

水平2方向地震力を受ける鋼製橋脚アンカー部の終局挙動に関する研究

A Study on The Ultimate Seismic Behavior of Steel Pier-To-Footing Connections

廣江昭博[†], 青木徹彦^{††}, 鈴木森晶^{††}

Akihiro HIROE, Tetsuhiko AOKI, Moriaki SUZUKI

Single-directional linear type cyclic loading and bi-directional horizontal circle and square type loading test were performed to investigate the ultimate behavior on rectangular steel pier base-to-footing connection. The main purpose of this study is to investigate the seismic response of the anchor bolts under several loading types. The destruction nature of an anchor bolt and footing concrete is examined using 1/5 scale model. The experimental result for the monotonic loading test was verified by numerical analysis.

1. はじめに

兵庫県南部地震(1995.1)では主要な幹線道路や高架橋で甚大な被害を被った。このため、橋梁など地上構造物に関する検討が各研究機関で盛んに行われてきたが、地中構造物(アンカー部)の耐震設計手法の開発や設計基準への反映は必ずしも十分に行われていない。橋梁構造物において上部構造と基礎構造はそれぞれが慣性力を受けて互いに影響を及ぼしあう状況となるため、アンカー部の挙動を忠実に耐震設計に取り組むことが設計精度を向上させる上で重要である。

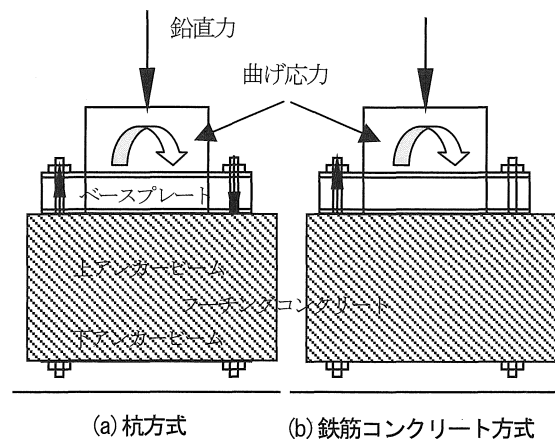
一般にアンカー部は基礎に剛結されたものと仮定されている。道路橋示方書V耐震設計編においても「アンカー部は橋脚の水平耐力と同等以上の耐力を有する」と記述されている¹⁾。しかし兵庫県南部地震では、橋脚躯体のみならずアンカー部の損傷も200件程度確認され、アンカー部の損傷を受けた場合には橋脚躯体の損傷は少なく、アンカー部の損傷が少ない場合には橋脚躯体の損傷は大きいというように、橋脚躯体とアンカー部には一定の傾向があることが確認された²⁾。このように複雑な地震時挙動を考慮する場合、アンカー部の挙動特性を考慮し、橋脚とアンカー部の複合構造としての検討を行う必要がある^{3)~7)}。

そこで本研究では、矩形断面鋼製橋脚アンカー部に着目した実構造物の約1/5の縮尺率を持つ大型供試体を作製し、単調載荷実験、直線繰り返し載荷実験、水平2方向(漸増円形)載荷実験、水平2方向(漸増方形)載荷実験を行う。実験ではアンカー部の破壊性状とフーチングコンクリートのひび割れに注目して計測と観察を行う。また、2方向地震動を受けた場合のアンカー部の基本的な耐荷力特性と劣化挙動についてもあわせて検討を行う。

2. 実験計画

2.1 実験供試体

供試体の設計では、まず実構造の1/5の縮尺率という条件から、アンカーボルト径、アンカーボルトの配置、橋脚断面、アンカーフレームサイズおよびフーチングなどの基本寸法を設定した。アンカー部の定着方式としては、図1(a)に示す杭方式と、図1(b)に示す鉄筋コンクリート方式がある³⁾。前者は、ベースプレート下のコンクリートを無視し、脚柱からの引張力および圧縮力はすべてアンカーボルトを介してフーチング内のアンカービームに伝達させる。後者は、引張力は前者と同様アンカーボルトを介して下アンカービームに伝達されるが、圧縮力は脚柱ベースプレートから直接支圧力としてフーチングに伝達される構造形式である。本研究では、現段階で高速道路等多くの公共構造物に使用されている杭方式に限定して検討を行った。



(a) 杭方式 (b) 鉄筋コンクリート方式

図1 アンカー部の定着方式

[†] 愛知工業大学 大学院 建設システム工学専攻

^{††} 愛知工業大学 都市環境学科 土木工学専攻(豊田市)

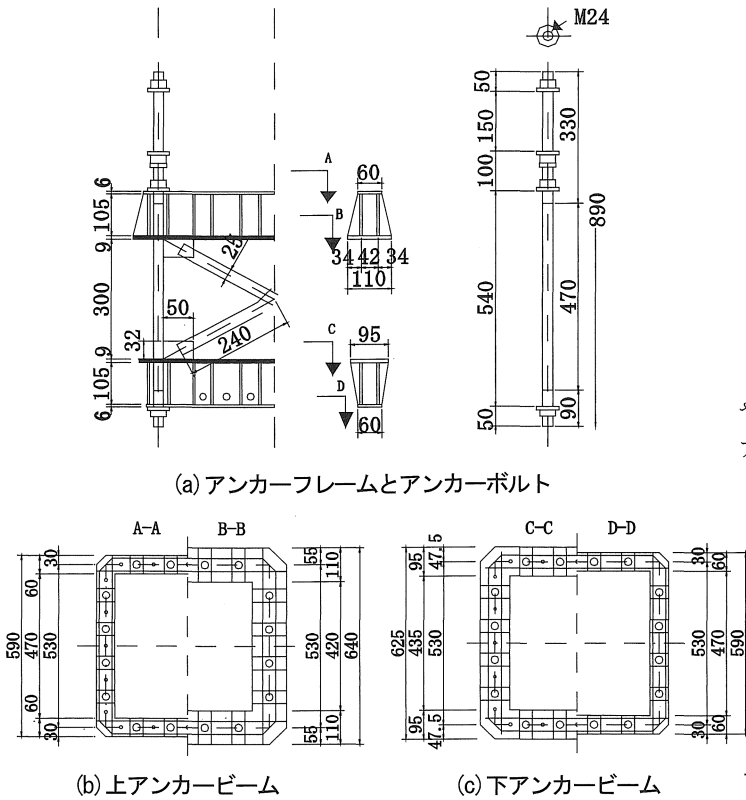


図 2 アンカーフレーム供試体

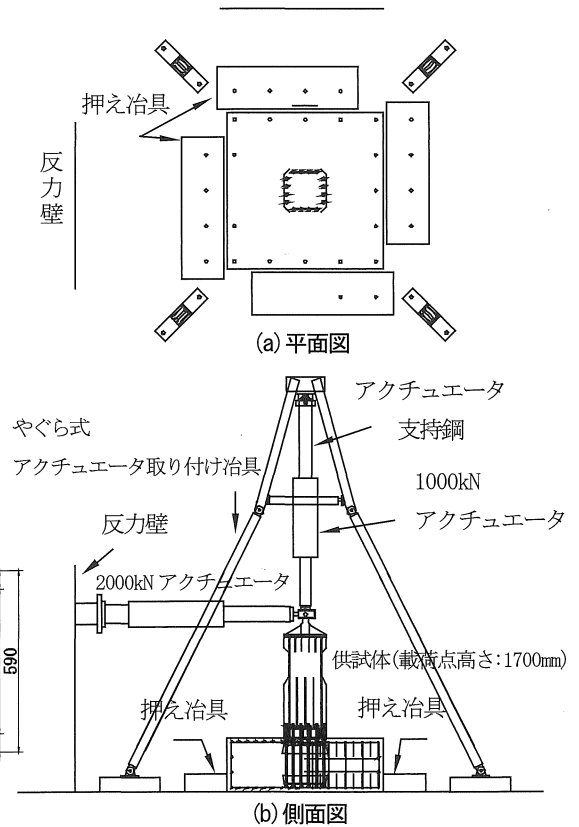


図 3 実験概要図

表 1 設計条件

アンカーボルト	S35CN $\sigma_{sy} = 314$ (N/mm ²)
鋼脚柱	矩形断面鋼製橋脚 SM490Y 約 1/5 模型相当, 高さ: 1440 (mm)
アンカービーム	SM490Y $\sigma_{sa} = 205.8$ (N/mm ²)*
ベースプレート	SM490Y $\sigma_{sa} = 205.8$ (N/mm ²)*
鉄筋	SD295 $\sigma_{sa} = 176.4$ (N/mm ²)*
フーチングコンクリート	2200×2200×750 (mm)

σ_{sa} : 許容応力度 σ_{sy} : 降伏応力 *公称値

(1) アンカーフレーム

アンカーフレームは、これまでの実構造での設計法に従い、震度法レベルの荷重に対して設計を行う。すなわち、橋脚基部に作用する鉛直力、曲げモーメントなどの外力は、すべてアンカーボルトを介してフーチングコンクリートに伝達され、橋脚ベースプレートから直接フーチングコンクリートには伝達されないものとする。アンカーフレーム供試体を図 2(a)~(c)に示す。

(2) 橋脚

橋脚は、アンカーフレームへの荷重シグとして取り扱うこととする。よって橋脚自体はベースプレートを含めてアンカーボルトの破断荷重まで弾性範囲となるような断面で構成されている。

(3) フーチングコンクリート

フーチングコンクリートにおいても、アンカーボルトの終局挙動を観察するため、破断荷重まで曲げおよびせん断破壊をおこさない強度を有する設計を行う。配筋図を図 4 に示す。フーチングコンクリートの剛体変位を防止するため押え治具により鉛直、水平方向の変位を拘束している。

(4) アンカーボルト

本実験で使用するアンカーボルトには通常のアンカーボルトと縦方向にボルトを割り溝加工を施した割溝ボルトの 2 種類を使用する。単調荷重実験、水平 2 方向(漸増円形)荷重実験は前者を用い、繰り返し荷重実験、水平 2 方向(漸増方形)荷重実験では後者を使用した。アンカーボルトの溝加工を施したのは、アンカーボルトの正確なひずみ計測を行い、さらにコンクリートに作用する付着の影響を無視するためである。

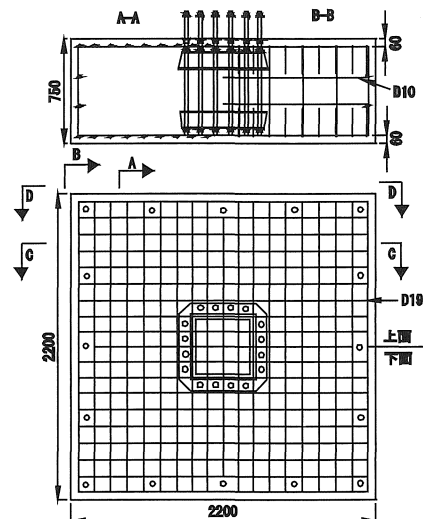


図 4 フーチングコンクリート配筋図

3. 荷荷方法

実験装置の概要図を図 3 に示す。供試体を反力床に固定し、死荷重を想定した一定鉛直荷重を載荷するため供試体上部に 1000kN アクチュエータを 1 基、地震による上部工水平荷重を想定した水平荷重を 2000kN アクチュエータ 2 基用いることにより水平 2 方向載荷を可能にした。実験において水平アクチュエータは変位制御によって行い、鉛直荷重の分力を常時補正しつつ実験を行う。以下に各載荷の種類について詳細に述べる。また、水平 2 方向から載荷するため、本学で開発された 3 方向載荷治具を介してアンカー部に作用させる方法とする。フーチングコンクリートについては、押え治具によって水平方向の移動を拘束させる。

(1) 実験システム

本研究では 2 方向載荷を可能にするため、コンピュータによる自動制御を行った。自動制御を可能にするために、制御用コンピュータ、計測用コンピュータ、理研精機社製静的油圧アクチュエータ・システム制御ラック (RCX-70) および東京測器社製 A/D 変換器 (DRA-101C) を使用した。また、本研究室で考案された Visual Basic6.0 を用いた制御プログラムにより、任意の載荷を行う。制御プログラムでは、アクチュエータおよび計測データを A/D 変換器を通して取り入れ制御ラックとの通信を行い、自動制御させるプログラムになっている。

(2) 載荷履歴

a) 単調載荷実験

鉛直荷重は圧縮側のアンカーボルトが許容応力度となる上部構造重量 $V=426\text{kN}$ に保持した状態で、変位制御で上部水平荷重を増加させることにより、ベースプレートの相対回転角を段階的に単調増加させる。

b) 直線繰り返し載荷実験

アンカーボルトのひずみが降伏ひずみとなる水平変位量 $\delta_0=4.2\text{mm}$ を基準として水平変位を正負両方向に繰り返し漸増載荷を行う (図 5(a) 参照)。

c) 水平 2 方向 (漸増円形) 載荷実験

引張側外縁アンカーボルトの降伏変位を基準とし、 $+1\delta_0$ までは右方向にスパイラルの円を描くよう載荷を行う。その後 y 軸が負の場合には、原点を中心とした半円を描くよう載荷を行い y 軸が正の場合には原点から X 方向の + 側へ $+0.5\delta_0$ 移動した点を中心とした半円の履歴をとる。載荷履歴を 図 5(b) に示す。

d) 水平 2 方向 (漸増方形) 載荷実験

正方形の履歴をとり、図 5(c) のように各頂点までの距離を δ_0 ごとに増加させる載荷を行う。

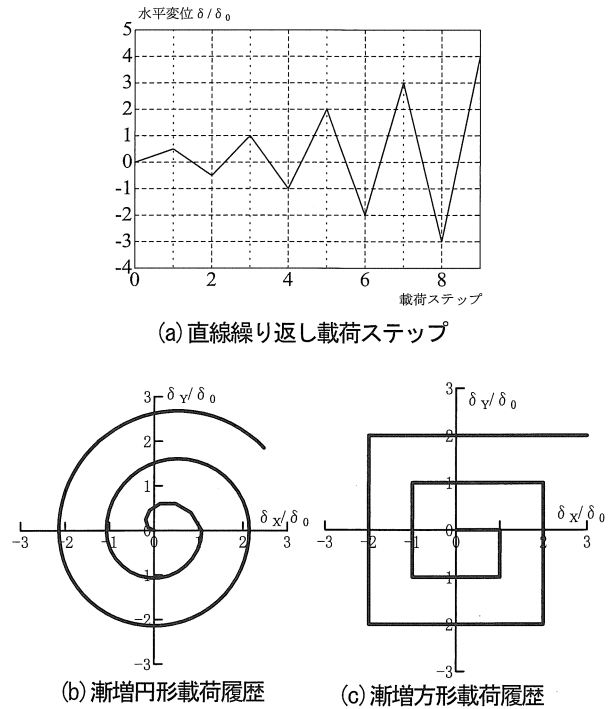


図 5 各載荷履歴

4. 実験結果

4.1 材料試験結果

本研究で使用するアンカーボルト 2 本の引張試験結果の平均値を図 6 と表 2 に示す。割溝ボルトは 1 本を用いた。またコンクリートの圧縮試験結果を表 3 に示す。

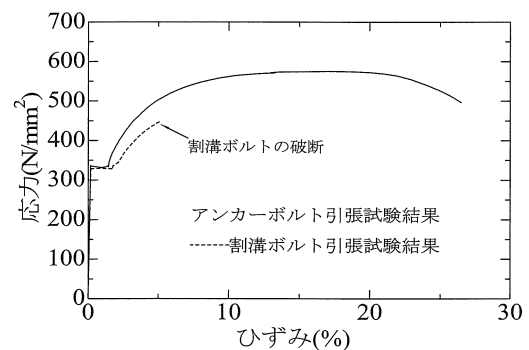


図 6 通常のアンカーボルトと割溝ボルトの関係

表 2 アンカーボルト引張試験結果

ボルトの種類	アンカーボルト(通常)	割溝ボルト
ヤング係数 $E(\text{kN/mm}^2)$	209	196
降伏応力 $\sigma_y(\text{N/mm}^2)$	329	332
最大応力 $\sigma_u(\text{N/mm}^2)$	573	449
最大応力ひずみ $\epsilon_u(\%)$	17.0	5.2
破断時ひずみ $(\%)$	1.31	5.19

表 3 コンクリート圧縮試験結果

	設計仕様	材料試験結果
フーチングコンクリート	$\sigma_{ck}=24$ (N/mm ²)	$f'_c=42.4$ (N/mm ²) (一軸圧縮強度)
ベースプレート内	$\sigma_{ck}=24$ (N/mm ²)	$f'_c=55.0$ (N/mm ²) (一軸圧縮強度)

4.2 単調荷重実験結果

(1) M-θ 関係曲線

本実験で得られた基部モーメントMと相対回転角θの関係を図8に示す。基部モーメントMは水平力と荷重点高さの積で相対回転角は基部コンクリートに対する橋脚基部の変位から求めた回転角を示す。基部モーメントM=500(kNm), 相対回転角θ=0.034(rad)前後までほぼ弾性的な挙動を示し, アンカーボルト全体の剛性が低下しながら, 基部モーメントが増加する傾向が見られる。降伏モーメントM₀=615(kNm)である。その時点の相対回転角θ₀=0.0055radを図のように弾性域と塑性域の接線の交点によって算出した。その後の最大モーメントM₁=963(kNm)(設計荷重の4.4倍)以降の引張側外縁角部のアンカーボルトの破断に伴う急激な荷重の低下により実験は終了した。

(2) 破壊性状(フーチングコンクリート)

単調荷重時のフーチングコンクリートのひび割れ状況を図7(a), (b)に示す。なおθ₀はフーチングに対する相対回転角を示す。11θ₀時にベースプレートの荷重側からひび割れが生じ, 20θ₀でアンカーボルトの引張側でコンクリートの剥離が生じた。21θ₀時にベースプレートとフーチングコンクリートの間で微細な離間を確認し, 最終的な最大離間量は17mmとなった。またベースプレートはフーチングコンクリートに沈み込む形になっていた。ひび割れの進展方向としてはアンカーボルトの引張側から圧縮作用側へと変化し, 最終的にはフーチングコンクリートの端面近くまでひび割れが進展する様子が見られた。

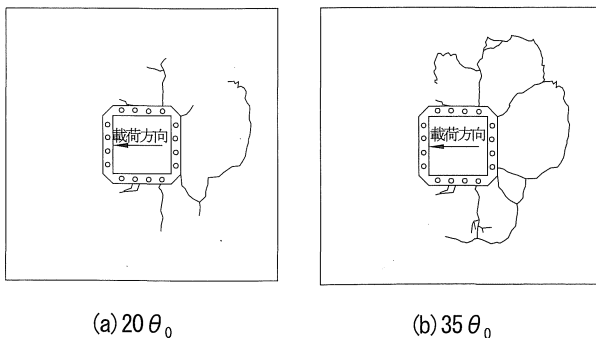


図7 フーチングコンクリートひび割れ進展状況(単調荷重)

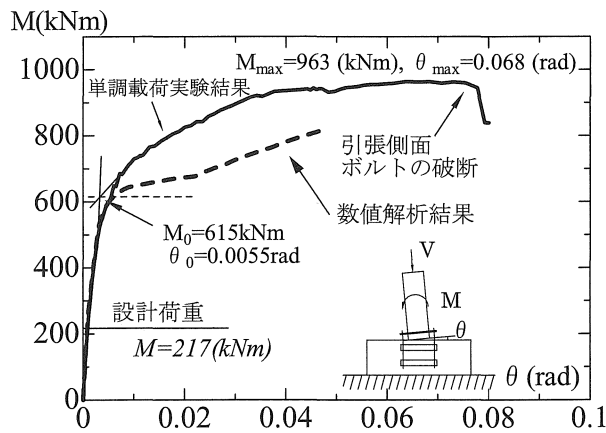


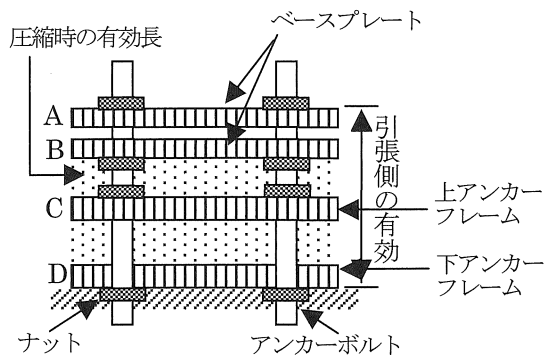
図8 M-θ 関係曲線

4.3 数値解析

本解析では, 単調荷重実験によって得られた M-θ 関係曲線と数値解析の再現性, またアンカーボルトに作用する圧縮力と引張力の有効長の検討を行うため, Visual Vasic6.0 を用いて数値解析を行った。

(1) アンカーボルトの有効長の決定

杭方式ではアンカーボルトは引張力および圧縮力に抵抗する。また基部相対回転角の変化とともに中立軸も移動する。アンカーボルトへの圧縮力の伝達は, 脚柱ベースプレート下に配置されたナットを介して行われる。よってアンカーボルトに作用する圧縮力は脚柱ベースプレート下に配置されたナットより下端で作用するから, 圧縮時の有効長を図9(B~C))ベースプレート下のナットから上アンカーフレーム上端までの間で作用すると仮定した。引張側の有効長については(図9(A~D))ベースプレートと下アンカーフレームの間で作用すると仮定する。また, アンカーボルトの断面積はネジ部谷系の平均値から算定した。



A, B : ベースプレート, C : 上アンカーフレーム
D : 下アンカーフレーム, B~D間はコンクリート充填

図9 アンカー部モデル概念図

(2) 数値解析方法

死荷重に相当する鉛直荷重(426kN)を荷重した後, 水平荷重を

単調増加させるモデルを考える。まず中央点の変位量 δ_0 を -1mm と仮定し 0.5mm ずつ増加させる。なお、相対回転角については $0(\text{rad})$ から $0.001(\text{rad})$ ずつ増加させる。フーチングコンクリートについても同様に縦方向に20分割し直線のバネと仮定し応力を求めた。具体的な算出式は以下に示す通りである。

$$\delta_{st} = \delta_0 + s \tan \theta \quad (1)$$

$$\epsilon_{st} = \frac{\delta_{st}}{L_{st}} \quad (2)$$

$$P_{st} = \sigma_{st} \times A_{st} \quad (3)$$

- θ : 基部回転角, s : 中立軸からアンカーボルトまでの距離
- δ_{st} : アンカーボルトの伸び量, A_{st} : アンカーボルトの有効断面積
- L_{st} : アンカーボルトの有効長, δ_0 : 中央点の変位量
- ϵ_{st} : 基部回転角に対するアンカーボルトのひずみ
- σ_{st} : ϵ_{st} における材料試験結果から得られた応力

(3) 数値解析結果

図8に実験結果と数値解析結果を比較して示す。降伏基部モーメント $M_0=615\text{kNm}$, $\theta_0=0.0055\text{rad}$ の弾性域まで実験結果と数値解析結果はほぼ同等の値を示した。このことから、前述で定義した圧縮力と引張力の作用位置に関する定義の妥当性を確認した。しかし、降伏点以降は実験結果を下回る結果となり、基部モーメントは最大19%低くなった。この理由としては、数値解析ではアンカーボルトに働く曲げおよびせん断応力の影響を無視したためと考えられる。

4.4 直線繰り返し載荷実験結果

(1) M- θ 関係

直線繰り返し載荷実験によって得られた基部モーメント M と相対回転角 θ の関係を図10に示す。最大曲げモーメント M_{\max} は x 軸が正側の最大基部モーメント、また最小曲げモーメント M_{\min} は x 軸が負側の最小基部モーメントとした。水平荷重載荷位置での水平変位 $\pm 4\theta_0$ 程度を境として、アンカーボルトの塑性変形によりスリップ型(原点付近で相対回転角の増大と共に基部モーメントが増大しない現象)の履歴を描き、急激に剛性が低下している。これは、繰り返し載荷によるアンカーボルトの塑性化や脚柱基部コンクリートの圧壊、またフーチングコンクリートのひび割れによるものであると考えられる。また、最大基部モーメント $M_{\max}=14M_0$ 以降、急激な基部モーメントの低下が見られる。この原因としては、アンカーボルトの破断とともにアンカー部の耐力が低下したためと考えられる。

(2) 破壊性状(フーチングコンクリート)

直線繰り返し載荷実験時での水平変位 δ におけるフーチ

ングコンクリートのひび割れ状況を図11に、脚柱ベースプレートの浮き上がりの様子を写真1に示す。単調載荷実験結果のひび割れ結果と比較するとベースプレート付近にひび割れがわずかに見られる程度で繰り返し載荷実験ではほとんどひび割れが起こらなかった。この原因としては、直線繰り返し載荷ではボルトの損傷により最大水平力が単調載荷より上昇しなかったためと考えられる。

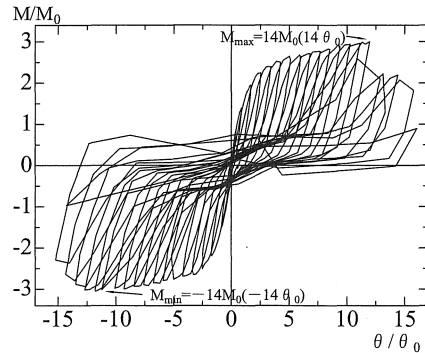


図10 直線繰り返し載荷 M- θ 関係曲線

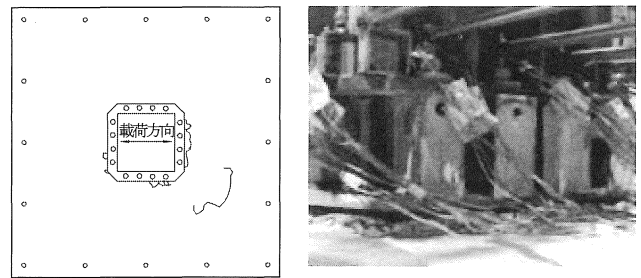


図11 フーチングひび割れ状況 写真1 ベースプレートの浮き上がり

4.5 水平2方向載荷実験結果

(1) M- θ 関係曲線

水平2方向載荷実験によって得られたアンカー部の基部モーメント M と相対回転角 θ の関係を x, y 方向別それぞれ図12(a), (b)と図13(a), (b)に示す。縦軸は、基部モーメント M を降伏基部モーメント M_0 で、横軸は相対回転角を降伏回転角 θ_0 で無次元化して示す。最大基部モーメントは直線繰り返し載荷と比較して水平2方向(漸増円形)載荷が17%低下、水平2方向(漸増方形)載荷は7%低下した値を示した。また、水平2方向(漸増円形)載荷実験において水平荷重載荷点での水平変位 $\pm 3\theta_0$ 程度を境にアンカーボルトの塑性変形により、徐々に剛性が低下するが、再び上昇を示し、 $14\theta_0$ あたりから一部のボルト破断により最大荷重の低下が急速に生じて終局に到っている。荷重の低下後再び上昇する理由は、アンカーボルトの残存耐力により一様にエネルギーを吸収しないためであると考えられる。また、その他の要因として、橋脚がフーチングコンクリートに沈み込むため、フーチングコンクリートにも耐力の伝達が行われるためである。

(2) 耐力相関関係曲線とひび割れ進展状況

(a) 水平 2 方向 (漸増円形) 荷重実験

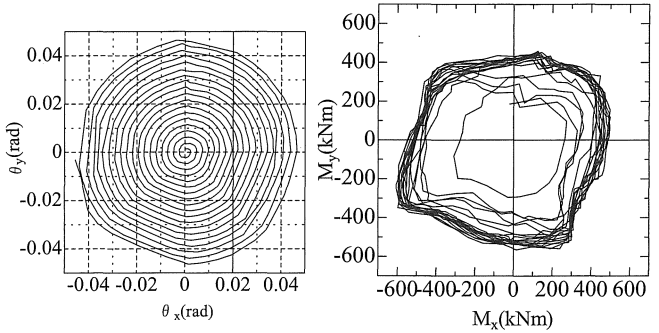
図 14(a) に X, Y 方向の相対回転角 (荷重点変位) を示す. またその時点の耐力の相関関係を図 14(b) に示す. 図 14(a) より, 本実験の荷重履歴は正確な漸増円形の履歴を描く. だが, 相対回転角の増大とともに y 軸が負の箇所若干直線的な漸増円形の履歴をとる. 完全な漸増円形になっていない理由はプログラムの目標値到達までの分割数と目標に到達した事を示す到達評価幅に原因があると考えられる.

また, 図 14(b) より耐力の相関関係の形状は弾性域まではほぼ円形またはひし形の形状を示し, 非弾性域では矩形に近い形状を示した⁷⁾. これはボルトの配置が矩形になっているためである. 最大耐力に至るまでの耐力相関関係はアンカーボルトとフーチングコンクリート内部の局部的な破壊を伴うため, 複雑な挙動をとる.

(b) 水平 2 方向 (漸増方形) 荷重実験

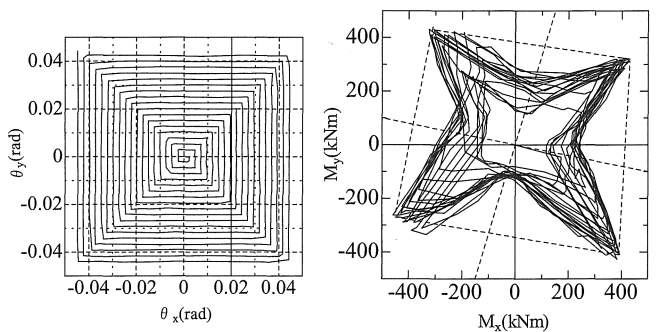
図 15(a) に X, Y 方向の相対回転角 (荷重点変位), またその時点の耐力の相関関係を図 15(a), (b) に示す. 図 15(a) から荷重履歴は相対回転角が増大しからも正確な漸増方形の荷重履歴を示している. よって水平 2 方向を正確に制御させた荷重である.

実験によって得られた相関関係の曲線を図 15(b) の実線で示す. 曲げモーメント相関関係は星型の形状を示した. 星の頂部の中点を原点と結び, 星型の傾きを調べると約 11 度 X, Y 軸から傾いている. これは, 荷重履歴が漸増方形であるために正方形荷重の角部に進むに従い, 水平力に対して有効に抵抗するアンカーボルトが増えるためであると考えられる. またフーチングコンクリートのひび割れ進展状況を図 17(a), (b) に示す. フーチングコンクリートは $M_x - M_y$ の影響を受けて角部を中心にひび割れが進展する結果となった.



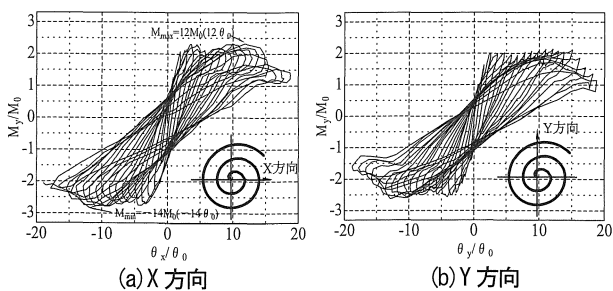
(a) X, Y 方向の相対回転角 (b) X, Y 方向の基部モーメント

図 14 水平 2 方向 (漸増円形) 荷重耐力相関関係曲線

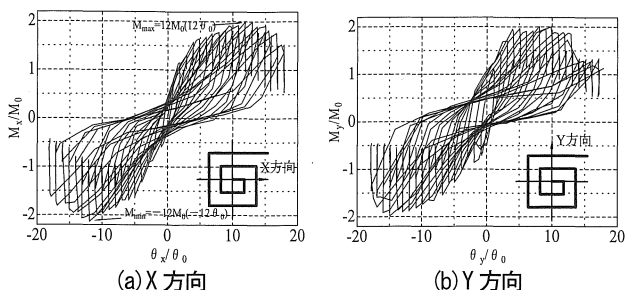


(a) X, Y 方向の相対回転角 (b) X, Y 方向の基部モーメント

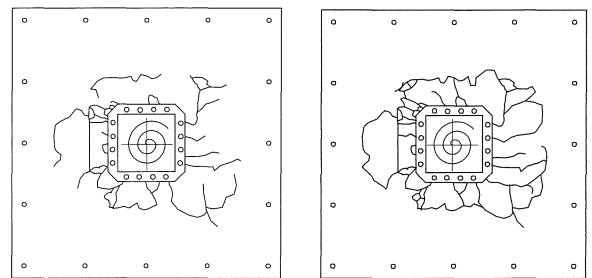
図 15 水平 2 方向 (漸増方形) 荷重耐力相関関係曲線



(a) X 方向 (b) Y 方向
図 12 水平 2 方向 (漸増円形) 荷重の M-θ 関係曲線

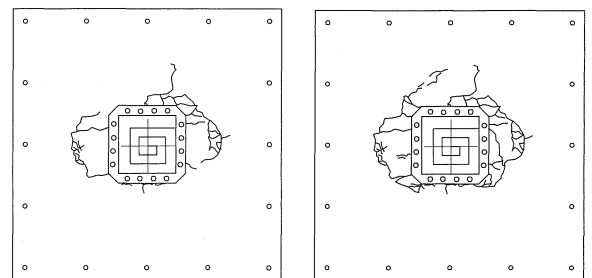


(a) X 方向 (b) Y 方向
図 13 水平 2 方向 (漸増方形) 荷重の M-θ 関係曲線



(a) 15θ₀ (b) 19θ₀

図 16 フーチングのひび割れ (水平 2 方向 (漸増円形) 荷重)



(a) 16θ₀ (b) 18θ₀

図 17 フーチングのひび割れ (水平 2 方向 (漸増方形) 荷重)

(3) アンカーボルトのひずみ履歴 (漸増円形载荷実験)

アンカーボルトの塑性変形は 1 方向载荷と比較して 2 方向载荷の場合が複雑な履歴を描くことが予測出来る。図 18 に水平 2 方向 (漸増円形) 载荷時のアンカーボルトの配置を示し、図 19 に計測されたひずみと基部モーメントの関係を示す。またここではフランジ面に近いアンカーボルトから 1 列目ボルト、2 列目ボルト、3 列目ボルトと称し、各列における代表的なひずみの変化を示す。

図 19(a), (b), (c) に示された基部モーメントが正側において 1, 2 列目のボルトはほぼすべて $11 \delta_y$ 以降の履歴ループの基部モーメントのひずみの変化が微小で、1 列目は 5000μ 付近で、2 列目は 1800μ 付近に収束した値を示す。またフランジ面から橋脚中心部に向かうにつれて、逆 S 字型の曲線を描いている。

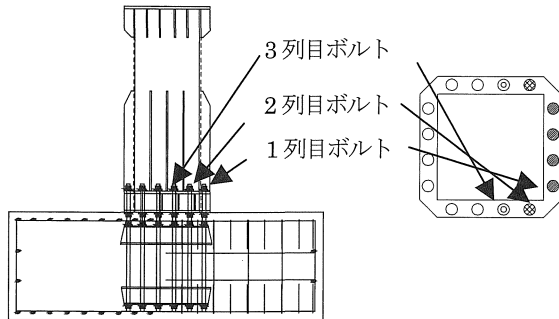
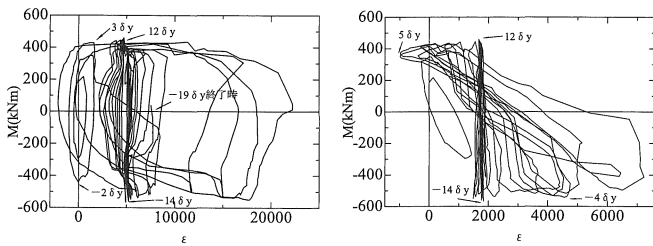
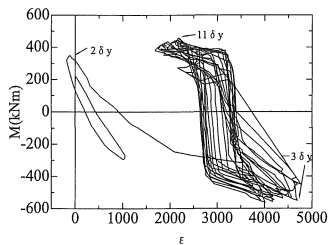


図 18 アンカーボルトの配置図



(a) 1 列目ボルト

(b) 2 列目ボルト



(c) 3 列目ボルト

図 19 各列におけるひずみ関係

(4) (a) M-θ 関係曲線と $\delta_x - \delta_y$ の関連性

水平 2 方向 (漸増方形) 载荷実験によって得られた M-θ 関係曲線について詳細な検討を行う。漸増方形载荷履歴は図 20 に示したように $1 \delta_0$ を①から⑥の順序をたどる。各時点の基部モーメントと相対回転角の関係を X, Y 方向別々に図 21 に示す。

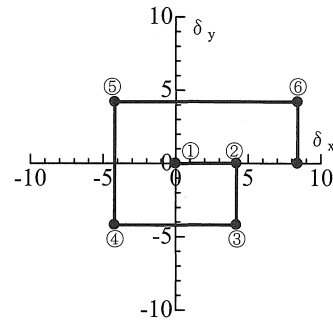
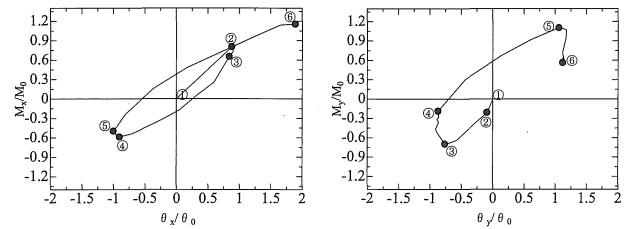


図 20 漸増方形载荷履歴



(a) $1 \delta_0$ 終了時の X 方向

(b) $1 \delta_0$ 終了時の Y 方向

図 21 M-θ 関係 (詳細)

(b) 水平 2 方向 (漸増方形) 载荷の M-θ 関係曲線 ($17 \theta_0$)

図 22 に水平 2 方向 (漸増方形) 载荷によって得られた X 方向側の M-θ 関係曲線 ($17 \theta_0$) を示す。図より最大基部モーメント後、一旦基部モーメントは減少し、その後また上昇する傾向が見られる。これは図 20 の②~③の箇所に対応する。このような現象が起きた原因として、②~③への移動時に θ_x の増大とともに水平荷重は一定の変位を保つため降伏基部モーメントが低下することが原因だと考えられる。この現象は X 軸の正側でそれぞれ生じ、X 軸の正側が 25% 程度荷重の低下率が高い結果を示した。

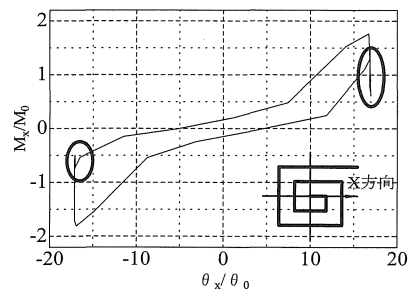


図 22 $17 \theta_0$ における X 方向の M-θ 関係

(5) 包絡線

水平 2 方向 (漸増方形) 载荷実験、水平 2 方向 (漸増方形) 载荷実験によって得られた包絡線を図 23 に、降伏荷重と最大荷重比の関係を表 4 に示す。縦軸は载荷方向の水平荷重 H を降伏水平荷重 H_0 で、また横軸は変位 δ^* を降伏水平変位 δ_0 で無次元化したものを示す。変位 $\delta^* = \Sigma \Delta \delta^*$ と降伏水平荷重 H は以下の (1), (2) 式により求めた。なお、一方向载荷の場合これらの結果は通常の H-δ 関係と同じになる。

$$\Delta \delta^* = \sqrt{\Delta \delta x^2 + \Delta \delta y^2} \quad (1)$$

$$H^* = Hx \frac{\Delta \delta x}{\Delta \delta^*} + Hy \frac{\Delta \delta y}{\Delta \delta^*} \quad (2)$$

$$\Delta E^* = H^* \Delta \delta^*, \quad E^* = \Sigma \Delta E^* \quad (3)$$

同図より直線繰り返し載荷実験, 水平 2 方向(漸増円形)載荷とも設計荷重の約 2.2 倍の強度を有するため, 安全側として評価できる. 水平 2 方向(漸増方形)載荷の降伏荷重は両者と比較して 30%程度低下した値を示した. しかし, 水平 2 方向(漸増円形)載荷, 水平 2 方向(漸増方形)載荷では直線繰り返し載荷と比較して降伏荷重以降の剛性の低下が早く, 前者は最大荷重で 17%程度, 後者は 7%程度低下した値を示した. これは 1 方向載荷と比較して 2 方向載荷の方が多方向に載荷を行い, 入力エネルギーが大きいためと思われる. すなわち早期にアンカーボルトの塑性化, フーチングコンクリートのひび割れが生じるためであろう. また水平 2 方向(漸増円形)載荷実験では 10 δ_0 時に一時的に耐力が増加する. これは, 中心付近のアンカーボルトの残存耐力の影響によるものと考えられ, 水平 2 方向載荷時の水平変位が増大した時に顕著に見られる.

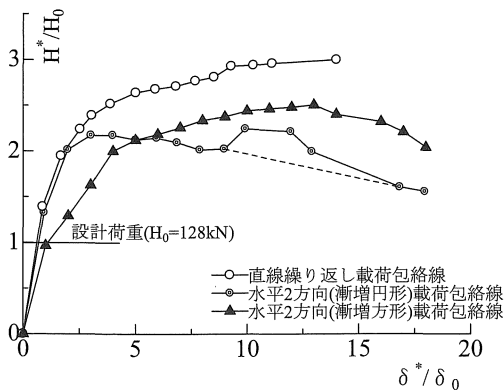


図 23 H* - δ^* 関係曲線

表 4 降伏荷重と最大荷重比

載荷履歴	1 θ_0 時の H^*/H_0	H^*_{max}/H_0
繰り返し載荷	1.39	3.01
漸増円形載荷	1.32	2.24
漸増方形載荷	0.96	2.50

(6) エネルギー吸収量

水平 2 方向(漸増円形)載荷実験によって得られた累積エネルギー吸収量を図 24 に示す. 横軸には変位 δ^* を δ_0 で無次元化し, 縦軸には累積吸収エネルギー E^* を示す. なお, 累積エネルギー吸収は前述の式を用いて (3) 式のように定義した. 直線繰り返し載荷と水平 2 方向(漸増円形)載荷はほぼ単調的にエネルギーを吸収する. しかし前者は 6 δ_0 の時点でそれまでの増加から一旦減少している. これは全アンカーボルトのうち部分的損傷によるも

のと思われる. 水平 2 方向(漸増方形)載荷の累積吸収エネルギーは $\delta^*/\delta_0=15$ 付近で水平 2 方向(漸増円形)載荷実験と比較して約 17%程度高い値を示す. これは水平 2 方向(漸増方形)載荷の入力エネルギーが他より大きいためと考えられる.

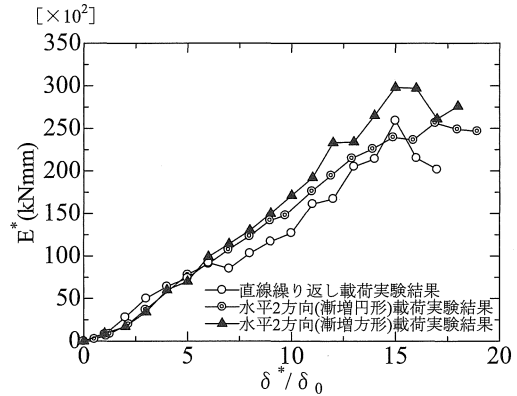


図 24 累積吸収エネルギー

第 4 章 結論

本研究では 2 方向載荷を与えた場合の鋼製橋脚アンカー部の終局挙動を把握するため単調載荷実験, 直線繰り返し載荷実験, 水平 2 方向(漸増円形)載荷実験, 水平 2 方向(漸増方形)載荷実験を行った. また, 数値解析によりアンカーボルトの有効長の検討を行った. 以下に本研究で得られた結論をまとめる.

- (1) 直線繰り返し載荷と比較して水平 2 方向(漸増円形)載荷は最大荷重で 17%低下, 水平 2 方向(漸増方形)載荷は 7%程度低下した値を示した. これは載荷パターンごとの入力エネルギーの差によるものと考えられる.
- (2) 水平 2 方向(漸増円形)載荷はアンカーボルト配置の隅角部からエネルギー吸収が先行しておこり, 橋脚中央付近のアンカーボルトより早く破断する. また, 直線繰り返し載荷実験と比較して水平 2 方向載荷はアンカーボルト全体の曲げに対する剛性の低下が早い.
- (3) 耐力相関関係曲線は水平 2 方向(漸増円形)載荷では矩形状をとり, 水平 2 方向(漸増方形)は星型の形状を示す. これらはボルトの配置と載荷履歴によって形状が変化する.
- (4) 各載荷履歴の変化によるエネルギー吸収は入力エネルギーによって 6 δ_0 付近から違いが現れる.
- (5) 数値解析結果により, アンカーボルトの圧縮側と引張側の有効長の妥当性を検証し, 降伏基部モーメントまで単調載荷実験結果とほぼ同等の結果を得た.
- (6) 巨大地震時のアンカー部に損傷を生じさせないことが重要であるが, もし損傷を生じた時では早期復旧が重要である. 現段階ではアンカーボルトは地中に存在するため, 補修が難しい. よって今後の課題としては, 既設後のアンカーボルトの取替えが出来る構造形式などさらに研究を深める必要がある.

謝辞:本研究を行うにあたり名古屋工業大学 海老澤健正助手に有益な助言を頂いた。また実験は本学土木工学科 4 年生加藤君, 森本君, 本学耐震実験センターの鈴木博氏の協力により行われた。ここに記して深く感謝する次第である。

参考文献

- 1) 前野裕文, 後藤芳顕, 小畑誠, 松浦聖: 付着型アンカーボルトを用いた鋼脚柱定着部の耐力実験, 構造工学論文集, Vol. 39A, pp. 1321-1334, 1993
- 2) (社)日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 2003. 5
- 3) 田嶋仁志, 半野久光, 藤原英之, 後藤芳顕: 単調載荷条件下での矩形断面鋼製橋脚アンカー部の終局挙動とモデル化, 土木学会論文集, No.612/I-46, pp.297-311, 1999
- 4) 後藤芳顕, 上條崇, 藤原英之, 小畑誠: 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. 3
- 5) 市川健, 増田浩志, 佐藤邦昭, 田中淳夫: 鋳造金物を用いた付着接合形式脚柱の力学性状に関する研究, 鋼構造論文集 Vol. 11. 44, pp.35-44, 2004. 12
- 6) 田嶋仁志, 半野久光, 藤原英之: 繰り返し荷重下の矩形断面鋼製橋脚アンカー部の終局挙動, 土木学会論文集 No. 612/I-46, 313-324, 1999. 1
- 7) 崔宰赫, 大井謙一, 嶋脇興助: 繰り返し 2 軸曲げを受ける露出型鉄骨柱脚の載荷実験, 構造工学論文集 Vol. 50B, pp.387-392, 2004. 3
- 8) 園田佳巨, 佐藤鉦志, 篠原啓治, 小林行雄: あと施工アンカーボルトの動的引抜き破壊メカニズムに関する実験的考察, 構造工学論文集 Vol. 43A, pp.1347-1354, 1997. 3
- 9) 早川涼二, 川島一彦, 渡邊学歩: 水平 2 方向地震力を受ける単柱式 RC 橋脚の耐震性, 土木学会論文集 No. 759/I-67, 79-98, 2004. 4
- 10) 山田哲, 森秀樹, 和田章: 高力ボルト 2 面摩擦接合部の繰り返し荷重下における終局挙動, 構造工学論文集 Vol. 50B, pp.379-386, 2004. 3
- 11) 小畑誠, 井上道雄, 後藤芳顕: 付着型アンカーボルトの引き抜き耐力に及ぼす縁端距離の影響, 構造工学論文集 Vol. 42A, pp.1131-1138, 1996. 3

(受理 平成 17 年 3 月 17 日)