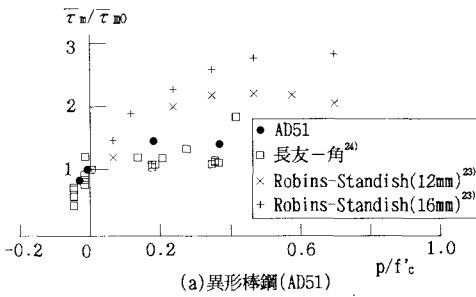


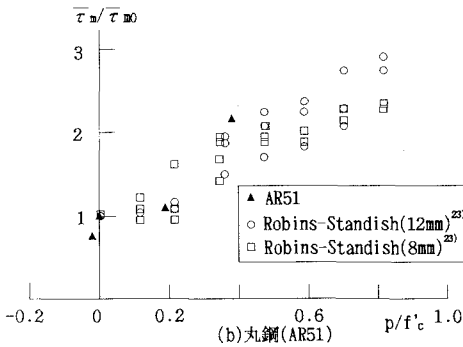
図-12 丸鋼 (AR 51) の各側圧下における平均付着応力-棒鋼下端変位

と棒鋼下端変位 s_0 の関係を側圧をパラメーターとして、図-11, 12 に示している。

図-11 より本異形棒鋼の場合、断面形状には方向性があるが、側圧の荷重方向にほとんど有意な影響を受けていないことがわかる。また引張側圧から圧縮側圧に変化すると、いずれも破壊性状に大きな変化が生じている。すなわち、破壊性状が割裂きによる脆性破壊から節間せん断破壊に移行して付着強度ならびに変形能に大きな向上がみられる。ただ、50 kgf/cm² 以上の側圧に対する付着特性の変化はほとんどない。また、コンクリートの割裂き破壊が生ずるまでは、その付着挙動は側圧荷重面ならびに側圧の大きさによらずほぼ一定であった。これは、異形棒鋼の場合の圧縮側圧による付着特性の向上が棒鋼表面の接着 (adhesion) ならびに摩擦抵抗の上昇によるのではなく、主として拘束力によるコンクリートの割裂き荷重の増大に起因しているとする文献²³⁾の結果とも一致している。



(a) 異形棒鋼 (AD51)



(b) 丸鋼 (AR51)

図-13 側圧と最大付着応力

一方、丸鋼の場合は側圧の変化に伴う破壊性状の変化はなく、すべて接着の破壊後は摩擦による付着へ移行し割裂き破壊は生じない。この場合、図-12に示すように付着強度、接着破壊後の摩擦強度はいずれも 100 kgf/cm^2 の側圧まではこの側圧とともに増大しているが、変形能については、異形棒鋼のような向上は認められず、いずれもほぼ脆性的な破壊様式となっている。図-13 (a), (b) は側圧と最大付着応力の関係に注目して、異形棒鋼と丸鋼に関する今回の実験結果を従来の実験結果と比較したものである。ここに、異形棒鋼および丸鋼に対し側圧 p のもとでの最大付着応力 $\bar{\tau}_m$ を、それぞれコンクリートの圧縮強度 f'_c と側圧零での最大付着応力 $\bar{\tau}_{m0}$ で無次元化することによって表示している。この図からわかるように、今回の実験と従来の実験とは定性的には同様の傾向を示している。すなわち、異形棒鋼、丸鋼とも側圧を増加させていくと $\bar{\tau}_m$ は上昇するが、異形棒鋼の場合は丸鋼に比べ小さい側圧でピーク値に達し、それ以降はやや低下する傾向を示している。実験は行われていないが側圧 p をさらに増加させると棒鋼表面付近でコンクリートは圧壊を始め強度は零に近づき、異形棒鋼および丸鋼の最大付着応力も減少し、最終的にはほぼ零に近づくものと考えられる。

以上のように、従来の実験結果および知見と比較しても、本実験結果と矛盾したものはみられず、実験の妥当性が確認できる。

b) スタッ付き異形棒鋼および丸鋼

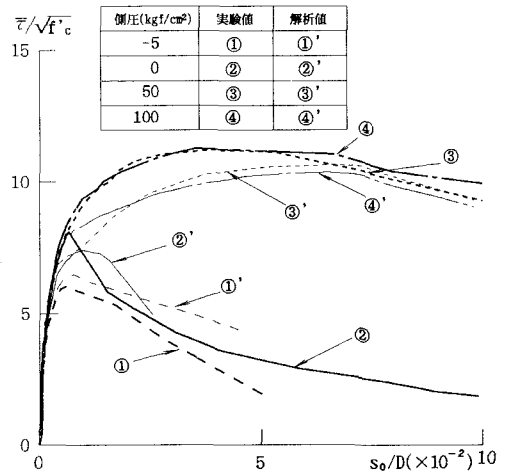
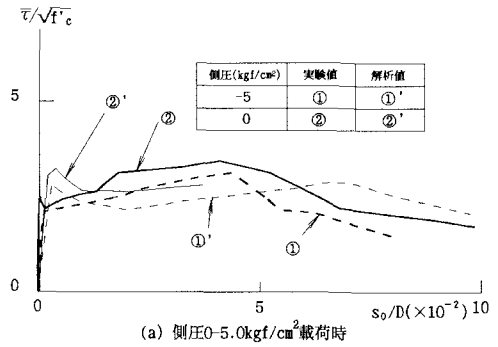
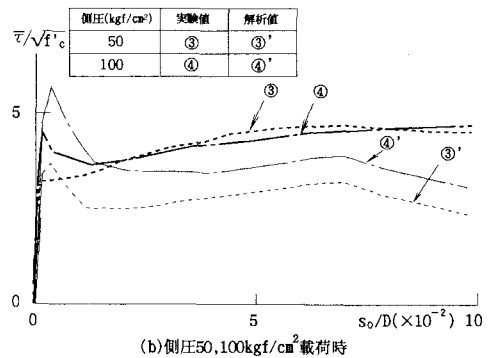


図-14 スタッ付き異形棒鋼 (ADS 51) の各側圧下における平均付着応力-棒鋼下端変位



(a) 側圧0-5.0kgf/cm² 載荷時



(b) 側圧50, 100kgf/cm² 載荷時

図-15 スタッ付き丸鋼 (ARS 51) の各側圧下における平均付着応力-棒鋼下端変位

上記のスタッを取り付けない場合の結果をもとに、異形棒鋼と丸鋼のおののにおにスタッを取り付けた場合の拘束力下での付着特性について調べる。図-11, 12と同様に、実験で得られた各側圧下の平均付着応力と棒鋼下端変位の関係を図-14, 15 (a) (b) に示す。図-14より異形棒鋼にスタッを取り付けた場合の付着特性は、これを取り付けない異形棒鋼と同様で、側圧が引

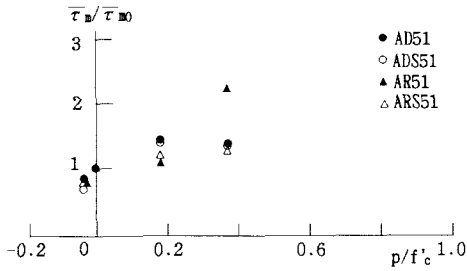


図-16 側圧と最大付着応力

表-6 各側圧下での最大付着応力の累加特性

供試体	側圧 (kgf/cm ²)	実験値	付着ばねの累加	最大付着応力の累加
丸鋼 ARS51	-5	1	0.95	1.28
	0	1	0.82	1.15
	50	1	0.79	1.01
	100	1	1.21	1.49
異形棒鋼 ADS51	-5	1	1.08	1.23
	0	1	0.90	1.02
	50	1	0.93	0.95
	100	1	0.92	0.94

張りから圧縮に変化すると破壊性状が割裂き破壊から節間せん断破壊に移行し、付着強度・変形能の向上が認められる。このときスタッドを取り付けた効果として、最大付着応力の上昇は見られるものの、割裂き破壊時の脆性的な挙動の改善はほとんどない。一方、丸鋼の場合は、図-15(a)(b)に示すようにスタッドを取り付けたことで、付着特性、特に変形能が大幅に向上しており、この傾向は拘束力が大きいほど著しい。破壊性状も丸鋼のみの場合と異なり、圧縮側圧が作用しない場合は、スタッドによりコンクリートの割裂き破壊が生ずる。側圧と最大付着応力の関係がスタッドの有無によりどのように変化するかを図-13と同じ要領で示したのが図-16である。これによると、スタッドを取り付けることで、丸鋼の場合側圧に対する付着特性が大きく変化するのに対し、異形棒鋼の場合はほとんど変化しないことが明瞭に理解できる。

これら拘束下の付着挙動に対する実験結果を節突起とスタッドとの協同作用の点から詳細に検討する。拘束下の節突起とスタッドの付着ばねの累加の可能性を見るために、(1)と同様に図-6のモデルにより解析した。ここで付着ばね k_b は図-11, 12に示す各側圧下の異形棒鋼および丸鋼のみの実験結果より評価し、スタッドのばね K_s は側圧の影響が小さいと考えられるので図-7に示すものを用いた。結果は先に示した図-14, 15(a), (b)に併記した。また表-6には「付着ばねの累加」と「最大付着応力の累加」を仮定した解析値と実験値とを比較する形で示した。

まず異形棒鋼にスタッドを取り付けた場合について

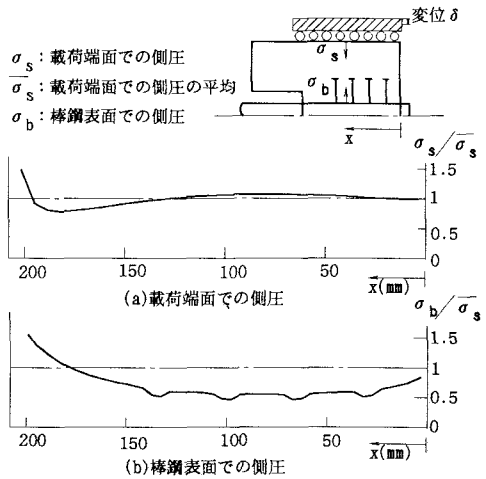


図-17 載荷端面と棒鋼表面での側圧分布の比較

は、図-14より実験を行った側圧の範囲ではほぼばねの累加は可能であると結論できる。さらに最大付着応力の累加についても表-6より引張り側圧が作用し、異形棒鋼の付着特性が図-11に示すように脆性的になる場合を除いて可能である。これらの理由については、すでに(1)で説明したとおりである。

一方、丸鋼にスタッドを取り付けた場合については図-15, 表-6よりばねの累加および最大付着応力の累加はいずれも困難であることがわかる。これは、丸鋼の場合、圧縮側圧による付着特性の向上は主として、棒鋼表面の接着ならびに摩擦抵抗の増大によるものであるが、スタッド溶植面に側圧を作用させた場合、側圧の無視できない部分がスタッドに分担され、棒鋼表面が受ける実質的な側圧と載荷面での側圧とに差が生じるためであると考えられる。図-17は載荷面に同一変位を与えた場合の側圧分布の様子を平面モデルを用いて弾性解析した結果を示したものである。この例では載荷側圧の30%程度はスタッドに分担され棒鋼表面での側圧が低下していることがわかる。また、最大付着応力の累加ができない大きな理由としては、図-12と図-7(b)の比較でわかるように、丸鋼とスタッドとの付着応力-ずれ変位の特性が大きく異なること、特にそれぞれのピーク値を与えるずれ変位が大きく異なるためと考えられる。

5. まとめ

異形棒鋼の場合、太径化すると棒鋼一本当たりについて、その引張強度の増加に比べ付着強度の増加が小さいため、棒鋼の引張り力を有効に利用するには、何らかの補助手段により付着強度を上昇させることが必要になる場合がある。ここでは、異形棒鋼を周辺拘束の大きいフーチングコンクリート内に用いる場合を対象に、異形棒鋼

にスタッドを溶植することで付着強度を向上させる手法を取り上げ、異形棒鋼節突起とスタッドの協同作用を中心に付着特性の検討を行った。得られた結果をまとめると以下ようになる。

(1) 付着挙動において、異形棒鋼節突起およびスタッドは非線形特性を持つ付着ばねとしてモデル化できる。このとき、スタッド付き異形棒鋼の付着特性は、通常考え得る周辺拘束力下の範囲では、スタッドと節突起それぞれのばね特性を累加することで評価される。つまり、異形棒鋼節突起の付着ばねとスタッドの付着ばねの累加は可能である。これは、異形棒鋼において節突起とスタッドが約90°をなす異なった面に存在しているため、その相互作用が小さいことに起因していると考えられる。

(2) スタッド付き異形棒鋼の最大付着応力についてもスタッドと異形棒鋼の最大付着応力を単に累加することによってほぼ評価し得る。これは、(1)で述べた異形棒鋼節突起とスタッドの相互作用が小さいことと、両者の付着に対する変形特性において極端な差がないことによると考えられる。

(3) 側圧を作用させることにより周辺コンクリートの拘束度を上げると、コンクリートの割裂き破壊強度が上昇し、異形棒鋼の付着強度・変形能などの付着特性が向上する。同様の傾向はスタッド付き異形棒鋼にも認められる。ただ、ある限度以上の側圧に対しては付着特性は向上しない。さらに側圧を上昇させると付着特性は逆に低下する傾向にある。

(4) スタッド付き丸鋼の場合、異形棒鋼と異なり、周辺拘束の大きさによらず付着ばねおよび最大付着応力の累加はできない。まず、付着ばねの累加ができない理由としては次のように考えられる。丸鋼の付着機構は棒鋼表面でのコンクリートの接着および摩擦によるもので、棒鋼表面における側圧に大きな影響を受ける。したがって、スタッドを取り付けることで棒鋼表面での側圧分布がかなり変化し、結果として付着特性も変化することによると考えられる。最大付着応力の累加ができない理由としては上記付着ばねの累加ができない理由の他、変形能のあるスタッドに比べ丸鋼の付着に対する変形特性が側圧の大きさによらず極端に脆性的であるためと考えられる。

補遺：式(2)の誘導

図-6のモデルの微小区間のつり合いに棒鋼と式(1a)の付着の構成関係を代入することによって得られる基礎微分方程式は次のようになる。

$$EA \frac{d^2s}{dz^2} = k_b s \dots\dots\dots (A1)$$

ここに EA は棒鋼の軸方向の剛性を表す。

式(A1)を解き、下端(z=0)での押し引き載荷時の軸力

$$N = -\frac{F}{2}, \text{ および変位 } s = s_0 \text{ を代入すると}$$

$$s = s_0 \cosh \rho z - \frac{F}{2EA\rho} \sinh \rho z, \rho = \sqrt{\frac{k_b}{EA}} \dots\dots (A2 a, b)$$

これより、棒鋼の軸力 N は

$$N = EA \frac{ds}{dz} = s_0 EA \rho \sinh \rho z - \frac{F}{2} \cosh \rho z \dots\dots\dots (A3)$$

式(A3)に上端(z=l)での軸力 $N = \frac{F}{2}$ を代入し s₀ と F の関係を求めれば式(2)が得られる。

謝 辞

本研究を実施するうえで、ご援助、御指導をいただいた名古屋工業大学吉田彌智教授(現学長)、梅原秀哲教授、に深甚なる謝意を表す。また実験に関し多大な御協力を受けた住友金属工業(株)建設エンジニアリング事業本部 建設技術部の加藤敏氏、小林洋一氏はじめ関係各位に謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 名古屋高速道路公社：鋼構造物設計基準, pp.275~340, 1987年
- 2) 秋元泰輔・桜井 順・宮内博良：フーチングにおける鋼橋脚アンカー部の破壊機構と補強方法, 橋梁と基礎, Vol.19, No.10, pp.18~26, 1985.10
- 3) 池田尚治：極大径ねじふし鉄筋の使用による新しいコンクリート構造形式の研究, 第2回合成構造の活用に関するシンポジウム講演論文集, pp.15~20, 1989年9月。
- 4) 前野裕文・後藤芳顕・小畑 誠・松浦 聖・小林洋一：鋼製橋脚の新しい定着工法について, 第2回合成構造の活用に関するシンポジウム講演論文集, pp.403~410, 1989年9月。
- 5) 園分正胤・岡村 甫：太径鉄筋の使用に関する研究, 土木学会論文報告集 第202号, pp.103~113, 1972年6月。
- 6) 村田二郎・河合紘茲：引き抜き試験による異形鉄筋の付着強度に関する研究, 土木学会論文報告集, 第348号/V-1, pp.113~122, 1984年8月。
- 7) 森田司朗・角 徹三：太径異形鉄筋“D51”の付着割り裂き強度, コンクリート工学論文, Vol.16, No.10, pp.107~118, Oct.1978。
- 8) 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, 土木学会論文報告集, 第378号/V-6, pp.165~174, 1987年2月。
- 9) 山尾芳秀・周 礼良・二羽淳一郎：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, pp.219~228, 1984年3月。
- 10) 池田尚治・大町武司・森 章・山口隆裕：スタッドジベルによる鋼材とコンクリートとの応力の伝達について, 第3回コンクリート工学年次講演論文集, pp.321~324, 1981。
- 11) 園田恵一朗・堀川都志雄・鬼頭宏明・木曾収一朗：鋼

- 板・コンクリート合成床板のスタッドに働くせん断力と押し抜きせん断耐力, 土木学会論文報告集, 第404号／I-11, pp.249~258, 1989年4月.
- 12) Klingner, R.E. and Mendonca, J.A. : Shear Capacity of Short Anchor Bolts and Welded Studs : A Literature Review, *ACI Journal*, Vol.79, No.5, pp.339 ~ 349, Sept./Oct. 1982.
- 13) 平城弘一・松井繁之・福本啓士: 頭付きスタッドの強度評価式の誘導—静的強度評価式—, 構造工学論文集, Vol.35A, pp.1221~1232, 1989.3.
- 14) Ollgaard, J.G., Slutter, R.G. and Fisher, J.W. : Shear Strength of Stud Connectors in Lightweight and Normal-Weight Concrete, *AISC Engineering Journal*, Vol.8, No.2, pp.55~64, Apr. 1971.
- 15) Viest, I.M. : Investigation of Stud Shear Connectors for Composite Concrete and Steel T-beams. *ACI Journal*, Vol.27, No.8, pp.875~891, Apr. 1956.
- 16) 田島二郎・町田篤彦・大友 健: スタッドシャーコネクターによる鋼・コンクリート部材接合部の強度, 合成構造の活用に関するシンポジウム講演論文集, pp.137~144, 1986年9月.
- 17) 松井繁之・佐々木洋・福本啓士・梶川靖治: 走行荷重下における鋼板・コンクリート合成床版の疲労特性に関する研究, 構造工学論文集, Vol.34A, pp.409~420, 1988.3.
- 18) 大竹章夫・高田啓一: 突起付きH形鋼を用いた合成桁の疲労特性, コンクリート工学年次論文報告集, pp.519~524, 1987.
- 19) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説I・II, pp.284~285, 1990年2月.
- 20) 村田二郎: 引抜き試験による鉄筋とコンクリートの付着強度試験方法(案), *コンクリート工学*, Vol.23, No.3, pp.8~11, 1985.3.
- 21) 赤尾親助・栗田章光・平城弘一: 頭つきスタッドの押し抜き挙動に及ぼすコンクリートの打込み方向の影響, 土木学会論文報告集, 第380号／I-7, pp.311~320, 1987年4月.
- 22) Untrauer, R.E. and Henry, R.L. : Influence of Normal Pressure on Bond Strength, *ACI journal*, Vol.62, pp.577~585, May, 1965.
- 23) Robins, P.J. and Standish, I.G. : The influence of lateral pressure upon anchorage bond, *Magazine of Concrete Research*, Vol.36, No.129, pp.195~202, December, 1984.
- 24) 長友克寛・角 徹三: 横方向応力を受ける異形鉄筋の付着特性に関する実験的研究, 土木学会論文集, 第402号／V-10, pp.97~104, 1989.2.
- 25) 六車熙・森田司朗・富田幸次郎: 鋼とコンクリートの付着に関する基礎的研究I「付着応力分布について」(I)・(II), 日本建築学会論文報告集, 第131号, pp.1~8, 第132号, pp.1~6, 1967年1, 2月.
- 26) 池田尚治: 鉄筋コンクリート部材における鉄筋とコンクリートとの応力伝達に関する研究, 土木学会論文報告集, 第307号, pp.85~97, 1981.3.
- 27) ACI : *Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-89)*, 1989.

(1990.12.14 受付)

BONDING CHARACTERISTICS OF A VERY LARGE DEFORMED BAR WITH HEADED STUDS

Hirofumi MAENO, Yoshiaki GOTO, Makoto OBATA and Sei MATSUURA

Bonding characteristics of a very large deformed (VLD) bar (ϕ 100~180 mm) with headed studs on its surface were experimentally studied in view of its application to an anchor bolt for steel pier. All the experiments were carried out using an approximately 1/3-scale model bar with the size of ϕ 51. This bar was embedded in a cubic concrete similar to a proto-JIS standard type specimen. The results did not show any significant interaction between the rugs of VLD and headed studs in bonding behavior. Therefore, the bonding characteristics of a studded VLD can be easily evaluated as a sum when the respective bonding characteristics of rugs and headed studs are known.