

# 高変形能高力ボルトを用いた柱基部定着構造に関する基礎的研究

橋梁工学分野 中野 貴史

## 1. はじめに

照明柱や標識柱, さらにこれより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. 一方, 照明柱や標識柱などの付属構造物については, 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. 特にアンカーボルトの抜けについては, 地面下のことということもあり, 兵庫県南部地震後においても, 詳細な力学的挙動を把握するのに必要な調査研究は行われていない. 基部定着構造の力学的特性に影響を与える因子を図-1.1にまとめる.

本研究では, アンカーボルトに着目し, 基部定着構造におけるアンカーボルトの与える力学的特性を実験的に検討する. また, 高いエネルギー吸収能を有する高変形能ボルトを用いた, 基部全体のエネルギー吸収能の改善性能を検討する.

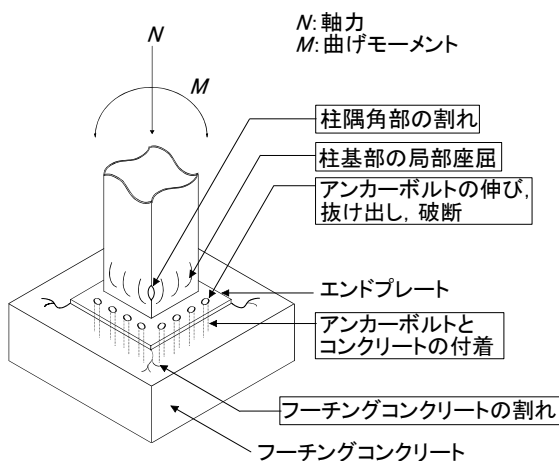


図-1.1 基部定着構造に影響を与える因子

## 2. 解析による高変形能高力ボルト (M24) の特性

### 2.1 解析モデルおよび支持条件

本解析では, 軸平行部を細く高力ボルトのエネルギー吸収能を調べるため, 軸対称有限要素解析を行う. 解析では軸平行部径  $W$  の大きさを変化させた. 図-2.1に太径高変形能ボルトの形状寸法, 要素分割, 荷重条件, 境界条件を示す.

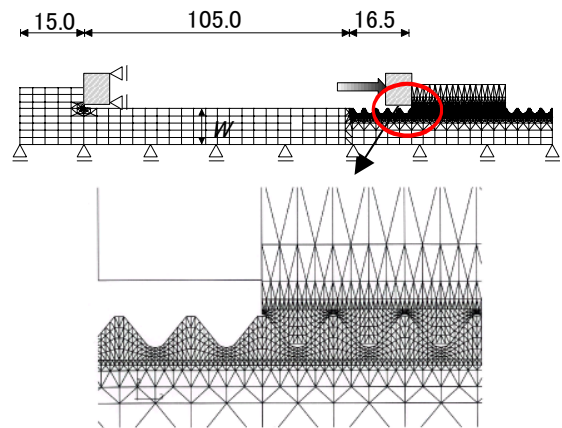


図-2.1 解析モデルの概要(単位: mm)

解析における主な条件, 仮定を以下に要約する.

- 1) 実際には, らせん形状に変化するねじ部の形状を, 図-2.1のように回転体にモデル化し, 軸対称問題として扱う.
- 2) 使用した要素については, 軸平行部およびボルトヘッドは, 4節点, または, 3節点アイソパラメトリック要素を, ねじ部およびナットのかみ合い部は, 6節点, または, 8節点アイソパラメトリック要素を用いる.
- 3) 応力-ひずみ関係はひずみ硬化係数を 0.14 としたバイリニアア型としている.
- 4) ワッシャーには, 軸対称剛体要素を用い, ナットとの接触面に一様な軸力を与える.
- 5) ボルトヘッド-ワッシャー, ねじ部-ナット, ナット-ワッシャーのそれぞれの接触面の摩擦係数を 0.2 としている.
- 6) 太径高変形能ボルトの等級は, F10T とする. 設定した機械的性質を表-2.1に示す.

表-2.1 解析に用いた材料の機械的性質

ヤング率 (N/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比	降伏点 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強さ (N/mm <sup>2</sup> )	ひずみ硬化係数
206,000	0.3	900	1,000	0.14

表-2.2 破壊機構

W(mm)	24	23	22	21.8	21.7	21.5	21	20	19	18	17
最大荷重(kN)	336.3	335.9	334.9	334.4	332.0	325.9	310.9	281.9	254.4	228.3	203.5
終局荷重(kN)	336.3	335.9	334.9	334.4	322.8	318.8	303.7	274.1	248.2	221.5	197.3
破壊機構	T	T	T	T	S	S	S	S	S	S	S

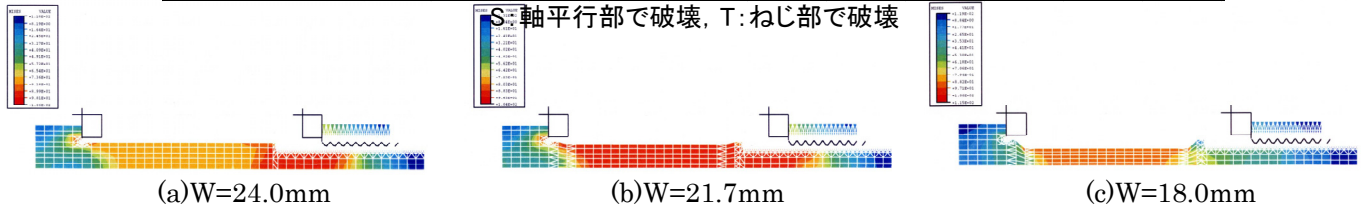


図-2.1 ミーゼス応力分布図

## 2.2 解析結果

軸平行部径  $W$  を変化させた時の軸平行部径ごとの最大荷重、終局荷重、および破壊機構を表-2.2 に示す。また、最大荷重時のミーゼス応力分布図を図-2.1 に示す。さらにエネルギー吸収能を図-2.2 に示す。エネルギー吸収能は、モデル内の一つの要素が終局応力に達した時の応力-ひずみ曲線を台形公式で積分した面積で評価している。

図-2.2 より、エネルギー吸収能は、 $W=21.7\text{mm}$  のときが一番高い値を示し、通常ボルトの約 10 倍程度まで向上する。ねじ部の有効径は、JIS では、約  $W=21.2\text{mm}$  と規定されているが、実際のねじ部の断面積は、規定されている有効断面積よりも大きく、 $W=21.7\text{mm}$  付近が実際のねじ部の有効径といえる。これよりも大きい軸平行部径を有するものは、塑性がねじ部に集中し、軸平行部は弾性のままである。そのため脆性的な挙動を示すため、高いエネルギー吸収能は期待できない。一方、これよりも軸平行部径が小さいものは塑性化が軸平行部で進展し、延性的な挙動を示す。そのため、エネルギー吸収能は飛躍的に向上する。しかし、軸平行部径が小さくするに従い、ボルト自体の強度が低下し、延性的ではあるが、エネルギー吸収能は徐々に低下する。そのため、最もエネルギー吸収能が高くなる軸平行部径は、 $W=21.7\text{mm}$  付近であると考えられる。

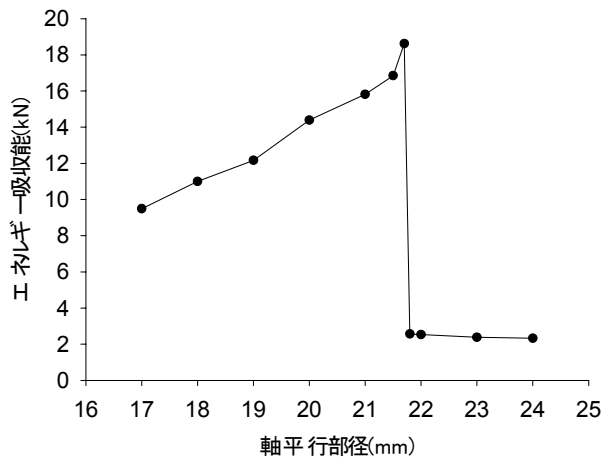


図-2.2 エネルギー吸収能

## 3. 高変形能高力ボルト (M24) に関する実験的検討

### 3.1 引張試験の概要

軸方向荷重作用下における高変形能高力ボルトの力学的特性を実験的に検証するために、単調引張試験を行った。用いた載荷装置と載荷方法の概要を図-3.1 に示す。高力ボルトを固定する治具には、M68 のナットを使用し、Tee plate の外径に M68 用のねじ切りをし、内径に、それぞれ M24、M30 用の穴を開けたものを製作した。

高力ボルト軸平行部のひずみは、軸平行部に 90 度間隔に、4 枚の一軸ひずみゲージを貼付し、これら 4 枚のひずみゲージのひずみ値の平均としている。また、締結区間全体の平均ひずみは、締結区間に変位計を取り付け、その変位量を、締結区間長で除すことで、全体の平均ひずみを算出している。

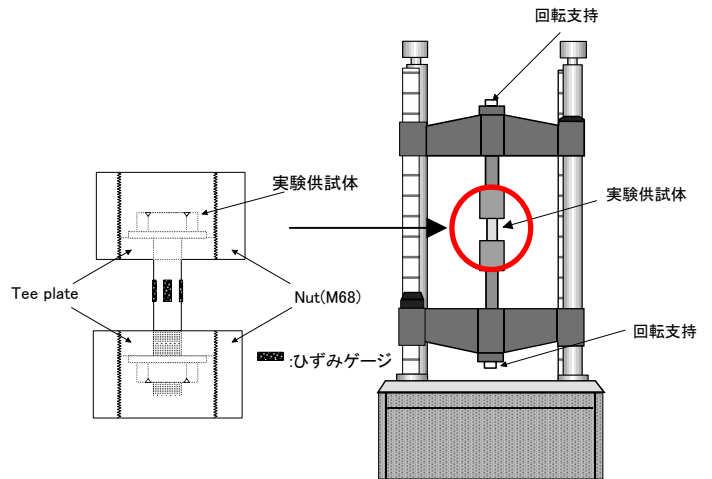


図-3.1 引張試験概要

### 3.2 実験供試体

実験供試体は、高力ボルト(M24)である。軸平行部径を 24、23、22、21mm まで細くしたものをそれぞれ 3 体ずつ製作した。また、その 3 体をそれぞれ、a、b、c としている。実験ケースを表-3.1 に、供試体の概形を図-3.2 に示す。

表-3.1 実験ケース

実験ケース	首下長さ	r	W	l
M24-24	160	1.6~2.4	24	20
M24-23	160		23	20
M24-22	160	1.6~2.4	22	20
M24-21	160	1.6~2.4	21	20

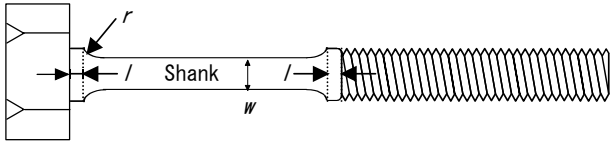


図-3.2 高変形能高力ボルトの概形

### 3.3 実験結果

実験より得られた、荷重-ひずみ曲線を図-3.3に示す。横軸のひずみは、変位計より算出された変位量を締結区間長で除した平均ひずみとしている。

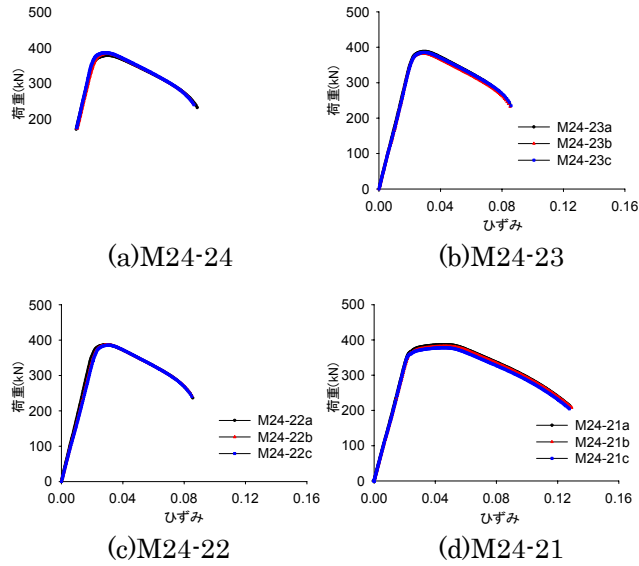


図-3.3 荷重-ひずみ曲線

図3.3より、軸平行部径が24から22mmまでは、荷重-ひずみ関係にほとんど変化がない。破壊機構が、ねじ部から軸平行部に移行するのは、軸平行部径を21mmまで細くした時で、その時の終局ひずみは、通常の高力ボルトに比べて、約1.5倍向上する。

また、軸平行部を細くしても、ねじ部の有効断面積程度までなら、最大荷重は、ほとんど低下しない。

図-3.3に示した曲線から算定されたエネルギー吸収能を図-3.4に示す。ここで、エネルギー吸収能は、試験体が破断に至った時を終局状態とし、荷重-平均ひずみ曲線に台形公式を用いて積分したものである。

軸平行部径が22mmまでの場合は、軸平行部径を細くした効果は現れないが、21mmまで細くした場合、エネルギー吸収能は、通常の高力ボルトに対して約1.5倍向上している。

また、解析との比較であるが、解析では、終局状態を、ひとつの要素が終局ひずみに達した時を終局状態としているため、エネルギー吸収能の最大

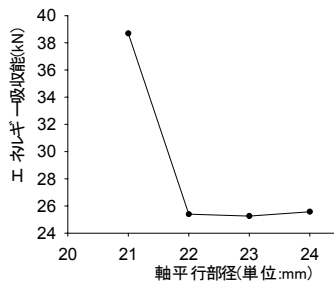


図-3.4 エネルギー吸収能

値に大きな差が見られるが、破壊機構の移行や、エネルギー吸収能が最大になるときの軸平行部径は、ほとんど同じである。また、解析、実験の両面から、高変形能高力ボルト(M24)の最適径は、 $W=21\text{mm}$ とするのが望ましいと言える。

## 4. 高変形能ボルトの基部定着構造への適用性

### 4.1 基部構造実験の概要

柱基部定着構造に高変形能ボルト(M24)を用いた場合の実験の概要を図-4.1に示す。また、設定した供試体の内訳を表-4.1に示し、供試体概形を図-4.2に示す。ここで、SP-3、およびSP-4の軸力比とは、柱に作用する鉛直荷重(以下:死荷重)を想定したもので、供試体の中立軸に鋼棒(M36)を設置し、このボルトにアンカーボルトの降伏荷重のそれぞれ30%と10%に相当する荷重をナットをしめることで導入した。

いずれの実験供試体も、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 S35CN (M24)を用い、高変形能ボルトは、前節の解析と実験との結果を基に、軸平行部を21mmまで切削した。アンカーボルトは、引張側と圧縮側にそれぞれ4本ずつ配置した。

本研究では、基部定着部の非線形挙動に着目するため、いずれの実験供試体においても、アンカー部の耐荷力が小さくなるように断面が決定されている。

各実験は、単純支持を仮定して、算出される曲げモーメントより、柱部材が、降伏するたわみ量を $\delta y$ とし、この $\delta y$ を基準に、漸増する両振りの繰り返し鉛直変位

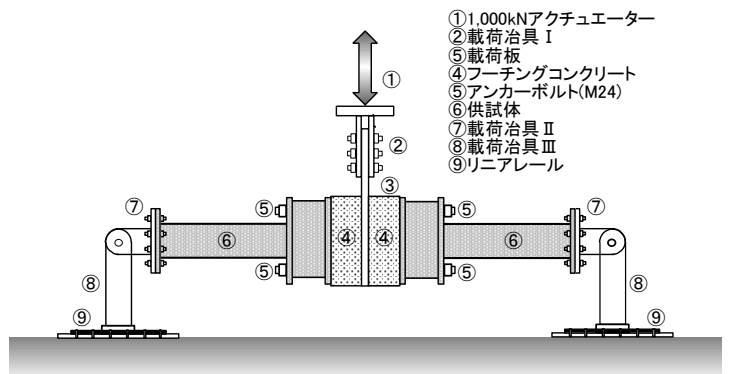


図-4.1 柱基部構造実験の概要

表-4.1 各実験供試体の特徴

実験ケース	軸力比	アンカーボルトの種類(M24)	アンカーボルトの初期導入軸力(一本当たり:86kN)	荷重方法
Sp-1	0	通常	有り	繰り返し漸増荷重
Sp-2	0	高変形能	有り	繰り返し漸増荷重
Sp-3	0.3	通常	有り	繰り返し漸増荷重
Sp-4	0.1	高変形能	有り	繰り返し漸増荷重

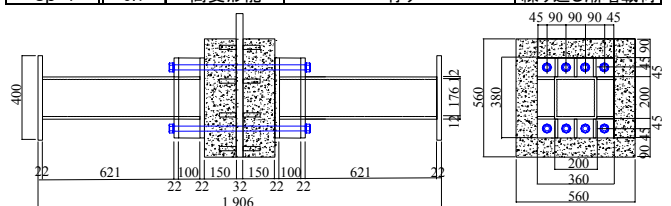


図-4.2 供試体寸法(単位:mm)

を与えた。荷重のステップは、アンカーボルトの破断まで行い、基準降伏変位  $\delta y$  の  $\pm 0.5, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm n$  倍とし、3 サイクルずつ行った。SP-2, および SP-4 は、実験装置の制約上  $10 \delta y$  まで荷重を行った。

## 4.2 実験結果

各供試体の荷重-変位曲線を図-4.3 に示す。また、各実験供試体の最大荷重、最大荷重時の鉛直変位、およびエネルギー吸収能を表-4.2 に示す。最大荷重は、図-4.3 の第 1 象限と第 3 象限の絶対値の平均値であり、鉛直変位は最大荷重時の変位量の絶対値を平均したものである。また、エネルギー吸収能は、図-4.3 の荷重-変位曲線に台形公式を用いて積分したものをエネルギー吸収能と定義し、算出した。SP-1, SP-3 はアンカーボルトの破断までを算出し、SP-2, SP-4 はアクチュエーターのストロークの問題上  $10 \delta y$  までを算出した。

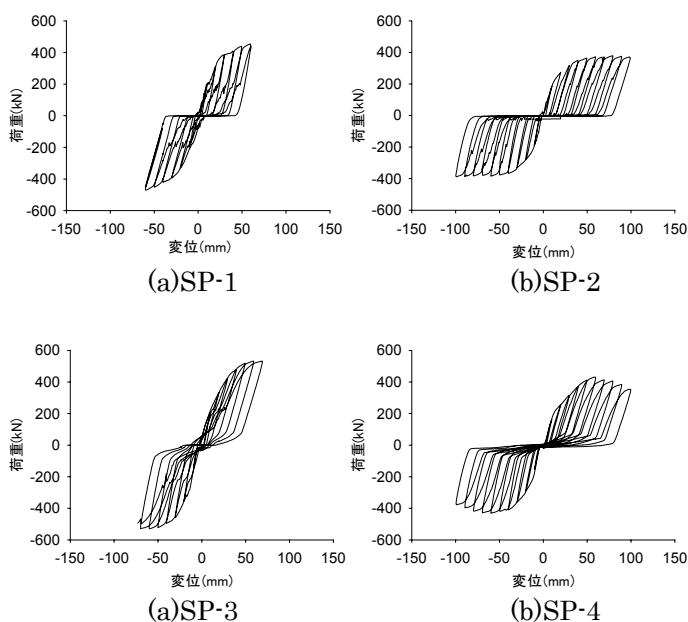


図 4-3 荷重—変位曲線

表-4.2 最大荷重および変位量

	最大荷重(kN)	変位量(mm)	エネルギー吸収能(kN・mm)
SP-1	462.84	59.29	39548
SP-2	377.98	59.70	63591
SP-3	531.59	59.27	55018
SP-4	431.43	59.33	67740

全ての供試体で、鉛直変位量が約 60mm 程度で最大荷重となっている。SP-1 は、耐荷力が低下することなく、鉛直変位約 60mm でアンカーボルトのナットの抜け出しにより、終局状態に至った。SP-3 は、鉛直変位約 70mm で、SP-1 同様に、アンカーボルトのナットの抜け出しにより、終局状態に至った。死荷重を考慮した軸力を導入した SP-3 の最大荷重が、死荷重を考慮していない SP-1 と比較して、約 1.15 倍に向上している。これは、中立軸に配置した、軸力導入用鋼棒(M36)が、鉛直変位を増加させることによって、中立軸からずれ、結果として、強度上昇という現象を引き起こしたものと考えられる。

また、軸平行部を 21mm まで切削した高変形能ボルトをアンカーボルトに用いた、SP-2 は、SP-1 に比較して、最大荷重が、約 8 割程度まで低下している。しかし、SP-1 同様、鉛直変位が約 60mm 程度で最大荷重となるが、その後アンカーボルトの軸平行部の塑性変形が卓越するため、 $10 \delta y$  まで荷重を行っても終局状態には、至らなかった。死荷重を考慮した軸力を導入した SP-4 は、SP-1 と SP-3 の関係と同様に、最大荷重が約 1.14 倍向上しているが、これは、上記と同様の理由と考えられる。

表-4.2 より、SP-2, および SP-4 は、 $10 \delta y$  までのエネルギー吸収能であるため、破断までのエネルギー吸収能は、さらに高い値であると予想できるが、SP-2 は、SP-1 の約 1.6 倍に、SP-4 は SP-3 の約 1.2 倍に向上している。これは、軸平行部を細くすることで、通常のボルトと比較して変形性能がねじ部のみにとどまらず、軸平行部でも高い変形性能を有するためである。また死荷重を考慮した軸力を導入した SP-3, および SP-4 は、死荷重を考慮していない SP-1, および SP-2 よりもエネルギー吸収能は高い値となっている。これは、軸力を導入することで、基部全体の強度が上昇するためである。

## 5. まとめ

1. 軸平行部径を小さくした高変形能ボルトは軸平行部で塑性が卓越するために材料の変形性能を十分に生かした延性的な変形を示す。解析により検討した結果、M24 高力ボルトの場合、軸平行部径  $W=21.7\text{mm}$  の場合、ボルトはねじ部での塑性変形から軸平行部の塑性変形へと移行し、変形性能、エネルギー吸収能が向上する。製作誤差などを考慮すると M24 の最適径は、 $W=21\text{mm}$  程度とするのが望ましい。

2. 解析による結論を検証するために軸平行部径を切削した高変形能ボルトの引張試験では、M24 の破壊機構がねじ部から軸平行部へ移行する軸平行部径は、 $W=21\text{mm}$  であった。従って行った解析は妥当である。また、引張試験結果より算出したエネルギー吸収能からも、解析で求めた最適径とほとんど差がないことから M24 の最適径は  $W=21\text{mm}$  であるといえる。

3. 鉄筋コンクリート方式の基部定着構造のアンカーボルトは、高変形能ボルトを用いた場合、その性能を十分に発揮できると言える。今回の実験では、軸平行部を 21mm まで切削したボルトをアンカーボルトに用いた場合、強度は、8 割程度まで低下するが、エネルギー吸収能は、逆に向上しているため、強地震時においてもその高いエネルギー吸収能が発揮できると言える。

## 参考文献

1) 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. 4.