

(61) 鋼製橋脚の新しい定着方法について

A NEW ANCHORAGE SYSTEM FOR STEEL PIERS

前野裕文* , 後藤芳顕** , 小畑 誠**

Hirofumi Maeno, Yoshiaki Goto, Makoto Obata

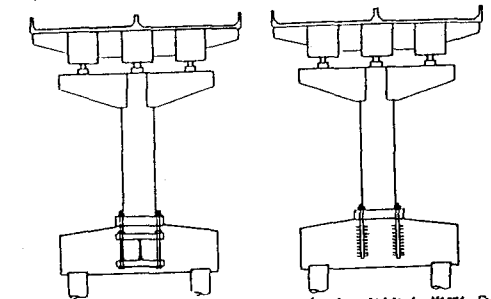
松浦 聖** , 小林洋一 ***

Sei Matsuura , Youichi Kobayashi

In spite of the advantages of steel piers, the current anchorage system of them has numbers of problems such as increasing welding works, complexity in design and difficulty in transportation in urban area. To circumvent the above problems, we proposed a new anchorage system. The new system embeds in the concrete footing very large deformed bars attached with studs, in stead of anchor beams. These deformed bars are used as anchor bolts. Thus, external forces are transferred to the footing by the bonding force of the deformed bars. Herein, to asses the fundamental characteristics of the bonding behavior, we carried out several experiments. As a result, it was known that the deformed bar with studs can yield enough bonding force to anchor the piers.

1. はじめに

都市内高架式道路橋の建設においては、限られた空間における柱の形状の制限、橋脚躯体の軽量化による基礎の小型化、ならびに施工スピードの向上による周辺交通の阻害回避等の必要性から、断面が小型、軽量、かつ基礎との現場接合の簡単な鋼製橋脚が採用される機会が多い。鋼製橋脚を用いる場合、従来の橋脚定着構造としては、図 1(a) のようにアンカービームと $\phi 100 \sim 180\text{mm}$ サイズのアンカーボルト、および仮設材で組み立てられたアンカーフレームをフーチング中に埋め込み、コンクリートフーチングが完成後、鋼製橋脚をアンカーボルトでねじ定着するアンカーフレーム方式が一般的である。アンカーフレーム方式では、アンカーボルトに作用する引き抜き力、および押し込み力は、アンカービームを介し支圧力としてフーチングコンクリートに伝達させる設計¹⁾を行なうため、フーチングコンクリート内での支圧面積の確保およびせん断抵抗面積の確保が必要となる。さらにアンカービームは十分な剛性と耐荷力を有するよう鋼板をリブ補強した溶接組立断面となっている。このため、従来の構造では、フーチング形状の大型化、厚板、高材質の使用、それに伴う溶接量増大等が避けられず、不経済となるばかりか、大型化による、輸送、架設上の問題も生じている。



(a) アンカーフレーム形式 (b) 直接定着形式
図1 アンカー形式

* : 名古屋高速道路公社 (名工大 博士後期課程) , ** : 名工大 社会開発工学科, *** : 住友金属

著者らは、上記の問題点を改善し、さらに設計をより合理的にすることを目的として、従来のアンカーフーム方式による定着構造を見直し、簡素化した図1 (b) に示す新しい構造を検討している。新しい構造は節突起を有する太径異形棒鋼を用い、アンカーボルトそのものの付着強度を有効に利用するとともに、十分な定着長がとれない場合には、スタッドジベル等の補助手段を棒鋼に設けることによりフーチング内に定着させる直接定着方式である。

本報告では異形棒鋼を用いた鋼製橋脚アンカー部の合理的構造、ならびにその設計を開発することを目的とした一連の研究のうち、アンカーボルトとして用いる異形棒鋼の付着力、および付着力向上の補助手段としてのスタッドジベルの効果を実験的に検討したので、その結果と実用化に向けての考察について述べる。

2. アンカーボルトの付着試験

1) 概要

異形棒鋼ならびにスタッドを用いたアンカーボルトの付着強度、変形特性を把握するために2種類の供試体を用いた実験を実施した。

一つはJIS原案²⁾による引抜き付着試験に用いる立方体型供試体で、これにより各種条件下の付着特性を詳細に調査した。まず、付着応力分布が付着特性に与える影響を調べるため、図2 (a) に示すJIS原案の「引き抜き試験」の他に、付着応力分布をできるだけ一樣になるように棒鋼の両端にそれぞれ絶対値が等しい押し引き荷重を加えた図2 (b) に示す「押し引き試験」も実施した。さらに実際の使用状況では棒鋼に正または負の側圧が作用することを考慮して、各レベルの側圧を加え付着特性に及ぼす影響についても調べた。ここでは、付着応力分布がより一樣になるように棒鋼への加力は「押し引き試験」によった。なお、実際の鋼製橋脚の定着用アンカーボルトには $\phi 100 \sim 180\text{mm}$ が用いられるが、以上の立方体型供試体で (a) 引き抜き試験 (b) 押し引き試験は、試験装置の制約と試験を容易にすることから、縮尺率約1/3 のD51に対応する小型異形棒鋼(AD51)を用いた。

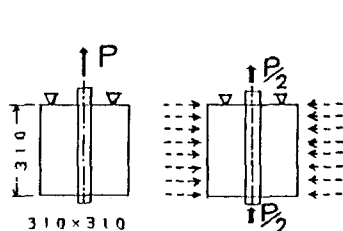


図2 立方体型供試体

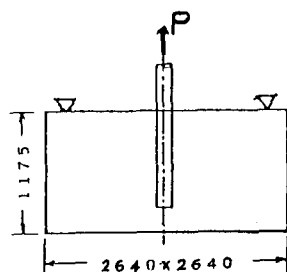
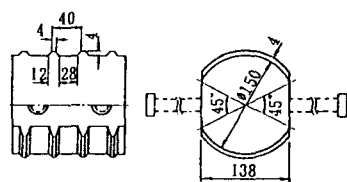


図3 フーチング型供試体

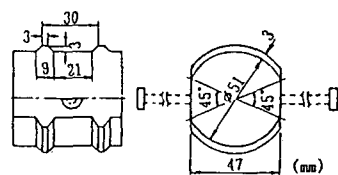
いま一つの試験は図3に示すフーチング型供試体を用いた「引き抜き付着試験」で実際の構造物の挙動に近い曲げを受けるフーチング内での付着特性を検討した。ここではAD51による縮尺率約1/3 の模型の他に、実大異形棒鋼AD150 (公称径150mm)による実験も実施し、太径化の影響も調べた。



大型異形棒鋼AD150の形状

2) 供試棒鋼の種類

アンカーボルトとして用いる棒鋼の付着特性を把握するために以下の棒鋼について実験を行なった。①図4に示す平坦面を持つ異形棒鋼³⁾ (ADシリーズ)、②図4の異形棒鋼の平坦面に同図において破線で示すスタッドを取り付けたもの(ADSシリーズ)、③異形棒鋼の突起の効果を把握する目的で丸鋼を使用したもの (ARシリーズ)。これら棒鋼の種類を表す記号の後に公称径 (mm) を記入することで、以下、棒鋼の寸法を区別するが、



小型異形棒鋼AD51の形状

図4 異形棒鋼

このような棒鋼の記号を含めて本論文で用いる主な記号についてはまとめて補遺に示している。

なお、実際の異形棒鋼は50～60キロ鋼程度の材質で製作する予定であるが、今回の実験では丸鋼(S45C)より削り出し機械加工によって製作した。

3) 実験方法

a) 立方体型供試体による「引き抜き」および「押し引き」試験

供試体はJIS原案によるもので図5に示すとおりである。コンクリートへの棒鋼の定着長は4d(d:棒鋼の公称径)で、上部に2dのアンボンド部を設けた6d×6dの立方体型供試体である。

棒鋼としては実大棒鋼の約1/3の縮尺率をもつD51に対応する小型異形棒鋼AD51を用いた。スタッドジベルについては、道路橋示方書⁴⁾を参考に定めた後で述べる実大棒鋼の約1/3の縮尺率をもつJSS8相当の6×50mmを用い、35mm間隔に片側4本計8本を異形棒鋼の両端の平坦面に取り付けた。

供試体のコンクリートは普通セメントを使用し、コンクリートは実際の場合と一致させるため異形棒鋼を鉛直に立て打設した。このときのコンクリート圧縮強度は平均286kgf/cm²であった。また比較のため棒鋼としてはAD51の他にADS51, AR51, についても試験を行なった。

加力は図6に示す治具を用い、「引き抜き」載荷ならびに「押し引き」載荷を行なった。このときの載荷は最大付着強度まで単調増加させ、その後、

変位制御により耐力低下傾向を観察した。側圧を負荷する場合には、これを一定に保つように水平ジャッキで調節を行ない、負荷面はローラーを設置し拘束力が働かないようにした。ただし、側圧負荷の場合は「押し引き」試験のみ行なった。

以下、特に立方体供試体の「引き抜き」試験を表すために記号Pを用いるが、この記号の使用法は補遺に述べている。

本実験での計測項目は1) 引き抜き荷重, 押し引き荷重, 2) 側圧, 3) 棒鋼埋め込み下端変位, 4) 棒鋼埋め込み上端変位, 5) フーチングの中央たわみ, 6) 棒鋼のひずみ, 7) ひび割れ進展状況(目視観察)である。

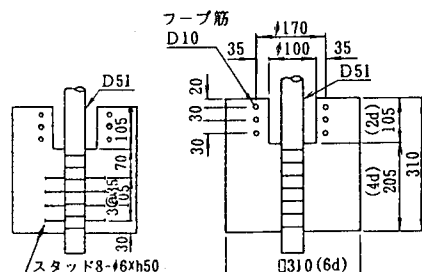


図5 立方体型供試体

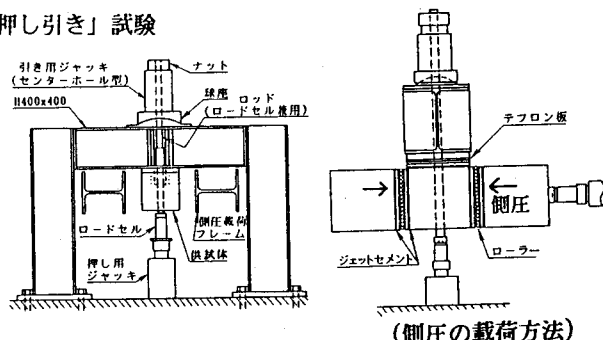


図6 立方体型供試体の載荷方法

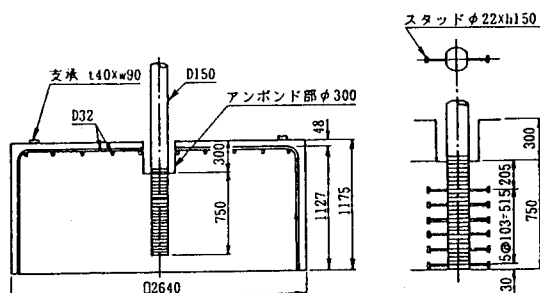


図7 フーチング型供試体

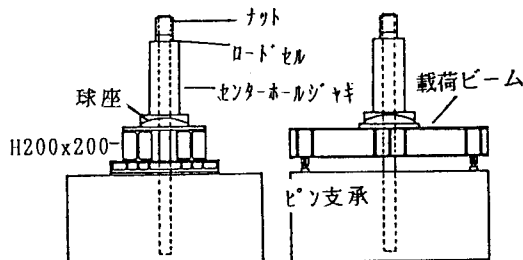


図8 フーチング型供試体の載荷方法

b) フーチング型供試体による「引き抜き」試験

供試体はフーチングコンクリートの部分模型に相当する。これは大型供試体と大型の1/3の小型供試体から成り立っており、大型供試体の寸法は図7に示すように2640mm×2640mm×1175mmである。棒鋼の実質定着長は、一般的な引き抜き試験の定着長が4～6dの範囲であることとジャッキの能力より5dとした。フーチングの寸法は、引き抜き載荷時のコーン破壊線より外側に支点を置くことにより決定した。さらに、上部には立方体型供試体同様2dのアンボンド部を設けた。

棒鋼として、大型供試体では実大構造を想定したAD150を用い、一方、縮尺率1/3の小型供試体ではAD51を用いた。スタッドジベルとしては道路橋示方書を参考に実大構造の場合は、22×150mmのものを103mm間隔で、片側6本、両側計12本取り付け付けた。小型供試体では立方体型供試体と同様の寸法間隔を用い、JSS8相当の6×50mmのスタッドを片側6本、両側で計12本取り付け付けた。

供試体のコンクリートには普通セメントを使用し打設方法も立方体型供試体と同様である。このときのコンクリート圧縮強度は、小型供試体においては289kgf/cm²で、実大供試体においては320kgf/cm²であった。

加力方法は図8に示す自己つり合型の治具を用い、単調引き抜き載荷を行った。計測項目は側圧を除き先に示した立方体型供試体と同様である。

以下、フーチング型供試体を表すため、記号Fを用いるが、この記号の使用法についても補遺に説明している。

3. 実験結果および考察

上記2で説明した供試体による実験から、以下の項目について考察を行なう。1) 載荷方法（「引き抜き」載荷、「押し引き」載荷）の差による付着応力分布が付着強度ならびに変形特性に及ぼす影響、2) 棒鋼に作用する側圧の付着強度への影響、3) 節突起およびスタッドジベル併用による合成効果、4) 「立方体型供試体」、「フーチング型供試体」のそれぞれの供試体形状による付着強度への影響、および5) 異形棒鋼の付着強度に対する太径化の影響。

なお、ここでは付着強度として初期付着強度 $\tau_{0.2}$ と最大付着強度 τ_u を用いる。また、これら付着強度を表すのに全荷重を定着部分の公称表面積で除した平均付着応力を採用する。

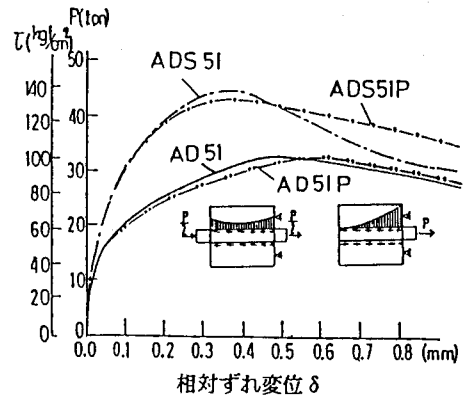


図9 載荷方法による棒鋼下端相対ずれ変位

注) P: 全荷重 τ : 平均付着応力

1) 載荷方法の影響

立方体型供試体に基づく初期付着強度 $\tau_{0.2}$ および、最大付着強度 τ_u を「引き抜き」載荷による結果と「押し引き」載荷の結果とを比較する形で表1に示す。これから明らかなように、いずれも載荷方法による影響は小さい。さらに、図9には、2通りの載荷方法による、荷重と棒鋼下端相対ずれ変位 δ の関係を示すが、載荷方法による影響はほとんどない。以上から、載荷方法による付着特性の差異は小さく、JIS原案の「引き抜き」載荷で付着力は十分評価し得ると言えよう。

2) 側圧の影響

側圧の棒鋼の付着に対する基本的な特性を知るために、まず比較基準として突起のない丸鋼(AR51)について考える。丸鋼に関して棒鋼下端相対ずれ変位と載荷荷重の関係を側圧をパラメーターとして図10にまとめ

表 1 載荷方法による異形棒鋼とスタッド付き異形棒鋼の付着強度 (側圧零)

棒鋼	径 (mm)	定着長さ (mm)	載荷方法	スタッド仕様	$\tau_{0.2}$	τ_u
AD51P	51	205	引き抜き	—	61	101
AD51	51	205	押し引き	—	65	103
ADS51P	51	205	引き抜き	$\phi 6 \times 50$ -8本	93	135
ADS51	51	205	押し引き	$\phi 6 \times 50$ -8本	95	139

(kgf/cm²)

ている。丸鋼の場合、表面での摩擦のみが付着力として働くので付着強度の値自体は小さいが、側圧が50kgf/cm²、100kgf/cm²と上昇するにしたがい、側圧がない場合に比べ付着強度はそれぞれ、約15%、120%と大きく増加している。この結果は文献5)とほぼ一致し、本実験の妥当性を示している。

次に節突起のある異形棒鋼(AD51)についての結果を図11に示す。この場合、付着力は摩擦力ではなく、主として節突起とコンクリートとの噛み合いにより与えられるためか、側圧による効果は丸鋼の場合ほど著しくはない。初期付着強度 $\tau_{0.2}$ と比較すると圧縮側圧の下でも強度増加は最大12%程度である。したがってこの範囲では側圧の影響は無視し得るといえよう。また、最大付着強度 τ_u についても表2に示すように、傾向は、初期付着強度とほぼ同様である。

さらに、節突起のある異形棒鋼にスタッドをとりつけたもの(ADS51)の結果を図12に示している。この場合にも、いわゆる付着力としては、節突起に加えてスタッドとコンクリートとの噛み合いが支配的となる。したがって、図12に見られるようにスタッドとコンクリートの噛み合いは圧縮側圧の影響を受けにくいため、初期付着強度での差は非常に小さい。しかしその一方で、最大付着強度 τ_u に対する側圧の影響は大きく、50kgf/cm²の圧縮側圧ではほぼ40%の付着力の増加が見られる。ただし、図11,12にみられるように、異形棒鋼はスタッドの有無にかかわらず、50kgf/cm²以上の圧縮側圧はもはや最大付着力の増加にほとんど寄与していない。

3) 節突起およびスタッド併用による合成効果

側圧が無い場合の立方体型供試体の荷重と棒鋼下端引き抜き相対変位 δ の初期の段階での関係を図13に示す。初期付着強度 $\tau_{0.2}$ はAR51が33kgf/cm²であるのに比べAD51が65kgf/cm²、ADS51が95kgf/cm²となり、それぞれ節突起とスタッドの併用の効果により約100%、190%増加する。最大付着強度 τ_u では丸鋼AR51の37kgf/cm²に対しAD51、ADS51がそれぞれ103kgf/cm²、139kgf/cm²となり、おのおの約80%、180%増加する。このように、丸鋼に比べ節突起をもつ異形棒鋼では付着強度がかなり増加するが、突起に

表2 側圧と付着強度

棒鋼	側圧	-5.0	0.0	50.0	100.0
AD51	付着強度				
	$\tau_{0.2}$	64	65	74	76
ADS51	τ_u	84	103	146	139
	$\tau_{0.2}$	76	95	90	86
AR51	τ_u	102	139	193	190
	$\tau_{0.2}$	27	33	38	38
	τ_u	28	37	40	79

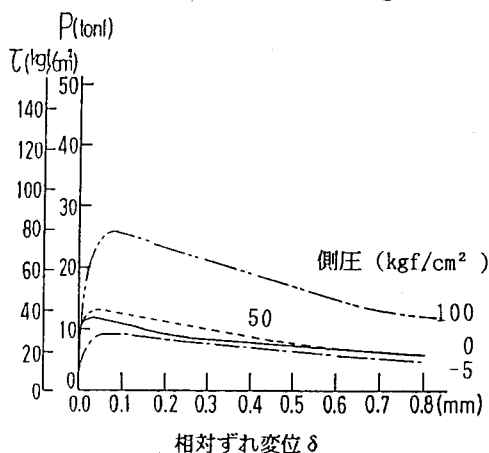
(kgf/cm²)

図10 側圧と丸鋼 (AR51) の荷重—棒鋼下端相対ずれ変位

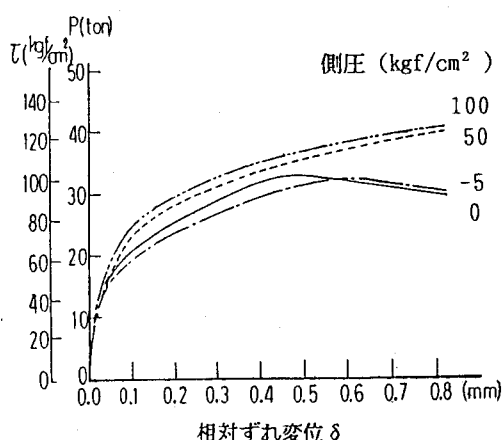


図11 側圧と異形棒鋼 (AD51) の荷重—棒鋼下端相対ずれ変位

くわえてスタッドを付加した場合スタッドとコンクリートの噛み合いによる初期および最大付着強度の増加はさらに著しく、異形棒鋼に比べ初期付着強度 $\tau_{0.2}$ で39kgf/cm²（約50%），最大付着強度 τ_u で36kgf/cm²（約30%）上昇する。しかしながら、スタッドを有する場合、節突起のみの場合に比べて、その最大荷重後の荷重低下は大きい。

4) 供試体形状の影響

より現実の荷重状態に近いフーチング型供試体では、「引き抜き」荷重においてディープビームとして挙動し、棒鋼に対する側圧が一定ではなく深さ方向に変化するため、その付着挙動は立方体型供試体におけるものとは異なると考えられる。ここでは、「引き抜き」荷重による立方体型供試体の実験結果に比べ、その付着特性がどのように変化するかを検討する。供試棒鋼にAD51,ADS51を用いたフーチング型供試体と立方体型供試体における荷重と棒鋼下端の相対ずれ変位を図14に示す。図14と表1、表3を参照すると、異形棒鋼のみの場合(AD51)，フーチング型供試体と立方体型供試体の初期付着強度 $\tau_{0.2}$ はそれぞれ77.3kgf/cm²，61kgf/cm²であり、最大付着強度 τ_u は116kgf/cm²，101kgf/cm²となっている。またスタッドつき異形棒鋼(ADS51)を用いたそれぞれの供試体に対応して、 $\tau_{0.2}$ は107kgf/cm²，93kgf/cm²であり、 τ_u では134kgf/cm²，135kgf/cm²となる。

以上の結果から、フーチング型供試体と立方体型供試体の $\tau_{0.2}$ と τ_u における比はAD51シリーズでは1.28,1.15で、ADS51シリーズでは1.15,0.99となる。これより初期付着強度で評価すればAD51，ADS51シリーズともにフーチング型供試体の付着強度は立方体型供試体に比べ約10%以上大きくなる。一方、最大付着強度はAD51シリーズで約15%大きくなるが、ADS51シリーズではほぼ同等である。したがって、初期付着強度 $\tau_{0.2}$ をもって設計上の付着強度とするならば、立方体型供試体を用いた「引き抜き」試験で付着強度を求めておけば、それは妥当な範囲で安全側の評価となるものと考えられる。

また、図14に示す荷重と棒鋼下端の相対ずれ変位から変形特性を見ると、立方体型供試体とフーチング型供試体ではほぼ同等の挙動を示しているが、立方体型供試体の方が、最大荷重到達後の荷重低下が大きい。これから、実際の構造物への適用を考える場合、立方体型供試体に対する試験で変形特性を把握しておけば、安全側の検討になるといえよう。

5) アンカーボルトの太径化の影響

前節までに示したように、アンカーボルトの付着特性の

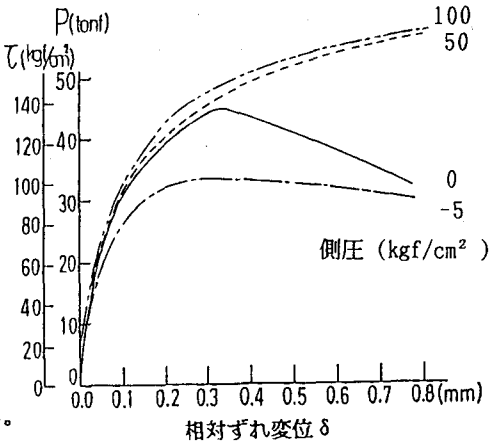


図12 側圧とスタッドつき異形棒鋼(ADS51)の荷重-棒鋼下端相対ずれ変位

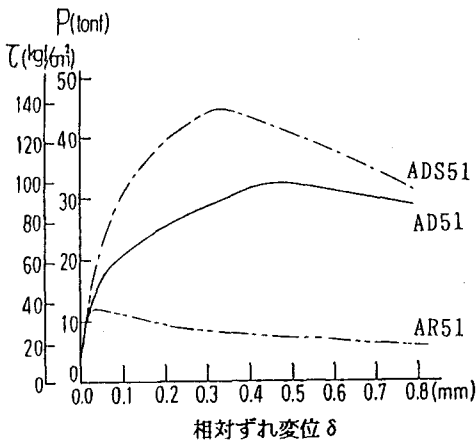


図13 各種棒鋼の荷重-棒鋼下端相対ずれ変位(側圧零)

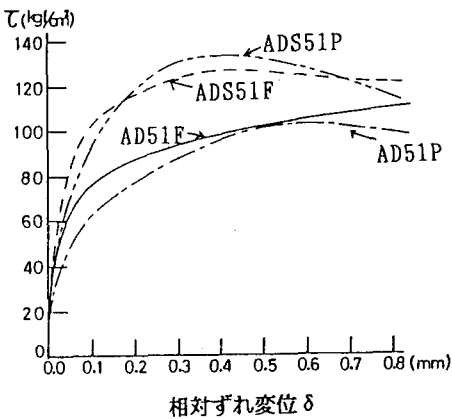


図14 供試体形状による差による荷重-変位関係

表3 棒鋼の付着強度

供試体	棒鋼	$\tau_{0.2}$	τ_u
小型	AD51F	77.3	116.1
供試体	ADS51F	107.0	128.4
AD51			(134)
φ51	AR51F	38.7	39.2
シリーズ			
大型	AD150F	74.0	101.0
供試体	ADS150F	96.0	104.1
AD150			(134)
シリーズ			

(kgf/cm²)

注) AD150F及びADS150Fは $\sigma_{ck} = 289 \text{ kgf/cm}^2$ とし補正した。

括弧内はコーン破壊を考慮したものである。

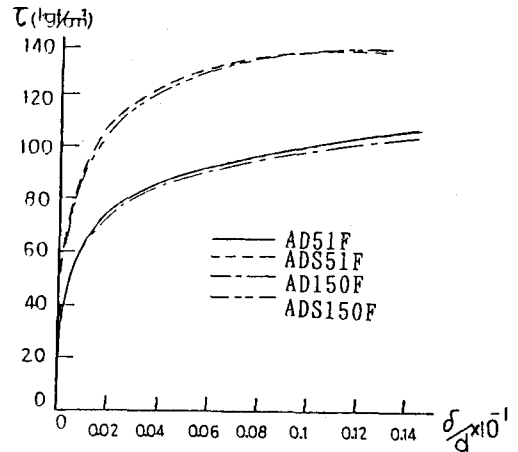


図15 平均付着応力-無次元化変位関係

検討には、実験の容易さから公称径51mmの棒鋼を用いた。しかしながら、実際のアンカーボルトはφ100～180mmであるため、太径化の影響を検証する必要がある。ここではより現実的なフーチング型供試体を用い、公称径150mmの棒鋼に対する実験から太径化の影響を検討する。

表3には、公称径150mmの各種棒鋼に対する初期付着強度 $\tau_{0.2}$ と最大付着強度 τ_u を公称径51mmの結果と比較する形で示している。なお、表3に示す150mmの太径棒鋼の結果は、付着強度がコンクリート強度の1/2乗に比例するとして⁶⁾、小型供試体のコンクリートを用いた場合の付着強度へ換算している。また、スタッド付き棒鋼では、最大荷重に到達する前に、棒鋼上部でコーン破壊が生じたため、それによる定着長の変化を付着強度算定時に考慮した。

表3より、スタッドのない異形棒鋼では、AD150はAD51に比べ、初期付着強度で約5%、最大付着強度で約13%低下しており、太径化により付着強度はいずれも若干低下する傾向を示す。一方、スタッドを併用した異形棒鋼では、太径化により初期付着強度では3%の低下はあるものの最大付着強度では低下は認められず、この場合太径化の影響はほとんどない。

また、変形特性に関しても、小型供試体(棒鋼径51mm)と大型供試体(棒鋼径150mm)の引き抜き荷重と棒鋼下端部変位の関係を平均付着応力と公称径で無次元化した棒鋼下端部相対ずれ変位を用いて整理すると図15のようになり両者の荷重・変位挙動に大差なく太径化の影響は現われない。

以上の結果から判断して、棒鋼径が51mmから150mmに増加することによる付着特性の変化は非常に小さく、小型供試体の結果を実大アンカーボルトへ適用しても、ほぼ問題がないと考えられる。

4. 実用化への検討

上記の結果より、たとえば50キロ鋼の異形アンカーボルトをコンクリート強度 210 kgf/cm^2 のフーチングへ定着長する場合を考える。アンカーボルトの全強(ここでは降伏耐力)を保証するためには異形棒鋼のみの場合14d、棒鋼ヘスタッドを配置すると10dの定着長となる。また今回の付着強度に対し通常の安全率を考慮すると定着長はそれぞれ25d、17dとなる。一般に鋼製橋脚のフーチング厚は3m～4m程度でありアンカーボルト径を150mmとすると20～26dの埋め込み長が確保できることになり十分に実用的な範囲にあることがわかる。

5. まとめ

アンカーボルトとして用いる太径異形棒鋼ならびにスタッドを併用した異形棒鋼の基礎的な付着力実験から得られた結果をまとめると次のようになる。

- (1) 「引き抜き」, 「押し引き」の両載荷方法により得られる初期付着強度ならびに最大付着強度に有意な差はない。
- (2) 棒鋼に作用する側圧の付着強度に対する影響は、摩擦力が付着力として卓越する場合は特に顕著であるが、節突起、スタッドとコンクリートとの噛み合いが付着力として作用する場合の影響は初期付着強度で考える限り十分小さい。
- (3) 異形棒鋼に今回の実験のようにスタッドを取り付けた場合、異形棒鋼のみに比べ初期付着強度は約50%の増加が期待できる。
- (4) より現実的なフーチング型供試体では、すべての場合で、立方体型供試体に比べやや大きめの付着強度ならびに、より安定した変形特性を示す。したがって、立方体型供試体の実験結果は一般に妥当な範囲で安全側の指標を与える。
- (5) 今回行なった51mm径と150mm径の棒鋼を用いた実験の範囲では、棒鋼の径、供試体の大きさによる、付着特性の変化は小さい。したがって、51mm径の小型棒鋼による実験で、実構造の付着特性を推定することが可能である。
- (6) 異形棒鋼ならびにスタッドを併用することによりアンカーボルトは鋼製橋脚定着のための十分な耐力を持つ。したがって、アンカーフレームを用いない本定着法の実用化は十分可能である。

今回の一連の基礎実験において太径異形棒鋼およびスタッド付き異形棒鋼の付着特性が明確になった。今後はアンカーボルトの相互作用の影響、必要アンボンド長、スタッド取り付け部の疲労特性および、フーチングの補強法の解明および理論解析を実施するとともに全体構造に関する破壊実験等により実用化に向けての検討を加えたい。

補遺

AD51 : 公称径51mmの異形棒鋼に対する、立方体型供試体による「押し引き」試験	ADSS1F (ADS150 F) : 公称径51mm (150mm) の異形棒鋼の平坦面にスタッド
AD51P : 公称径51mmの異形棒鋼に対する、立方体型供試体による「引き抜き」試験	を取り付けた棒鋼に対するフーチング型供試体による「引き抜き」試験
AD51F (AD150 F) : 公称径51mm (150mm) の異形棒鋼に対する、フーチング型	AR51: 直径51mmの丸鋼に対する、立方体型供試体による「押し引き」試験
供試体による「引き抜き」試験	AR51F: 直径51mmの丸鋼に対する、フーチング型供試体による「引き抜き」試験
ADSS1: 公称径51mmの異形棒鋼の平坦面にスタッドを取り付けた棒鋼に対する立方	d : 異形棒鋼の公称径 (mm) , δ : 棒鋼下端の相対ずれ変位 (mm)
体型供試体による「押し引き」試験	τ _{0.2} : 初期付着強度 (kgf/cm ²)
ADSS1P: 公称径51mmの異形棒鋼の平坦面にスタッドを取り付けた棒鋼に対する立	τ _u : 最大付着強度 (kgf/cm ²)
方体型供試体による「引き抜き」試験	

参考文献

- 1) 名古屋高速道路公社：鋼構造物設計基準，昭和62年
- 2) 村田：引抜き試験法による鉄筋とコンクリートの付着強度試験方法，コンクリート工学，1985.3，
- 3) 小林：溶接用平坦面を有する極太異形棒鋼の付着特性，土木学会第40回年次講演，昭和60.9
- 4) 日本道路協会：道路橋示方書・解説 I・II，昭和55年2月
- 5) P.J.Robin, (上田多門抄訳)：定着部付着強度に与える横方向圧縮応力の影響，コンクリート工学，Vol.24，No.1，Jan.1986
- 6) ACI: Building Code Requirement for Reinforced Concrete (ACI 318-71), Jan.1977