

鋼製橋脚に用いる実大付着型アンカーボルトの力学特性と 定着部の挙動評価モデル

Mechanical Characteristics of Bond Type Anchor Bolts for Steel Piers and
Modeling of Steel Pier Base-to-Footing Connections

前野裕文¹, 後藤芳顯², 上條崇³, 小林洋一⁴

Hirofumi MAENO, Yoshiaki GOTO, Takashi KAMIJO and Yoichi KOBAYASHI

¹工博 名古屋高速道路公社 工務部設計課 (〒460-0002 名古屋市中区丸の内 1-16-15)

²工博 名古屋工業大学教授 工学部社会開発工学科 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

³工修 住友金属工業(株) 建設技術部 (〒314-0255 茨城県鹿島郡波崎町砂山 16)

⁴工修 住友金属工業(株) 建設技術部 (〒314-0255 茨城県鹿島郡波崎町砂山 16)

Mechanical characteristics of bond-type anchor bolts with headed studs on its surface were investigated by laboratory tests. The specimen used for the experiment have the real-sized diameters ranging from 120mm to 180mm. It was observed from the test results that the bond strength of the bolt with studs is almost the same, regardless of the size of the diameter. In contrast, the bond strength of the bolt without studs tends to decrease with the increase in its diameter. An in-situ pull-out test of the bond-type anchor bolt confirmed that the anchor bolt has a sufficient bond strength to be used in stead of the conventional anchor bolt. Based on the loading test on a 1/3 scaled pier base-to-footing connection with the bond-type anchor bolts, we examined the applicability of the component method to the prediction of the moment-rotation curve. In the component method, we considered the bond stress-slip relation on the surface of the anchor bolt in addition to the constitutive relations of anchor bolt and concrete footing. As a result, it was found that the experimental moment-rotation curve can be predicted with an acceptable accuracy by the component method.

Key Words : bond type anchorage, deformed bar, headed stud

キーワード：付着型アンカー，異形棒鋼，頭付きスタッド

1. はじめに

鋼製橋脚のコンクリートフーチングへの定着構造としては、従来からアンカーフレーム方式が広く用いられており、近年ではそれに変わる構造や終局挙動に関する研究^{1)~3)}がなされている。アンカーフレーム方式は、コンクリートフーチングに埋め込まれたアンカービームに、アンカーボルトを介して橋脚ベース部を固定する定着方式であり、構造物が大型化するに伴い、アンカーフレーム方式ではアンカービームの板厚増大、高材質化、溶接量増大が避けられず、さらにはアンカーフレーム自体が大型化し、フーチングの縁端距離不足、製作・輸送・架設上の問題も生じている。

このような背景のもと、著者らは建設コスト縮減に寄与でき、かつ、耐震性にも優れた新しい鋼製橋脚の定着方式として、太径の異形棒鋼⁴⁾にスタッドを溶接した付

着型アンカーボルトを用いた直接定着方式を考案し、一連の研究^{5)~11)}を進めるとともに、実際の鋼製橋脚約 30 基に適用し、設計・製作・架設の問題点を解決し¹²⁾、今後の設計資料として現場での実測^{10)~12)}を精力的に進めてきた。

具体的には実際に用いる鋼製橋脚に対し縮尺率約 1/3 モデルを用い付着型アンカーボルトの節突起とスタッドの相互作用や側圧の影響などの力学特性^{5)~6)}を、コンクリートの破壊機構の研究^{7)~8)}では、アンカーボルトの付着破壊とコンクリートのコーン破壊との関係や複数本のアンカーボルトに対する破壊機構を明確にした。またアンカーボルトに取り付けたスタッドの疲労特性の研究¹¹⁾では 200 万回の繰返しに対しても設計上の問題が生じない事を示した。

次に、鋼製橋脚定着部の耐荷力実験⁹⁾では、直接定着方式がアンカーフレーム方式(杭方式)と同等の耐力を

表-1 アンカーボルトの仕様

アンカーボルト径	120	140	160	180
スタッド径	19	22	22	22
スタッドピッチ	95	110	100	90
スタッド長さ	130	150	150	150

(mm)

表-2 実大異形アンカーボルトの仕様

項目	仕様
ボルトの径	D120, D140, D160, D180
ふしの高さ	4mm
ふし底の幅	12mm
ふしの角度	45度
ふしのピッチ	40mm
ボルトの材質	SM490A 相当, SM520B 相当

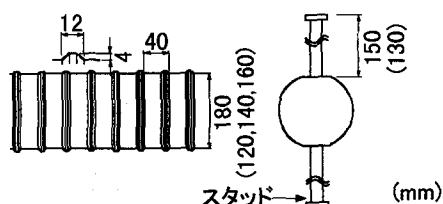


図-1 異形アンカーボルトの形状

有することやアンカーボルトの軸力算定法等の全体的な挙動を明らかにするとともに設計方法を示し、地震時の変形能に関する考察を加えた。

また、実大寸法のアンカーボルトである直径120, 140, 160mmに関しては、室内試験により設計上必要な付着強度を確認すると共に、現場引き抜き試験によりその安全性を検証した¹⁰⁾⁻¹²⁾。

本論文は、都市内高速において一般的な鋼製橋脚定着部に用いるアンカーボルトの上限値付近である直径180mmに対し、新たに室内試験、現場引き抜き試験を実施することにより、直径180mmまでの付着型アンカーボルトの力学特性を整理し従来の研究と比較した。また、直接定着方式による定着部の全体挙動についてモデル化¹³⁾を行い、模型実験結果との比較からこの解析モデルの適用性を検証し、より実用化に向けた考察を行っている。

2. 立方体型供試体による付着試験

2.1 試験方法

JIS 原案¹⁴⁾に準じた試験方法により、異形アンカーボルトの付着強度を確認した。D120~D180の実大異形アンカーボルトの仕様を表-1、表-2に、形状を図-1に示す。

異形アンカーボルトは棒鋼直径の6倍を一辺の長さとする立方体のコンクリートブロック中に埋め込み、載荷側に直径の2倍のアンボンド部を設け、定着長を直径の4倍とした。試験パラメータはアンカーボルト径、スタッドの有無、コンクリートブロックのフープ筋の有無であり、各ケース3体ずつの試験を行った。D120~D180の供試体とコンクリート強度の一覧を表-3に示す。

なお、コンクリートブロックにフープ筋を配置して補

表-3 試験体の種類とコンクリート圧縮強度

アンカーボルト径	供試体名	スタッド	フープ筋	σ_{ck} (N/mm ²)
D51	ADS51	φ6@35mm	—	27.6
	ADSH51	φ6@35mm	D13@40mm	29.4
	AD51	—	—	27.6
	ADH51	—	D13@40mm	29.4
D120	ADS120	有	—	23.3
	ADSH120	有	D16@55mm	23.3
	AD120	—	—	27.9
	ADH120	—	D16@55mm	31.2
D140	ADS140	有	—	23.3
	ADSH140	有	D19@70mm	23.3
	AD140	—	—	27.9
	ADH140	—	D19@70mm	31.2
D160	ADS160	有	—	24.5
	ADSH160	有	D22@80mm	24.5
	AD160	—	—	27.9
	ADH160	—	D22@80mm	31.2
D180	ADS180	有	—	27.6
	ADSH180	有	D25@90mm	27.6
	AD180	—	—	29.8
	ADH180	—	D25@90mm	29.8

注)・D120~D180のスタッド量は、表-1による

- ・D51はコンクリートブロックの一辺が7.5D、定着長5.5D、アンカーボルト材質SM490
- ・補強フープ筋はSD345
- ・D120~D180の補強フープ筋量は、コンクリートブロックの付着割裂耐力の1.5倍を補強フープ筋のみで負担するものとして算出した
- ・供試体数はD51が1体、その他の径は各3体

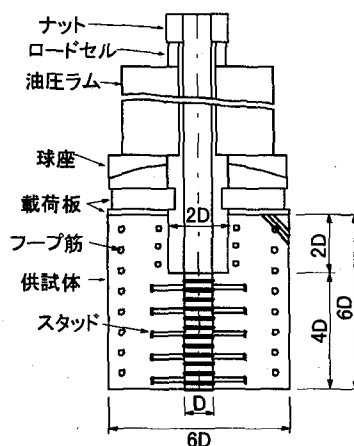


図-2 立方体型供試体とその載荷方法

強する理由は、実橋脚の定着部では、アンカーボルトがマッシュパなフーチング内に埋め込まれ、周辺からの拘束が大きい状態にあるので、この拘束状態を模擬するためである。また、供試体のコンクリートの打ち込みは、実際の状態と一致させるためにアンカーボルトを立てた状態で行った¹⁵⁾。

供試体への載荷は、センターホール型のジャッキを用いて供試体上方から単調増加の引抜き荷重を与える方法とした。載荷セットアップを図-2に示す。

また、小径のD51アンカーボルトについても基礎的な研究として、付着試験⁹⁾を実施しているのので、これも比較するため、表-3ならびに、次節の試験結果に加え

表-4 付着試験結果

試験体の種類 アンカー ボルト径	供試体名	ひび割れ 発生荷重 $P_{cr}(kN)$	付着耐力 $P_{0.2}(kN)$	付着強度 (N/mm^2)	
				$\tau_{0.2}$	τ_{max}
D51	ADS51	626	338	7.67	14.21
	ADSH51	—	488	11.07	20.29
	AD51	410	279	6.34	9.83
	ADH51	—	376	8.53	15.78
D120	ADS120 注1)	1548	1578	9.31	9.80
	ADSH120	1627	1842	10.19	13.72
	AD120	1637	1842	10.19	10.49
	ADH120	1813	1872	10.29	13.13
D140	ADS140	1852	2401	9.21	9.41
	ADSH140	1803	2538	9.80	13.33
	AD140	1803	2450	9.51	9.90
	ADH140	2009	2587	10.09	12.05
D160	ADS160	1862	2705	8.53	8.72
	ADSH160	2048	3107	9.70	11.76
	AD160	2156	2666	8.33	8.33
	ADH160	2430	3018	9.41	11.56
D180	ADS180	3342	4145	10.19	10.29
	ADSH180	3548	4782	11.76	14.50
	AD180	3009	3577	8.82	8.82
	ADH180	3391	3685	9.02	11.47

注1) ADS120は3体中1体が偏心割裂破壊をおこしているため、2体平均値

注2) 表中の値は3体の平均値 (D51は各1体)

た。なお、この供試体はコンクリートブロッカー辺の長さが7.5D、埋め込み長が5.5Dで、補強鉄筋量についても、D120～D180の実大アンカーボルトの付着試験に比べて相対的に多くなっている。載荷方法についてもより付着応力分布を均一化するため、JIS原案とは異なり、棒鋼の上下端を押し引きする載荷方法としている点が他のケースと相違している。

2. 2 試験結果と考察

(1) 付着強度

付着試験結果として、初期付着強度 $\tau_{0.2}$ ¹⁴⁾(棒鋼下端のずれ量が棒鋼直径の0.2%に達した時点の平均付着応力度)、最大付着強度 τ_{max} を各ケース3体平均した結果を表-4に示す。また、表-4からコンクリート圧縮強度の影響を取り除く¹⁵⁾ため、式(1)により、コンクリート強度を24 N/mm^2 に補正した付着強度の結果を、フープ筋を有するADSHとADHについて図-3に示す。

$$\tau = \tau_e \times \sqrt{24/\sigma_{ck}} \quad (1)$$

ここに、

τ : $\sigma_{ck}=24 N/mm^2$ に換算した平均付着応力度

τ_e : 実験で得られた平均付着応力度

σ_{ck} : コンクリートの圧縮強度

図-3より、スタッドの無いADHでは、アンカーボルト径の大きいD160、D180において $\tau_{0.2}$ が許容付着応力度 $\tau_a=2.8 N/mm^2$ ($\sigma_{ck}=24 N/mm^2$)の3倍に満たない結果であるが、ADSHシリーズでは、 $\tau_{0.2}$ は全てのアンカーボルト径について、許容付着応力度 τ_a の3倍以上となっており、異形棒鋼にスタッドを取り付けることで、全てのサ

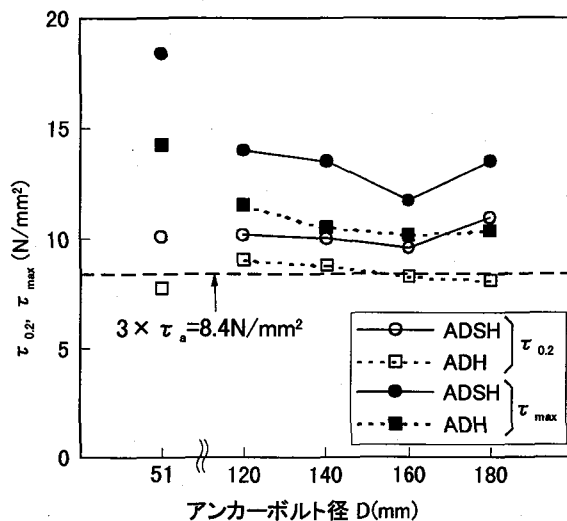


図-3 アンカーボルトの付着強度

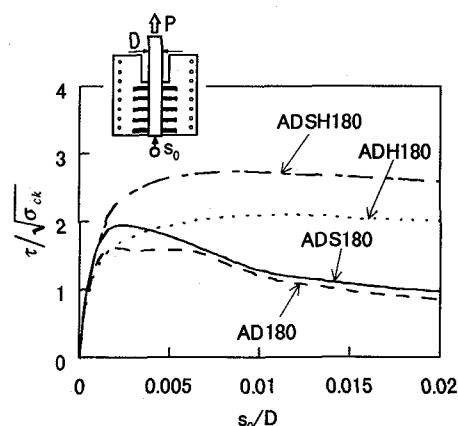


図-4 平均付着応力と棒鋼下端変位量の関係 (D180アンカーボルト)

イズで設計上必要な付着強度を満足することを確認した。

次に、同図から、太径化の影響についてみると、スタッドの無いADHでは、D120からD180の範囲でボルト径の増大に伴い、 $\tau_{0.2}$ 、 τ_{max} が若干低下する傾向が認められる。D120とD180を比較すると、 $\tau_{0.2}$ 、 τ_{max} のいずれについても、太径化により10%程度低下している。

スタッドのあるADSHに関しては、アンカーボルト径と τ_{max} の間に一定の傾向は認められないが、 $\tau_{0.2}$ はD51の試験結果まで含めても、アンカーボルト径によらずおおそ一定となる結果が得られた。このことから、設計上の基準としている $\tau_{0.2}$ に関しては、太径化による影響はなく、設定したスタッド配置間隔は適切なものであるといえる。ADSHの τ_{max} に関しては、アンカーボルト径による変動が比較的大きいが、いずれの径についても、 $\tau_{0.2}$ より2割以上大きく、付着型アンカーボルトが有する安全度が十分高いことを確認できた。なお、D51アンカーボルトの τ_{max} は他のケースと比較して極端に高いが、これはコンクリートブロッカーへの補強鉄筋量が多かったことが、その理由と推察される。

(2) ずれ性状

ずれ性状の一例として、今回試験を行った直径180mm

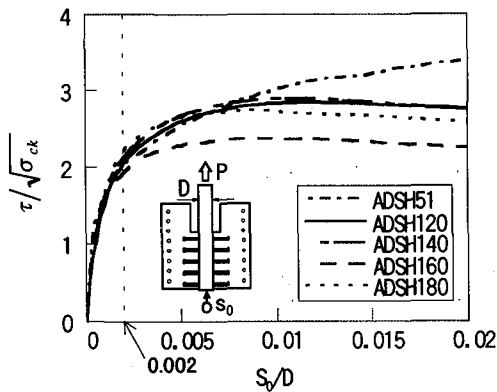


図-5 平均付着応力と棒鋼下端変位の関係
(アンカーボルト径による比較)

のアンカーボルトについて、4 ケースの試験で得られた平均付着応力度と棒鋼下端のずれ量 s_0 の関係を図-4 に示す。図-4 の縦軸は、式(1)と同様の考え方で $\sqrt{\sigma_{ck}}$ により基準化し、横軸はアンカーボルト径 D で基準化している。これらはいずれも 3 体平均の結果である。

図-4 より、フープ筋によりコンクリートブロックを補強した場合 (ADSH180, ADH180) は、補強無しの場合 (ADS180, AD180) に比べて、最大付着強度到達後の劣化勾配が小さく、粘りのある付着性状を示している。これは、コンクリートブロックにひび割れが発生した後も、フープ筋がひび割れの開口を抑制するためであると考えられる。

次に、ずれ性状とアンカーボルト径の関係を検討するために、ADSH シリーズについて、アンカーボルト径により比較した $\tau/\sqrt{\sigma_{ck}} - s_0/D$ 関係を図-5 に示す。

図-5 から、 $\tau/\sqrt{\sigma_{ck}} - s_0/D$ 関係の初期勾配は、アンカーボルト径によらずほぼ一定で、設計上考慮している $s_0/D \leq 0.002$ の範囲では、アンカーボルト径による差異はほとんど無いことがわかる。

$s_0/D > 0.002$ の範囲では ADSH160 のみ他の径のものと比較して、付着強度が若干低くなっている。図-3 においてもスタッドありの ADSH160 の場合に他の径に比べて付着強度が小さくなる傾向が認められるが、表-1 に示したように D160 のスタッド径、長さは D140, D180 と同一で、かつ、配置間隔はこれらの中間値であるので、スタッドの配置方法が付着強度に影響を与えたとは考えにくい。よって、ADSH160 の付着強度が他の径より低いのは、実験誤差等によるものではないかと推定される。

また、図-5 において、下限値である ADSH160 の $\tau/\sqrt{\sigma_{ck}} - s_0/D$ 関係を採用すれば、スタッド付き異形アンカーボルトの付着特性を D120~D180 の範囲で径によらず同一のものとして取り扱うことができるといえる。

3. 現場引抜き試験

立方体型供試体を用いた付着試験により、異形アンカーボルトが所要の付着強度を有することを確認した後、

表-5 フーチングコンクリートの強度 (N/mm^2)

材 齢	現場養生		標準養生	
	圧縮強度	引張強度	圧縮強度	引張強度
28 日	30.7	2.45	30.3	2.30

注 1) 現場養生条件は、打設 2 日目に脱型し、外気空中養生したもの

注 2) 現場試験はコンクリート材齢 30 日で実施した

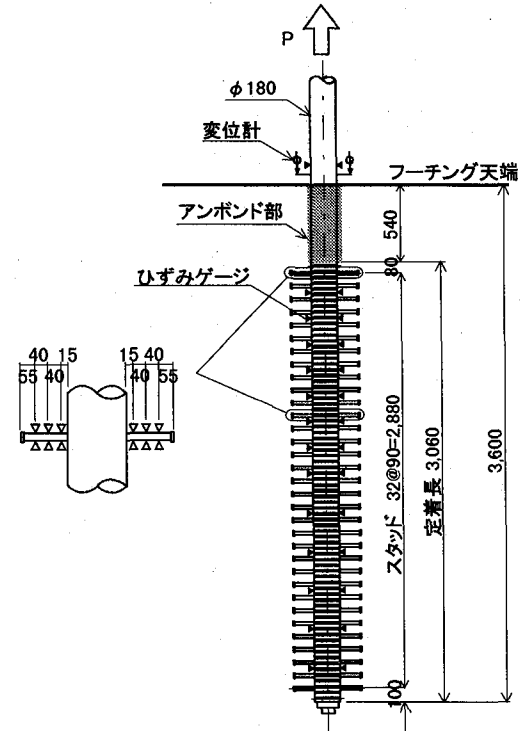


図-6 現場引抜き試験用アンカーボルトと計測位置

より使用状態に近い状態でアンカーボルトの定着耐力、付着応力分布を確認するために、D120~D180 アンカーボルトの現場引抜き試験を実施した。ここでは、最大直径であり、今回試験を行った D180 について報告する。

3. 1 試験方法

現場引抜き試験に使用したアンカーボルトの節形状ならびにスタッド配置間隔は、2. の付着試験の ADSH180 と同一である。

試験用アンカーボルトでは、フーチングコンクリートにひび割れが生じないように、埋め込み上部のアンボンド長は $3D$ とし、アンボンド長を除いた定着長は $17D$ とした。

アンカーボルトにはひずみゲージを軸方向に貼り付け、軸応力を計測し、スタッドについても軸部上下面にひずみゲージを貼り付け、曲げ応力の計測を行った。

フーチングコンクリートの強度試験結果を表-5 に、試験用アンカーボルトの形状寸法、ならびに、計測位置を図-6 に、載荷セットアップを図-7 に示す。

アンカーボルトへの載荷は、センターホール型ジャッキを用いて行った。試験体へ与える引抜き荷重およびその繰り返し回数は次のように設定した。

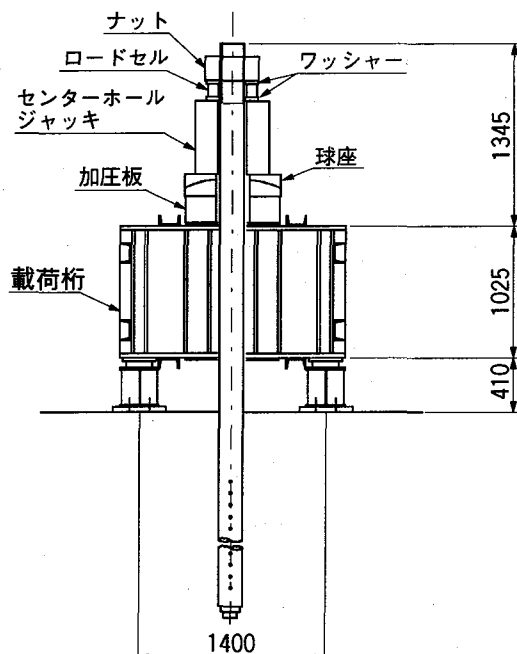


図-7 載荷セットアップ (現場引抜き試験)

- 1) 震度法レベル ($P=6.27MN$; 5 回繰り返し)
- 2) 地震時保有水平耐力法レベル・タイプ I
($P=6.71MN$; 5 回繰り返し)
- 3) 地震時保有水平耐力法レベル・タイプ II
($P=7.89MN$; 5 回繰り返し)
- 4) 降伏耐力 ($P=7.99MN$; 1 回, アンカーボルト鋼材の公称降伏点に対応)

3. 2 試験結果と考察

(1) アンカーボルトの相対ずれ量

載荷荷重とアンカーボルトーフーチング間の相対ずれ量の関係を図-8 に示す. なお, 図-8 には変位測定位置からアンボンド部下端までの棒鋼の弾性変位量を除いたアンカーボルトの変位量を示している.

今回の現場引抜き試験では, 実験の最終段階までに 16 回の繰り返し載荷を行い, さらに, アンカーボルトの降伏点に対応する最大引抜き力を与えているにも関わらず, 図-8 の荷重-抜け出し変位量関係の勾配は, 試験を通してほとんど変化せず, ほぼ線形に挙動している.

図-8 中には 2. の ADHS180 付着試験結果から求めたアンカーボルトの分布付着ばね特性を用いて, 文献 7) と同様の手法でアンカーボルトの抜け出し変位量を解析した結果も示しているが, 試験結果と解析結果の対応は良好であり, 立方体型供試体からアンカーボルトの分布付着ばね特性を推定することの妥当性が確認できる. なお, 立方体型供試体の試験結果からアンカーボルトの分布付着ばね特性を求める際, 付着ばねのずれ量は, 図-4 のようにアンカーボルト下端の変位量 s_0 とするのではなく, 定着区間の上下端で計測したアンカーボルトずれ量の平均値 s としている. ADHS180 について $\tau/\sqrt{\sigma_{ck}} - s_0/D$ 関係と $\tau/\sqrt{\sigma_{ck}} - s/D$ 関係の比較を図-9 に示

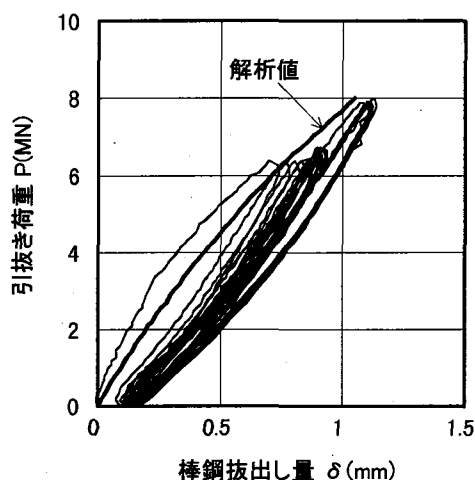


図-8 荷重とアンカーボルトの相対ずれの関係 (D180 現場引抜き試験)

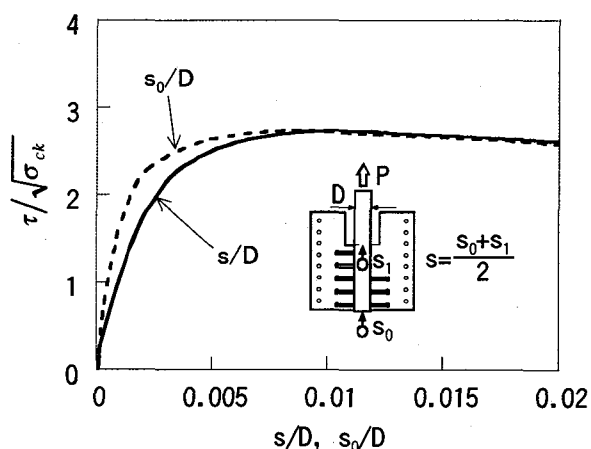


図-9 ADHS180 の付着ばね特性

すが, 図から明らかなように, $\tau/\sqrt{\sigma_{ck}} - s/D$ 関係の初期勾配は $\tau/\sqrt{\sigma_{ck}} - s_0/D$ 関係に比べて緩やかになるので, 解析上, 付着ばねの剛性を過大評価しないためには $\tau/\sqrt{\sigma_{ck}} - s/D$ 関係を用いるのが好ましいと考えられる.

(2) アンカーボルトの軸応力分布と付着応力分布

アンカーボルトのアンボンド区間における軸応力 σ_a が $100N/mm^2$, $290N/mm^2$ のときのアンカーボルト軸応力分布を図-10 に, アンカーボルトの軸応力の区間差から求めた区間平均付着応力分布を図-11 に, 解析値とともに示す. これらの図には, 比較のために D140 アンカーボルトの結果¹⁰⁾も合わせて示している.

図-10, 図-11 から, 軸応力分布と付着応力分布のいずれについても, 放物線状の分布形状で, 埋め込み深さ y をアンカーボルト径 D で基準化すると, D180 と D140 の軸応力分布, 付着応力分布はほぼ一致する. これは, 図-5 において, D180 と D140 の $\tau/\sqrt{\sigma_{ck}} - s_0/D$ 関係はほぼ同一の曲線であることに対応していると考えられる.

次に, 図-10, 図-11 から, D180 について実験と解析を比較すると, アンカーボルトの応力状態, ならびに, 付着応力分布が実用上十分な精度で推定可能なことがわかる.

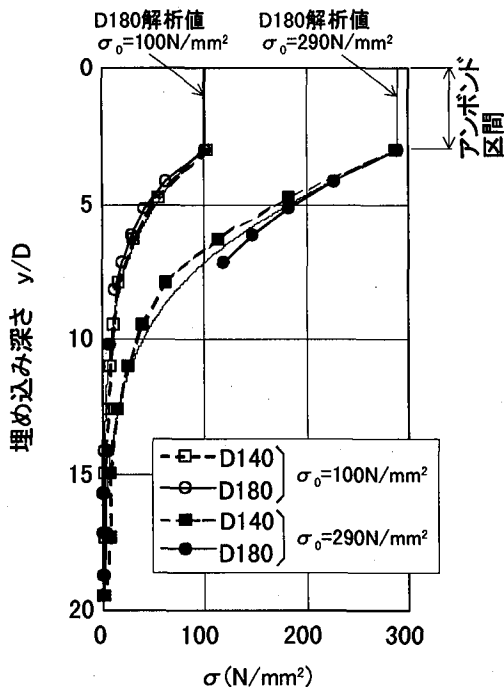


図-10 アンカーボルトの軸応力分布

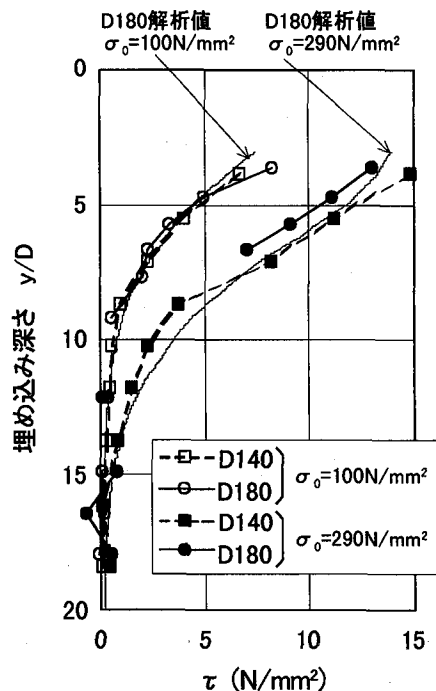


図-11 アンカーボルトの付着応力分布

(3) スタッドの曲げ応力

D180, D140 について、図-10, 図-11 と同一荷重レベルにおけるスタッドの曲げ応力分布を図-12 に示す。

図-12a) から最上段のスタッドについて D180 と D140 を比較すると、同レベルの荷重条件であっても、D180 のスタッドの方が大きな曲げ応力が生じていることがわかる。これは、次のように考えられる。まず、径の異なるアンカーボルトを同一荷重レベルで比較するために、アンカーボルト上端の軸応力を一致させると、図-11 から明らかなように、アンカーボルトに生じる付着応力は、 y/D に関してほぼ同じになる。一方、図-5 からは、アンカーボルト径によらず、 $\tau/\sqrt{\sigma_{ck}-s_0}/D$ 関係は概ね同一の曲線なので、直径が異なり、埋め込み長比が同じアンカーボルト上端の軸応力を一致させた場合には、アンカーボルトとコンクリートの相対ずれ量はアンカーボルト径 D に比例して大きくなるものと考えられる。スタッドに生じる曲げ応力は、材料が弾性範囲にあれば、アンカーボルトとフーチングとの相対ずれ量に比例するので、結果として、スタッドの曲げ応力はアンカーボルト径に応じて大きくなったものと考えられる。

図-12b) の埋め込み中段のスタッドについては D180, D140 のいずれの場合も、再上段スタッドに比べて 1/10 程度にまで曲げ応力が減少しており、この位置より深い位置ではアンカーボルトとコンクリートの相対ずれ量が極めて小さいことがわかる。

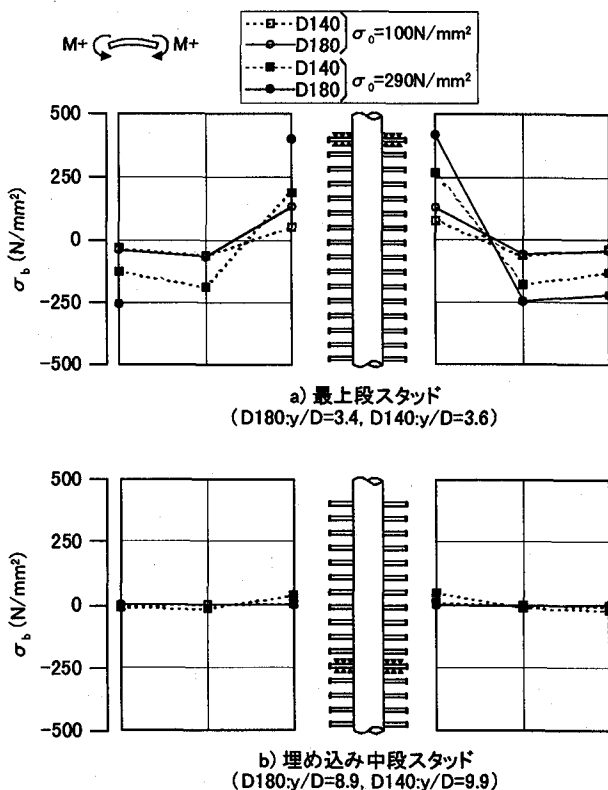


図-12 スタッドの曲げ応力分布

れそれぞれに対応する一軸要素を用いて表す、いわゆる component method により、終局挙動が精度よく追跡できることが明らかにされている¹³⁾。ここでは、直接定着方式を対象に、この解析手法の適用性を検討する。解析モデルの精度の検証は、文献 9) の D51 アンカーボルトを用いた全体構造模型実験との比較により行った。

全体構造模型実験の概要を図-13 に示す。この実験で

4. 付着型アンカーボルトを用いた定着部の挙動の評価

単調載荷条件下のアンカーフレーム方式の定着部については、アンカーボルト、フーチングコンクリートをそ

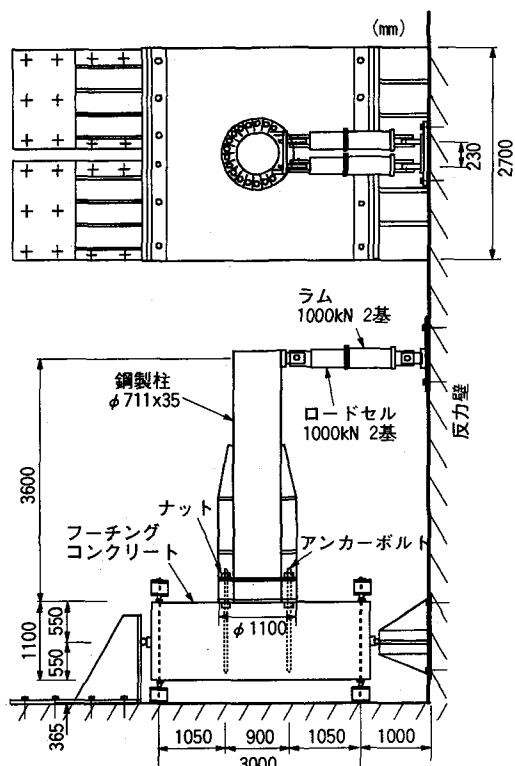


図-13 全体構造模型実験

は、地震時荷重に相当する水平荷重 $H=\pm 686\text{kN}$ の荷重振幅で 10 サイクルの繰り返し載荷を行い、その後、水平荷重を単調増加させ、破壊に至らしめている。

4. 1 定着部のモデル化

(1) アンカーボルトの軸力-変位関係

component method により定着部をモデル化する場合、アンカーボルトの軸力-変位関係（ばね特性）が必要になるが、直接定着方式ではこのばね特性をアンカーボルトの変形のみならず、アンカーボルトとフーチングとの相対変位まで含めた形で、図-14 に示すモデルにより算定する。また、図-14 のモデルにおいて、アンカーボルトの鉛直変位の着目点は、アンカーボルトに作用する軸力が圧縮の場合と引張りの場合で変化させている。この理由は、脚柱ベース部からアンカーボルトに伝達する力の作用位置（ナット位置）が圧縮の場合と引張りの場合で異なるためである。

図-14 のモデルに用いるアンカーボルトの分布付着ばね特性は、全体模型供試体と同一の直径、節形状、スタッド間隔を有するアンカーボルトに関して実施した立方体型供試体の付着試験結果をコンクリート強度により補正して求めた。この分布付着ばね特性を図-15 に示す。また、本解析ではアンカーボルト鋼材の降伏後の挙動も追跡できるように、図-14 のアンカーボルト要素には材料試験結果をもとに、図-16 に示すバイリニア型の応力-ひずみ関係を与えた。

以上の手順により求めた付着型アンカーボルトの軸力-変位関係を図-17 に示す。

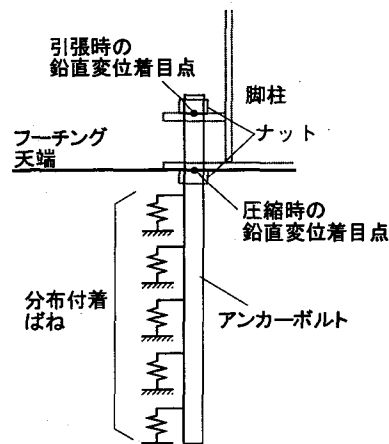


図-14 アンカーボルトばねの計算モデル

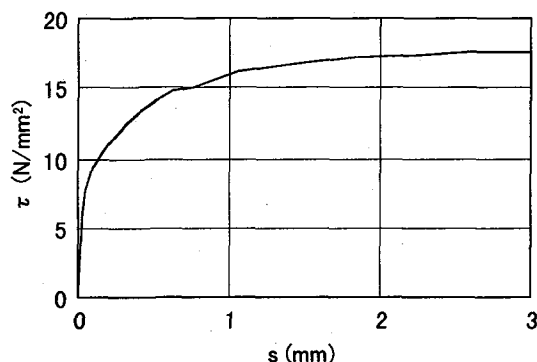


図-15 D51 アンカーボルトの付着ばね特性

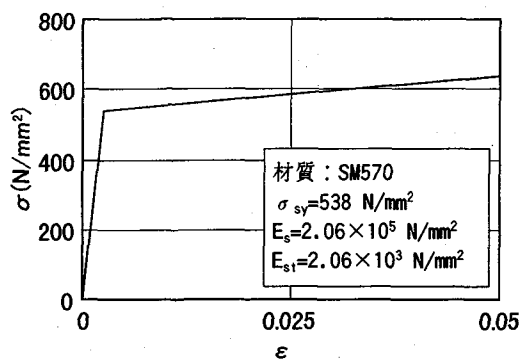


図-16 アンカーボルト鋼材の応力-ひずみ関係

(2) 定着部のモーメント-回転角関係

アンカーボルト、フーチングコンクリートを一軸ばね要素に置き換え、さらに、以下の仮定を導入することで、定着部の解析モデルを設定する。解析モデルの概要を図-18 に示す。

- 1) ベースプレートは剛体とする。また、ベースプレート中心は水平方向には変位しない。
- 2) フーチングコンクリートにはアンカーボルトの引抜きによるコーン破壊は生じない

上記の仮定にもとづき、文献 13)と同様の定式化を行うと、定着部に作用する軸力 N 、曲げモーメント M とベースプレート中心点の鉛直変位 δ_0 、回転変位 θ の増分関係は次のように表される。

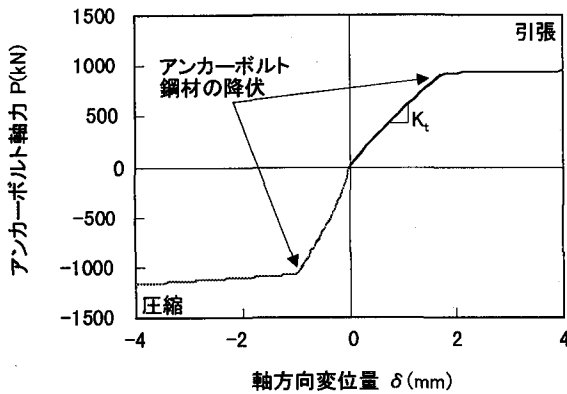


図-17 付着型アンカーボルトのばね特性
(D51 アンカーボルト)

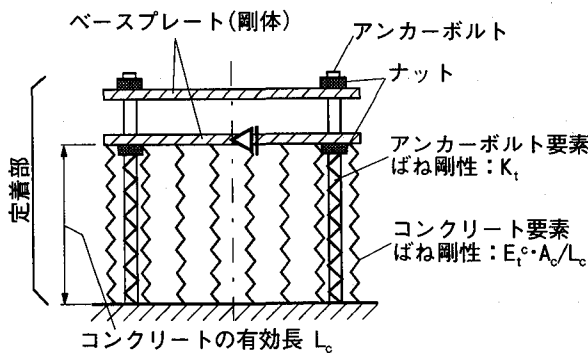


図-18 定着部の解析モデル

$$\begin{Bmatrix} \Delta N \\ \Delta M \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta \delta_0 \\ \Delta \theta \end{Bmatrix} \quad (2)$$

$$a_{11} = \sum_{j=1}^m K_{tj} + \sum_{j'=1}^{m'} \frac{E_{tj'}^c A_{tj'}}{L_{cij'}} \quad (3)$$

$$a_{12} = a_{21} = \sum_{j=1}^m K_{tj} x_{tj} + \sum_{j'=1}^{m'} \frac{E_{tj'}^c A_{tj'} x_{tj'}}{L_{cij'}} \quad (4)$$

$$a_{22} = \sum_{j=1}^m K_{tj} x_{tj}^2 + \sum_{j'=1}^{m'} \frac{E_{tj'}^c A_{tj'} x_{tj'}^2}{L_{cij'}} \quad (5)$$

ここに、

K_{tj} : アンカーボルトばねの剛性

$E_{tj'}^c$: コンクリートの接線弾性係数

A_{tj} : i 番目のコンクリート要素の断面積

x_{tj} : i 番目のアンカーボルトまたはコンクリート要素の図心位置

L_{ci} : i 番目のコンクリート要素の有効長 (ここではフーチング厚)

m : アンカーボルト本数

m' : コンクリートの断面分割数 (ベースプレート直下の断面)

なお、コンクリート要素の一軸応力-ひずみ関係は材料試験結果をもとに図-19のように設定した。

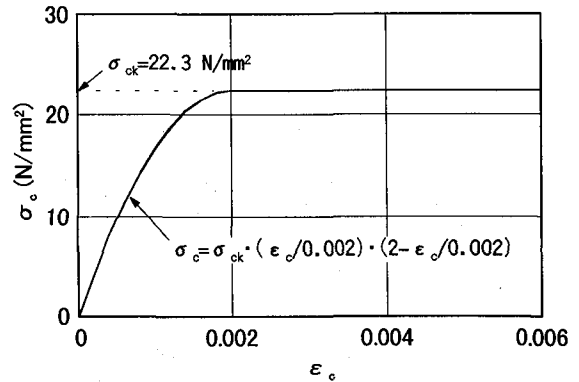


図-19 コンクリートの応力-ひずみ関係

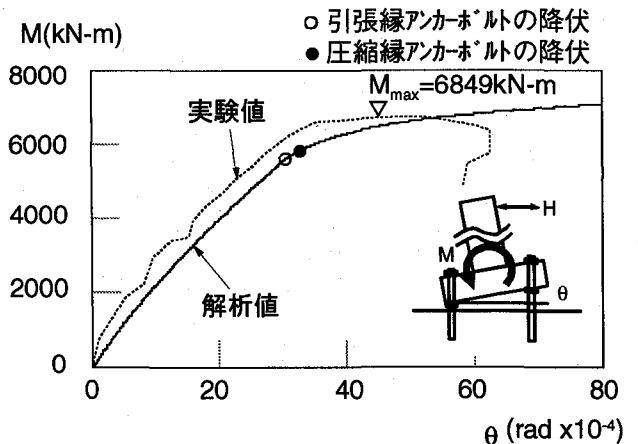


図-20 定着部の M-θ 関係 (全体構造模型実験)

4.2 実験結果と解析結果

橋脚全体模型実験で得られた定着部の M - θ 関係 (地震時荷重の繰返し載荷と破壊までの単調載荷の包絡線) と解析結果との比較を図-20 に示す。

図-20 から、定着部の初期剛性、剛性変化点について、実験結果と解析結果は良く一致している。但し、実験結果は $M_{max}=6849\text{kN}\cdot\text{m}$ の最大荷重以降、緩やかに荷重低下するのに対し、本モデルは荷重が増加し続けており、実験と解析は相違している。この理由は、実験ではアンカーボルトの引抜きに伴うコーン破壊の発生により最大耐力が決定しているのに対し、本解析ではこの破壊形式を考慮していないためである。

また、解析値では縁端アンカーボルトの降伏後に定着部の剛性が徐々に低下しており、アンカーフレーム方式の場合¹³⁾と同様にアンカーボルトの塑性化が定着部の全体挙動に与える影響が大きいことがわかる。

以上により、フーチングにコーン破壊が生じない範囲において、本解析モデルは定着部の M - θ 関係を良好な精度で追跡できることが明らかになった。通常設計される範囲では、コーン破壊に対してはフーチングコンクリート内に十分な量の補強鉄筋が配置されること、躯体部の終局時にアンカーボルトは弾性範囲内に留まるように設計¹⁷⁾されることを考えると、本解析モデルは十分実用的なものであるといえる。

なお、定着部の塑性変形能に期待した耐震設計を行う場合には、定着部の終局耐力、終局変位、繰返し載荷による劣化特性、さらに、フーチングコンクリートの破壊性状¹⁸⁾を把握する必要があるが、これらについては今後の課題としたい。

5. まとめ

一般的な鋼製橋脚定着部に用いるアンカーボルトの上限值付近である直径 180mm の付着型アンカーボルトについて、新たに室内試験、現場引抜き試験を実施し、180mm までのアンカーボルトの付着性能について整理した。この結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 付着試験から、スタッドを有する D180 アンカーボルトが設計上必要な付着強度を満足することを確認し、設定された D180 アンカーボルトのスタッド配置間隔が妥当なものであることを確認した。異形棒鋼にスタッドを取り付けることで、D120~180mm のアンカーボルトは全て所要の付着性能を満足していた。
- (2) スタッドが無い場合、アンカーボルトが太径化するに伴い初期付着強度、最大付着強度が低下する傾向が認められた。但し、D120 から D180 への付着強度の低下率は 10%程度とそれ程大きくない。
- (3) 現場引抜き試験から、実橋脚フーチング内に埋め込んだ付着型アンカーボルトは、アンカーボルトの降伏相当の引抜き荷重に対しても十分な定着耐力を有し、荷重一ずれ関係も、ほぼ線形挙動を示すことを確認した。
- (4) アンカーボルトが太径化すると、アンカーボルトの軸応力が同レベルでも、スタッドに生じる曲げ応力が大きくなる傾向を確認した。
- (5) 立方体型供試体から求めた分布付着ばね特性を求め、これを用いて解析することで、現場引抜き試験結果を精度良く推定できた。

さらに、直接定着方式の定着部の挙動評価への component method の適用性について検討し、一例のみであるが、実験結果と提案した計算方法の対応が良いことを確認した。

参考文献

- 1) 田嶋, 半野, 藤原, 後藤: 鋼製橋脚アンカー部の終局挙動および終局耐力に関する検討, 第 2 回鋼構造物の非線形数値解析と耐震設計への応用に関する論文集, pp.127-134, 1998.11
- 2) 田嶋, 半野, 船本, 船越, 空閑: 支圧板方式アンカーフレームを用いた鋼脚柱定着部の基礎実験, 構造工学論文集, Vol. 44A, pp.1467-1474, 1998
- 3) 迫田, 北田, 尾立, 加賀山: 鉄筋コンクリート方式で設計された鋼製橋脚定着部の終局限界状態と非弾性挙動の定式化, 鋼構造論文集, 第 6 巻第 21 号, pp.83-96, 1999.3
- 4) 池田: 極太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
- 5) 前野, 後藤, 小畑, 松浦, 小林: 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
- 6) 前野, 後藤, 小畑, 松浦: スタッドを取り付けた太径異形棒鋼の付着特性, 土木学会論文集, 第 441 号 / I-18, pp.87-96, 1992 年
- 7) 前野, 後藤, 小畑, 松浦: 引き抜き力を受ける付着型アンカーボルトの定着部の破壊機構に関する研究, 土木学会論文集, 第 441 号 / I-18, pp.185-192, 1992 年
- 8) Goto, Y., Obata, M., Maeno, H. and Kobayashi, Y.: Failure Mechanism of a New Bond-Type Anchor Bolt subject to Tension, Journal of Structural Engineering, ASCE, vol.119, No.4, 1993
- 9) 前野, 後藤, 小畑, 小林, 松浦: 付着型アンカーボルトを用いた鋼脚柱定着部の耐荷力実験, 構造工学論文集, Vol.39A, pp.1321-1334, 1993
- 10) 山本, 鈴木, 前野, 深田: 鋼製橋脚定着部に用いる付着型アンカーボルトの室内付着試験および現場引抜き試験, 橋梁と基礎, pp.27-33, 1998.5
- 11) 前野, 永岡, 森, 小林, 川津: 付着型アンカーボルトを用いた鋼製橋脚定着部の設計および現場試験, 橋梁と基礎, pp.23-30, 1994.5
- 12) 永岡, 鍵和田, 原田: 「明道工区」P2 橋脚の定着方式について—鋼製橋脚直接定着方式の設計・施工および現場付着試験—, 技報まつお, No.27, pp.18-26, 1994.4
- 13) 後藤, 上條, 藤原, 小畑: 鋼製橋脚定着部の終局挙動とそのモデル化に関する考察, 構造工学論文集, Vol.42A, pp.987-998, 1996
- 14) 村田: 引き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 (案), コンクリート工学, Vol.23, No.3, pp.8-11, 1985
- 15) 赤尾, 栗田, 平城: 頭付きスタッドの押し抜き挙動に及ぼすコンクリートの打ち込み方向の影響, 土木学会論文報告集, 第 380 号 / I-7, pp.311-320, 1987
- 16) ACI: Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI318-19), 1989
- 17) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 平成 8 年
- 18) 幸左, 小林, 藤井, 水田: フーチングの地震時終局挙動に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol. 45A, pp.1369-1376, 1999

(1999 年 9 月 17 日受付)