

柱基部定着構造の力学的特性に関する実験的研究

Experimental Study on Mechanical Behavior of Column Basements with Anchor Bolts

山口 隆司*, 北田 俊行**, 岡田 潤***, 中野 貴史****

Takashi YAMAGUCHI, Toshiyuki KITADA, Jun OKADA and Takashi NAKANO

- * 博士 (工学) 大阪市立大学大学院講師 工学研究科都市系専攻 (〒558-8585 大阪市住吉区杉本 3-3-138)
 ** 工博 大阪市立大学大学院教授 工学研究科都市系専攻 (〒558-8585 大阪市住吉区杉本 3-3-138)
 *** 工修 大阪市立大学大学院後期博士課程 工学研究科土木工学専攻 (〒558-8585 大阪市住吉区杉本 3-3-138)
 **** 大阪市立大学大学院前期博士課程 工学研究科土木工学専攻 (〒558-8585 大阪市住吉区杉本 3-3-138)

In this study, the both monotonous loading test and cyclic loading test for the column basement structures with footing concrete and anchor bolts are carried out in order to investigate the influence of inelastic behavior of anchor bolts and compression failure of footing concrete on rotational characteristics of them. As a result, it is observed that the compression failure of footing concrete has less influences and the inelastic behavior of anchor bolt has significant influences on rotational characteristics of the column basement structures.

Key Words: anchor bolt, footing concrete, cyclic loading test

キーワード: アンカーボルト, フーチング・コンクリート, 繰返し試験

1. まえがき

照明柱や標識柱, そして, これらよりさらに大型の鋼製橋脚柱など, エンドプレートとアンカーボルトを介してフーチング・コンクリートに定着される基部構造を有する鋼構造物は多数存在する. 中でも, 鋼製橋脚柱については, その重要性から, 基部の力学的挙動を明らかにすべく, 実験と解析との両面から様々な検討が行われており, それらの成果がその設計に反映されている¹⁾⁵⁾. 一方, 照明柱や標識柱などの定着構造については, これまであまり注目されておらず, その力学的特性を詳細に把握するには至っていない. これらの基部定着構造の終局状態に至るまでの挙動の詳細な解明にあたっては, アンカーボルト, フーチング・コンクリート, そしてエンドプレートとの間の荷重伝達のしくみを明らかにする必要がある. また, 鋼製橋脚柱においても, フーチング・コンクリートとエンドプレートとの定着部は, 異種材料の接合部・接触部であり, その荷重伝達機構が複雑であることから, これらの影響を正確に考慮するには至っていない. 基部定着構造の力学的特性に影響を与える因子を図-1にまとめる.

このような背景から, 本研究では, 基部定着部を有する構造物の静的・動的挙動の解明に有効な解析

プログラムの構築を目指し, 北田らによってすでに開発されている板構造の弾塑性有限変位解析コードUSSP⁶⁾に, 現バージョンでは考慮することのできない基部の非線形性についても解析できるように改良するため, 非線形基部要素を追加する際に必要となる基礎的資料の収集を目的とする. そこで, 図-1にあげた因子の中から, アンカーボルトの塑性伸びとフーチング・コンクリートのひび割れ・圧壊とが基部定着構造の曲げモーメント-曲率関係に与える影響を実験的に検討している.

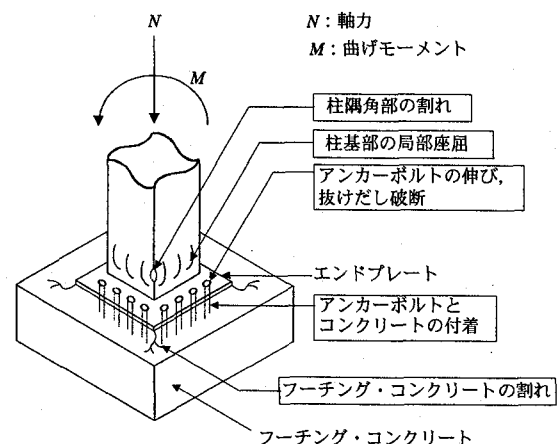


図-1 基部定着構造の力学的特性に影響を与える因子

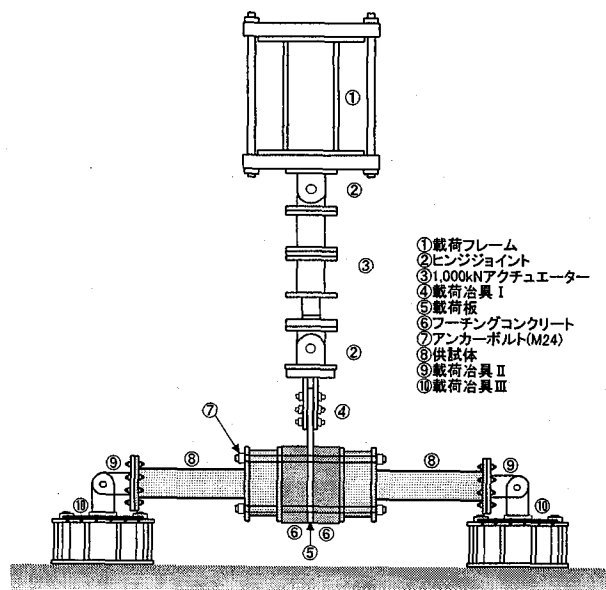


図-2 実験装置

表-1 実験供試体の内訳

名称	载荷方法	着目箇所
SP-1	単調	柱部材のエンドプレートと载荷板間の離間およびアンカーボルトの塑性伸びに起因する基部の非線形挙動
SP-2	単調	柱部材のエンドプレートと载荷板間の離間、アンカーボルトの塑性伸び、およびコンクリート部のひび割れに起因する基部の非線形挙動
SP-3	繰返し	

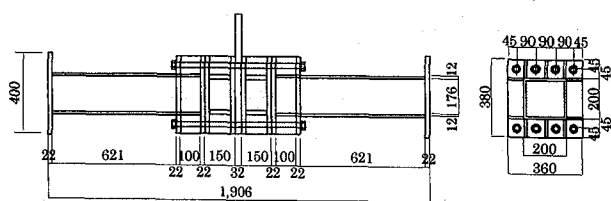
2. 実験概要

2.1 実験装置

本研究で用いた実験装置の概要を図-2に示す。図-2に示すように、柱部材および柱定着部基部をモデル化した実験供試体は水平方向に設置され、载荷板を対称面に左右対称の構造となっている。载荷には1,000kN アクチュエーターを用いて、鉛直方向に単調载荷および繰返し载荷を実施した。

2.2 実験供試体

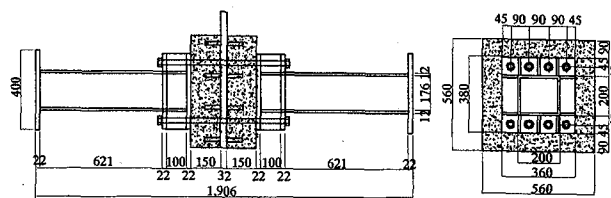
本実験においては、表-1に示す3体の供試体を製作した。実験供試体 SP-1 においては、フーチング・コンクリートが基部定着部の非線形挙動に及ぼす影響を除去するため、フーチング・コンクリートの代わりに同じ高さを持つ鋼製のスペーサー(図-3参照)を製作し、それを用いた。また、実験供試体 SP-2 および SP-3 においては、载荷板とフーチング・コン



(i)側面図

(ii)断面図

(a)SP-1



(i)側面図

(ii)断面図

(b)SP-2およびSP-3

図-3 実験供試体の側面図および断面図

(単位: mm)

表-2 供試体に用いた角形鋼管の機械的性質

引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)	降伏点 (N/mm ²)	ポアソン比
464.6	1.99×10^5	392.4	0.262

表-3 アンカーボルトに用いた鋼材の機械的性質

引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)	降伏点 (N/mm ²)	ポアソン比
643.9	2.10×10^5	405.8	

表-4 コンクリートの材料試験結果

(材令 150 日)

圧縮強度 σ_{ck} (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 E_c (N/mm ²)	ポアソン比
26.63	2.428	2.24×10^4	0.172

クリートとを一体化するために、载荷板に長さ80mmのジベル(M19)を32本配置している。さらに、基部定着部の非線形挙動を呈する原因をアンカーボルトの弾塑性伸びおよびフーチング・コンクリートの非弾性挙動・ひび割れに限定するため、フーチング・コンクリートとアンカーボルトとの間の付着をきっている。今回の実験では、まず、フーチング・コンクリートのひび割れ損傷に起因する基部定着部への影響を評価するための基礎的なデータを入手する目的で、フーチング・コンクリートに鉄筋を入れていない。図-3には、実験供試体の側面図および断面図を示す。なお、供試体の設計にあたっては文献7)を参考にした。

表-5 予想限界曲げモーメント

供試体名	アンカーボルト 降伏時の 曲げモーメント (kN・mm)	コンクリート 圧縮強度到達時の 曲げモーメント (kN・mm)	柱部基部 降伏時の 曲げモーメント (kN・mm)
SP-1	1.83×10^5		1.87×10^5
SP-2 SP-3	1.64×10^5	1.68×10^5	1.87×10^5

表-6 測定項目および測定方法

測定項目	測定方法
载荷荷重	アクチュエーター内部荷重計
载荷板変位	アクチュエーター内部変位計
	外部変位計
曲率	外部変位計(図-4参照)
柱部ひずみ	ひずみゲージ(図-7参照)
フーチング・ コンクリート のひずみ	ひずみゲージ(図-6参照)
アンカーボルト ひずみ	ひずみゲージ(図-5参照)

いずれの実験供試体も、载荷装置の性能を考慮して柱部および基部定着部の断面を決定した。すなわち、柱部には一般構造用角形鋼管 STKR400(200×200×12)を、アンカーボルトには機械構造用炭素鋼鋼材 S45CN(M24)を用い、両端をねじ加工した。また、アンカーボルトは、引張側と圧縮側とにそれぞれ4本ずつ配置した。なお、アンカーボルトの配置は、道路橋示方書⁸⁾に示されているボルトの中心間隔および縁端距離を満たすように決定した。

材料試験結果から求めた実験供試体柱部に用いた一般構造用角形鋼管(STKR400)の機械的性質を表-2に、アンカーボルトに用いた機械構造用炭素鋼鋼材(S45CN)の機械的性質を表-3にそれぞれ示す。また、実験供試体に用いたコンクリートの実験実施日(打設後150日)における材料試験結果を表-4に示す。

本研究では、基部定着部の非線形挙動に着目するため、いずれの供試体においても基部定着部の耐荷力が柱部基部のそれよりも小さくなるように断面が決定されている。今回の実験では、アンカーボルトの塑性伸びとフーチング・コンクリートの圧壊に着目し、アンカーボルト降伏時曲げモーメントとフーチング・コンクリート圧縮強度到達時の曲げモーメントとが同程度の値となるように設計を行っている。基部定着部の予想限界曲げモーメントは、文献⁹⁾を参考に、アンカーボルトを鉄筋に置き換えた単鉄筋モデルに理想化して算出した。

表-5には、柱部の降伏曲げモーメント、アンカー

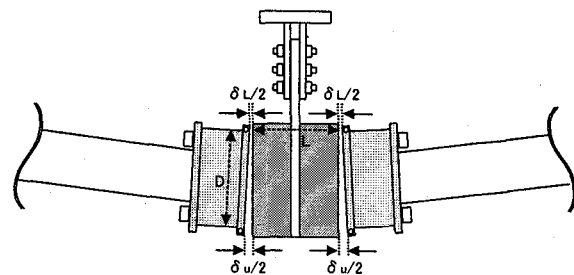
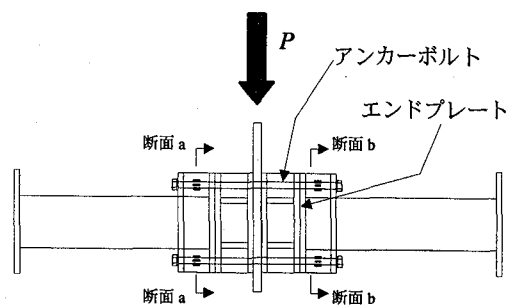
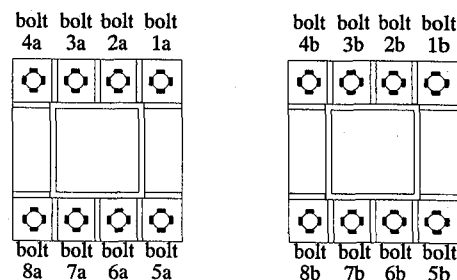


図-4 平均曲率(φ)の定義



(a)側面図



(b)断面 a

(c)断面 b
- : ひずみゲージ

図-5 アンカーボルトのひずみゲージ貼付位置

ボルト降伏時の曲げモーメント、およびフーチング・コンクリートが圧縮強度($0.85 \sigma_{ck}$)に達する時の曲げモーメントの値をまとめている。なお、算出の際、アンカーボルトの断面積としては、ねじ部の断面欠損を考慮した有効断面積を用いた。

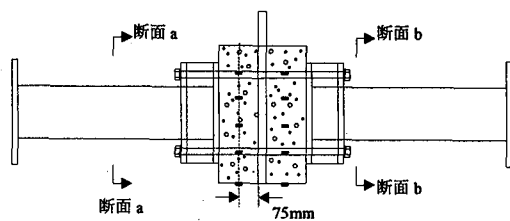
2.3 測定項目と測定方法

载荷実験における測定項目とそれらの測定方法を表-6に示す。

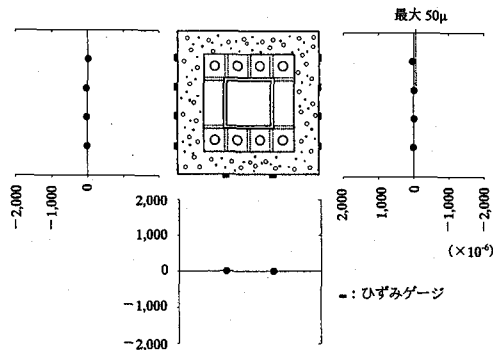
平均曲率(φ)は、図-4を参考に、式(1)によって定義した。

$$\phi = \frac{(\delta_L - \delta_u)}{L \cdot D} \quad \dots(1)$$

アンカーボルトについては、軸力変化や塑性伸びを調べるために軸方向にひずみゲージをはることにした。アンカーボルトのひずみゲージ貼付位置は図-5に示すとおりであり、90度ごとに一枚、計4枚貼り付けられている。



(a) 側面図



(b) ひずみ分布図

図-6 供試体 SP-2 におけるコンクリート外表面のひずみ分布図(a側, 最大荷重載荷時)

3. 実験結果と考察

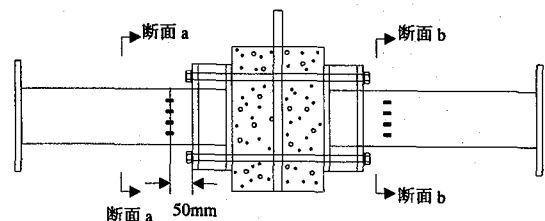
3.1 フーチング・コンクリート表面および柱基部のひずみ分布

ひずみ分布状況の一例として、供試体 SP-2 の最大荷重(393kN)載荷時における a 側のフーチング・コンクリート表面および柱基部のひずみ分布状況を図-6 および図-7 にそれぞれ示す。図-6 より、フーチング・コンクリート外表面で発生しているひずみのレベルは、最大荷重載荷時においても、 50μ 程度であり、非常に小さいことがわかる。すなわち、フーチング部外表面は、ほとんど荷重が伝達されていないことが確認できる。

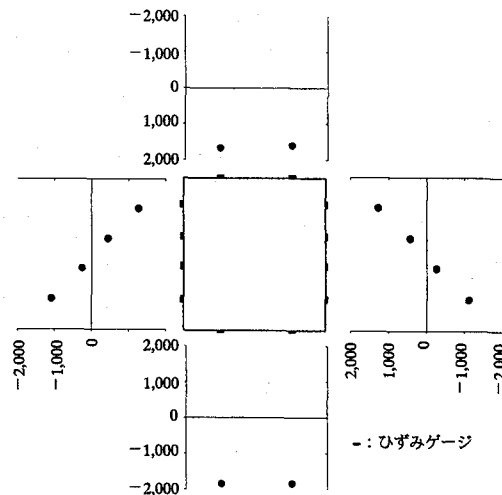
一方、図-7 より、柱基部には、平面保持の仮定が成立するひずみ分布が発生していること、最大荷重作用時においてもまだ弾性範囲内にあることがわかる。また、柱基部のひずみ分布計測断面における曲げモーメントの値から、アクチュエーターで計測される曲げモーメントが実際に実験供試体にかかっている曲げモーメントと同一であることを確認している。

3.2 曲げモーメントーアンカーボルト平均ひずみ関係

供試体 SP-1, SP-2, SP-3 の曲げモーメントとアンカーボルトの平均ひずみとの関係を図-8, 図-9, 図-10 にそれぞれ示す。ここで、曲げモーメントは、ア



(a) 側面図



(b) ひずみ分布図

図-7 供試体 SP-2 における柱基部のひずみ分布図(a側, 最大荷重載荷時)

表-7 アンカーボルト降伏軸方向力到達時の降伏曲げモーメント, 降伏曲率, および曲げ剛度

		SP-1	SP-2	SP-3
有効断面積を用いた場合	降伏曲げモーメント M_{y1} (kN・mm)	1.83×10^5	1.63×10^5	
	降伏曲率 ϕ_{y1} (mm ⁻¹)	6.85×10^{-6}	8.93×10^{-6}	
	曲げ剛度 EI_1 (kN・mm ²)	2.67×10^{10}	1.83×10^{10}	
軸平行部断面積を用いた場合	降伏曲げモーメント M_{y2} (kN・mm)	2.52×10^5	2.19×10^5	
	降伏曲率 ϕ_{y2} (mm ⁻¹)	7.03×10^{-6}	9.39×10^{-6}	
	曲げ剛度 EI_2 (kN・mm ²)	3.58×10^{10}	2.33×10^{10}	
実験より得られた降伏曲げモーメント M_y (kN・mm)		2.14×10^5	2.13×10^5	2.38×10^5

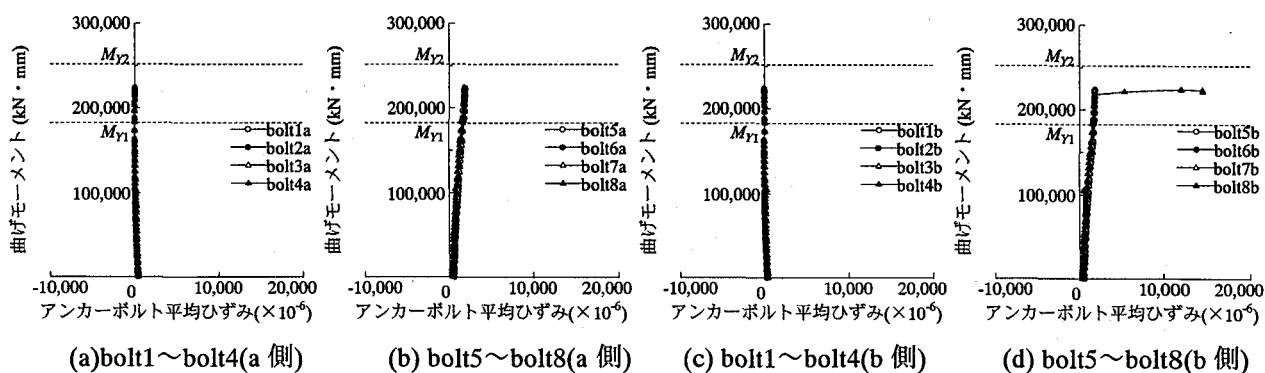


図-8 供試体 SP-1 の曲げモーメントーアンカーボルト平均ひずみ関係

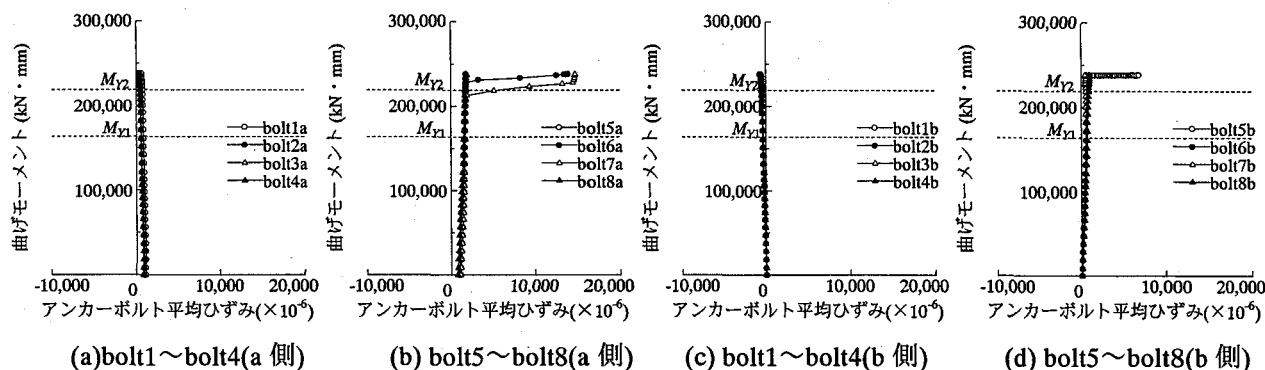


図-9 供試体 SP-2 の曲げモーメントーアンカーボルト平均ひずみ関係

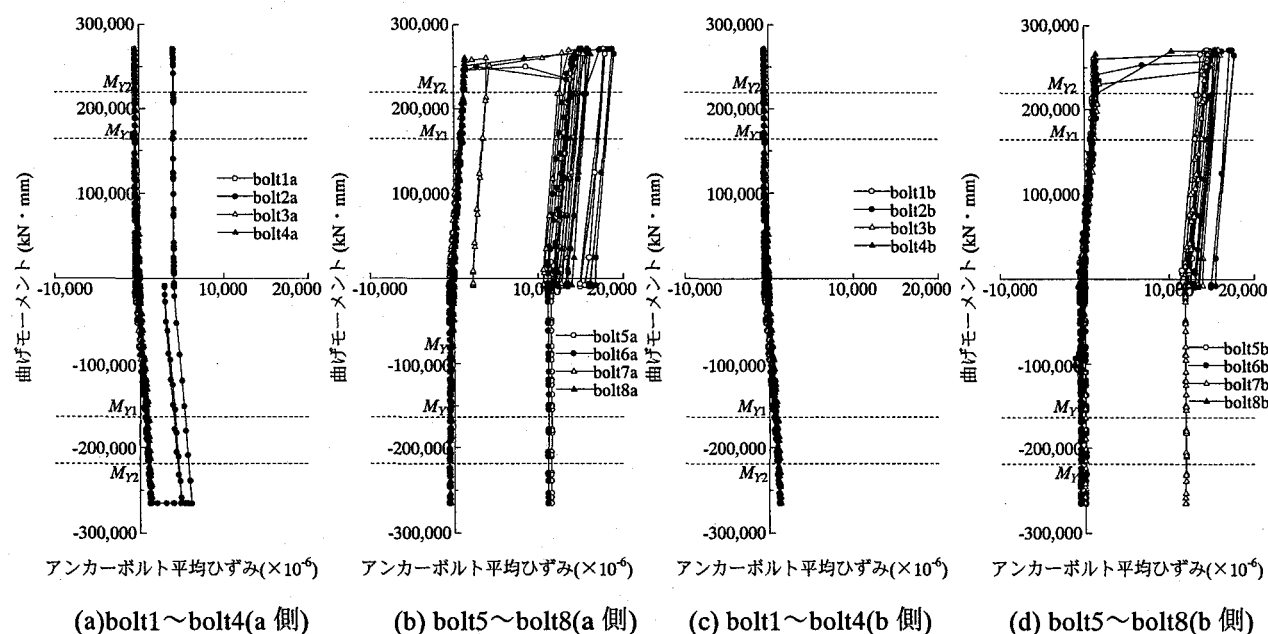


図-10 供試体 SP-3 の曲げモーメントーアンカーボルト平均ひずみ関係

クチュエーターの内部荷重による値を用いて算出した。また、アンカーボルトの平均ひずみは、アンカーボルトの軸方向に貼った4枚のひずみゲージから得られたひずみの平均値である。

図中には、参考のため、平面保持の仮定を満たす単鉄筋モデルの計算により算出される、アンカーボルトが降伏軸方向力に到達する際の降伏曲げモーメント M_{Y1} および M_{Y2} もプロットしている。ここで、

M_{Y1} は降伏曲げモーメントを算出する際、アンカーボルトの断面積を有効断面積に設定して算出した値を意味し、 M_{Y2} はアンカーボルトの断面積を軸平行部（アンカーボルトのねじが切られていない部分の断面積）に設定して算出した値を意味する。

表-7には、各供試体の降伏曲げモーメント、降伏曲率、および曲げ剛度をまとめている。また、この表には、実験より得られた降伏モーメント M_Y の値

も示している。ここで、 M_Y は、アンカーボルトに貼り付けたひずみゲージが塑性化した時点での載荷荷重より算出される曲げモーメントである。実験より得られた降伏曲げモーメント M_Y については、供試体 SP-1、SP-2、および SP-3 とともに、ほぼ等しいか、やや SP-3 のみが高くなっている。供試体 SP-2 と SP-3 とで M_Y の値にばらつきが出た理由としては、本実験では図-5に示しているように、アンカーボルトの軸方向のひずみを計測する箇所が少なく、アンカーボルトの局所的な塑性化を観測しきれていないためであると考えられる。

フーチング・コンクリートが存在しない供試体 SP-1 においては、引張側で最外縁部に配置されている bolt8b が、曲げモーメントが約 $2.1 \times 10^5 \text{ kN} \cdot \text{mm}$ の時点、すなわち約 $0.85 \times M_{Y2}$ で塑性化した。そして、アンカーボルトには、2 mm 程度の残留変形が認められた。

一方、フーチング・コンクリート部を有する供試体 SP-2 においては、bolt5～bolt8、すなわち引張側のアンカーボルトがすべて塑性化し、アンカーボルトの残留変形は 8mm～10 mm 程度認められた。最初に塑性化が観測されたのは bolt7a であり、この時の曲げモーメントは、 $2.1 \times 10^5 \text{ kN} \cdot \text{mm}$ 時点、すなわち、 $0.97 \times M_{Y2}$ である。また、実験終了後のアンカーボルトの残留変形については、SP-1 とは逆に、端部に配置した bolt5 および bolt8 に比べて、内側に配置した bolt6 および bolt7 の残留変形が、より大きくなった。

繰返し載荷を実施した供試体 SP-3 では、bolt5～bolt8 において、塑性化が顕著に見られた。最初に、 $2.38 \times 10^5 \text{ kN} \cdot \text{mm}$ 、すなわち $1.09 \times M_{Y2}$ 時点において、bolt7b の軸平行部が塑性化した。

アンカーボルトの挙動に着目すると、いずれの供試体においても、ねじ部の破断に至る前に軸平行部に塑性化が認められた。例えば、ボルトの破断まで載荷した供試体 SP-3 では、軸平行部の平均ひずみが約 20,000 程度を越えた後に、ネジ部で破断している。

したがって、降伏軸方向力に達する際の曲げモーメントの評価法については、アンカーボルトの軸平行部の断面積を採用した単鉄筋モデル(RC モデル)を用いることで、おおむね推定することが可能であり、適切な安全率を設定することで設計への適用も可能と思われる。

3.3 曲げモーメントー平均曲率関係

(1) 単調載荷

単調載荷実験(供試体 SP-1 および SP-2)より得られた曲げモーメントと曲率との関係を、表-7の降伏曲げモーメント M_{Y2} および降伏曲率 ϕ_{Y2} で無次元化し

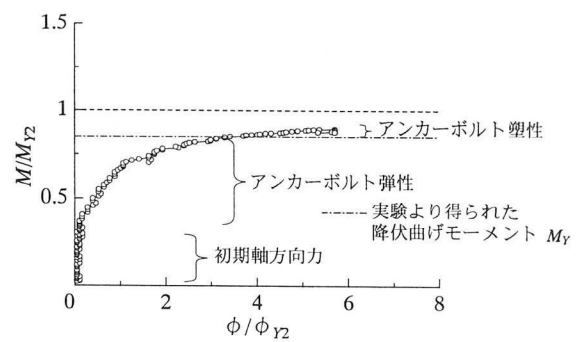


図-11 供試体 SP-1 より得られた M - ϕ 関係

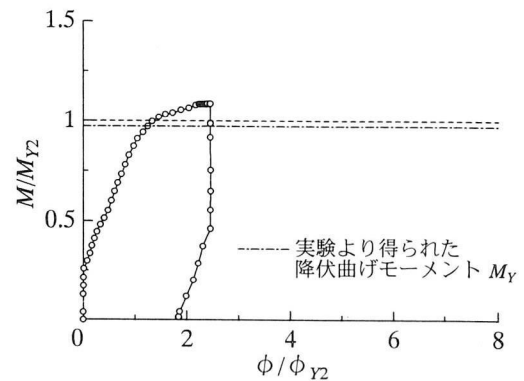
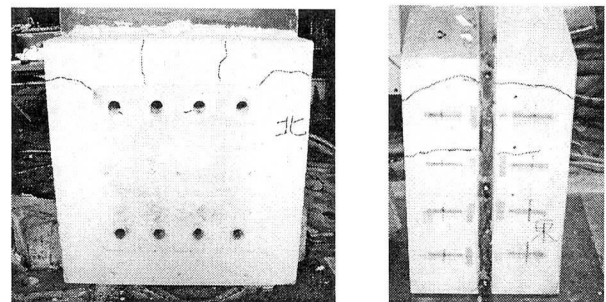


図-12 供試体 SP-2 より得られた M - ϕ 関係

表-8 アンカーボルトに導入した初期軸方向力の例(供試体 SP-3)

	初期軸方向力 (kN)							
	bolt1	bolt2	bolt3	bolt4	bolt5	bolt6	bolt7	bolt8
SP-3	60.625	58.550	56.345	52.408	60.672	53.357	53.013	53.285

アンカーボルトの降伏軸力: $\sigma_Y \times A = 198.8 \text{ kN}$



(a) 正面

(b) 側面

図-13 供試体 SP-2 のフーチング・コンクリートひび割れ状況(ひび割れが大きく見えるようマジックでトレースしている)

て、図-11および図-12に示す。

供試体 SP-1 および SP-2 とともに、初期の段階(供試体 SP-1 および SP-2 とともに、約 $0.3 \times M_{Y2}$)では、曲率の変化が見られない。これはアンカーボルトに導入された初期軸方向力によるものと考えられる。参考までに、供試体 SP-3 のアンカーボルトに導入した初期軸方向力を表-8に示す。初期軸方向力によって、

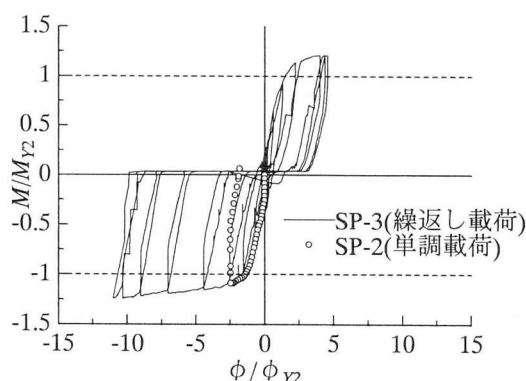


図-14 繰返し載荷実験より得られた M - ϕ 関係

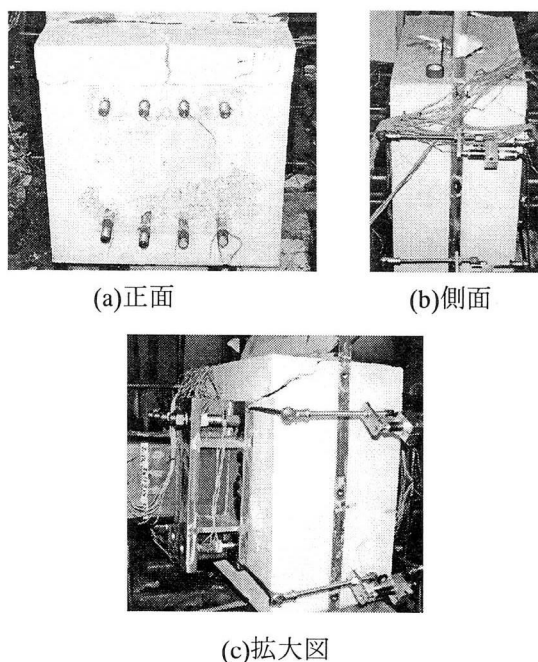


図-15 供試体 SP-3 のフーチング・コンクリートひび割れ状況

離間が発生しない場合には、柱基部は完全に基礎構造と剛結されている挙動を示すが、離間が発生すると、弾性支持的な挙動を示していることがわかる。

また、曲率が大きく変化する曲げモーメントは、供試体 SP-2 では、3.2 節で記述したアンカーボルトの降伏荷重時の曲げモーメントとほぼ一致しており、アンカーボルトの降伏により曲率が急増したことが確認できる。ただし、フーチング・コンクリートを有さない供試体 SP-1 では、そのレベルが異なっており、その差異はひずみゲージを貼り付けた箇所以外での塑性化が先行したためと考えられる。

実験終了後のフーチング・コンクリートのひび割れ状況を図-13に示す。図からわかるように、フーチング・コンクリートは、圧縮側において、水平方向にひび割れが進行しているが、引張側において、ひび割れが発生していない。これは、フーチング・コ

ンクリートとアンカーボルトの付着を完全に切っているため、引張側は、アンカーボルトにのみ作用力がかかり、フーチング・コンクリートにはほとんど荷重が作用していないためである。

以上のことから、曲げモーメントと平均曲率の関係より、フーチング・コンクリートのひび割れが単調載荷時の橋脚の M - ϕ 関係に及ぼす影響は小さく、むしろ、アンカーボルトの塑性伸びが M - ϕ 関係に大きく影響を与えていると考えられる。

(2) 繰返し載荷実験

繰返し載荷実験から得られた曲げモーメントと曲率との関係を表-7の降伏曲げモーメント M_{y2} と降伏曲率 ϕ_{y2} で無次元化し、図-14に示す。図には比較のため単調載荷実験結果(供試体 SP-2)より得られた曲げモーメントと平均曲率の関係も併せてプロットする。

両者を比較すると、 M - ϕ 関係において、単調載荷実験結果と繰返し載荷実験結果との差異はほとんど見られない。

また、繰返し載荷実験終了後のフーチング・コンクリートのひび割れ状況を図-15に示す。単調載荷実験終了後の供試体 SP-2 のひび割れ状況を示している図-13と比較して、供試体 SP-3 ではひび割れ幅がかなり進展していることがわかる。しかしながら、繰返しの進展とともにアンカーボルトの降伏による作用曲げモーメントは低下せずわずかに上昇している。また、鋼製柱のベースプレート直下のフーチング・コンクリートはコンクリートに囲まれているため、コンクリートの圧縮強度以上の圧縮応力が作用したとしても、現実的には圧壊するような現象が生じることはないと考えられる。

したがって、以上のことからフーチング・コンクリートが大きな損傷を受ける前にアンカーボルトが降伏するような場合、曲げモーメント-平均曲率関係は、繰返し載荷時においてもフーチング・コンクリートにほとんど影響されないと言える。

4. 結論

本研究では、柱基部定着構造の力学的挙動において、アンカーボルトの塑性伸びおよびフーチング・コンクリートのひび割れ・圧壊の与える影響を実験的に調べるために、アンカーボルトとフーチング・コンクリートとを含めた基部定着部の載荷実験(単調載荷実験および繰返し載荷実験)を行った。その成果は、以下のとおりである。

- (1)本研究では、基礎的なデータを入手する目的で、アンカーボルトの降伏時の曲げモーメントとフーチング・コンクリートの圧縮強度到達時の曲げモーメントとが同程度の値となるように柱基部の設計を行った。しかし、実験を実施した結果、アンカーボルトが先に塑性化した。これは、コンクリートの拘束効果によるコンクリートの圧縮強度の上昇が原因と考えられる。
- (2)フーチング・コンクリートが大きな損傷を受ける前にアンカーボルトが塑性化するような場合、柱基部の曲げモーメントー平均曲率関係にフーチング・コンクリートは、ほとんど影響を与えないと考えられる。その結果、本実験のように、アンカーボルトの塑性化が、フーチング・コンクリートの非弾性挙動・ひび割れよりも早く顕在化すると、単調載荷実験と繰返し載荷実験より得られる曲げモーメントー平均曲率関係に差異がほとんど見られず、単調載荷実験結果より繰返し載荷実験の挙動が評価できる。
- (3)本研究で実施した3体の実験結果から、アンカーボルトの軸平行部において塑性化が認められた。したがって、降伏軸方向力に達する際の曲げモーメントの評価法については、アンカーボルトの軸平行部の断面積を採用した単鉄筋モデル(RCモデル)を用いることで、おおむね推定することが可能であり、一次推定法として、本法は有効であることが確認できた。
- (4)今後は、コンクリートとアンカーボルトとの付着を考慮した場合、柱に軸方向力を導入した場合、およびフーチング・コンクリートを鉄筋で補強した場合など、出来るだけ実際に近い実験を行い、それらの影響がどの程度、柱基部の曲げモーメントー平均曲率関係に影響をおよぼすのか検討する必要がある。

謝辞

本研究は平成11～13年度科学研究費補助金・基盤研究(c)(2)(課題番号：11650491)の一部として実施されたものである。

また、本研究を進めるにあたり、(株)酒井鉄工所

の石崎 茂氏および興地正浩氏には、載荷治具製作など、多大な協力をいただいた。ここに記して、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 後藤芳顕, 日比幸一, 上条 崇, 藤原英之, 小畑 誠: アンカーフレーム杭方式による鋼脚柱定着部の繰返し載荷実験, 構造工学論文集, Vol.41A, 土木学会, pp.1137-1143, 1995年3月.
- 2) 後藤芳顕, 宮下 敏, 藤原英之, 上条 崇: 繰返し荷重を受ける鋼製橋脚アンカー部の挙動とモデル化, 土木学会論文集, No.563/I-39, pp.105-123, 1997年4月.
- 3) 宮下 敏, 後藤芳顕, 藤原英之, 上条 崇: アンカー部の挙動を考慮した鋼製橋脚の地震時挙動と耐震設計, 鋼製橋脚の非線形解析と耐震設計に関する論文集, 土木学会, pp.77-84, 1997年5月.
- 4) 迫田治行: 鋼アーチ系橋梁および鋼製橋脚基部定着部の兵庫県南部地震での損傷事例の原因究明と耐震性評価法に関する研究, 大阪市立大学博士論文, 2000年4月.
- 5) 阪神高速道路公団: 設計基準第2部構造物設計基準(橋梁編), 1990年6月.
- 6) USSP 研究会: USSP ユーザーズ・マニュアル, 理論編, Ver.3.0, 日本構研情報(株), 1996年10月.
- 7) Sándor ÁDÁNY and László DUNAI: Modeling of Steel-to-Concrete End-Plate Connections under Monotonic and Cyclic Loading, PERIODICA POLYTECHNICA SER., Vol.41, No.1, pp3-16, 1997.
- 8) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, I.共通編, およびII.鋼橋編, 2002年3月.
- 9) 日本橋梁建設協会: 鋼製橋脚の耐震設計マニュアル, 1998年11月.

(2002年9月13日受付)