

2. 鋼製ブラケット設計法検討WG

鋼製ブラケット設計法検討WGメンバー

WG 長	北根	安雄	京都大学
幹 事	山田	智之	株式会社 IHI インフラ建設
部 会 員	佐藤	悠樹	株式会社 駒井ハルテック
〃	川原	将	株式会社 長大
〃	細谷	英司	株式会社 IHI インフラシステム
〃	柴田	寿仁	佐藤鉄工 株式会社

目 次

WG2 「鋼製ブラケット細部構造の設計に関する一提案」

1. はじめに	II- 1
1-1. 鋼製ブラケットのアンカーボルトの孔径について	II- 1
1-2. 斜角を有するブラケットについて	II- 1
1-3. 報告書の構成	II- 2
1-4. 名称の定義	II- 2
2. 鋼製ブラケット構造について	II- 5
2-1. 鋼製ブラケットの種類	II- 5
2-2. 鋼製ブラケットアンカーボルトの設計・施工法	II- 6
2-3. 鋼製ブラケットのアンカーボルト孔に対する問題点	II- 10
3. 拡大孔の影響	II- 12
3-1. はじめに	II- 12
3-2. 引張力に対する検討	II- 14
3-2-1. 検討条件	II- 14
3-2-2. 引張力に対する照査結果	II- 18
3-2-3. FEM 解析	II- 22
3-2-4. まとめ	II- 28
3-3. せん断力に対する検討	II- 29
3-3-1. はじめに	II- 29
3-3-2. 解析対象	II- 29
3-3-3. FEM 解析	II- 30
3-3-4. まとめ	II- 40
3-4. 結論	II- 40
4. 斜角の影響	II- 42
4-1. 基本的な設計の流れ	II- 42
4-2. 斜角を有する場合のアンカーボルトに作用する応力について	II- 43
4-3. 設計事例	II- 43
5. 今後の課題	II- 64
5-1. はじめに	II- 64

5-2. 金属製コマ材	II - 64
5-3. パテ材・樹脂材	II - 64
5-4. 留意点	II - 65
6. まとめ	II - 66
6-1. 拡大孔が鋼製ブラケットの耐荷性能に与える影響	II - 66
6-2. 斜角を有する橋梁に設置する鋼製ブラケットの設計方法	II - 66

1. はじめに

我が国では、高度経済成長期に整備されたインフラ構造物が今後一斉に老朽化し、今後 20 年間で、建設後 50 年以上となる構造物の割合が加速度的に高くなる見込みである。また、阪神大震災以降、大規模地震に対する耐震補強も行われているものの、全橋の対策が終了するのは程遠い進捗である。その中で、老朽化や耐震補強は様々な工種（例えば、床版取替、支承取替、耐震補強部材の設置など）があり、それぞれの工種については数多くの研究開発が行なわれている。

一つの工種、例えば耐震補強部材に着目した場合、重要となる構造、部品等の設計施工については、各種規準、設計施工要領にこと細かく記されており、今までの実績も数多く存在する。しかし、一般に意識しないような部材においては、決定根拠等を判断するに困難なものが存在する。以下にあげる 2 点それぞれにあたるのだが、通常、「重箱の隅をつついてような内容」とも思われる事案が、時として設計施工においてクリティカルとなる場合もある。そこで、この 2 つの事案に着目して、研究を行うこととした。

1-1. 鋼製ブラケットのボルト孔径について

支承取替や耐震補強部材の設置などは、既設構造物が対象となる。既設構造物を対象とする場合、鋼構造物は既設図面と比べ、さほど大きな違いは生じない。既設構造物調査として、各寸法等（部材の幅、長さ、板厚等）を確認することも可能である。しかし、コンクリート構造物の場合、全体的な構造の形状の差異は少ないが、「既設の鉄筋がどのように配筋されているか」という避けては通れない問題が存在する。鉄筋コンクリートの配筋状況について、たとえ鉄筋探査機による調査を行なったとしても位置関係を詳細に計測することは非常に困難である。

通常、工事会社が受注する際の発注図面（建設コンサルタントが行なった詳細設計図面）は、既設図面を基に設計が行われている。コンクリート構造物の配筋など、理想的な配置となっているが、実際の配筋が図面通りとは限らない。アンカーボルトの配置は既設の鉄筋を避けて設置する必要がある。そのため、鉄筋探査や削孔結果を反映させた製作図を作成しなければならない。

部材取付の際、高力ボルトやアンカーボルトのボルト孔は大きいほうが望ましい。製作や施工の誤差、さらには製作図を作成する上での計測の誤差を吸収することが可能となるためである。高力ボルトは拡大孔の場合、ネジ径+4.5mm（M22 ボルトの場合）という明確な規定があるが、アンカーボルトの場合その規定がない。発注図面に倣っているというのが一般的のようである。

そこで、これらの問題点を踏まえ、アンカーボルト、ベースプレート、そしてその孔径の相関関係を整理し、少しでも設計施工が容易に行なえるよう、一つの判断基準となるべき資料を取りまとめた。

1-2. 斜角を有する橋梁のブラケットについて

橋梁は、平面で交差する道路や河川など障害物を回避する、山岳部の谷部を跨ぐ、など架設目的は様々である。そしてその目的や位置関係により橋梁の形式はもちろんのこと、形状そのものも様々なものが存在する。その一つとして、斜角を有する橋梁がある。

通常、設計例など参考となる資料としては直橋（斜角 90°）のものが代表として挙げられている。新設橋の設計例などでは、斜角を有する場合の着目点、留意点等を丁寧に取りまとめられている。しかし、耐震補強部材の設計などにおいては、斜角による影響を全く無視することが出来ない橋梁も存在する。

ここでいう斜角による影響とは、斜角を有することにより作用する力の方向が変化することである。着目する部材の部材軸方向への引張力や部材軸に直角方向のせん断力に加え、斜方向の力を分力に換算し、

それぞれを引張力やせん断力に置き換え、それぞれの計算に考慮する必要がある。

部品メーカーなどで、独自に斜角に影響を考慮した設計手法を採用している事例はあるものの、具体的な設計例として公表されているものは少ない。

そこで、斜角を有する場合の設計法について、現在の設計法、斜角による作用応力への影響を整理し、斜角がブラケットに与える影響について検討を行なった。また、これからの設計の際に参考となる設計事例を作成することとした。

身近な内容ではあるが、特に詳しく検討された資料は少ない。今後、設計施工を行う上で少しでも参考になればと思うところである。

最後に、本研究を行うにあたり参考とした資料名を巻末に記載している。今後参考とした資料等が改変・改訂となる場合もある。その際は、内容をよく検討のうえで参考としてもらいたい。また、研究途中で道路橋示方書の改訂が行われた（平成 29 年 11 月改訂）。本研究は平成 28 年 5 月からスタートしていることから、部会内で平成 24 年道示を基準とすることとした。

1-3. 報告書の構成

WG2 はグループ名を「鋼製ブラケット細部構造の設計に関する一提案WG」として、「鋼製ブラケットのボルト孔径について」と「斜角を有する橋梁のブラケット」の 2 つについて活動を行ってきた。その成果として、報告書を以下の構成で取りまとめている。

- 1.はじめに
- 2.鋼製ブラケット構造について
- 3.拡大孔の影響
- 4.斜角の影響
- 5.今後の課題
- 6.まとめ

第 1 章では、研究の背景、2 つの検討課題を取り上げた経緯、報告書の構成、用語の定義について記載している。第 2 章では、鋼製ブラケットの種類、設計方法、施工方法について取りまとめている。また、現在の鋼製ブラケットを設計施工するにあたっての問題点を記載している。第 3 章では、アンカーボルト孔の拡大孔に関する、現在の基準、各社（国交省、各道路会社、地方自治体等）の傾向を整理している。また、拡大孔とした場合のアンカーボルト本体、ナット、座金、鋼製ブラケットのベースプレートにそれぞれ着目し、アンカーボルト本体に引張力、せん断力が作用した場合の検討を行っている。また、アンカーボルト本体とアンカーボルト孔の位置関係にも着目し、片利きによる検討も行っている。第 4 章では、斜角を有する場合のブラケットの設計法として、斜角に対する分力の考え方を整理し、アンカーボルトの照査内容をまとめた。設計事例として①アンカーボルト方向に応力が作用する場合と②アンカーボルトの直角方向に応力が作用する場合の 2 通りを作成した。設計事例は実業務に使用できるように本報告書にエクセルデータを添付した。第 5 章では、拡大孔を塞ぐ場合の材料や採用に向けての可能性について、簡潔に記載している。第 6 章では、本研究で得られた結論をまとめている。

1-4. 名称の定義

図 1-4-1 にアンカーボルト構成図を、図 1-4-2 に鋼製ブラケット構成図を示す。報告書をまとめるにあたり、部材名称を以下のように定義している。

- ・アンカーボルト
コンクリートに埋め込むボルト。ボルト本体、ナット、座金から構成される。
- ・アンカーボルト径
アンカーボルトのネジ切されていない部分の径。ここでは鉄筋径とする。
- ・ウェブ（鋼製ブラケット）
主にせん断に対し抵抗する部材。
- ・拡大孔
ボルト孔径で、設計や施工その他様々な理由により、通常のものより大きくする必要がある場合に採用する。
- ・ネジ径
アンカーボルトのネジ切りされている部分の径。M径。
- ・ブラケット
コンクリート側面に設置される、片持ち状の支持部材の総称。使用目的、形状など様々である。鋼製であることが多い。
- ・フランジ（鋼製ブラケット）
主に曲げに対し抵抗する部材。
- ・ベースプレート
ブラケットを構成する部材。ブラケットを鋼製とする場合にコンクリート構造の側面と接する。
- ・ボルト孔、ボルト孔径
ブラケットのベースプレートに孔明されているアンカーボルト用の孔およびその孔径。
- ・ボルト本体
アンカーボルトを構成する部材。異形棒鋼や丸鋼などで製作される。

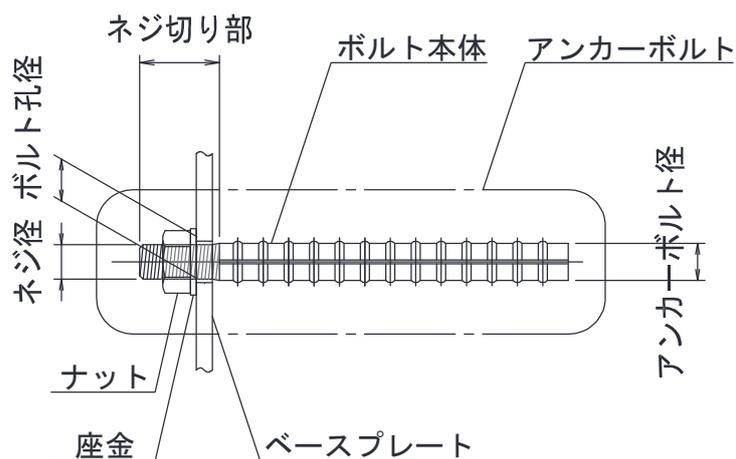


図 1-4-1 アンカーボルト構成図

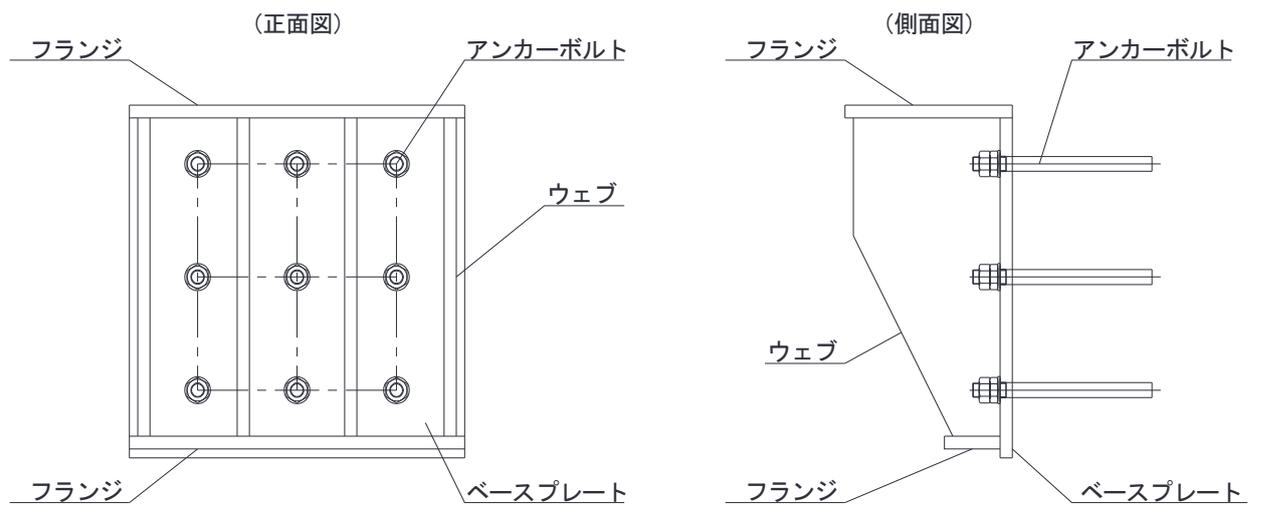


図 1-4-2 鋼製ブラケット構成図

2. 鋼製ブラケット構造について

鉄筋コンクリート橋脚・橋台に鋼製ブラケットを設置する場合は、鉄筋コンクリート躯体側面にアンカーボルトを定着し、これと鋼製ブラケットを接合して設置するケースが一般的である。ここでは鋼製ブラケットの種類・ブラケットアンカーボルトの設計施工法およびその問題点を述べる。

2-1. 鋼製ブラケットの種類

橋脚・橋台躯体側面に設置する鋼製ブラケットは、一般的に以下に分類される。

1) 鋼製ブラケットが鉛直荷重に抵抗する（引張・せん断が作用し、せん断が支配的）

- ・縁端拡幅ブラケット
- ・支承取替時ジャッキアップ用仮受けブラケット

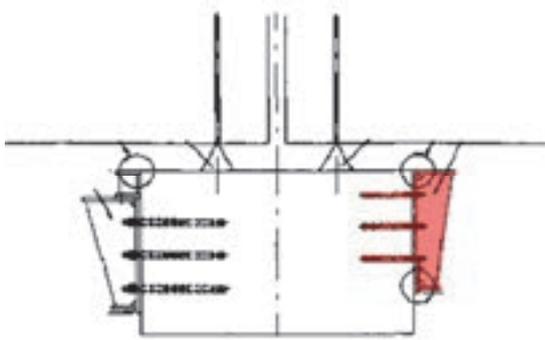


図 2-1-1 縁端拡幅ブラケット



図 2-1-2 ジャッキアップ用ブラケット

2) 鋼製ブラケットが水平荷重に抵抗する（引張・せん断が作用し、引張が支配的）

- ・落橋防止構造定着用ブラケット
- ・ダンパー定着用ブラケット

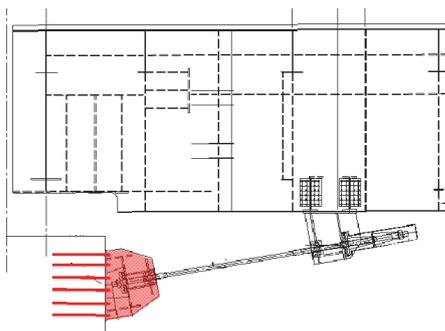


図 2-1-3 落橋防止構造定着用ブラケット



図 2-1-4 ダンパー定着用ブラケット

2-2. 鋼製ブラケットアンカーボルトの設計・施工法

鋼製ブラケットアンカーボルトの設計および施工は、一般的に以下の要領で行われている。

1) アンカーボルトの設計

①アンカーボルトに作用する力

- ・縁端拡幅ブラケット

上部工死荷重がブラケット先端に作用したときの、ブラケットの曲げによるアンカーボルトの引張およびせん断

- ・ジャッキアップ用ブラケット

ジャッキアップ時の不均等を考慮した上部工全反力がジャッキ設置位置に作用したときの、ブラケットの曲げによるアンカーボルトの引張およびせん断

- ・落橋防止構造・ダンパー定着用ブラケット

定着位置に落橋防止構造設計水平力やダンパー最大抵抗力が作用した時の、アンカーボルトの引張および作用方向に伴う付加引張・せん断

②アンカーボルトの設計照査項目

- ・アンカーボルト本体の引張・せん断応力度
- ・アンカーボルトと樹脂、コンクリートと樹脂およびコンクリート本体の付着応力度
- ・コーン状のコンクリートせん断破壊に対する引抜きせん断応力度

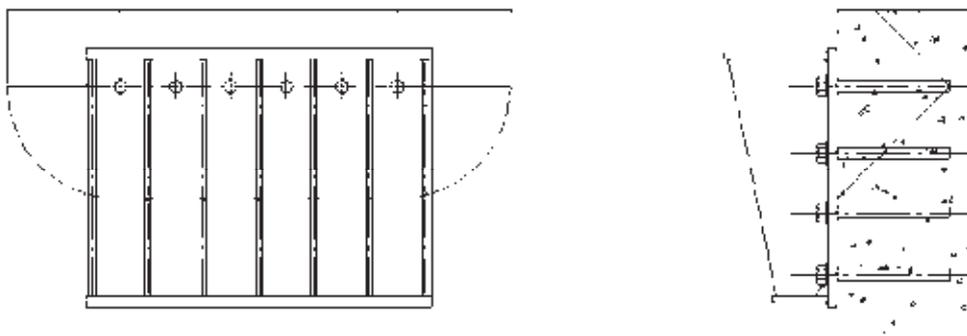


図 2-2-1 コーン状のせん断破壊に対する照査方法

2) アンカーボルトの施工手順

アンカーボルトは、一般的に以下に示す手順で施工される。

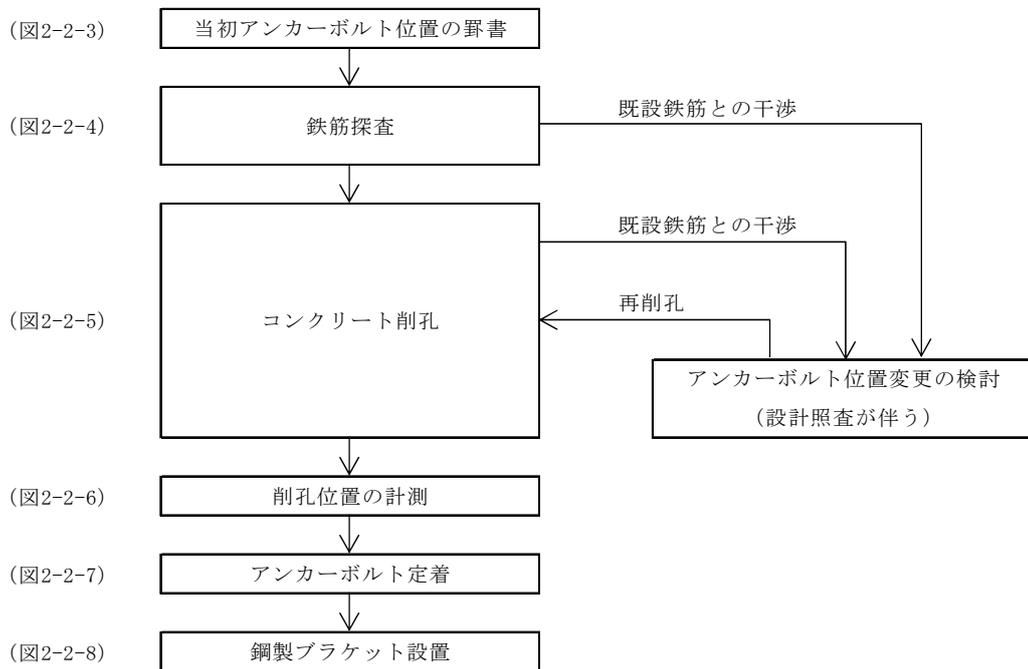


図 2-2-2 アンカーボルト施工フロー

① 当初アンカーボルト位置の罫書

配筋状況反映前の当初アンカーボルト位置の罫書を型板等を用いて行う。



図 2-2-3 当初アンカーボルト位置の罫書

② 鉄筋探査

鉄筋探査機を用いて、内部の鉄筋位置をコンクリート表面に罫書く。

一般的にコンクリート表面から1段目の鉄筋は探査可能だが、2段目以降は1段目と位置が重なっていたり近接していたりしていると探査精度が低下するので注意が必要である)



図 2-2-4 鉄筋探査

③ コンクリート削孔

コアドリル(鉄筋接触時停止機能付)を用いて削孔する。削孔にあたっては、削孔が水平かつブラケットベースプレート面に対して垂直となるよう注意して行う。



図 2-2-5 コンクリート削孔

④ アンカーボルト位置変更の検討

既設鉄筋と干渉する場合は、アンカーボルト位置の変更を設計照査により検討する。

⑤ 削孔位置計測

アンカーボルト位置の変更をブラケット製作に反映するために、削孔完了後の位置を型板等により記録する。



図 2-2-6 削孔位置の計測

⑥ アンカーボルト定着

アンカーボルトを専用のエポキシ樹脂等により定着する。



図 2-2-7 アンカーボルト定着

⑦ 鋼製ブラケット設置

アンカーボルト位置を反映して製作したブラケットを設置する。



図 2-2-8 鋼製ブラケット設置

2-3. 鋼製ブラケットのアンカーボルト孔に対する問題点

鋼製ブラケットを設置するにあたり、設計・施工の観点から大きく以下の2点が過去の文献や施工事例から不明瞭であり、問題となっている。

1) 鋼製ブラケットアンカーボルト孔径

鋼製ブラケットのアンカーボルト径に対する孔径をどの程度にするかは明確な基準がなく、一般的にはアンカーボルト径に対して+3~5mmの孔径としている場合が多くみられる。一方施工においては、アンカーボルトが傾いて施工されていると、鋼製ブラケットが設置できない場合がみられる。図2-3-1に鋼製ブラケットが設置できない状況の概念図を示す。また、図2-3-2にアンカーボルトが傾く要因を2種類示している。このため、施工の観点からは鋼製ブラケットのアンカーボルト孔径を大きくしたいとの要望がある。

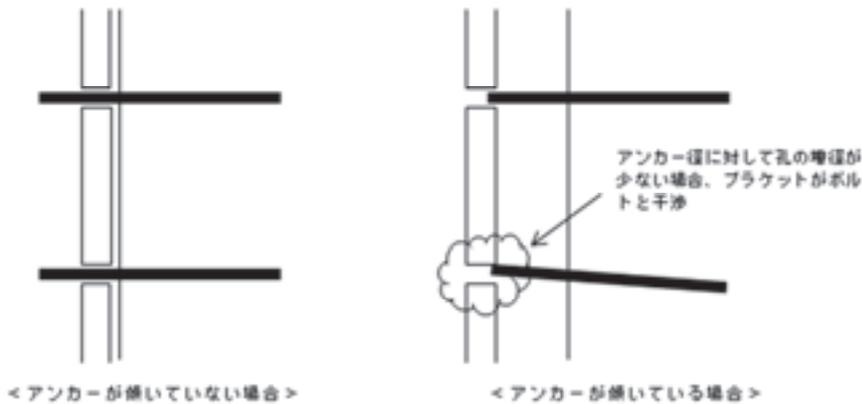


図2-3-1 アンカーボルトが傾くことにより鋼製ブラケットが設置できない状況（概念図）

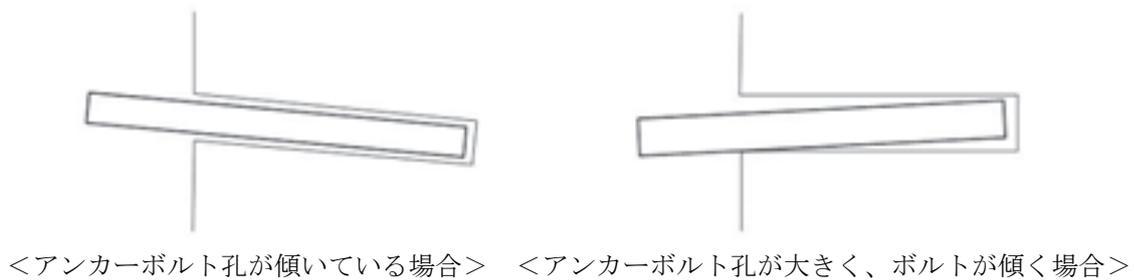


図2-3-2 アンカーボルトが傾く要因

2) 斜角を有する場合のアンカーボルトの設計方法

斜角を有する橋梁に鋼製ブラケットを設置する場合、落橋防止構造やダンパーなどは橋軸方向に、鋼製ブラケットアンカーボルトは橋脚に直角に設置されるため、力の作用方向とアンカーボルトの方向が一致しない。このため、設計上は作用方向に伴う分力を考慮して設計している場合が多くみられる（図 2-3-3 参照）。またコンクリート削孔結果によりブラケットに対して均等かつ対称にアンカーボルトが配置されないため、荷重作用位置とアンカーボルト群の重心が一致せず、アンカーボルトには付加せん断応力が生じている。

このため、設計の観点からは斜角を有する場合のアンカーボルトの設計手法を確立したいとの要望がある。

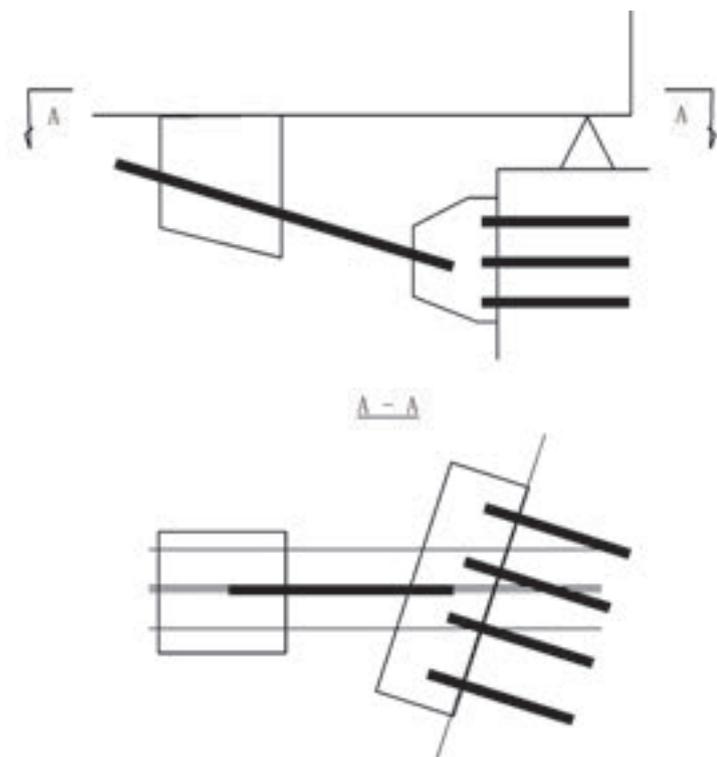


図 2-3-3 斜角により力の作用方向とアンカー方向が一致しない場合

3. 拡大孔の影響

3-1. はじめに

アンカーボルトは、ブラケットなどをコンクリート構造物（橋台、橋脚など）に取り付けるための連結用部材である。ブラケットに作用する力は、引張力やせん断力としてブラケットのベースプレートを介してアンカーボルトに作用する。アンカーボルトは、ボルト本体、ナット、座金（ワッシャー）から構成され、それぞれに異なった役割がある。ボルト本体は、ブラケットに作用する力をコンクリート構造物に伝達させる。ナットは、ボルト本体とブラケットのベースプレートとを確実に締結させる。座金は、ブラケットのベースプレートとナットの間なじみ（ボルト孔径をやや塞ぐかたちとなり、かつナットとブラケットのかかりを確実にする）や、ナットの回転を防止するために用いられる。

通常的设计においては、作用力によりブラケットそのものの構造やアンカーボルトの径、本数などを決定する。ベースプレートに孔明するボルト孔径は計算では算出せず、標準図等に倣うのが一般的である。ボルト孔径はネジ径+3mm～+5mmほどが一般的であるが、基準類で明確に記載してある文献等は見当たらない。そこで、各社（国交省、各道路会社、地方自治体等）の標準図、発注図面等にある記載から、アンカーボルトに作用する応力の方向によって整理を行なった。

表 3-1-1 孔径比較

応力方向	引張力	せん断力
部材名	落橋防止構造 縁端拡幅ブラケット※ ジャッキアップ（仮受）ブラケット※ など	横変位拘束構造 水平力分担構造 縁端拡幅ブラケット※ ジャッキアップ（仮受）ブラケット※ など
各道路会社	ネジ径+3mm (M36以下) (NEXCO:標準図) ¹⁾ ネジ径+2mm (M41以上) (NEXCO:標準図) ¹⁾ ネジ径+5mm (首都高:発注図) ネジ径+5mm (名高速:標準図) ²⁾	ネジ径+6mm (NEXCO:発注図) ネジ径+10mm (首都高:発注図) ネジ径+3mm (名高速:標準図) ²⁾
国土交通省	ネジ径+5mm (関東地整:発注図) ネジ径+3mm (東北地整:発注図)	ネジ径+5mm (関東地整:発注図) ネジ径+4mm (東北地整:発注図)
地方自治体	ネジ径+3mm (東京都:発注図) ネジ径+5mm (埼玉県:発注図)	ネジ径+3mm (東京都:発注図)

注記： 発注図については、設計者の思想もあるため、あくまで参考であり、必ずしもこの通りではない。

※は引張力、せん断力の両方が作用する場合もある。

太字は標準図等で明確に記載されているものを示す。

表 3-1-1 に示すとおり、傾向としてはネジ径+3mm～5mmほどだが、なかにはネジ径+10mmとする資料もあり、一概に断定することはできない。また、応力方向によっても統一性がないようである。このようにボルト孔径については、各社、設計者により考え方がまちまちであるのが現状である。

ボルト孔径については、施工面を考慮すれば拡大孔であることが望ましい。しかし、高力ボルトと違い明確な基準が無いため、どの程度拡大孔とするかの判断は非常に難しいところである。拡大孔としたことによるブラケットのベースプレートとナットの間なじみ（ナットのかかり）、座金に作用する応力、アンカーボルト中心とボルト孔の中心がずれることによる複数本あるアンカーボルトの片利き、などに注意し、

拡大孔の径を決定する必要がある。

なお、橋梁用支承アンカーボルトのベースプレートのボルト孔径について参考に記す。こちらは、せん断力と引張力（上揚力）に抵抗する構造である。ブラケット等に用いるアンカーボルトと異なり、ベースプレートの隅に配置されることが多い支承アンカーボルトは、ボルト孔径の大きさがベースプレートの縁端距離にも影響を及ぼす。そのためボルト孔径はネジ径+2mm となっている³⁾。

3-2. 引張力に対する検討

3-2-1. 検討条件

引張力に対する検討を行うにあたり、検討条件を決定する必要がある。代表的な一例として、引張力が作用する鋼製ブラケットをあげ、検討条件を決定する。

1) 材質

通常、アンカーボルトは、ボルト本体、座金、1種ナット（もしくは1種3種ナット）で構成される。そしてそれぞれの材質の組合せは次のとおりである。

表 3-2-1 材質の組合せ

アンカーボルト		ナット		座金	
異形棒鋼	SD345		SS400相当	強度区分 4	SS400相当
丸鋼	SS400	強度区分 4.8	SS400相当	強度区分 4	SS400相当
	S35CN			強度区分 8	200HV
	S45CN	強度区分 8.8		強度区分 8	200HV

注：代表的な組合せのため、必ずしもこの通りではない

2) ナット、座金（ワッシャー）のサイズ

ナット、座金のサイズは以下の通りとする。

①ナット、座金の形状は、ネジ径にあわせたものとする⁴⁾。

座金やナットの形状は JIS で定められている。特に座金については、特別に製作したものを使うケースも見受けられるが、検討ケースが膨れ上がるのみとなるので、JIS で定められた通常使用するサイズを対象としている。

②ボルト孔径は、座金のサイズより小さいものとする。

座金はナットより平面形状が大きく、ボルト孔径が座金より大きい場合、引張力をボルト本体に伝達できないためである。

3) 検討する引張力

ブラケットに作用した引張力は、ナット、座金を介してボルト本体に伝達する。その際、ボルト本体には引張力、ナットと座金には支圧力がそれぞれ作用する。

①アンカーボルトの引張力による支圧応力の照査

支圧力は、座金とナット、座金とブラケットとの接触面に作用する。

座金とナットの接触面に作用する支圧応力の照査は、JIS に規定されたサイズを用いたため省略する。座金とブラケットとの接触面に作用する場合は、支圧面積 (A) を次のようにした。

$$A = \pi a^2 - \pi r_2^2 \quad (3-2-1)$$

ここに、 a : 座金半径

r_2 : ボルト孔半径

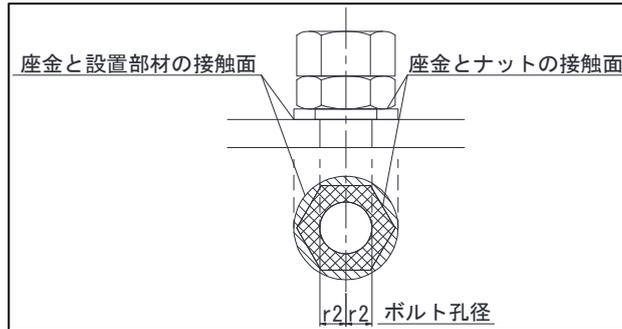


図 3-2-1 座金とナットの接触面の関係

②アンカーボルトの引張力によるげ応力の照査

座金に作用する曲げ応力はボルト孔径のサイズにより検討方法が変化する。

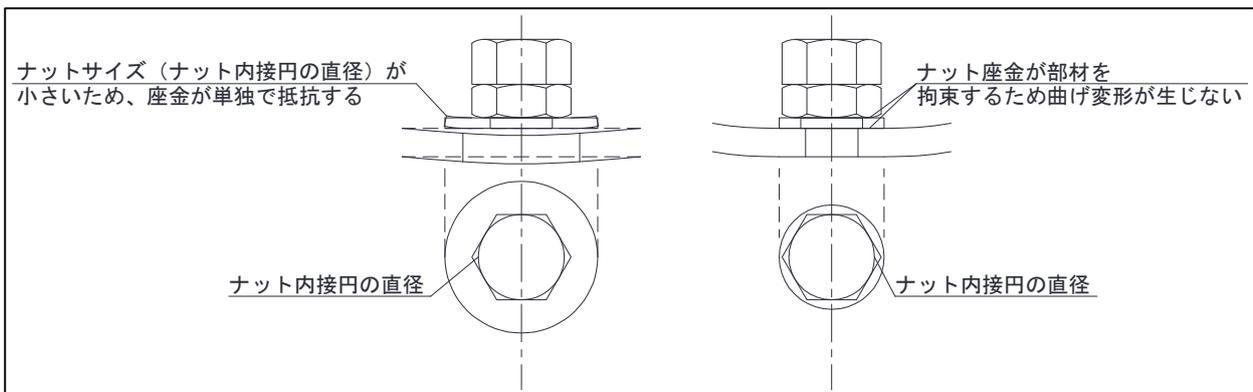


図 3-2-2 座金とボルト孔径の関係

(左：ナットサイズ<ボルト孔径，右：ナットサイズ>ボルト孔径)

(a) ナットサイズ（ナット内接円の直径）がボルト孔より小さい場合

ボルト本体とナットが固定されているため、ブラケットに作用した引張力に対し、座金のみで抵抗しようとし、曲げ変形を生じる。そのため、ナットサイズ（ナット内接円の直径）を支間とした単純支持板を形成しようとする。そのため、座金の円周上に線荷重を受ける単純支持板としての照査が必要である。単純支持板の応力算出式は下式のとおりである。なお、ここでの P とは、座金上に作用する線荷重（等分布荷重）として次のように設定した。

$$P = P' / (2\pi r_l) \quad (3-2-2)$$

ここに、 P ：座金上に作用する線荷重 (N/mm)

P' ：アンカーボルトの引張力

r_l ：ナット内接円半径

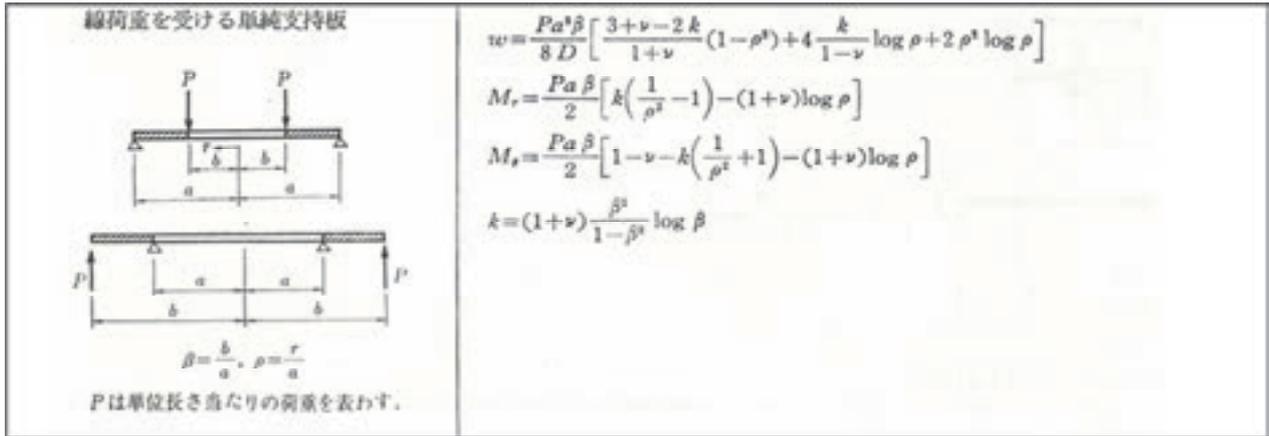


図 3-2-3 単純支持板の応力算出式⁵⁾

(b) ナットサイズ (ナット内接円の直径) がボルト孔より大きい場合

ボルト孔径がナットサイズ (ナット内接円の直径) より小さい場合は、ナットとブラケットが座金を介して直接接する状態となるため、単純支持板を形成せず、直接アンカーボルトに力を伝達する。そのため、引張応力の照査は不要となる。しかし確実にナット座金を介して力を伝達させるため、支圧応力について座金孔径 (座金内径) もしくはボルト孔径の最大値と座金径から形成される支圧面積 A' による照査が必要となる。

$$A' = \pi a^2 - \pi (\max(r, r_2))^2 \tag{3-2-3}$$

ここに、 a : 座金半径

max(r, r₂) : 座金半径もしくはボルト孔径のうち最大値

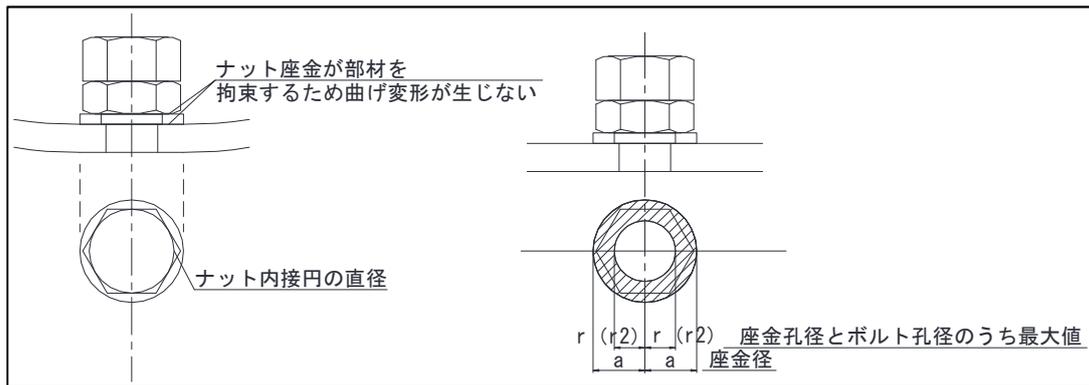


図 3-2-4 支圧面積概略図

以上より、支圧応力と引張応力の検討の組合せは表 3-2-2 のとおりである。

表 3-2-2 検討内容の組合せ

	支圧応力の検討	曲げ応力の検討
ナットサイズ>ボルト孔径	必要	不要 (※)
ナットサイズ<ボルト孔径	必要	必要

※別途支圧照査が必要

4) 引張力

アンカーボルトに作用する引張力は、ボルト本体のネジ切り部の有効断面積⁶⁾に鉄筋 (SD345) の引張許容応力度を乗算したものとした。引張許容応力度は、荷重の組合せによって上限が異なる。ここでは、鉄筋の許容引張応力度の最大値である 200N/mm²とする。

表 3-2-3 許容引張応力度

応力度, 部材の種類		鉄筋の種類			
		SD345	SD390	SD490	
引張 容 力 度	1) 活荷重及び衝撃以外の主荷重が作用する場合 (はり部材等)	100	100	100	
	荷重の組合せに衝突荷重又は地震の影響を含まない場合の基本値	180	180	180	
	2) 一般の部材	160	160	160	
	3) 水中又は地下水位以下に設ける部材				
	荷重の組合せに衝突荷重又は地震の影響を含む場合の基本値	4) 軸方向鉄筋	200	230	290
		5) 上記以外	200	200	200
	6) 鉄筋の重ね継手長又は定継長を算出する場合の基本値		200	230	290
7) 圧縮応力度		200	230	290	

5) ボルト本体の鉄筋径とネジ径及び有効断面積の関係

アンカーボルトに使用する場合の鉄筋径を指定した文献等は少なく、支承用のアンカーボルトに D25 以上を使用すると記載がある程度である⁷⁾。そこで D16 以上の鉄筋に対して検討することとした。D16 以上の鉄筋としたのは、道路橋示方書では軸方向鉄筋の最小径を D16 としていることに倣っている。鉄筋径とネジ径及び有効断面積の関係は次の通りである。

表 3-2-4 鉄筋径とネジ径および有効断面積の関係

鉄筋径	D16	D19		D22	D25		D29
ネジ径	M14	M16	M18	M20	M22	M24	M27
有効断面積 (mm ²)	115.4	156.7	192.5	244.8	303.4	352.5	459.4
鉄筋径	D32	D35	D38	D41	D51		
ネジ径	M30	M33	M36	M39	M42	M45	M48
有効断面積 (mm ²)	560.6	693.6	816.7	975.8	1120.9	1306.0	1473.1

3-2-2. 引張力に対する照査結果

上述した条件を元に、引張力に対する照査を行なった。ボルト孔径は、ネジ径に対し、+3, +5, +10mmの場合としている。

アンカーボルト材質	SD345	アンカーの許容引張応力度	200	N/mm ²
ナット座金材質	SS400相当	ボルト孔径	ネジ径+	3 mm

線荷重を受ける単純支持梁

$$w = \frac{P \cdot D}{2L} \left[\frac{2 + \nu - 2k}{1 + \nu} (1 - \rho^2) + 4 \frac{k}{1 - \nu} \log \rho + 2 \rho^2 \log \rho \right]$$

$$M_L = \frac{P \cdot D}{2} \left[k \left(\frac{1}{\rho^2} - 1 \right) - (1 + \nu) \log \rho \right]$$

$$M_R = \frac{P \cdot D}{2} \left[1 - \nu - k \left(\frac{1}{\rho^2} + 1 \right) - (1 + \nu) \log \rho \right]$$

$$k = (1 + \nu) \frac{D}{2} \log \rho$$

ρは単純支持点からの距離を基にす。

				アンカー(ネジ径)													備考		
				M14	M16	M18	M20	M22	M24	M27	M30	M33	M36	M39	M42	M45		M48	
対応鉄筋				D16	D19			D22	D25			D29	D32	D35	D38	D41	D51		
ボルト孔径	2 × r ₂	(mm)		φ17	φ19	φ21	φ23	φ25	φ27	φ30	φ33	φ36	φ39	φ42	φ45	φ48	φ51		
有効断面積		(mm ²)		115.4	156.7	192.5	244.8	303.4	352.5	459.4	560.6	693.6	816.7	975.8	1120.9	1306.0	1473.1	JIS B 0205	
座金径	2 × a	(mm)		28	30	34	37	39	44	50	56	60	66	72	78	85	92		
座金孔径	2 × r	(mm)		16	18	20	22	24	26	30	33	36	39	42	45	48	52	JIS B 1256	
座金板厚	t	(mm)		3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	4.5	4.5	4.5	6	6	6	7	7	8		
ナット内接円	2 × r ₁	(mm)		22	24	27	30	32	36	41	46	50	55	60	65	70	75	JIS B 1181	
支圧応力	引張力	P	(N)	23080	31340	38500	48960	60680	70500	91880	112120	138720	163340	195160	224180	261200	294620		
	支圧面積	A	(mm ²)	389	423	562	660	704	948	1257	1608	1810	2227	2686	3188	3865	4605		
	支圧応力度	σ _b	(N/mm ²)	59.4	74.0	68.6	74.2	86.2	74.4	73.1	69.7	76.7	73.4	72.7	70.3	67.6	64.0		
	許容支圧応力度	σ _{ba}	(N/mm ²)	210.0	210.0	210.0	210.0	210.0	210.0	210.0	210.0	210.0	210.0	210.0	210.0	210.0	210.0	210.0	
	照査				OK	OK													
引張応力	ナットサイズ(ナット内接円の直径)とボルト径の比較			ボルト孔径が小さい															
	引張応力の照査の有無			照査不要															
	引張力	P	(N)	23080	31340	38500	48960	60680	70500	91880	112120	138720	163340	195160	224180	261200	294620		
	線荷重	P'	(N/mm)	262.4	332.5	360.4	421.2	495.3	510.0	584.9	637.3	735.9	787.8	862.8	914.9	978.1	1019.4		
	線モーメント	M	(N・mm)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
	曲げモーメント	Mr	(N・mm/mm)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
	断面係数	Z	(mm ³)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
	引張応力が最大となる直径	2 × r'	(mm)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
	有孔円板のモーメントの算出	ν		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
		β		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
		ρ		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
		k		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
	引張応力度	σ _t	(N/mm ²)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
	許容引張応力度	σ _{ta}	(N/mm ²)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	SS400相当
	支圧面積	A'	(mm ²)	389	423	562	660	704	948	1257	1608	1810	2227	2686	3188	3865	4524		
支圧応力度	σ _b	(N/mm ²)	59.4	74.0	68.6	74.2	86.2	74.4	73.1	69.7	76.7	73.4	72.7	70.3	67.6	65.1			
許容支圧応力度	σ _{ba}	(N/mm ²)	210.0	210.0	210.0	210.0	210.0	210.0	210.0	210.0	210.0	210.0	210.0	210.0	210.0	210.0	210.0		
照査				OK															

アンカーボルト材質	SD345	アンカーの許容引張応力度	200	N/mm ²
ナット座金材質	SS400相当	ボルト孔径	ネジ径+	5
				mm

線荷重を受ける単純支持梁

$$w = \frac{P_0 L^2}{8 D^2} \left[\frac{2 + \nu - 2k}{1 + \nu} (1 - \rho^2) + 4 \frac{k}{1 - \nu} \log \rho + 2 \rho^2 \log \rho \right]$$

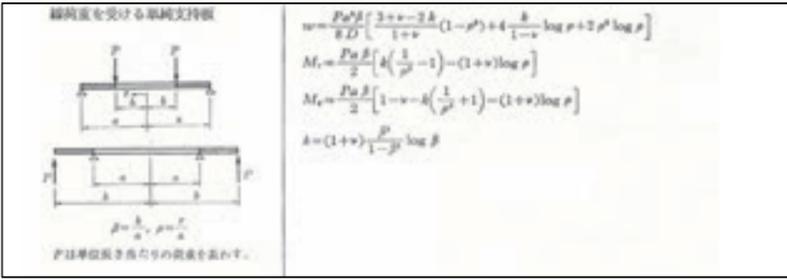
$$M_L = \frac{P_0 L^2}{2} \left[k \left(\frac{1}{\rho^2} - 1 \right) - (1 + \nu) \log \rho \right]$$

$$M_R = \frac{P_0 L^2}{2} \left[1 - \nu - k \left(\frac{1}{\rho^2} + 1 \right) - (1 + \nu) \log \rho \right]$$

$$k = (1 + \nu) \frac{P_0}{1 - \nu} \log \rho$$

ρは単純支持点からの距離を基にす。

				アンカー(ネジ径)													備考		
				M14	M16	M18	M20	M22	M24	M27	M30	M33	M36	M39	M42	M45		M48	
対応鉄筋				D16	D19			D22	D25			D29	D32	D35	D38	D41	D51		
ボルト孔径	2 × r ₂	(mm)		φ19	φ21	φ23	φ25	φ27	φ29	φ32	φ35	φ38	φ41	φ44	φ47	φ50	φ53		
有効断面積		(mm ²)		115.4	156.7	192.5	244.8	303.4	352.5	459.4	560.6	693.6	816.7	975.8	1120.9	1306.0	1473.1	JIS B 0205	
座金径	2 × a	(mm)		28	30	34	37	39	44	50	56	60	66	72	78	85	92	JIS B 1256	
座金孔径	2 × r	(mm)		16	18	20	22	24	26	30	33	36	39	42	45	48	52		
座金板厚	t	(mm)		3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	4.5	4.5	4.5	6	6	6	7	7	8		
ナット内接円	2 × r ₁	(mm)		22	24	27	30	32	36	41	46	50	55	60	65	70	75	JIS B 1181	
支圧応力	引張力	P	(N)	23080	31340	38500	48960	60680	70500	91880	112120	138720	163340	195160	224180	261200	294620		
	支圧面積	A	(mm ²)	332	360	492	584	622	860	1159	1501	1693	2101	2551	3043	3711	4441		
	支圧応力度	σ _b	(N/mm ²)	69.5	86.9	78.2	83.8	97.6	82.0	79.3	74.7	81.9	77.7	76.5	73.7	70.4	66.3		
	許容支圧応力度	σ _{ba}	(N/mm ²)	210.0	210.0	210.0	210.0	210.0	210.0	210.0	210.0	210.0	210.0	210.0	210.0	210.0	210.0	210.0	
	照査				OK	OK													
ナットサイズ(ナット内接円の直径)とボルト径の比較				ボルト孔径が小さい															
引張応力の照査の有無				照査不要															
引張力	P	(N)		23080	31340	38500	48960	60680	70500	91880	112120	138720	163340	195160	224180	261200	294620		
線荷重	P'	(N/mm)		262.4	332.5	360.4	421.2	495.3	510.0	584.9	637.3	735.9	787.8	862.8	914.9	978.1	1019.4		
線モーメント	M	(N・mm)		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
曲げモーメント	Mr	(N・mm/mm)		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
断面係数	Z	(mm ³)		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
引張応力が最大となる直径	2 × r'	(mm)		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
引張応力	有孔円板のモーメントの算出	ν		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
		β		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
		ρ		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
		k		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
	引張応力度	σ _t	(N/mm ²)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
	許容引張応力度	σ _{ta}	(N/mm ²)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	SS400相当
	支圧面積	A'	(mm ²)	332	360	492	584	622	860	1159	1501	1693	2101	2551	3043	3711	4441		
	支圧応力度	σ _b	(N/mm ²)	69.5	86.9	78.2	83.8	97.6	82.0	79.3	74.7	81.9	77.7	76.5	73.7	70.4	66.3		
	許容支圧応力度	σ _{ba}	(N/mm ²)	210.0	210.0	210.0	210.0	210.0	210.0	210.0	210.0	210.0	210.0	210.0	210.0	210.0	210.0	210.0	
	照査				OK	OK													



アンカーボルト材質	SD345	アンカーの許容引張応力度	200	N/mm ²
ナット座金材質	SS400相当	ボルト孔径	ネジ径+	10 mm

		アンカー(ネジ径)														備考	
		M14	M16	M18	M20	M22	M24	M27	M30	M33	M36	M39	M42	M45	M48		
対応鉄筋		D16	D19			D22	D25			D29	D32	D35	D38	D41	D51		
ボルト孔径	2×r2 (mm)	φ24	φ26	φ28	φ30	φ32	φ34	φ37	φ40	φ43	φ46	φ49	φ52	φ55	φ58		
有効断面積	(mm ²)	115.4	156.7	192.5	244.8	303.4	352.5	459.4	560.6	693.6	816.7	975.8	1120.9	1306.0	1473.1	JIS B 0205	
座金径	2×a (mm)	28	30	34	37	39	44	50	56	60	66	72	78	85	92		
座金孔径	2×r (mm)	16	18	20	22	24	26	30	33	36	39	42	45	48	52	JIS B 1256	
座金板厚	t (mm)	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	4.5	4.5	4.5	6	6	6	7	7	8		
ナット内接円	2×r1 (mm)	22	24	27	30	32	36	41	46	50	55	60	65	70	75	JIS B 1181	
支圧応力	引張力	P (N)	23080	31340	38500	48960	60680	70500	91880	112120	138720	163340	195160	224180	261200	294620	
	支圧面積	A (mm ²)	163	176	292	368	390	613	888	1206	1375	1759	2186	2655	3299	4006	
	支圧応力度	σb (N/mm ²)	141.3	178.1	131.8	132.9	155.5	115.1	103.4	92.9	100.9	92.8	89.3	84.4	79.2	73.6	
	許容支圧応力度	σba (N/mm ²)	210.0	210.0	210.0	210.0	210.0	210.0	210.0	210.0	210.0	210.0	210.0	210.0	210.0	210.0	
照査			OK														
ナットサイズ(ナット内接円の直径)とボルト径の比較			ボルト孔径が大きい	ボルト孔径が大きい	ボルト孔径が大きい	ボルト孔径が大きい	ボルト孔径が大きい	ボルト孔径が小さい									
引張応力の照査の有無			照査必要	照査必要	照査必要	照査必要	照査必要	照査不要									
引張力	P (N)	23080	31340	38500	48960	60680	70500	91880	112120	138720	163340	195160	224180	261200	294620		
線荷重	P' (N/mm)	262.4	332.5	360.4	421.2	495.3	510.0	584.9	637.3	735.9	787.8	862.8	914.9	978.1	1019.4		
線モーメント	M (N・mm)	2685.1	3378.8	4999.6	5793.8	6779.3	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
曲げモーメント	Mr (N・mm/mm)	34.6	40.2	52.8	55.6	61.3	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
断面係数	Z (mm ³)	132.4	143.3	161.7	178.0	188.8	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
引張応力が最大となる直径	2×r' (mm)	24.7	26.7	30.2	33.2	35.2	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
引張応力	有孔円板のモーメントの算出	ν	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
		β	1.27	1.25	1.26	1.23	1.22	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
		ρ	1.12	1.11	1.12	1.11	1.10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
		k	-0.819	-0.806	-0.811	-0.796	-0.787	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
引張応力度	σt (N/mm ²)	20.3	23.6	30.9	32.6	35.9	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
許容引張応力度	σta (N/mm ²)	140	140	140	140	140	—	—	—	—	—	—	—	—	—	SS400相当	
支圧面積	A' (mm ²)	—	—	—	—	—	613	888	1206	1375	1759	2186	2655	3299	4006		
支圧応力度	σb (N/mm ²)	—	—	—	—	—	115.1	103.4	92.9	100.9	92.8	89.3	84.4	79.2	73.6		
許容支圧応力度	σba (N/mm ²)	—	—	—	—	—	210.0	210.0	210.0	210.0	210.0	210.0	210.0	210.0	210.0		
照査			OK														

1) 計算結果に対する考察

照査結果を整理すると次のとおりである。

- ボルト孔径は、ネジ径+10mm の拡大孔を用いても問題は無い。
- 無論、ネジ径+3mm、+5mm のボルト孔径でも問題は無い。
- ただし、ネジ径が M22 以下でボルト孔径がネジ径+10mm の条件でのみ、ナットサイズ（ナット内接円）よりボルト孔径が大きくなる。そのため、座金に引張力が作用し、曲げ応力の照査が必要となる。しかし、発生する曲げ応力は値も小さく問題はない。

3-2-3. FEM 解析

計算による照査では、どのボルト孔径を使用しても問題ない結果となった。そこで FEM 解析を行い、計算結果に対する検証と、アンカーボルトがボルト孔に対し偏芯が生じた際の影響の確認を行うこととした。

1) 解析条件・モデル

解析条件およびモデルは次のように決定した。

- アンカーボルト径 D22、ネジ径 M20（有効断面積 244.8mm^2 ）。
- 材質はアンカーボルトは SD345、ナット座金は SS400（もしくは SS400 相当）、ベースプレートは SS400。
- 3次元ソリッドモデルとし、対象の 1/2 をモデル化
- 鋼材間摩擦係数 0.4（摩擦接合継手と同等と仮定した）
- ベースプレート両端を固定条件
- アンカーボルト下端に有効断面積×200MPa（ $=200\text{N/mm}^2$ ）を載荷
- Model1：ボルト孔径はネジ径+5mm とし、アンカーボルトはボルト孔に対して中心に配置
- Model2：ボルト孔径はネジ径+10mm とし、アンカーボルトはボルト孔に対して中心に配置
- Model3：ボルト孔径はネジ径+10mm とし、アンカーボルトを 5mm 偏芯して配置

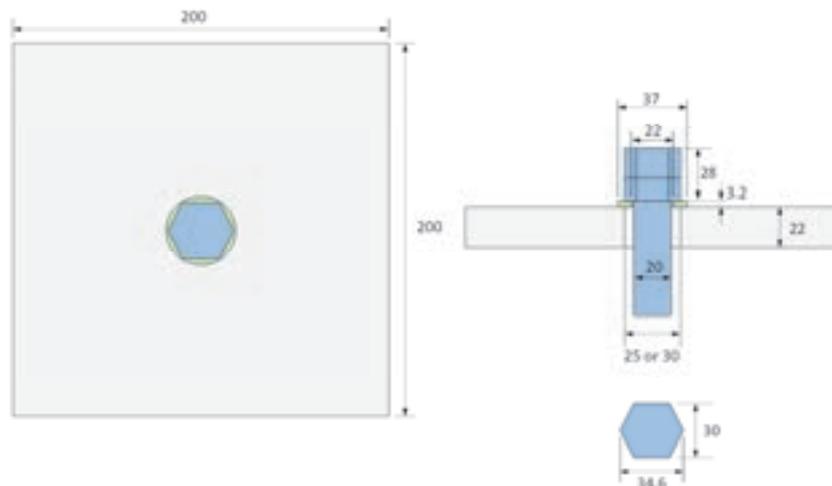


図 3-2-5 解析対象

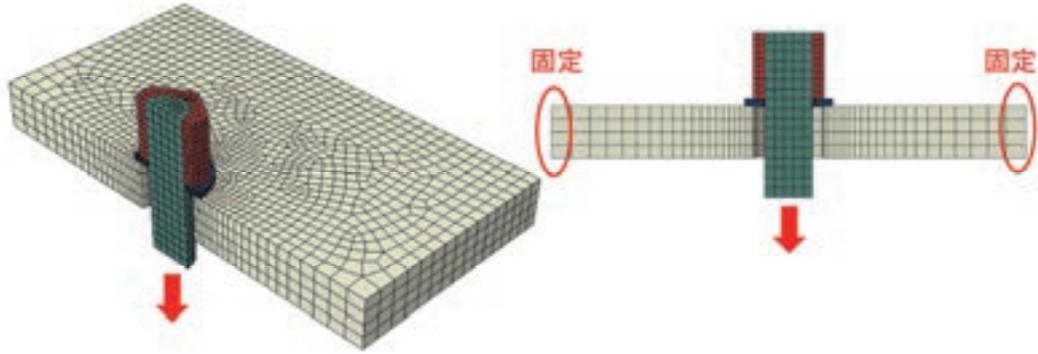


図 3-2-6 FEM 解析モデル 1

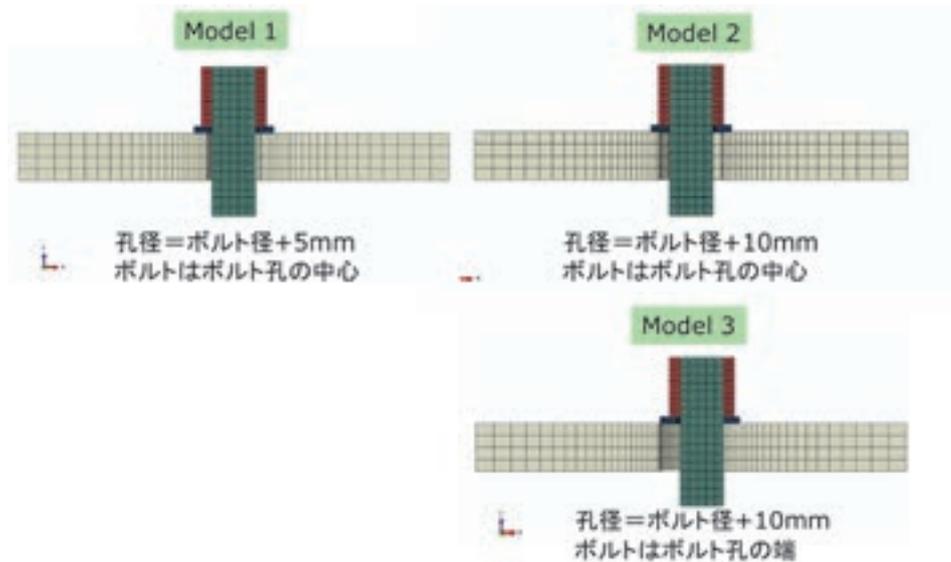


図 3-2-7 FEM 解析モデル 2

2) FEM 解析結果

FEM 解析の結果は、次のとおりである。

①変形

3-2-2 で示したようにボルト孔径がネジ径+10mm かつ D22 以下の場合で、ナットサイズよりボルト孔径が大きくなり、座金に曲げ変形が生じることになる。3-2-2 の簡易計算では、曲げ変形が生じても許容値内に収まる結果となっているが、FEM 解析では、一部にナット角部の応力集中による高い応力が生じている。

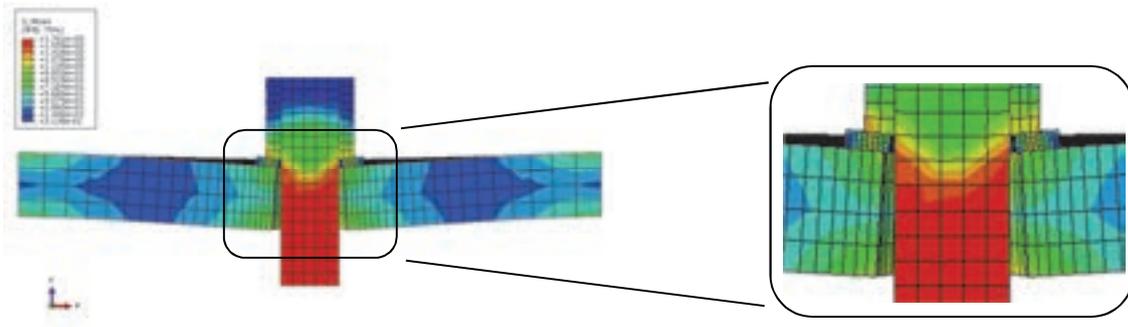


図 3-2-8 変形図 (Model1) および拡大図

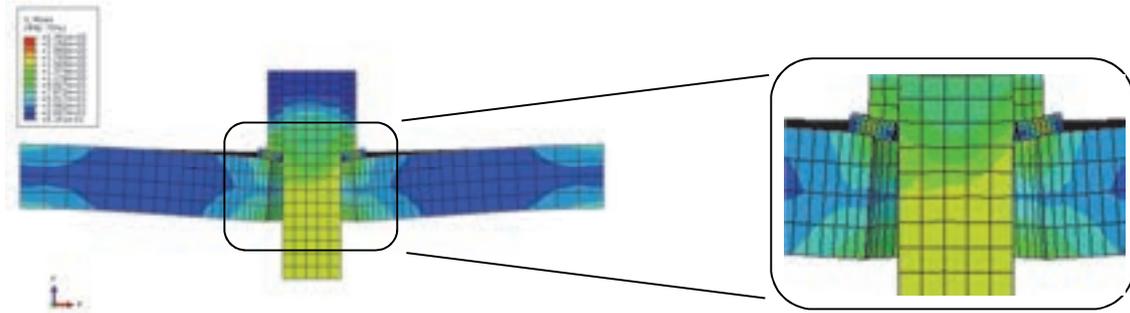


図 3-2-9 変形図 (Model 2) および拡大図

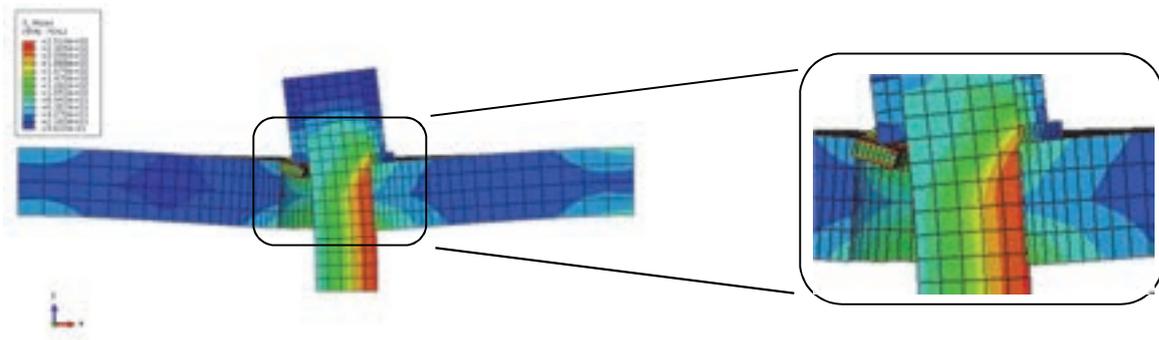


図 3-2-10 変形図 (Model 3) および拡大図

偏芯を考慮した場合、この傾向はさらに大きくなる。図 3-2-10 で示すように、座金の一部でブラケットにかからない箇所が生じ、そのため、座金にねじれ変形のほか、座金の一部がボルト孔に落ちることによりアンカーボルトに回転が生じ、曲げ引張が生じている。

②座金の応力

図 3-2-11～図 3-2-13 に座金に発生しているミーゼス応力を示す。座金の発生応力は、Model 1 で 140MPa、Model 2 で 235MPa である。Model 2 の応力増加は、拡大孔のボルト角部による応力集中によるものであり約 70% 増となっている。さらに、Model 3 では 251MPa であり、Model 2 と Model 3 では約 7% 増である。計算と比較した場合、全体的に大きい応力が発生している。これは、拡大孔となったことによりベースプレートとナットのかかりが少なくなったことと、ナット角部が忠実にモデル化できていないことが原因と考えられる。また、拡大孔の曲げ引張による影響が大きく、偏芯による影響を考慮した場合は塑性化がみられる。

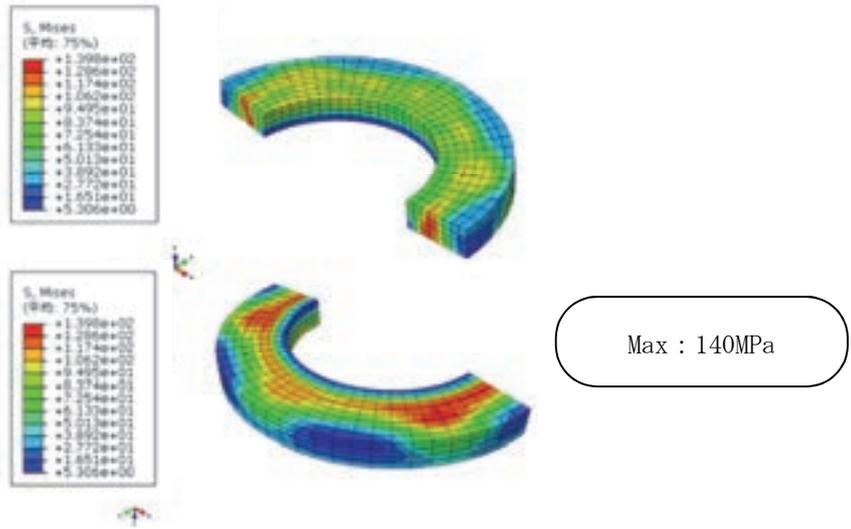


図 3-2-11 座金のミーゼス応力 (Model1)

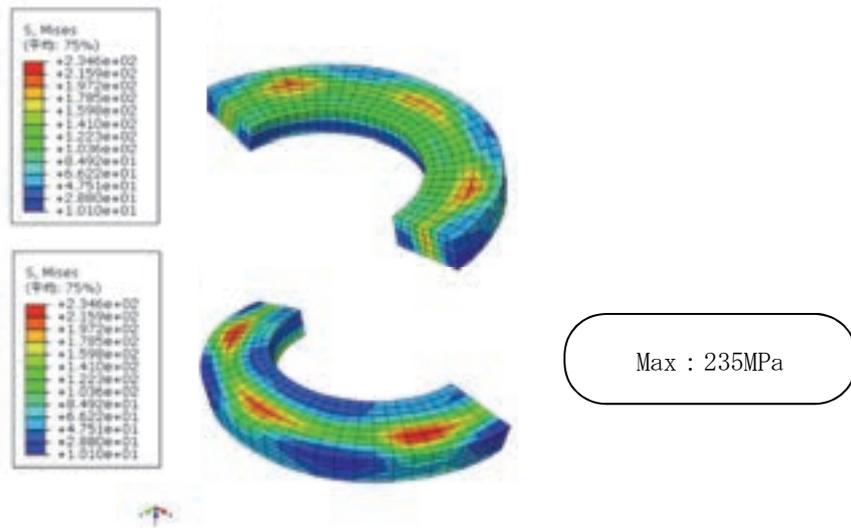


図 3-2-12 座金のミーゼス応力 (Model2)

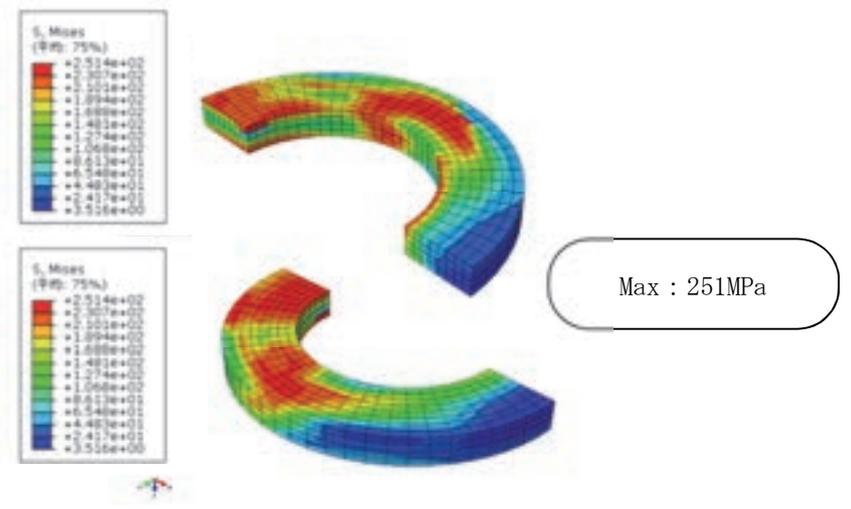


図 3-2-13 座金のミーゼス応力 (Model3)

③ボルト本体及びナットの応力

拡大孔はボルト本体及びナットの発生応力にも変化を生じさせている。Model1 (図 3-2-14) では、ボルト孔が小さいことから、ボルト本体 (軸部) やナットの角部など全体的に均等な応力が生じている。発生応力は 149MPa である。Model2 (図 3-2-15) では、拡大孔によりナットのかかりが少なくなったことから、ナットの角部に応力が集中し 235MPa となっている。Model1 と Model2 で約 38%増である。

さらに Model3 (図 3-2-16) では、拡大孔によりナットのかかり少なくなった上、偏芯していることからナット部でも均等の応力ではなくなり、本体 (軸部) にも引張応力が生じている。ただし、最大応力の差は小さく、236MPa であり Model2 と Model3 で約 1%増程度である。

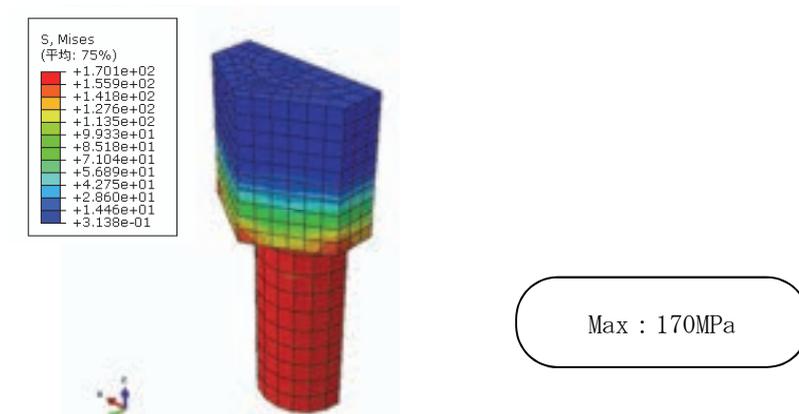


図 3-2-14 ボルト本体及びナットのミーゼス応力 (Model1)

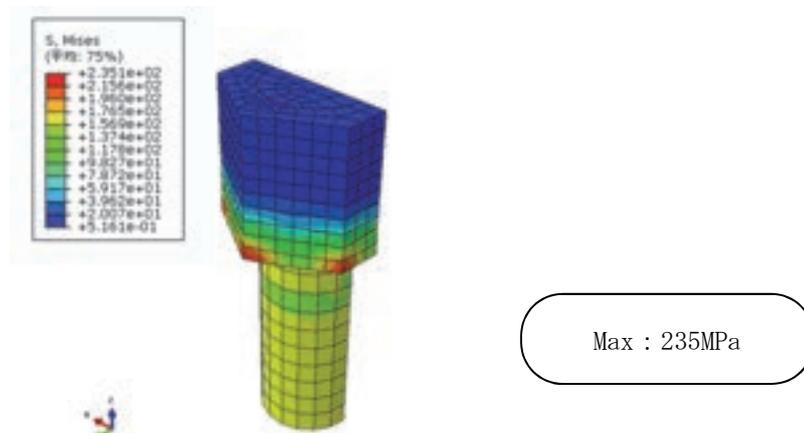


図 3-2-15 ボルト本体及びナットのミーゼス応力 (Model2)

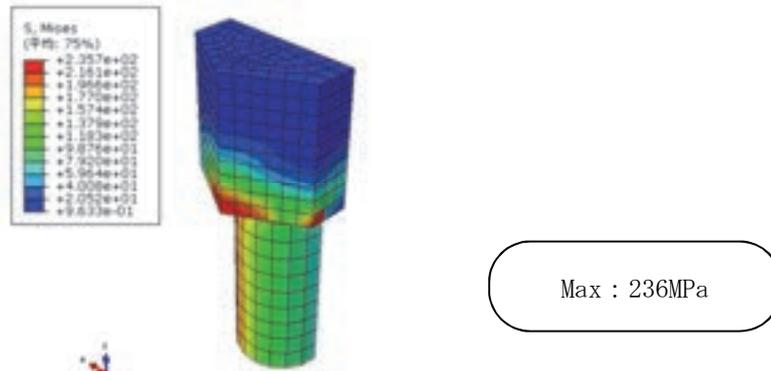


図 3-2-16 ボルト本体及びナットのミーゼス応力 (Model3)

④ベースプレートの応力

ベースプレートのボルト孔周囲では、Model1 (図 3-2-17) で 149MPa、Model2 (図 3-2-18) で 164MPa、の応力が生じている。ボルト孔の円周に対しほぼ均等の応力である。これは拡大孔とした場合でも、座金を介してベースプレート面に均等に応力が伝達されていることによる。Model1 と Model2 で約 10%増程度である。しかし、偏芯を考慮した Model3 (図 3-2-19) では、座金のかかりが一部で無くなることから、ベースプレートにも部分的に集中的な応力が作用し、233MPa となる。ナット角部による応力集中もあり、高い応力となっている。Model2 と Model3 で約 42%増、Model1 と Model3 で約 56%増である。ベースプレートは剛性を確保する目的から板厚を 22mm 以上としており、通常ボルト孔周辺に用する応力計算は行っていない。

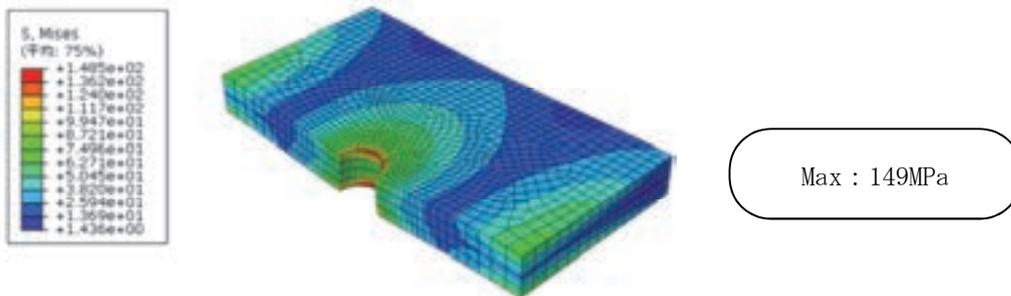


図 3-2-17 ベースプレートのミーゼス応力 (Model1)

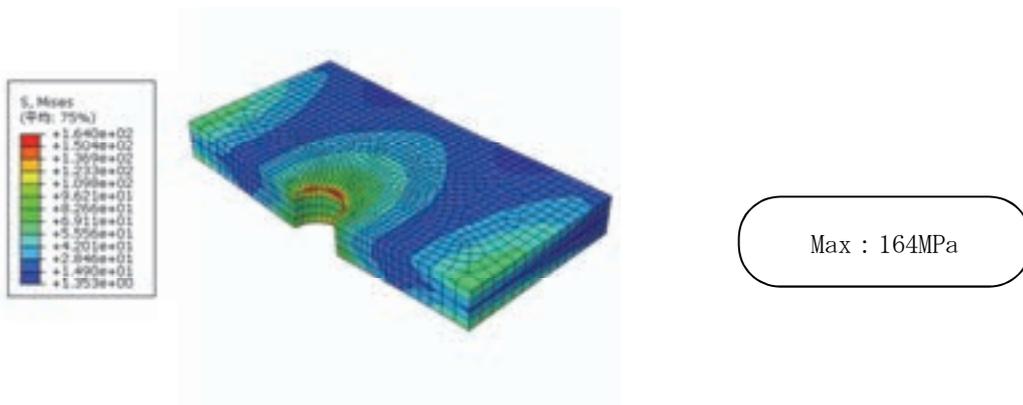


図 3-2-18 ベースプレートのミーゼス応力 (Model2)

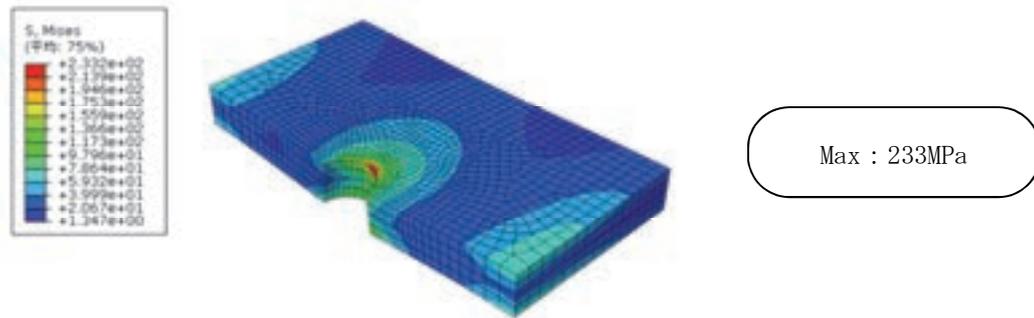


図 3-2-19 ベースプレートのミーゼス応力 (Model3)

3) FEM 解析結果に対する考察

FEM 解析結果を整理すると次のとおりである。

- FEM 解析では、Model1 (ネジ径+5mm) に比べ、拡大孔である Model2 (ネジ径+10mm) でボルト径が大きくなったことにより座金のかかりが少なくなり、それに起因してナット角部に応力集中が生じている。
- FEM 解析での座金の発生応力は Model1 (ネジ径+5mm) と Model2 (ネジ径+10mm) の場合で比較した場合、約 70% 増となる。座金の Mises 応力でベースプレートとかかる部分で塑性化が見られる。
- 偏芯を考慮した場合 (Model3)、座金がアンカーボルト孔に落ちることによるアンカーボルトの回転が生じ、これにより座金のねじれとアンカーボルトの曲げ引張が生じる。
- ネジ径が大きくなると、ナットサイズは常にボルト孔径よりも大きいため、座金に生じる応力が過大となることはないと予想される。

3-2-4. まとめ

簡易計算および FEM 解析により、拡大孔が引張力を受けるアンカーボルトに与える影響を検討した結果、得られた結論は次のとおりである。

- 計算と FEM 解析の結果の差は、計算では円周上に作用する線荷重を想定しており、ナット角部に作用する集中応力は考慮していないことによる。
- D22 以下かつネジ径+10mm の条件でのみ、座金に引張応力が生じ、さらに FEM 解析では、ボルト角部による高い応力集中が生じる。
- 偏芯することによるベースプレートへの影響は、ネジ径+3mm、+5mm の場合は問題ない。ネジ径+10mm では、ブラケットのベースプレートに高い応力集中が生じるがネジ径が細い場合のみであり、ネジ径 M24 (D25) 以上と限定した場合、問題はない結果である。

よって、引張力に対してはネジ径+3mm、+5mm のボルト孔径は問題は無い。ネジ径+10mm の場合は、M22 (D25) 以下のボルト径の場合には、アンカーボルトに高い応力集中が生じるため拡大孔は使用しないこと、もしくはより詳細な検討を行い、安全性を確認する必要がある。

3-3. せん断力に対する検討

3-3-1. はじめに

ブラケットのアンカー孔を拡大孔にした場合、アンカーボルトはアンカー孔との隙間の中で配置できる。しかし、この状態でブラケットにせん断荷重が作用した場合、アンカー孔内のアンカーボルトの配置によってアンカーボルトの片利きが生じ、少数のアンカーボルトにせん断力が集中する（図 3-3-1）。片利きの対策として、アンカー孔とアンカーボルトに隙間にパテ材を注入する方法等があるが、アンカーボルトの片利きが生じて強度上問題ないことが確認できれば片利きの対策が不要となる。

簡易的な片利きモデルをFEMにより解析し、片利きが生じた場合にアンカーボルトに与える影響について検討する。片利きしない正常モデルと片利きするモデルを作成し、ブラケットにせん断荷重が作用した場合の影響を確認する。



図 3-3-1 アンカーボルトとアンカー孔の位置関係

3-3-2. 解析対象

解析対象の詳細を表 3-3-1 に示す。

表 3-3-1 解析対象の詳細

解析対象となる	ネジ径		M30	M48
アンカーボルトのネジ部	有効断面積	mm ²	560.6	1473.1
	有効径	mm	27.73	39.08
対応鉄筋			D32	D51
座金	外形	mm	56	92
	内径	mm	33	52
	厚さ	mm	4.5	8.0
ナット	内接円径	mm	46	75
	ナット厚(1種)	mm	24	38
	ナット厚(3種)	mm	18	29
	ナット頂点間距離	mm	53	86.5
解析対象となる	板厚	mm	28	28
ベースプレート	ボルト孔径	mm	40	58
	解析モデルの	ネジ径	mm	26.72
アンカーボルトのネジ部	有効断面積	mm ²	560.6	1473.1
	解析モデルの	板厚	mm	28
ベースプレート	ボルト孔径	mm	36.72	53.31

解析用にアンカーボルトのネジ部をモデル化する際に、ネジ部の形状をそのままモデル化せずに円柱形状とし、その円柱の直径は、実際のアンカーボルトのネジ部の有効断面積と等しくなる円の直径としている。このため、アンカーボルトのネジ部をモデル化した円柱の直径は実際のアンカーボルトのネジ部の外径(山部の径)より若干小さくなる。そこで、解析上のベースプレートのボルト孔径については、アンカーボルトのネジ部をモデル化した円柱の直径+10mmとしている。なお、アンカーボルトと定着しているコンクリート部材については接着剤等により確実に付着していることを前提に完全固定とした。

3-3-3. FEM 解析

FEM 解析は3次元ソリッドモデルとした。解析モデルを図 3-3-2 に示す。

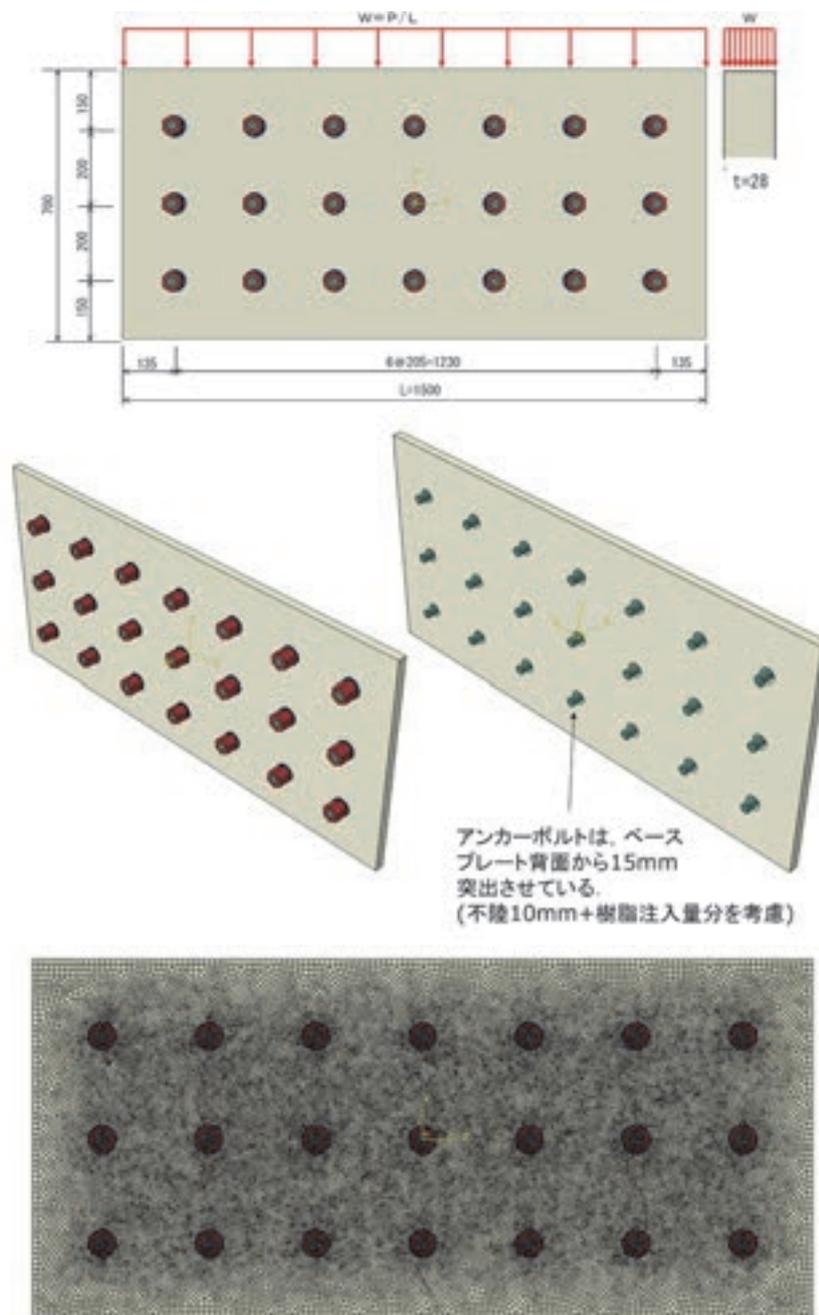


図 3-3-2 解析モデル

FEM 解析は以下の条件でおこなった。

- ・鋼材間の摩擦係数は 0.4 とする。
- ・アンカーボルトの先端を固定する。
- ・ベースプレート上端の節点を下方へ強制変位する。
- ・ベースプレート裏面の面外方向を固定する。

ここで図 3-3-2 に示す全体的なモデルを用いて解析を試みる前に、解析の簡素化と、事象の簡略化の為アンカーボルトの配列が 1 列のみとなる簡易的なモデルについて解析を行った。簡易モデルは、横方向 3 段、縦方向 1 列（縦 1 列モデル）と横方向 1 段、縦方向 3 列のモデル（横 1 列モデル）とした。また、ワッシャーをナットに固定し、解析モデルのサイズを小さくすることにより解析時間の短縮を図った。

それぞれのモデルで、片利きしない正常モデルと片利きするモデルを作成し、ブラケットにせん断荷重が作用した時の影響を確認した。

簡易モデルと使用材料を図 3-3-3 に、使用材料の応力-ひずみ線図を図 3-3-4 に示す。

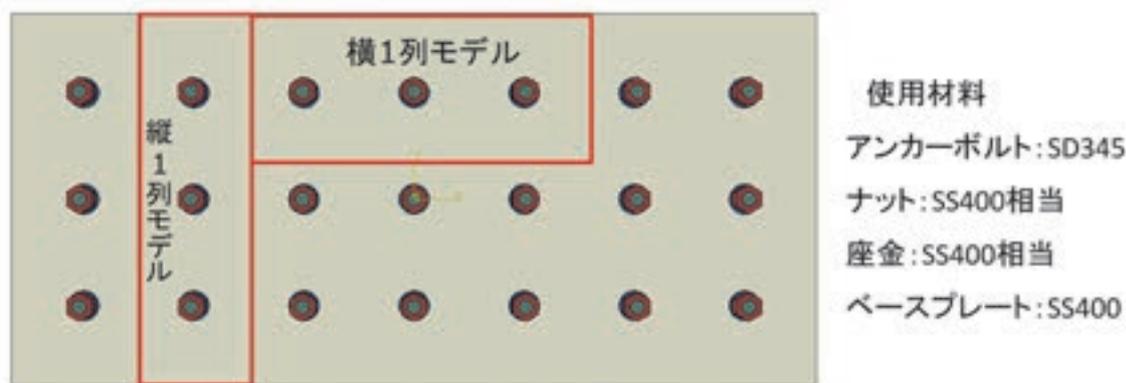


図 3-3-3 簡易モデル(1 列モデル)

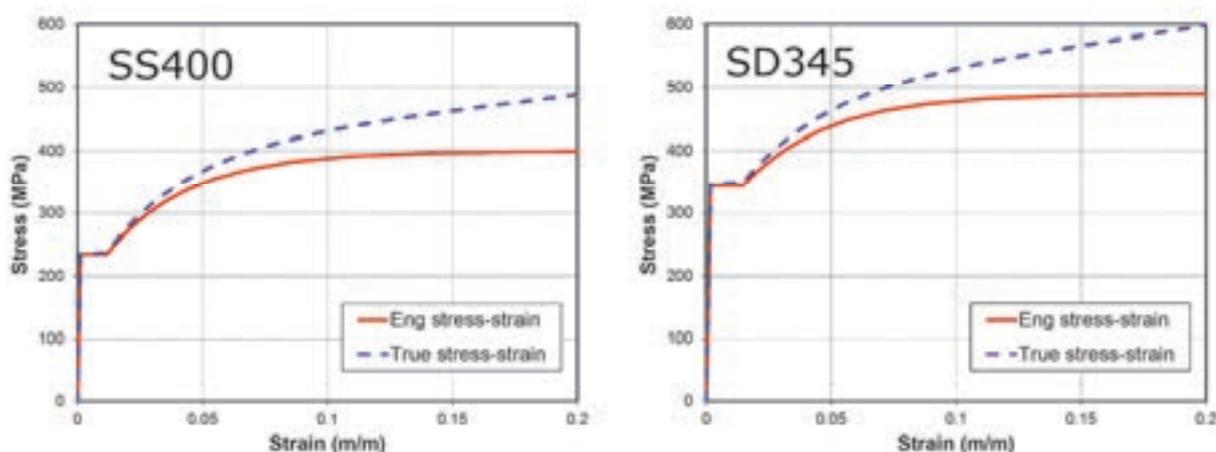


図 3-3-4 使用材料の応力-ひずみ曲線

1) 縦 1 列モデル

縦 1 列モデルを図 3-3-5 に、強制変位方法を図 3-3-6 に示す。片利きモデルは上段のアンカーボルトを 5mm 上方に配置し、モデルの上端に強制変位を生じさせる。

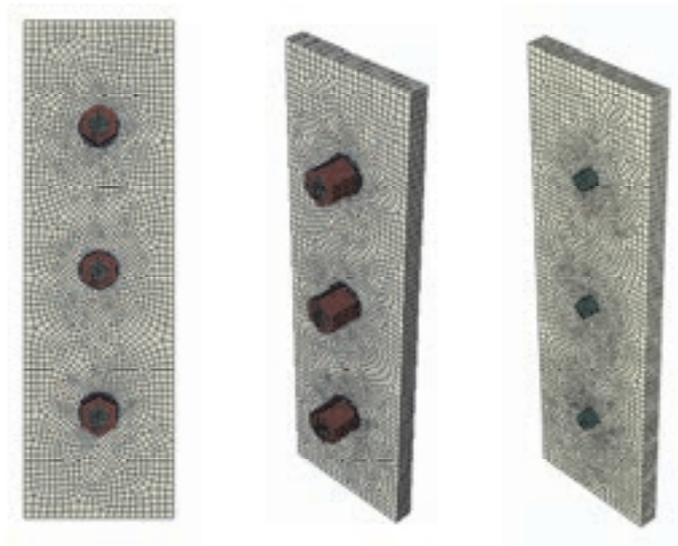


図 3-3-5 縦 1 列モデル

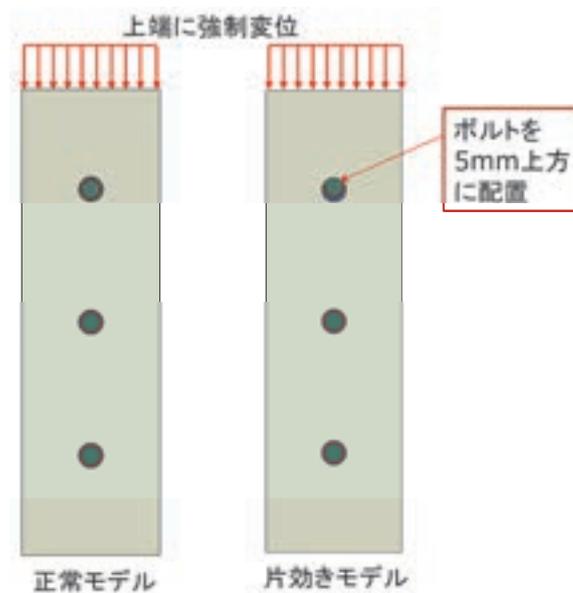
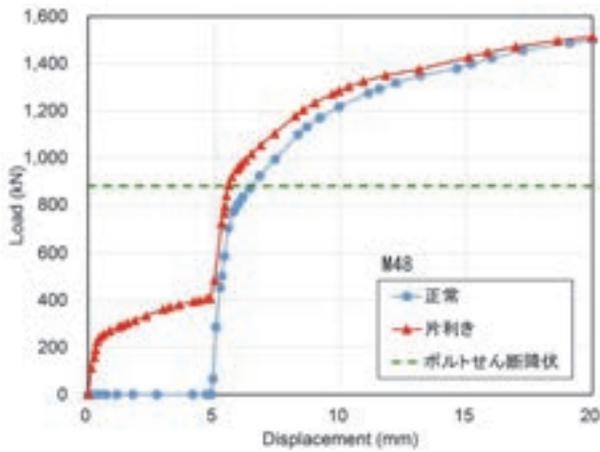
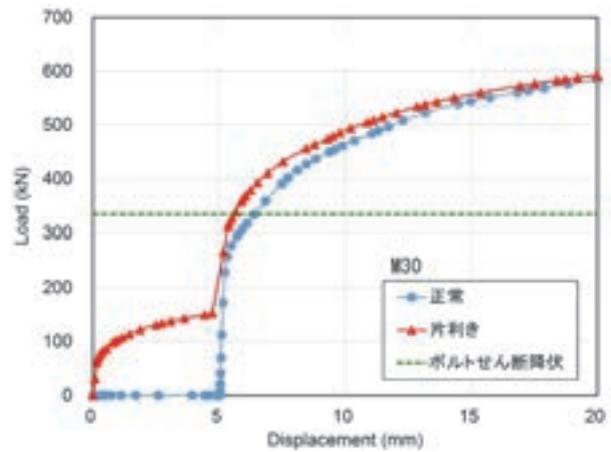


図 3-3-6 強制変位方法

荷重と変位量の間を関係を図 3-3-7 に示す。正常モデルでは 5mm 移動してから 3 本のアンカーボルトが抵抗する。一方片利きモデルでは、最初の 1 本が抵抗し、5mm 移動してから残り 2 本のアンカーボルトが抵抗する。片利きモデルで 5mm 移動後は、正常モデルと同程度の抵抗が生じていることが分かる。また、ネジ径が M30 と M48 の傾向が類似していることが分かる。



(a) M30



(b) M48

図 3-3-7 荷重-変位関係

ベースプレートの変位量が 20mm の場合のアンカーボルトの変形状態を図 3-3-8 に示す。片利きしているアンカーボルトの変形量が大きいことが分かる。

また、ネジ径が M30 と M48 の傾向が類似していることが分かる。

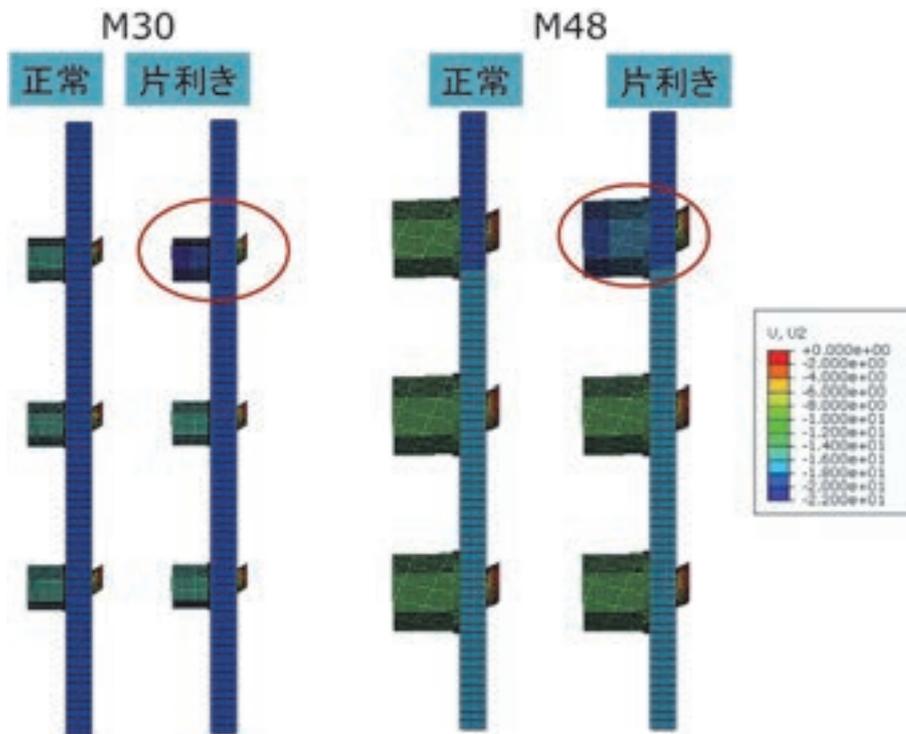


図 3-3-8 アンカーボルトのミーゼス応力の分布 (M30、M48)

ベースプレートの変位が 7mm と 20mm の場合の、アンカーボルトのミーゼス応力のコンター図を図 3-3-9 と図 3-3-10 に示す。7mm 変位時では、片利き部の応力が大きくなっていることが分かる。20mm 変位時では正常時と片利き時に大きな違いは見られない。また、ネジ径が M30 と M48 の傾向が類似していることが分かる。

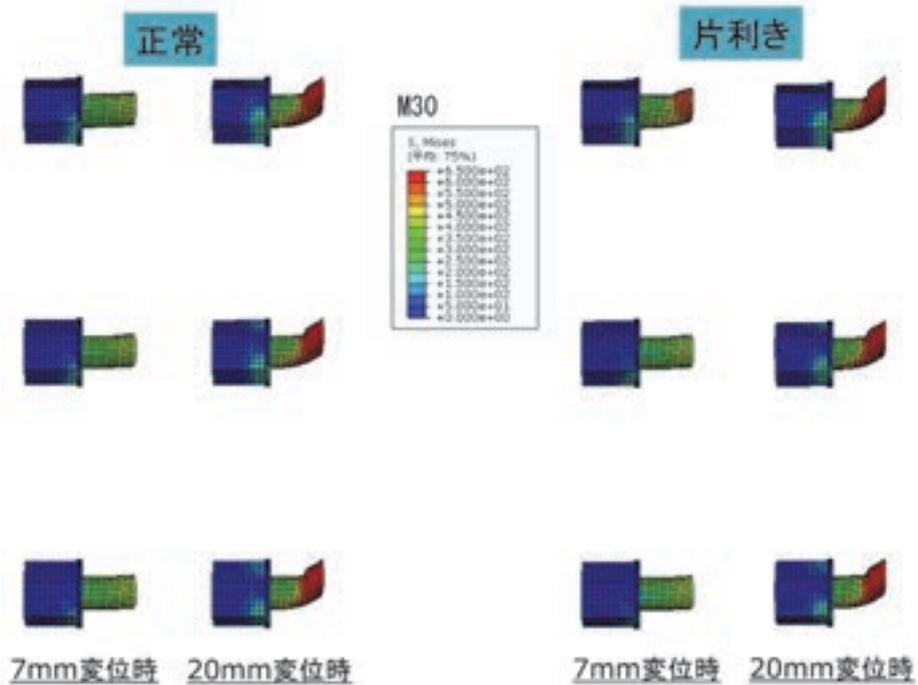


図 3-3-9 アンカーボルトのミーゼス応力の分布 (M30)

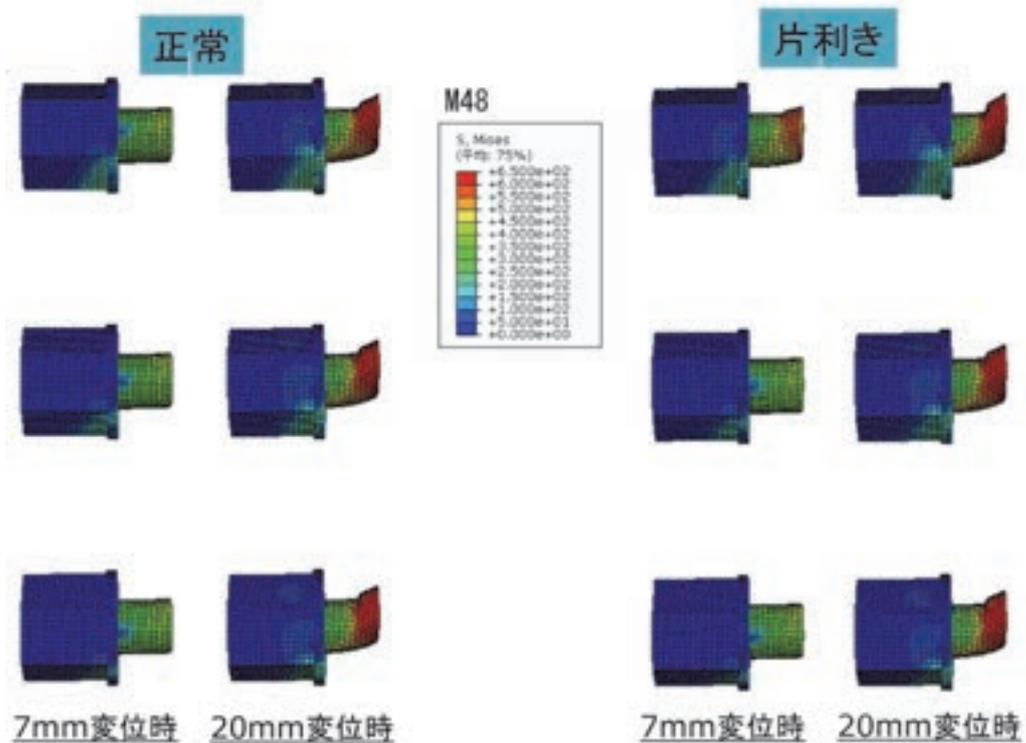


図 3-3-10 アンカーボルトのミーゼス応力の分布 (M48)

ベースプレートの変位が 20mm の時のアンカーボルトの相当塑性ひずみのコンター図を図 3-3-11 に示す。アンカーボルトのネジ径が M30 の場合の 20mm 変位時では、正常モデルでは 66% のところ片利き 93% となった。一方、ネジ径が M48 の場合の 20mm 変位時では、正常モデルでは 56% のところ片利き 85% となった。片利きモデルでアンカーボルトに発生する塑性ひずみが大きくなるのがわかる。

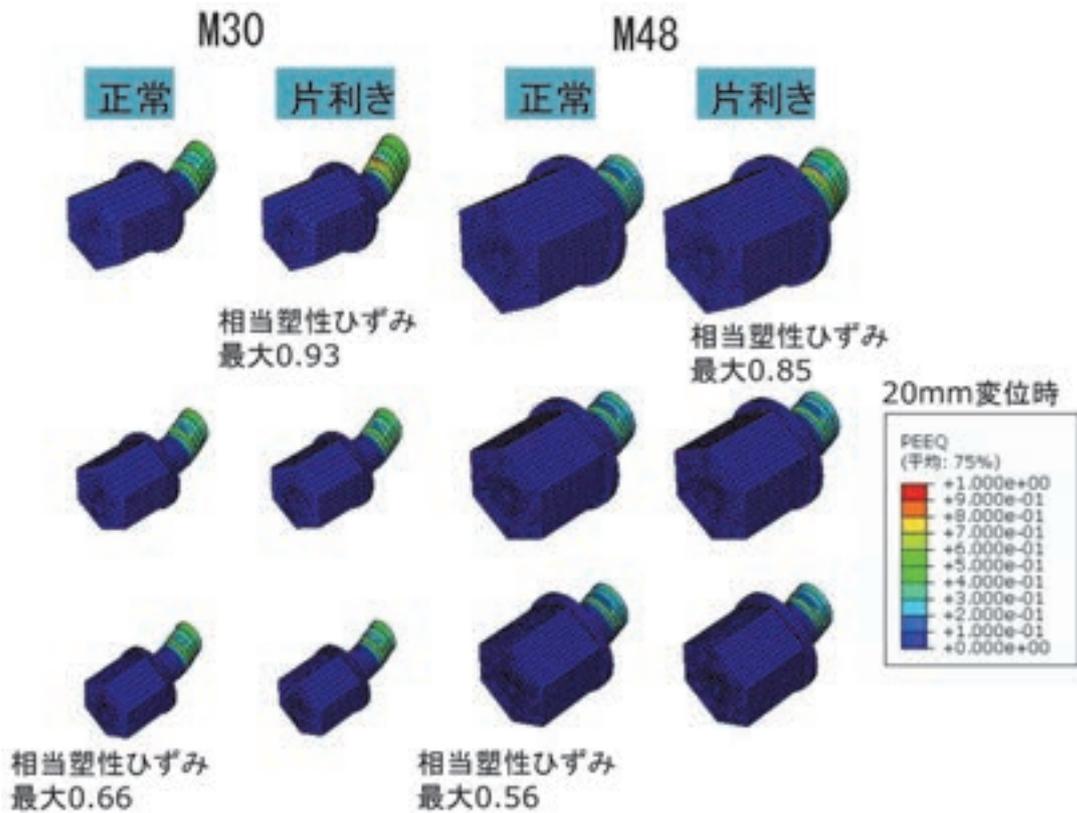


図 3-3-11 ベースプレートの変位量が 20mm 時のアンカーボルトの相当塑性ひずみの分布

ベースプレートの変位が 20mm 時のベースプレートのミーゼス応力のコンター図を図 3-3-12 と図 3-3-13 に示す。アンカーボルトのネジ径が M30 と M48 のいずれの場合においても 20mm 変位時では、正常モデルと片利きモデルに大きな違いは見られない。

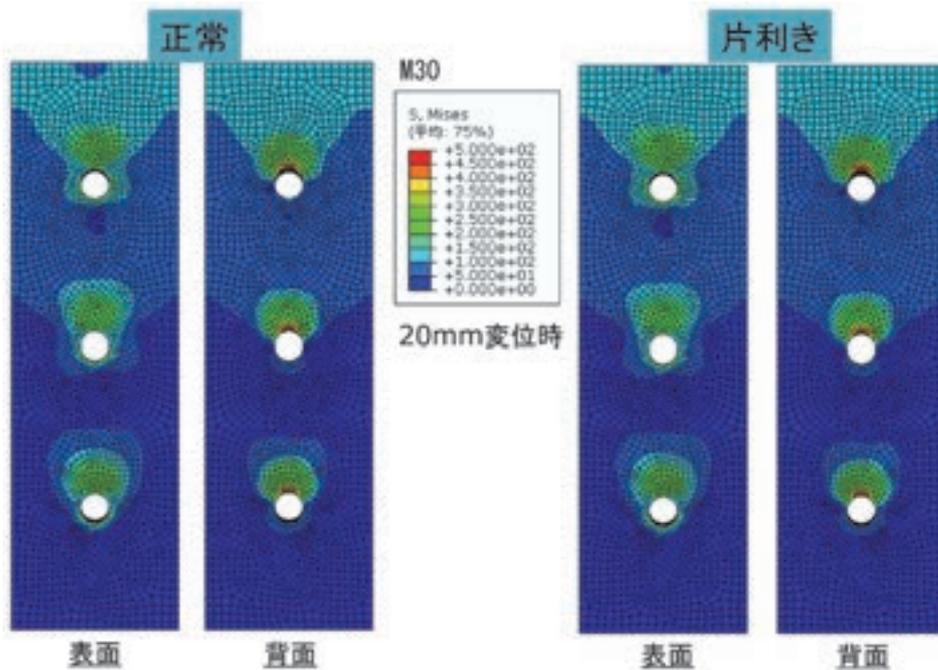


図 3-3-12 ベースプレートの変位量が 20mm 時のベースプレートのミーゼス応力の分布 (M30)

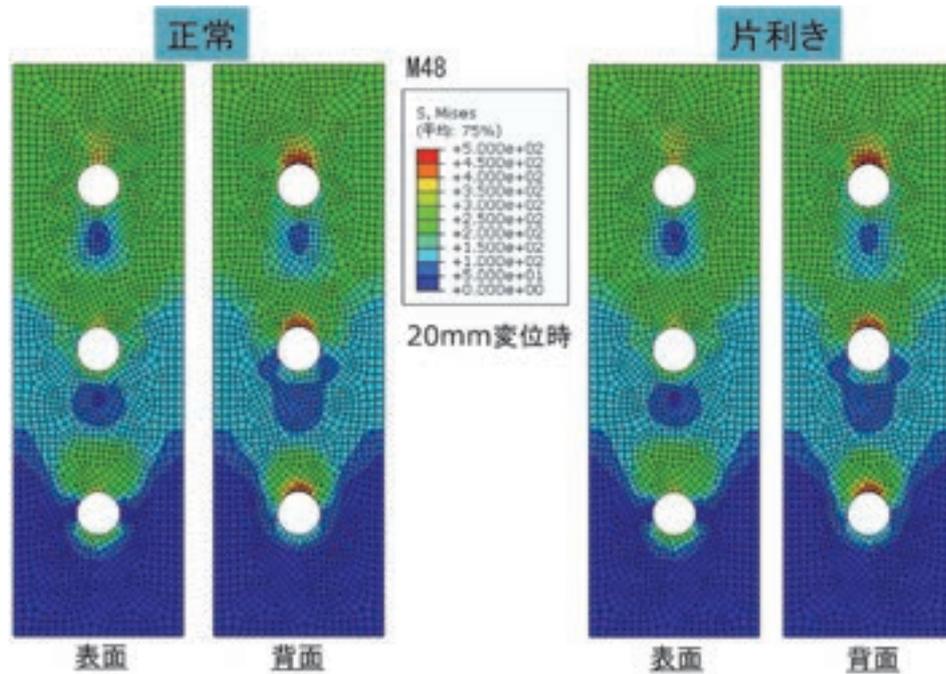


図 3-3-13 ベースプレートの変位量が 20mm 時のベースプレートのミーゼス応力の分布 (M48)

2) 横 1 列モデル

横 1 列モデルを図 3-3-14 に、強制変位方法を図 3-3-15 に示す。片利きモデルとして 4 パターンの配置を想定し、参照点に強制変位を生じさせる。参照点とベースプレートは剛体変位とする。なお、縦一列モデルの結果から、M30 と M48 の結果の傾向に違いが見られなかったことから、横 1 列モデルは M30 でのみ解析を行った。なお解析時間短縮の為、鋼材間の摩擦係数は 0 とした。

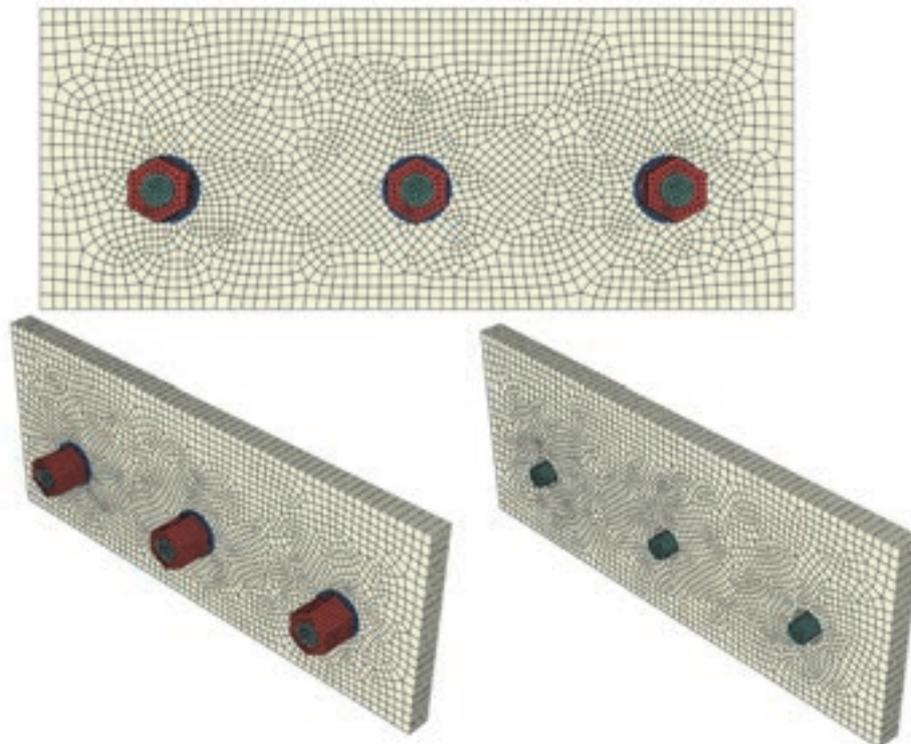


図 3-3-14 横 1 列モデル

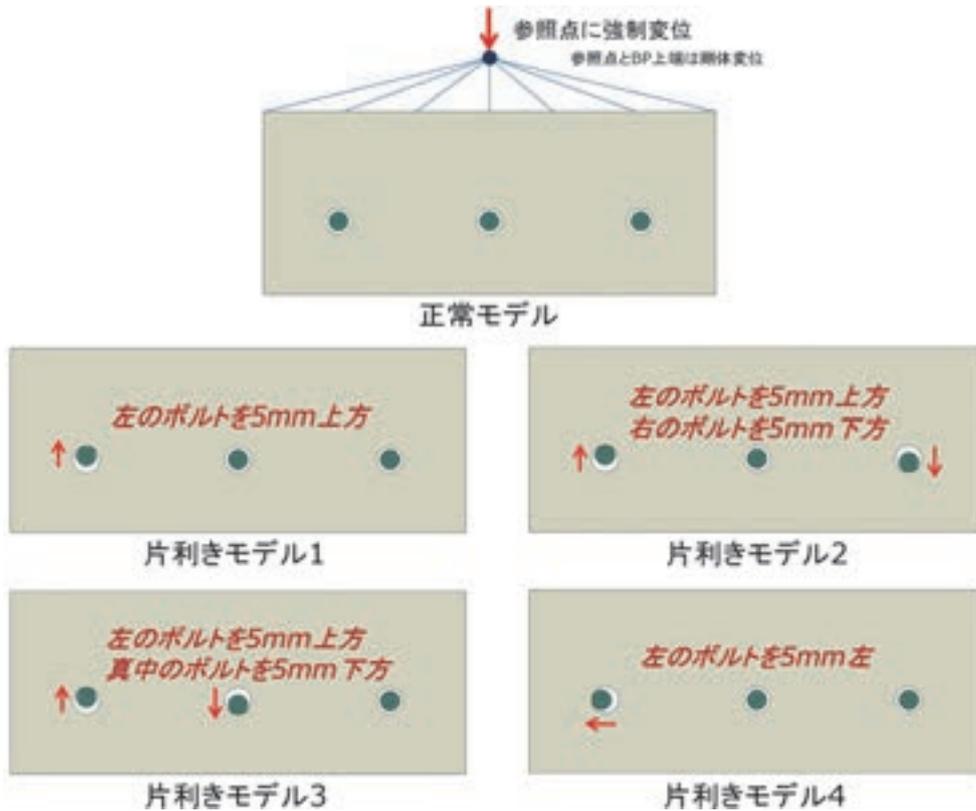


図 3-3-15 強制変位方法

荷重と変位量の関係を図 3-3-16 に示す。正常モデルでは 5mm 移動してから 3 本のアンカーボルトが抵抗する（縦 1 列モデルと同様）。一方片利きモデルでは、片利きが 1 本の場合には残りの 2 本の内のいずれかがブラケットのアンカー孔の縁に接するまで、ブラケットが回転挙動を示す。2 本のアンカーボルトで荷重を分担し、そのまま変位が大きくなった後に 3 本のアンカーボルトで荷重を分担するようになる。

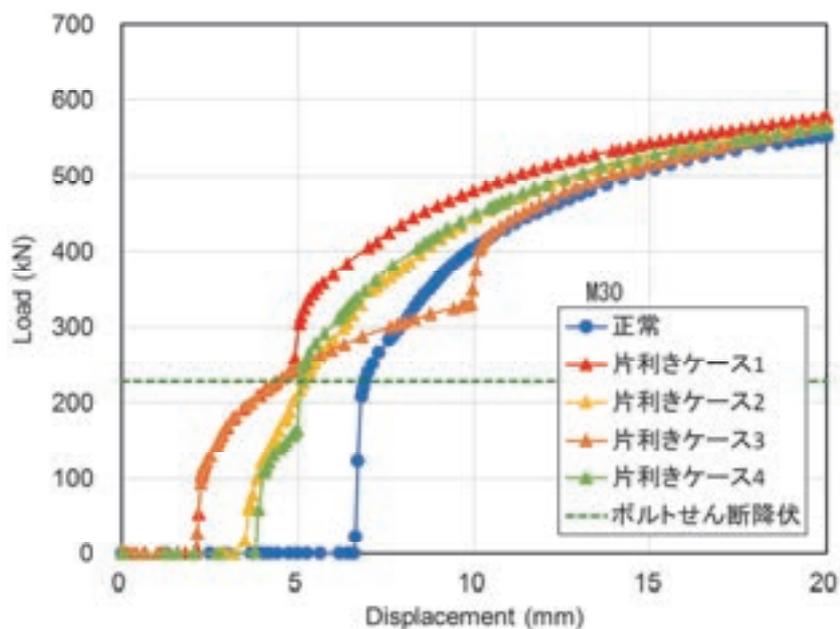


図 3-3-16 荷重—変位関係

各ケースにおける解析終了時の鉛直方向の変位のコンター図を図 3-3-17 に示す。片利きするアンカーボルトに拘束されるため、片利きするアンカーボルト側の変形量が少なくなっていることが分かる。また、片利きするアンカーボルトで回転挙動を示した後に変形するため、変形量が強制移動量の 20mm を超える場所がある。

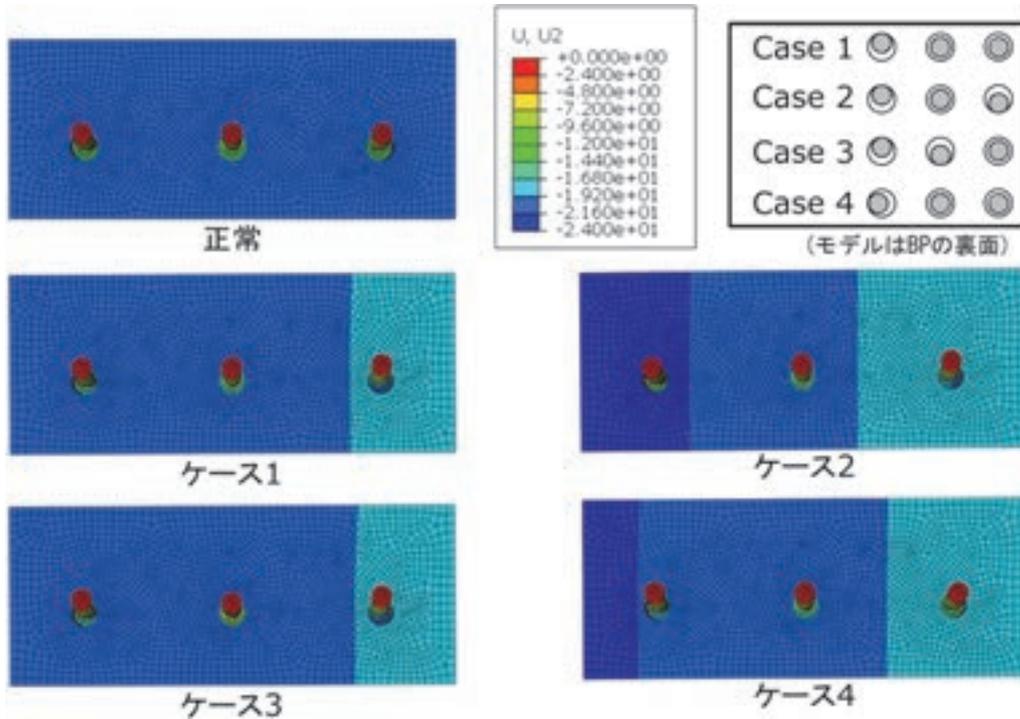


図 3-3-17 荷重と変形量の関係

ベースプレートの変位が 7mm と 20mm の場合の、アンカーボルトのミーゼス応力のコンター図を図 3-3-18、図 3-3-19 にそれぞれ示す。7mm 変位時は、片利きする 2 本が荷重を分担するため 1 本だけ応力が低いことが分かる。20mm 変位時では正常モデルと片利きモデルに大きな違いは見られない。

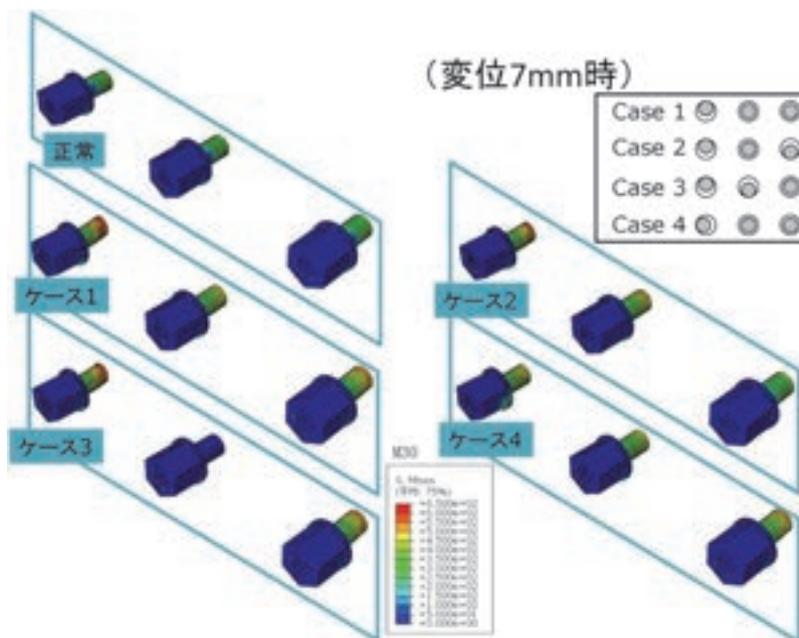


図 3-3-18 アンカーボルトのミーゼス応力の分布 (変位 7mm 時)

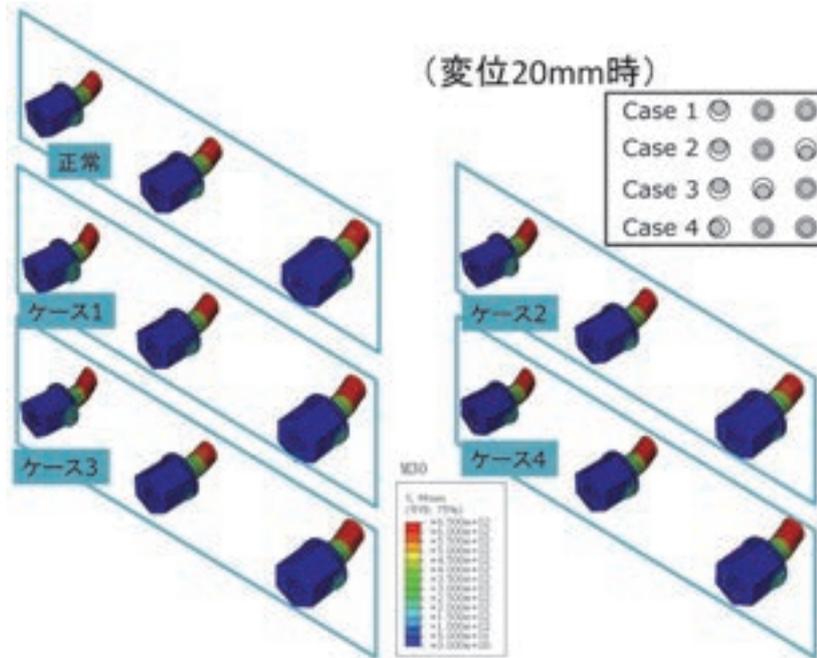


図 3-3-19 アンカーボルトのミーゼス応力の分布 (変位 20mm 時)

ベースプレートの変位が 20mm の時のアンカーボルトの相当塑性ひずみのコンター図を図 3-3-20 に示す。20mm 変位時では、正常モデルでは 52% のところ片利きモデルの各ケースでは 67~82% となった。各ケースで差異が生じるのは回転挙動の差分によるものと考えられる。片利きモデルでは、片利きしたアンカーボルトの塑性ひずみが非常に大きくなるのがわかる。

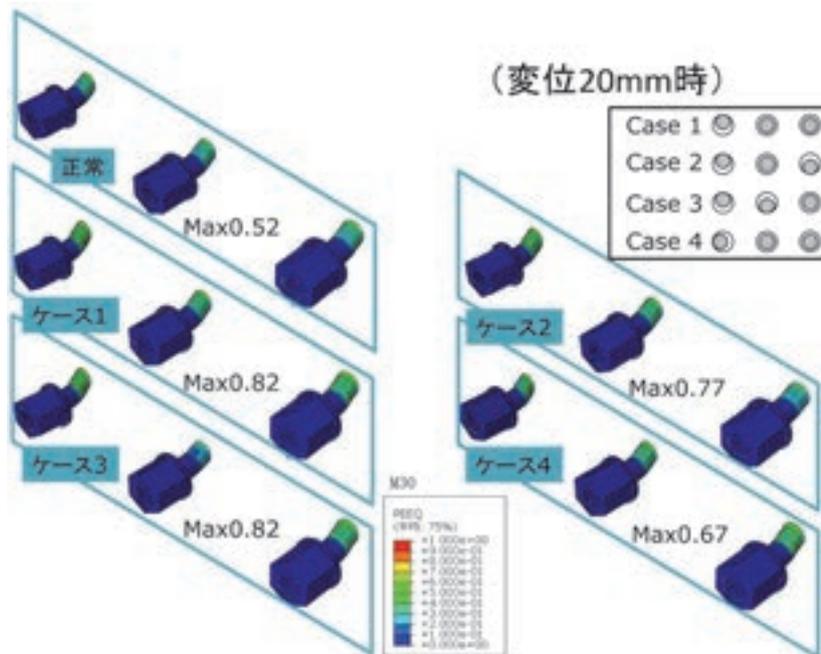


図 3-3-20 アンカーボルトのミーゼス応力の分布

図 3-3-21 にベースプレートの変位が 20mm の時のベースプレートに生じるミーゼス応力のコンター図を示す。20mm 変位時では、正常モデルと片利きモデルに大きな違いは見られない。

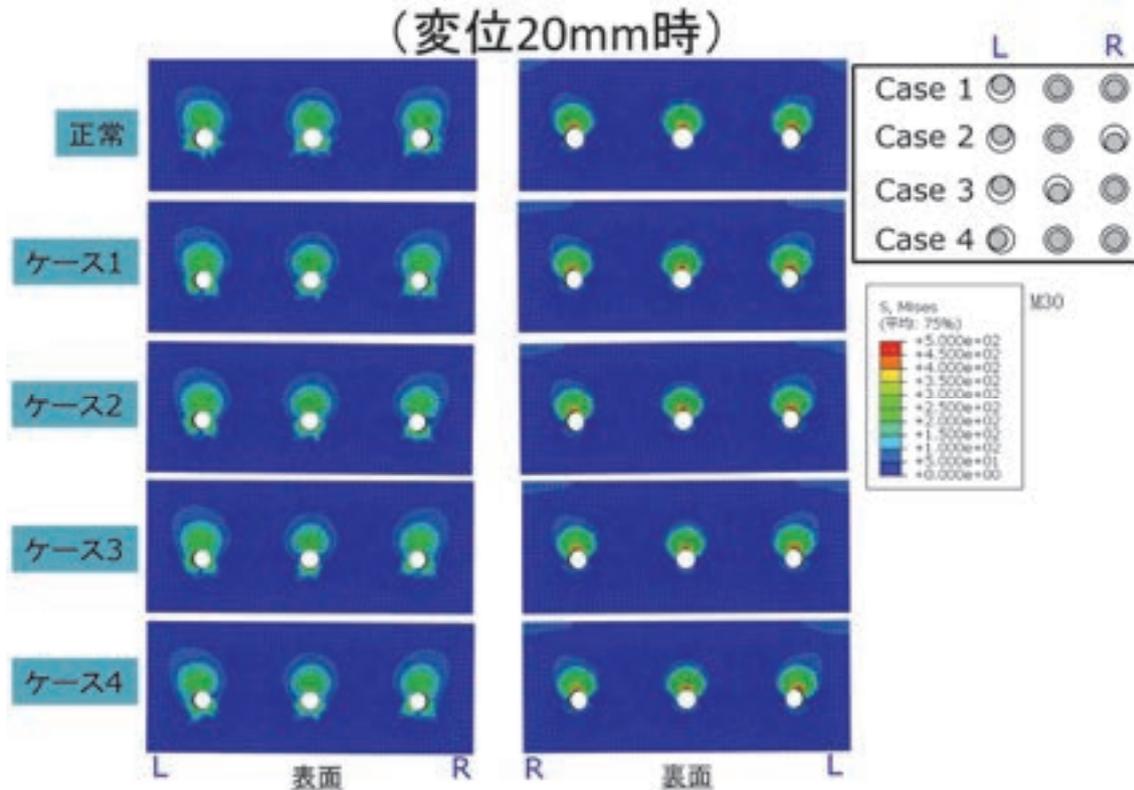


図 3-3-21 ベースプレートの変位量が 20mm 時のベースプレートのミーゼス応力の分布

3-3-4. まとめ

- 片利きモデルにおいても、アンカーボルトの位置のずれが 5mm 程度であれば最終的には全アンカーボルトで荷重を分担する。
- 片利きの程度によっては全アンカーボルトで荷重を分担する前に、最初に荷重を受けたアンカーボルトが破断する場合がある。そのため、アンカーボルトが破断しないことを検証することが出来れば、アンカーボルト径に対して+10mm の拡大孔で問題ないことが結論つけることが可能と考える。

3-4. 結論

ブラケットのアンカー孔を拡大孔にした場合について検討した結果、以下の結論を得た。

- (1) ナットサイズよりもブラケットのボルト孔径が大きい場合は引張力によって座金に曲げ変形が生じるが許容値内である。ただし、偏芯し座金の一部がベースプレートにかからない場合は、座金のねじれ変形やアンカーボルトに回転が生じ、曲げ引っ張りが生じる。
- (2) ブラケットのアンカー孔を拡大孔にするとナットのかかりが少なくなるため、引張力による座金の応力はナット角部に集中する。また、偏芯が大きいと座金が塑性変形する。
- (3) ブラケットのアンカー孔が小さいとアンカーボルトには引張力により均等な応力が生じるが、拡大孔としたアンカー孔内で偏芯すると応力が不均等になり、アンカーボルトの軸部に引張応力が生じる。
- (4) ブラケットのアンカー孔を拡大孔にしても偏芯していなければ引張力によるベースプレートの応力はボルト孔の円周に対してほぼ均等になる。偏芯すると一部で座金のかかりが無くなるため部分的に集中して応力が生じる。
- (5) アンカーボルトが片利きした状態でせん断力が作用すると、片利きしたアンカーボルトが変形した後

に残りのアンカーボルトにせん断力が均等に作用していく。

- (6) せん断力により片利きしたアンカーボルトが変形後、片利きの状態が解消されると、正常状態とほぼ同様の変形を示す。
- (7) アンカーボルトのねじ部の径が M30 と M48 では、(5)と(6)の傾向は同じである。

参考文献

- 1) 日本道路公団：橋梁縁端拡幅マニュアル（案），平成7年10月
- 2) 名古屋高速道路公社：既設橋の落橋防止システムの設計要領（案），平成11年4月
- 3) ゴム支承協会：ゴム支承の鋼材部の設計標準（案），pp.104-119，平成17年10月
- 4) 日本工業規格：JIS B 1180, JIS B 1181, JIS B 1256
- 5) 土木学会：構造力学公式集，p.327
- 6) 日本橋梁建設協会：'16 デザインデータブック，pp.115
- 7) 日本道路協会：道路橋支承便覧，p.176，平成16年4月

4. 斜角の影響

4-1. 基本的な設計の流れ

下部工付きの鋼製ブラケットを有する構造には、落橋防止構造や水平力分担構造（横変位拘束構造）、縁端拡幅、ジャッキアップブラケットなどが想定される。

それらの構造に対し、アンカーボルトに作用する力を模式図で表すと下図のようになる（図 4-1-1）。

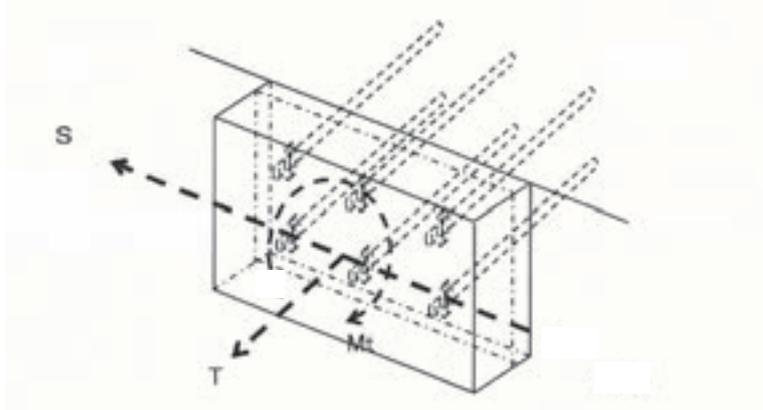


図 4-1-1 アンカーボルトに作用する力

一般的にアンカーボルトに作用する力に対して、以下の照査を行う。

- ①アンカーボルトの軸方向の作用力 T に対する照査
- ②アンカーボルトの直角方向の作用力 S に対する照査
- ③①②の合成応力の照査

また、図 4-1-2 に示すように、ブラケットに水平力が作用する構造（例えば水平力分担構造）では、水平力作用位置から図心位置までの距離を L としたねじりモーメント（ねじりせん断）がアンカーボルトに作用する。

通常のアンカーボルトの設計においては、ねじりモーメントに対し、各位置のアンカーボルトに発生するせん断力に抵抗できるようにアンカーボルト群として設計する。

その他、上下部連結の落橋防止ケーブルなど、斜め方向に引張力 T が作用する場合は、図 4-1-3 に示すように、斜め方向の作用力を水平方向 HR と鉛直方向 VR の成分に換算し設計する。

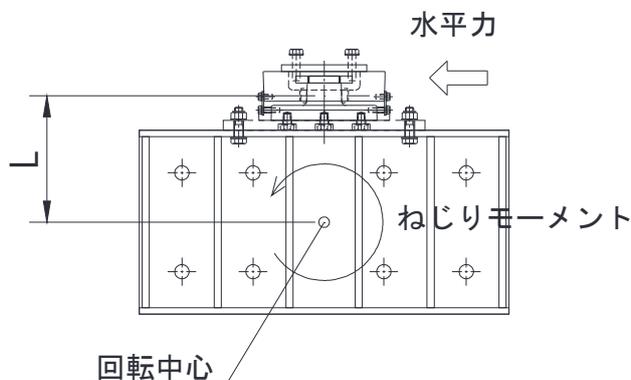


図 4-1-2

ブラケットに水平力が作用する構造

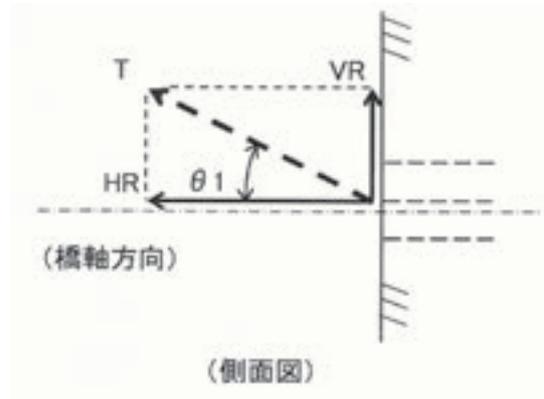


図 4-1-3

斜め方向の作用力に対する分力

4-2. 斜角を有する場合のアンカーボルトに作用する応力について

斜角を有する橋梁においても、設計手法は斜角が無い場合と同様である。

ただし、斜角によりアンカーボルトには図 4-2-1 に示すように、アンカーボルト軸方向 T1 と橋軸直角方向 S の両成分が作用することになるため、分力に換算した設計荷重にて設計を行う。

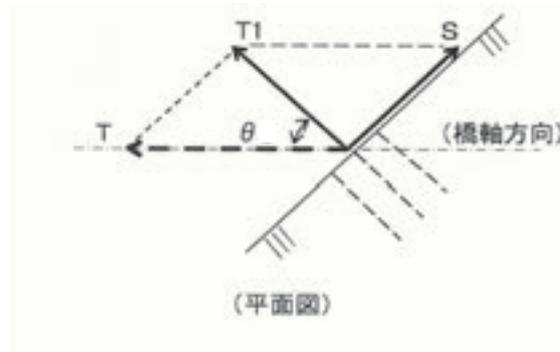


図 4-2-1 斜角を考慮した設計荷重

4-3. 設計事例

次頁より斜角を有する場合の設計事例を 2 例挙げる。留意すべき点は、どちらの場合も、4-2. で詳述したとおり、作用力を分力に換算してアンカーボルトおよびブラケットの設計を行わなければならない。

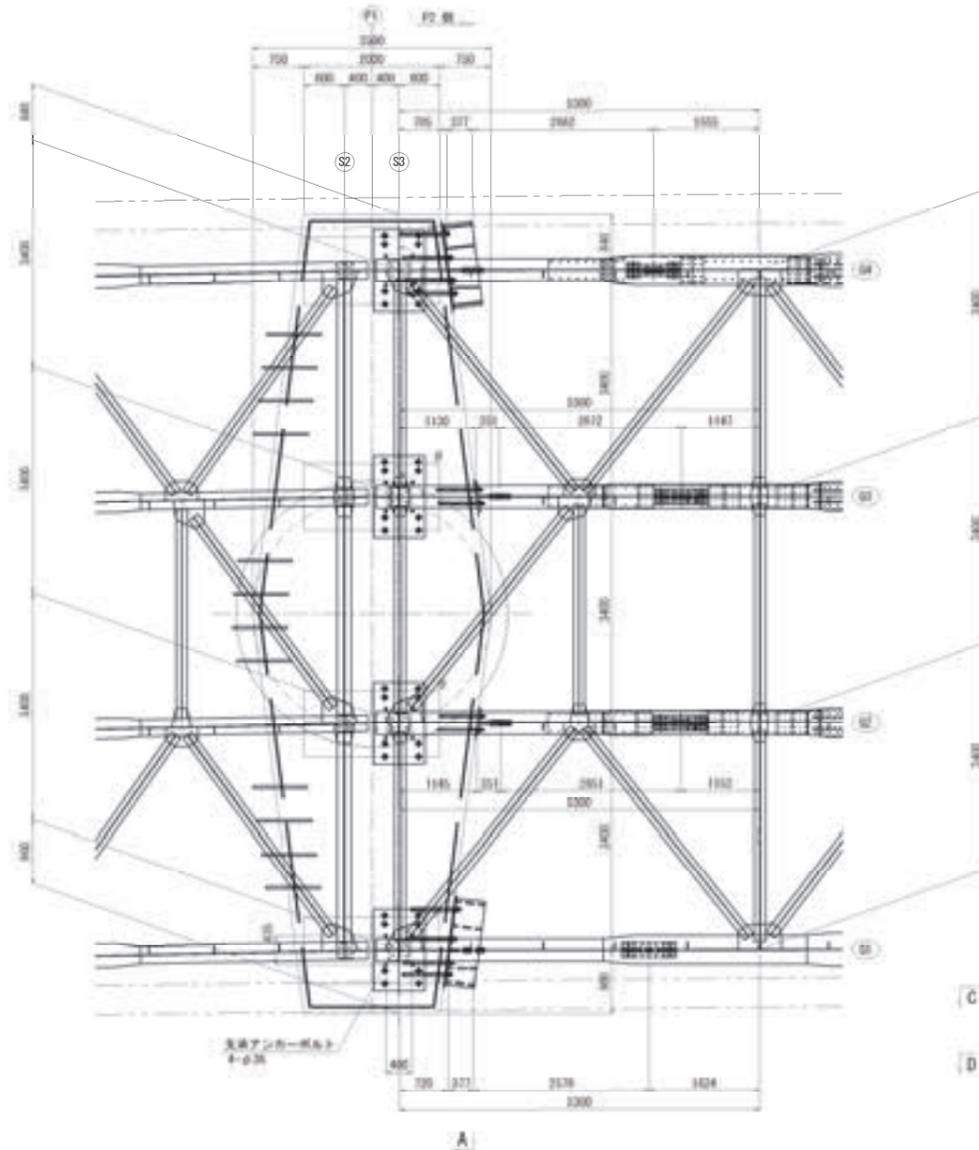
なお、本設計例では、現場実測を想定したアンカーボルト配置にて試算するものとする。

- 1) アンカーボルト方向に力が作用する場合（落橋防止構造）
- 2) アンカーボルトの直角方向に力が作用する場合（水平力分担構造・横変位拘束構造）

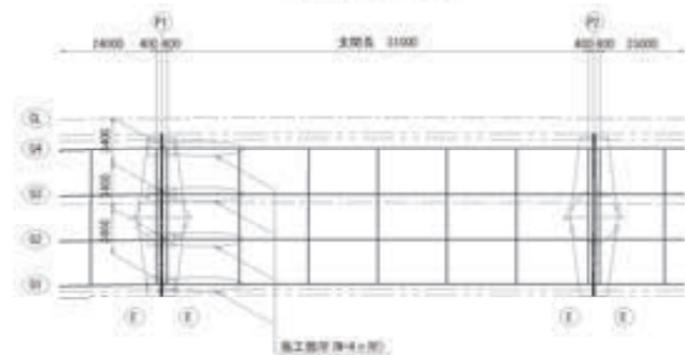
落橋防止構造図 一般図 S=1:40

P1橋脚

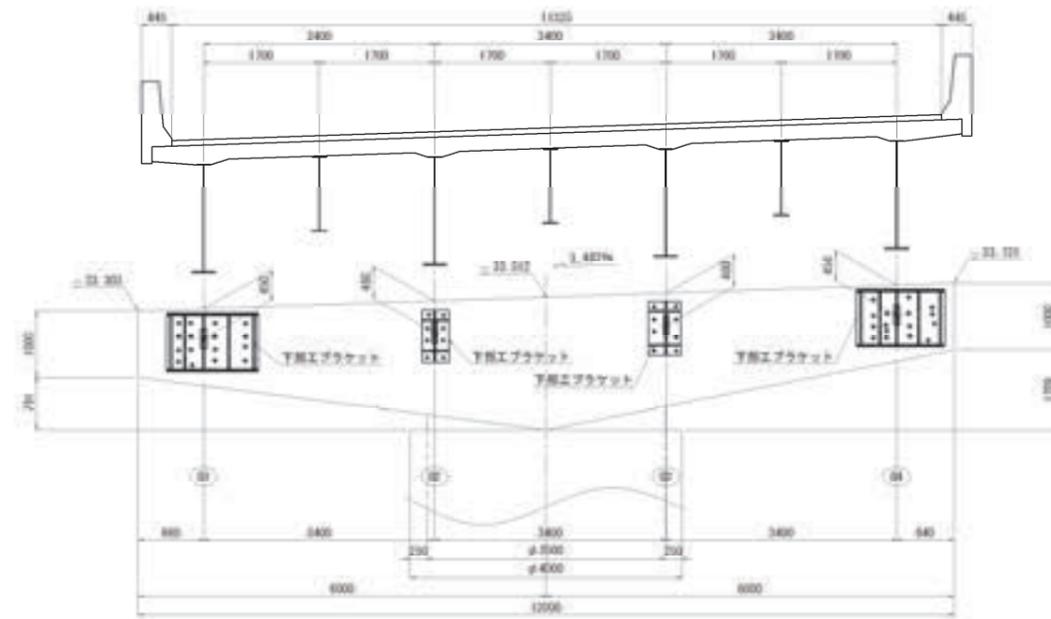
平面図 A



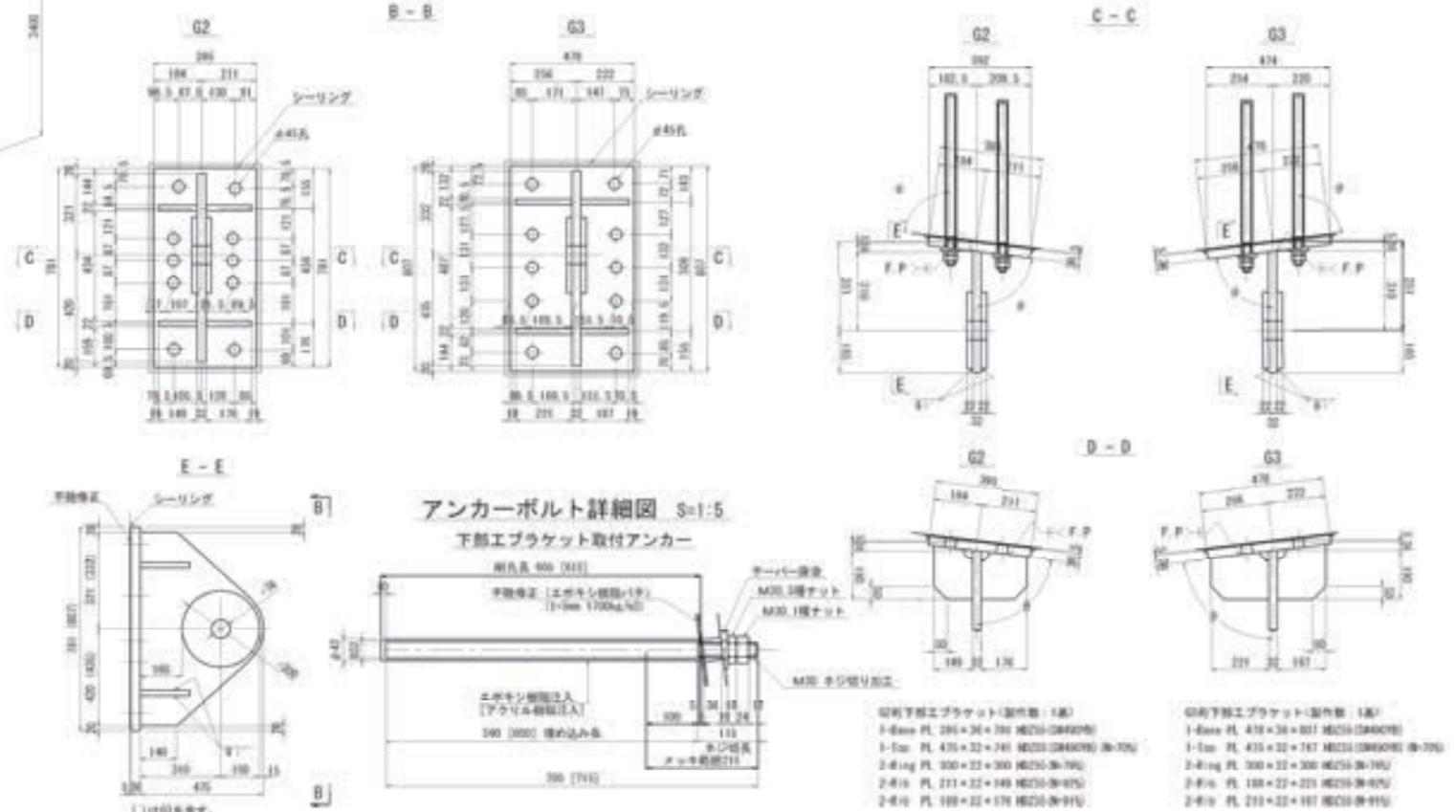
位置図 S=1:200



正面図 A-A

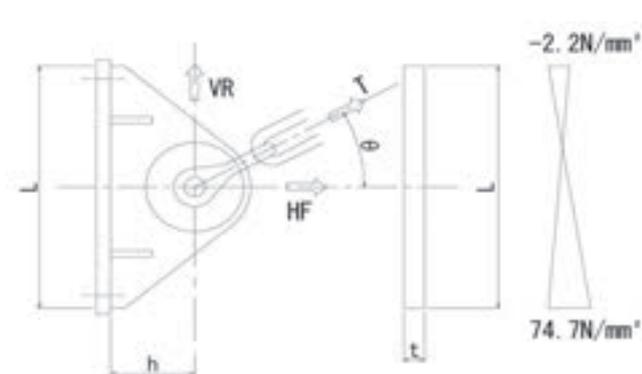


下部エブラケット詳細図 S=1:10



落橋防止装置 下部エブラケットの照査

① トッププレートの照査



トッププレート長さ
L = 781 mm

トッププレート板厚
t = 22 mm (SM490Y)

荷重の作用高さ
h = 310 mm

チェーンの作用角度
 $\theta = 20^\circ$

チェーンに作用する張力
T = 900 kN

地震時設計水平力
HF = 846 kN

作用鉛直力
VR = 289 kN

①-1) 曲げモーメント

$$M = VR \times h$$

$$= 289,254 \times 310$$

$$= 89,668,872 \text{ N}\cdot\text{mm}$$

①-2) 断面係数

$$Z = t \times L^2 / 6$$

$$= 22 \times 781^2 / 6$$

$$= 2,236,524 \text{ mm}^3$$

①-3) 断面積

$$A = t \times L$$

$$= 22 \times 781$$

$$= 17,182 \text{ mm}^2$$

①-4) 応力度

$$\delta t = M / Z + HF / A$$

$$= 89,668,872 / 2,236,524 + 845,723 / 17,182$$

$$= 89.3 \text{ N/mm}^2 \leq \delta sa = 315 \text{ N/mm}^2 \quad \text{OK}$$

$$\delta t = M / Z - HF / A$$

$$= 89,668,872 / 2,236,524 - 845,723 / 17,182$$

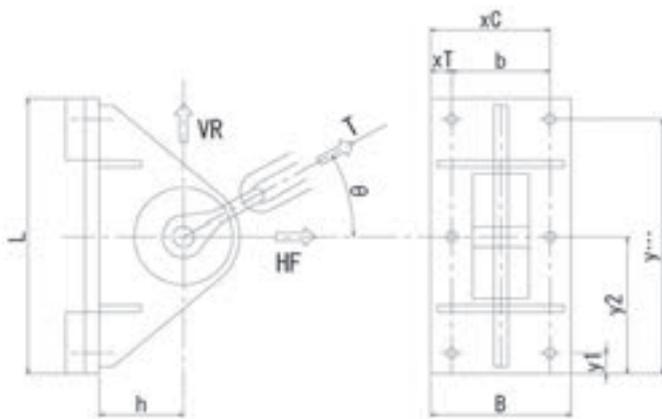
$$= -9.1 \text{ N/mm}^2 \leq \delta sa = 315 \text{ N/mm}^2 \quad \text{OK}$$

$$\tau s = VR / A$$

$$= 289,254 / 17,182$$

$$= 16.8 \text{ N/mm}^2 \leq \tau \alpha = 180 \text{ N/mm}^2 \quad \text{OK}$$

②アンカーボルトの照査



チェーンに作用する張力	$T = 900$ kN
地震時設計水平力	$HF = 846$ kN
作用鉛直力	$VR = 289$ kN
ベースプレート長さ	$L = 781$ mm
ベースプレート厚	$t = 32$ mm
荷重の作用高さ	$h = 310$ mm
ベースプレートの幅	$B = 395$ mm
水平方向ボルト間隔	$b = 220$ mm

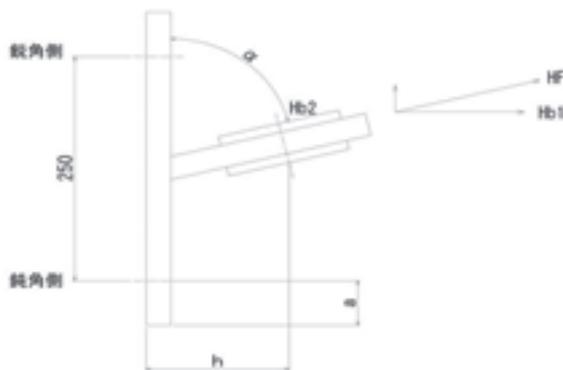
使用アンカーボルトの径 : D38 (SD345 : ネジ径 M36)

ボルトの有効断面積 $A_s = 817$ mm²

橋梁の斜角 $\alpha = 55^\circ$ (トッププレートを斜角にあわせ、傾けて設置する。)

ここでは斜角を有する場合の計算例を示すため、 55° とする。

これより水平力は、下図に示す分力で表される。



$$\begin{aligned} Hb1 &= HF \cdot \sin \alpha \\ &= 845.7 \times \sin 55^\circ \\ &= 692.8 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Hb2 &= HF \cdot \cos \alpha \\ &= 845.7 \times \cos 55^\circ \\ &= 485.1 \text{ kN} \end{aligned}$$

②-1) 曲げモーメント

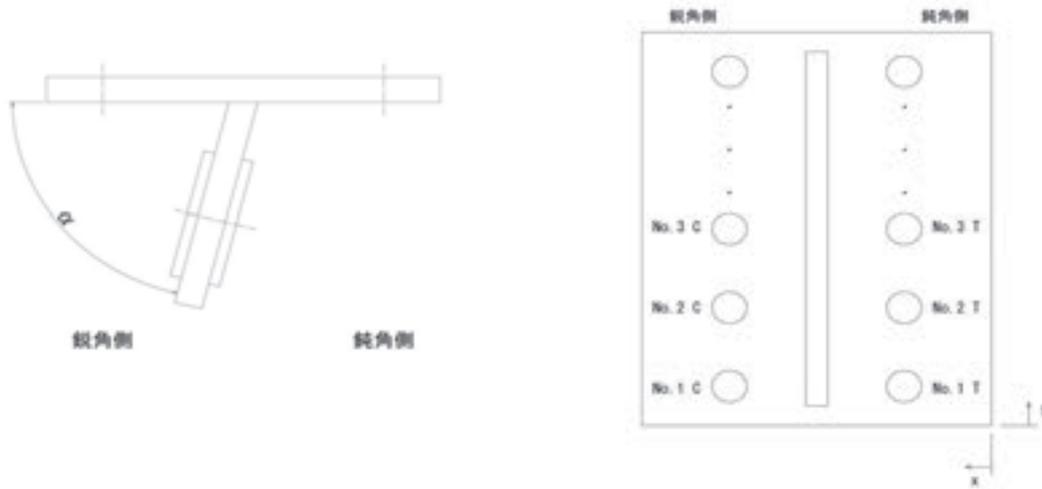
(鉛直方向)

$$M1 = VR \times h = 289,254 \times 310 = 89,668,872 \text{ N}\cdot\text{mm}$$

(水平方向)

$$M2 = Hb2 \times h = 485,100 \times 310 = 150,381,000 \text{ N}\cdot\text{mm}$$

2) ボルトに作用する引張力 Bt



i) 作用鉛直力、VRによりボルトに作用する引張力 Bt1

アンカーボルト群中心までの距離eの計算

$$e = \frac{n \cdot y}{\sum n}$$

$$= \frac{4059.5}{10}$$

$$= 406 \text{ mm}$$

	ボルトNo.	yi(mm)	本数n (本)	中立軸からの距離e (mm)	n・e ² (mm ²)	ボルト1本あたりの Bt1(N)※1	
鈍角側	No.1 T	y1	69	1	337	#####	68891.3
	No.2 T	y2	331	1	75	5617.5	15324.0
	No.3 T	y3	418	1	-12.1	145.2	-2463.7
	No.4 T	y4	505	1	-99.1	9810.9	-20251.3
	No.5 T	y5	702.5	1	-296.6	87941.9	-60631.3
	No.6 T	y6					
鋭角側	No.1 C	y1	69.5	1	336.5	#####	68789.1
	No.2 C	y2	331	1	75	5617.5	15324.0
	No.3 C	y3	418	1	-12.1	145.2	-2463.7
	No.4 C	y4	505	1	-99.1	9810.9	-20251.3
	No.5 C	y5	710.5	1	-304.6	92750.7	-62267.0
	No.6 C	y6					
Σ n・e ² =					#####		

※1 ボルト1本に作用する引張力 Bt1=M1xe / Σ n・e²

※3 ベースPLは、支承改良ブラケットと兼用のため、仮想縁端距離を用いる場合がある。

ii) 水平力、HFによりボルトに作用する引張力 Bt2

アンカーボルト群中心までの距離eの計算

$$e = \frac{n \cdot y}{\sum n}$$

$$= \frac{2003.5}{10}$$

$$= 200.4 \text{ mm}$$

	ボルトNo.	xi(mm)※3	本数n (本)	中立軸からの距離e (mm)	n・e ² (mm ²)	ボルト1本あたりの Bt2(N)※2
鈍角側	No.1 T	y1 85	1	115.4	13305.6	203,684
	No.2 T	y2 89.5	1	110.9	12287.7	198,441
	No.3 T	y3 89.5	1	110.9	12287.7	198,441
	No.4 T	y4 89.5	1	110.9	12287.7	198,441
	No.5 T	y5 81	1	119.4	14244.4	208,345
	No.6 T	y6				
鋭角側	No.1 C	y1 316.5	1	-116.2	13490.8	-66,056
	No.2 C	y2 318	1	-117.7	13841.5	-67,804
	No.3 C	y3 318	1	-117.7	13841.5	-67,804
	No.4 C	y4 318	1	-117.7	13841.5	-67,804
	No.5 C	y5 298.5	1	-98.2	9633.4	-45,083
	No.6 C	y6				
Σ n・e ² =					129062	

※2 ボルト1本に作用する引張力 Bt2=M2x e / Σ n・e²+Hb1/ Σ n

iii) 引張力の合計 Σ Bt

	ボルトNo.	Bt1(N)	Bt2(N)	Σ Bt(N)	ボルトの 許容引張力Bta(N)	判定
鈍角側	No.1 T	68891	203,684	272,575	277,678	OK
	No.2 T	15324	198,441	213,765	277,678	OK
	No.3 T	-2464	198,441	195,977	277,678	OK
	No.4 T	-20251	198,441	178,189	277,678	OK
	No.5 T	-60631	208,345	147,713	277,678	OK
	No.6 T	0	0	0	277,678	OK
鋭角側	No.1 C	68789	-66,056	2,733	277,678	OK
	No.2 C	15324	-67,804	-52,480	277,678	OK
	No.3 C	-2464	-67,804	-70,268	277,678	OK
	No.4 C	-20251	-67,804	-88,055	277,678	OK
	No.5 C	-62267	-45,083	-107,350	277,678	OK
	No.6 C	0	0	0	277,678	OK
Σ =				692,800		

ボルトの許容引張力

$$Bta = \delta ta \times As$$

$$= 340 \times 817$$

$$= 277,678 \text{ N}$$

3) せん断力

$$S = \sqrt{Vl} + \sqrt{Hb2^2}$$

$$= \sqrt{289254^2} + 485100^2$$

$$= 564,792 \text{ N}$$

4) 応力度の照査

引張応力度

$$\begin{aligned}\delta t &= \frac{\max \Sigma Bt}{A} \\ &= \frac{272,575}{816.7} \\ &= 333.8 \text{ N/mm}^2 \leq \delta t_a = 340 \text{ N/mm}^2 \quad \text{OK}\end{aligned}$$

せん断応力度

$$\begin{aligned}\tau &= \frac{S}{n \cdot A} \\ &= \frac{564,792}{10 \times 817} \\ &= 69.2 \text{ N/mm}^2 \leq \tau_a = 196 \text{ N/mm}^2 \quad \text{OK}\end{aligned}$$

合成応力度

$$\begin{aligned}K &= \left(\frac{\delta t}{\delta a} \right)^2 + \left(\frac{\tau}{\tau_a} \right)^2 \\ &= \left(\frac{333.8}{340} \right)^2 + \left(\frac{69.2}{195.5} \right)^2 \\ &= 1.1 \leq 1.2 \quad \text{OK}\end{aligned}$$

5) コンクリートの押し抜きせん断に対する照査

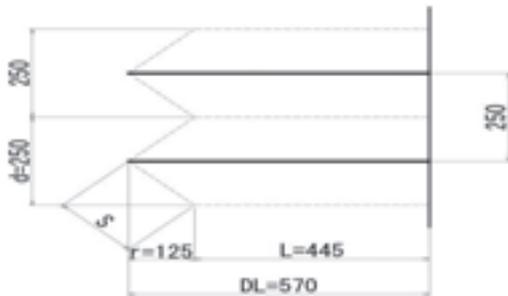
引き抜き力

$$\begin{aligned} T &= \max \Sigma Bt \times n \\ &= 272,575 \times 2 \\ &= 545,151 \text{ N} \end{aligned}$$

コンクリートの許容押し抜きせん断応力度

$$\begin{aligned} \tau_{pa} &= 0.9 \times 1 \\ &= 0.9 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

コンクリートの押し抜きせん断抵抗面積



アンカーボルトの埋め込み長

$$DL = 570 \text{ mm}$$

アンカーボルト本数

$$n = 2 \text{ 本}$$

アンカーボルト間隔

$$p = 220 \text{ mm}$$

$$r = 110 \text{ mm}$$

$$s = 156 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} A &= n \cdot (\pi \cdot r \cdot s + \pi \cdot d \cdot L) \\ &= 2 \times (\pi \times 110 \times 156 + \pi \times 220 \times 460) \\ &= 743,376 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$\tau_p = \frac{T}{A}$$

$$= \frac{545,151}{743,376}$$

$$= 0.7 \text{ N/mm}^2 \leq \tau_{pa} = 0.9 \text{ N/mm}^2 \quad \text{OK}$$

※アンカー群としての照査(アンカー群抵抗面積は参考資料を参照)

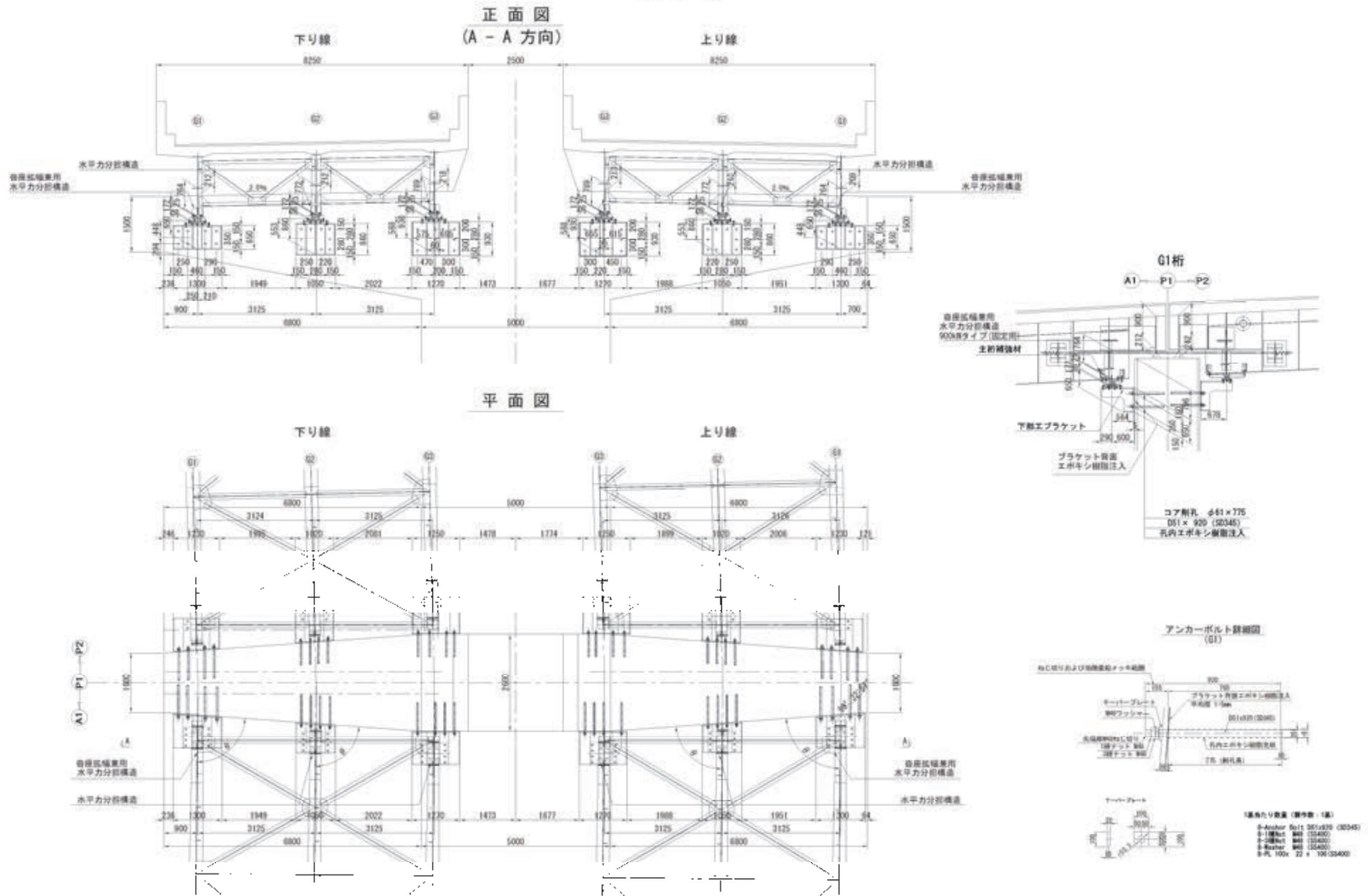
$$\tau_p = \frac{\Sigma T}{A}$$

$$= \frac{1,131,852}{2,374,644}$$

$$= 0.48 \text{ N/mm}^2 \leq \tau_{pa} = 0.85 \text{ N/mm}^2 \quad \text{OK}$$

水平力分担構造一般図 S=1:50

部材配置図



水平力分担構造の設計

1 設計条件

- 1) 支承条件 : 固定
- 2) 設計荷重

$$\begin{array}{lcl}
 \text{1支承の最大死荷重反力} & \text{maxRd} = & 430 \text{ kN} \\
 \text{1支承線上の全設計水平力} & \begin{array}{l} \text{橋軸方向} \quad H'a = 2678 \text{ kN} \\ \text{橋軸直角方向} \quad H'b = 1313 \text{ kN} \end{array} &
 \end{array}$$

$$\begin{array}{lcl}
 \text{水平力分担構造設置箇所数} & n = & 3 \text{ 箇所} \\
 \text{縁端拡幅構造設置箇所数} & n = & 3 \text{ 箇所}
 \end{array}$$

水平力分担構造1基あたりの設計荷重
設置1箇所あたりの設計水平力

橋軸方向

$$\begin{aligned}
 H_a &= \frac{H'a}{n} \\
 &= \frac{2678}{3} \\
 &= 892.7 \text{ kN} \rightarrow 900 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

橋軸直角方向

$$\begin{aligned}
 H_b &= \frac{H'b}{n} \\
 &= \frac{1313}{3} \\
 &= 437.7 \text{ kN} \rightarrow 440 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

3) 設計移動量

$$\begin{array}{lcl}
 \text{橋軸方向全移動量} & e_l = & \pm 15 \text{ mm} \\
 \text{移動余裕量} & e = & \pm 15 \text{ mm}
 \end{array}$$

4) 使用材料及び許容応力度

水平力分担構造に対する許容応力度の割り増しは、鋼材に対して降伏強度以下とし、1.7倍を考慮する。その他については、1.5倍を考慮するものとし、縁端拡幅構造については割り増しを考慮しない。また、ブラケットに十分な剛性を持たせるために、主要部材の最小板厚を22mmとする。

使用材料一覧表	
上部エブラケット	SM490Y
下部エブラケット	SM490Y
主桁補強材	SM400
調整プレート	SM490
連結ボルト	強度区分8.8
高力ボルト	S10T

5) せん断ストッパー形式

部位	Ha(kN)		許容荷重	形式	設計移動量
P30橋脚(起点側)G1	900	<	970kN	900kN F	±15mm

2) 下部工付取付金具(鋼製ブラケット)の設計

2)-1. 断面力の計算

斜角による設計荷重

既設下部工との斜角 $\theta = 55^\circ$ ここでは斜角を有する場合の計算例を示すため、 55° とする。

橋軸方向作用時

下部工前壁直角方向分力

$$H1 = H_a \times \sin \theta = 900 \times \sin 55^\circ = 737 \text{ kN}$$

下部工前壁方向分力

$$H2 = H_a \times \cos \theta = 900 \times \cos 55^\circ = 516 \text{ kN}$$

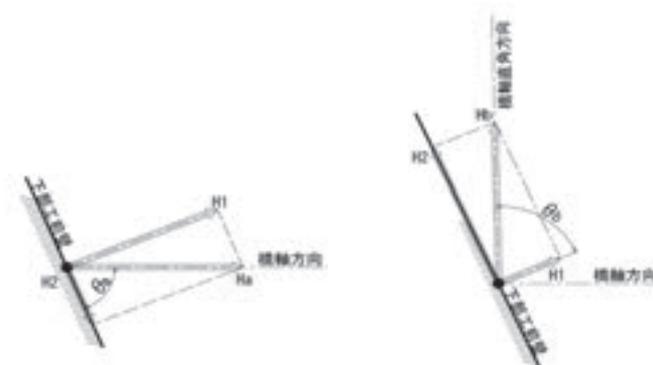
橋軸直角方向作用時

下部工前壁直角方向分力

$$H1 = H_b \times \cos \theta = 440 \times \cos 55^\circ = 252 \text{ kN}$$

下部工前壁方向分力

$$H2 = H_b \times \sin \theta = 440 \times \sin 55^\circ = 360 \text{ kN}$$



2)-3 アンカーボルトの設計

RC断面計算表
(アンカーボルトおよびコンクリート軸方向応力算出表)

				①橋軸前面(H1方向)		②橋軸背面(H1'方向)		③直角左向 (H2方向)	④直角右向 (H2'方向)
				M1に対する 応力度	M2に対する 応力度	M1に対する 応力度	M2に対する 応力度		
作用力	軸方向力 (圧縮:正)	N	kN	-737		737		0	0
	曲げモーメント	M	kN・m	330		330		216	216
	$M'=M+N\cdot u$		kN・m	201		459		216	216
断面諸元	部材幅	b	mm	1300		1300		650	650
	部材高	h	mm	650		650		1300	1300
	引張鉄筋量	径	-	M48		M48		M48	M48
	1段目	本数	-	4		4		2	2
		As1	mm ²	5892.4		5892.4		2946.2	2946.2
		d1	mm	500		500		1150	1150
	2段目	本数	-	0		0		2	2
		As2	mm ²	0		0		2946.2	2946.2
		d2	mm	-		-		860	900
	3段目	本数	-	0		0		0	0
		As3	mm ²	0		0		0	0
		d3	mm	-		-		-	-
	4段目	本数	-	0		0		0	0
		As4	mm ²	0		0		0	0
		d4	mm	-		-		-	-
	ヤング率	n	-	15		15		15	15
$pt=As/bd$		-	0.0091		0.0091		0.0092	0.0090	
$u=h/2-(h-d)$		mm	175		175		500	500	
$e=M/N+u$		mm	-273		623		0	0	
心軸 力方 度向	中立軸位置	x	mm	147		270		404	409
	δ_c		N/mm ²	6.4		7.4		1.8	1.8
	δ_{ca}		N/mm ²	13.5		13.5		13.5	13.5
	判定 $\delta_c \leq \delta_{ca}$		-	OK		OK		OK	OK
	平均 δ_s		N/mm ²	228.2		95		40.5	40.2
	1段目 δ_s		N/mm ²	228.2		95		50.3	48.3
	2段目 δ_s		N/mm ²					30.7	32
	3段目 δ_s		N/mm ²						
	4段目 δ_s		N/mm ²						
	δ_{sa}		N/mm ²	345		345		345	345
判定 $\delta_s \leq \delta_{sa}$		-	OK		OK		OK	OK	

アンカーボルトの有効断面積

使用アンカーボルト : D51 (SD345) <M48を使用する。>
 M48 の有効断面積 d2 = 45 mm
 d3 = 42 mm

ネジ部の有効断面積 : A_s (mm²)

$$A_s = \frac{\pi}{4} \times \left(\frac{d2 + d3}{2} \right)^2$$

$$= \frac{\pi}{4} \times \left(\frac{45 + 42}{2} \right)^2$$

$$= 1473 \text{ mm}^2$$

アンカーボルト配置

番号	x (mm)	y (mm)	yl (mm)	yu (mm)	xl (mm)	xr (mm)
1-1	150	150	500	150	150	1150
1-2	150	500	150	500	150	1150
2-1	400	150	500	150	400	900
2-2	400	500	150	500	400	900
3-1	860	150	500	150	860	440
3-2	860	500	150	500	860	440
4-1	1150	150	500	150	1150	150
4-2	1150	500	150	500	1150	150

ベース幅 1300 mm
 ベース高 650 mm

yl : 鋼製ブラケット下端からアンカーボルトまでの距離
 yu : 鋼製ブラケット上端からアンカーボルトまでの距離
 xl : 鋼製ブラケット左端からアンカーボルトまでの距離
 xr : 鋼製ブラケット右端からアンカーボルトまでの距離
 n : 設置アンカーボルト本数 8 本

(1).橋軸方向に対する検討:H1方向

(1)-1. 設計断面力の算出

作用高 $h_5 = 448$ mm (下部工側連結プレート中心から設計断面中心までの距離)

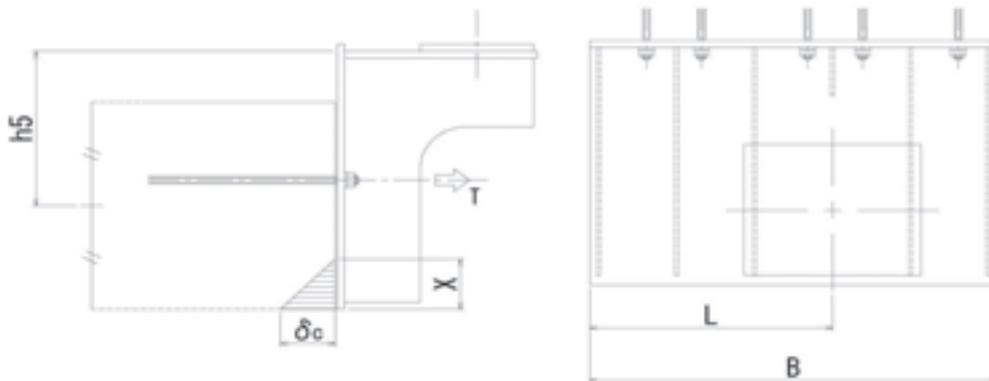
$$\begin{aligned} M1 &= \max H1 \times h_5 \\ &= 737236.8 \times 448 \\ &= 330282104 \text{ N}\cdot\text{mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M2 &= \max H1 \times \left(\frac{L - B}{2} \right) \\ &= 737236.8 \times \left(\frac{650 - 1300}{2} \right) \\ &= 0 \text{ N}\cdot\text{mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} N &= \max H1 \\ &= 737237 \text{ N} \end{aligned}$$

(1)-2. 軸方向応力度の照査

単鉄筋RC断面として照査する。



RC断面計算表より

中立軸位置 $x = 147$ mm

応力度

コンクリート圧縮応力度 設計基準強度 $\delta_{ck} = 27$ N/mm²

$$\begin{aligned} \delta_{c1} + \delta_{c2} &= 6.1 + 0 \\ &= 6.1 \text{ N/mm}^2 < \delta_{ca} = 13.5 \text{ N/mm}^2 \quad \text{OK} \end{aligned}$$

アンカーボルト引張応力度

$$\begin{aligned} \delta_{s1} + \delta_{s2} &= 244.5 + 0 \\ &= 244.5 \text{ N/mm}^2 < \delta_{sa} = 345 \text{ N/mm}^2 \quad \text{OK} \end{aligned}$$

(2). 橋軸方向に対する検討 : H1' 方向

(2)-1. 設計断面力の算出

作用高 $h_5 = 448$ mm (水平力載荷点から部材断面中立軸までの距離)

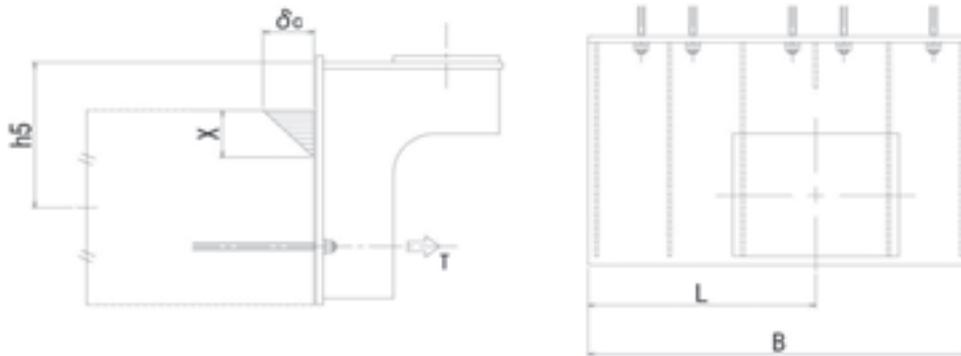
$$\begin{aligned} M1 &= -\max H1 \times h_5 \\ &= -737236.8 \times 448 \\ &= -330282104 \text{ N}\cdot\text{mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M2 &= -\max H1 \times \left(\frac{L - B}{2} \right) \\ &= -737.24 \times \left(\frac{650 - 1300}{2} \right) \\ &= 0 \text{ N}\cdot\text{mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} N &= -\max H1 \\ &= 737237 \text{ N} \end{aligned}$$

(2)-2. 軸方向応力度の照査

単鉄筋RC断面として照査する。



RC断面計算表より

中立軸位置 $x = 270$ mm

応力度
 コンクリート圧縮応力度 設計基準強度 $\delta_{ck} = 27$ N/mm²

$$\begin{aligned} \delta_{c1} + \delta_{c2} &= 7.4 + 0 \\ &= 7.4 \text{ N/mm}^2 < \delta_{ca} = 13.5 \text{ N/mm}^2 \text{ OK} \end{aligned}$$

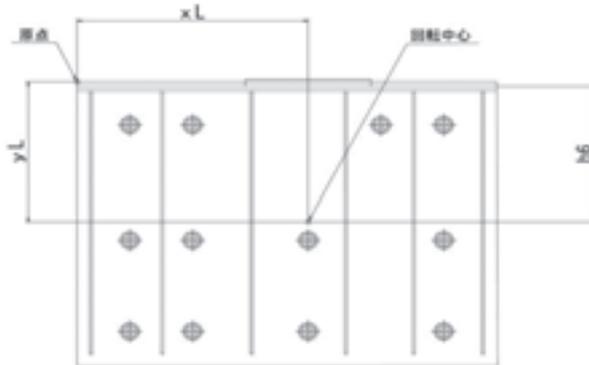
アンカーボルト引張応力度

$$\begin{aligned} \delta_{s1} + \delta_{s2} &= \text{###} + 0 \\ &= 82.6 \text{ N/mm}^2 < \delta_{sa} = 345 \text{ N/mm}^2 \text{ OK} \end{aligned}$$

(3). 橋軸直角方向に対する検討
 (3)-1. 純せん断応力度の照査

$$\begin{aligned}
 S &= \max H2 \\
 &= 360426.9 \text{ N} \\
 \tau H &= \frac{S}{n \cdot A_s} \\
 &= \frac{360426.9}{8 \cdot 1473} \\
 &= 30.6 \text{ N/mm}^2 < \tau a = 195.5 \text{ N/mm}^2 \quad \text{OK}
 \end{aligned}$$

(3)-2. 回転によるせん断応力度の照査



回転中心位置の算出

$$\begin{aligned}
 \sum x &= 5120 \text{ mm} \\
 \sum y &= 2600 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

座標原点からの距離

(x方向)

$$\begin{aligned}
 xL &= \frac{5120}{8} \\
 &= 640 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

(y方向)

$$\begin{aligned}
 yL &= \frac{2600}{8} \\
 &= 325 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

回転モーメントの算出

作業高 $h_6 = 448 \text{ mm}$ (水平力載荷点からボルト群回転中心までの高さ)

$$\begin{aligned} M_o &= \max H_2 \times h_6 \\ &= 516218.8 \times 448 \\ &= 231266019 \text{ N}\cdot\text{mm} \end{aligned}$$

番号	Lx (mm)	Ly (mm)	L (mm)	L ² (mm ²)	Sy (N)	Sx (N)	τ_y (N/mm ²)	τ_x (N/mm ²)	$\Sigma \tau$ (N/mm ²)	τ_a (N/mm ²)	判定
1-1	-490	175	520	270725	-77755	27770	52.8	18.9	72.3	195.5	OK
1-2	-490	-175	520	270725	-77755	-27770	52.8	18.9	72.3	195.5	OK
2-1	-240	175	297	88225	-38084	27770	25.9	18.9	55.8	195.5	OK
2-2	-240	-175	297	88225	-38084	-27770	25.9	18.9	55.8	195.5	OK
3-1	220	175	281	79025	34910	27770	23.7	18.9	54.8	195.5	OK
3-2	220	-175	281	79025	34910	-27770	23.7	18.9	54.8	195.5	OK
4-1	510	175	539	290725	80929	27770	54.9	18.9	73.9	195.5	OK
4-2	510	-175	539	290725	80929	-27770	54.9	18.9	73.9	195.5	OK
合計値				1457400							
最大値									73.9		

$$L_x = x - x_L$$

$$L_y = y - y_L$$

$$Q = \frac{M_o \cdot L}{\Sigma L^2} \quad L: \text{ボルト群回転中心から照査ボルトまでの距離}$$

回転せん断応力度

$$\tau_m = \frac{Q}{A_s} < \tau_y = 195.5 \text{ N/mm}^2$$

合成せん断応力度

$$\Sigma \tau = \sqrt{(\tau_y)^2 + (\tau_x + \tau_H)^2} < \tau_a = 195.5 \text{ N/mm}^2$$

(3)-3. 引張応力度および合成応力度の照査 : H2方向荷重

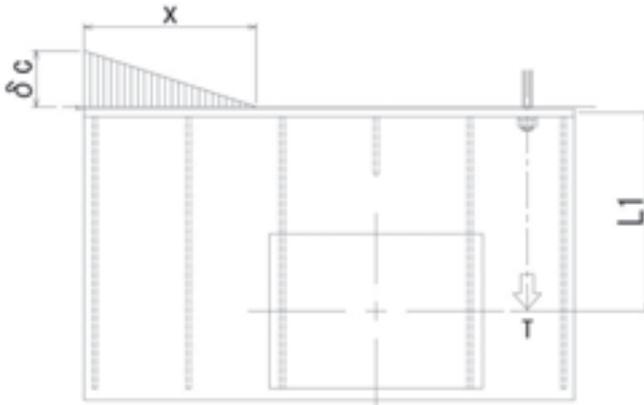
(a). 曲げモーメント

作用距離 $L1 = 600$ mm (水平力載荷点中心から鋼製ブラケットBasePL底面までの距離)

$$\begin{aligned} M &= \max H2 \times L1 \\ &= 360426.9 \times 600 \\ &= 216256140 \text{ N}\cdot\text{mm} \end{aligned}$$

(b). 引張応力度の照査

単鉄筋RC断面として照査する。



RC断面計算表より

中立軸位置 $x = 404$ mm

応力度

コンクリート圧縮応力度 設計基準強度 $\delta_{ck} = 27$ N/mm²

$$\delta_c = 2.2 \text{ N/mm}^2 < \delta_{ca} = 13.5 \text{ N/mm}^2 \quad \text{OK}$$

アンカーボルト引張応力度

$$\delta_s = 61.4 \text{ N/mm}^2 < \delta_{sa} = 345 \text{ N/mm}^2 \quad \text{OK}$$

(c). 合成応力度の照査

$$\begin{aligned} K &= \left(\frac{\delta}{\delta_{sa}} \right)^2 + \left(\frac{\max \Sigma \tau}{\tau_a} \right)^2 \\ &= \left(\frac{61.4}{345} \right)^2 + \left(\frac{71}{195.5} \right)^2 \\ &= 0.17 < 1.2 \quad \text{OK} \end{aligned}$$

(3)-4. 引張応力度および合成応力度の照査 : H2'方向荷重

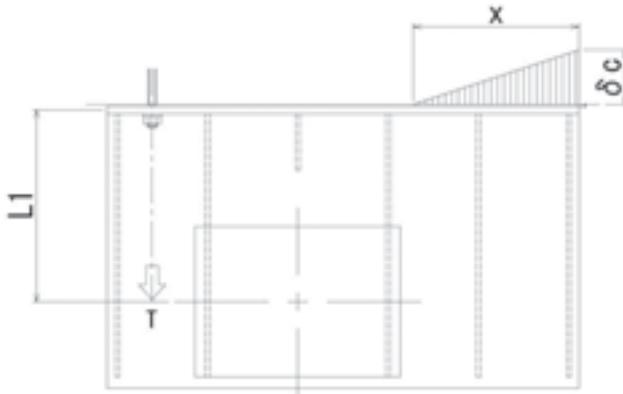
(a). 曲げモーメント

作用距離 $L1 = 600$ mm (水平力載荷点中心から鋼製ブラケットBasePL底面までの距離)

$$\begin{aligned} M &= \max H2 \times L1 \\ &= 360426.9 \times 600 \\ &= 216256140 \text{ N}\cdot\text{mm} \end{aligned}$$

(b). 引張応力度の照査

単鉄筋RC断面として照査する。



RC断面計算表より

中立軸位置 $x = 409$ mm

応力度
コンクリート圧縮応力度 設計基準強度 $\delta_{ck} = 27$ N/mm²

$$\delta_c = 2.2 \text{ N/mm}^2 < \delta_{ca} = 13.5 \text{ N/mm}^2 \quad \text{OK}$$

アンカーボルト引張応力度

$$\delta_s = 59 \text{ N/mm}^2 < \delta_{sa} = 345 \text{ N/mm}^2 \quad \text{OK}$$

(c). 合成応力度の照査

$$\begin{aligned} K &= \left(\frac{\delta}{\delta_{sa}} \right)^2 + \left(\frac{\max \sum \tau}{\tau_a} \right)^2 \\ &= \left(\frac{59}{345} \right)^2 + \left(\frac{71}{195.5} \right)^2 \\ &= 0.17 < 1.2 \quad \text{OK} \end{aligned}$$

(4). アンカーボルトのコンクリートに対する付着の照査

コンクリートに対する付着は、付着強度が低いコンクリートの許容付着応力度により算出する。
この場合、付着面積は、アンカーボルト削孔径を使用する。

下部工コンクリートの設計基準強度 $\delta_{ck} = 27 \text{ N/mm}^2$

樹脂とコンクリートの許容付着応力度 $\tau_{oa} = 1.7 \times 1.5 = 2.6 \text{ N/mm}^2$

樹脂と鉄筋の許容付着応力度 $\tau_{oa} = 11 \text{ N/mm}^2$

コンクリートの押し抜きせん断応力度 $\tau_{pa} = \frac{2.6}{1.425} \times 1.5 = 2.7 \text{ N/mm}^2$

アンカーボルト径 $D = 51 \text{ mm}$

アンカーボルト削り孔径 $\varnothing = D + 10 \text{ mm} = 51 + 10 = 61 \text{ mm}$

引き抜き力 $\text{maxNP} = \delta_s \times A_s = 244.5 \times 1473.11 = 360176 \text{ N}$

アンカーボルト最小定着長 $L_{min} = 15 \times D = 765 \text{ mm}$

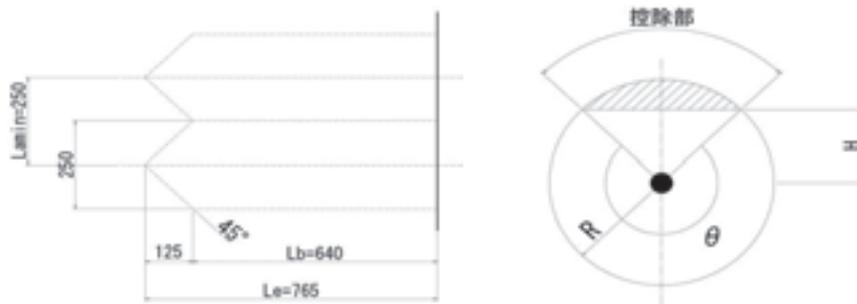
樹脂とコンクリートの付着によるアンカーの必要定着長 $= \frac{\text{maxNP}}{\tau_{oa} \cdot \pi \cdot \varnothing} = \frac{360176.214}{2.6 \cdot \pi \cdot 61} = 737.1 \text{ mm} < L_{min}$

樹脂と鉄筋の付着によるアンカーの必要定着長 $= \frac{\text{maxNP}}{\tau_{oa} \cdot \pi \cdot \varnothing} = \frac{360176.214}{11 \cdot \pi \cdot 61} = 170.9 \text{ mm} < L_{min}$

ここで、縁端拡幅の検討による必要最小定着長は、765 mm
よって、アンカーボルトの必要最小定着長は、765 mm 以上とする。

(4)-1. コンクリートの引抜きせん断力の照査

ボルト1本あたりの照査



有効埋め込み長	Le	=	765	mm	へり空き控除部面積	H	=	294	mm
最小ボルト間隔	Lamin	=	250	mm		R	=	125	mm
円柱部長さ	Lb	=	$\frac{Le - Lamin}{2}$			θ	=	360	°
		=	$\frac{765 - 250}{2}$						
		=	640						

せん断抵抗面積

$$A_c = \left(\frac{Lamin}{2} \times \pi \times \sqrt{\frac{2}{Lamin}} + \frac{Lamin}{2} \times \pi \times \frac{Lamin}{Lb} \right) \times \frac{\theta}{360^\circ}$$

$$= \left(\frac{250}{2} \times \pi \times \sqrt{\frac{2}{250}} + \frac{250}{2} \times \pi \times \frac{250}{640} \right) \times \frac{360}{360^\circ}$$

$$= 572075 \text{ mm}^2$$

引抜きせん断応力度

$$\tau_p = \frac{\max NP}{A_c}$$

$$= \frac{360176}{572075}$$

$$= 0.6 \text{ N/mm}^2 \leq \tau_{pa} = 1.425 \text{ N/mm}^2 \quad \text{OK}$$

5. 今後の課題

5-1. はじめに

ブラケットのベースプレートに設けたボルト孔を拡大孔とした場合、アンカーボルト本体とボルト孔の間に大きなクリアランス（隙間）が生じる。本研究ではこのクリアランスを塞ぐなどの対応をせず、引張力およびせん断力が作用した場合の応力照査することで、拡大孔の影響を検討してきた。そのため、引張力に対しては、ボルト径が小さく+10mmの拡大孔の場合に、ナット角部において高い応力が生じること、せん断力に対してはボルトの片利きによるアンカーボルトの個々の破断の恐れがあるという結果となっている。これらの問題は、拡大孔によりアンカーボルト本体（ネジ切り部）とボルト孔との隙間（図 5-1-1）が大きいことが原因である。そこで、対策としてはボルト孔における隙間を塞ぐ方法が考えられ、ここではその方法を2案提案する。

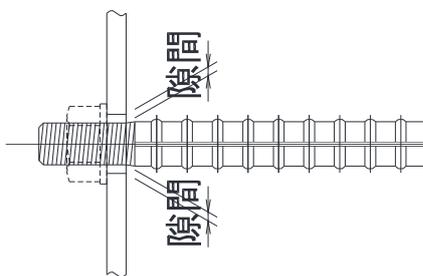


図 5-1-1 アンカーボルトとボルト孔の隙間

5-2. 金属製コマ材

ブラケットのベースプレートに設けたボルト孔に、孔径-1mmほどのコマ材を別途製作し、ボルト孔を塞ぐ方法が考えられる。コマ材にはボルト孔を明けてあるため、部品としては非常に薄く、現場溶接によるベースプレートとの一体化は、溶接熱によるコマ材の溶解に注意が必要である。

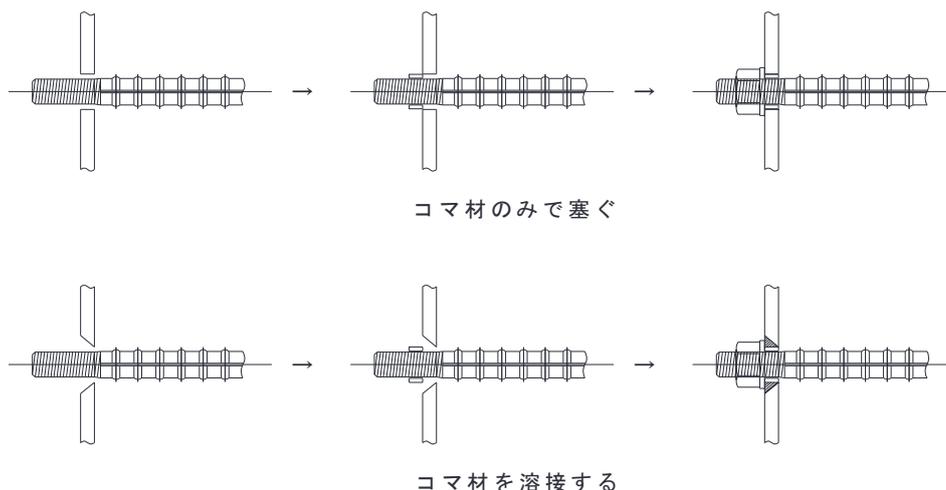


図 5-2-1 コマ材設置イメージ

5-3. パテ材・樹脂材

次に、拡大孔によりボルト本体（M径）とボルト孔との隙間をパテ材や樹脂材で埋める方法が考えられる。

エポキシパテ材やエポキシ樹脂系注入材などを使用する。施工に際しては、特殊な機材や作業員の高度な技量を必要とせず簡易に施工できる利点はあるが、接着力が強力であるため将来的にブラケットを撤去する必要がある場合には向かないという欠点がある。

5-4. 留意点

上記のいずれの方法を採用する場合でも、アンカーボルトやベースプレートに作用する力を十分考慮し、孔埋め材や孔埋め材とベースプレートのボルト孔の接触面に作用する力に対しての検討や、孔埋め材の材料の特性を十分に理解し検討を行う必要がある。特に金属によるコマ材は、溶接の熱量によるコマ材そのものの溶解の対策が必要であるが、これを見越してより大きな拡大孔とするなどの方法も考えられる。現場溶接を行なう場合は、溶接の作業員の確保や溶接作業時間、UT試験（超音波探傷試験）の作業時間や溶接欠陥が生じた場合の補修溶接の時間を確保しておく必要があり、作業工程をしっかり管理しておく必要がある。また、現場溶接の設備も別途必要となる。溶接による熱量も多くなるため溶接によるひずみの管理も必要となる。

6. まとめ

多視点からの補修補強設計法に関する研究部会の鋼製ブラケット設計法検討 WG (WG2) では、鋼製ブラケットの設計に関して、日ごろ技術者が疑問を感じている事案に着目し、2016年5月から約2年半の調査研究活動を実施してきた。取り組んだ課題は、(1)既設コンクリート構造物に鋼製ブラケットを設置する際に、ブラケットベースプレートに明けられる拡大孔が、鋼製ブラケットの耐荷力に与える影響、および、(2)斜角を有する橋梁に設置される鋼製ブラケットの設計方法である。

本 WG の調査研究活動から得られた結論を以下にまとめる。

6-1. 拡大孔が鋼製ブラケットの耐荷性能に与える影響

- (1) 鋼製ブラケットをコンクリート構造物（橋台、橋脚など）に取り付ける際のアンカーボルトのアンカー孔径について、標準図および発注図面等の調査を実施した結果、ネジ径+3mm～5mm としているものが多いが、中にはネジ径+10mm としているものも存在することが明らかとなった。
- (2) 引張力が作用する鋼製ブラケットのアンカーボルト接合部について、拡大孔の影響を検討した結果、D25 (M22) 以下のアンカーボルトで、拡大孔がネジ径+10mm 以上の場合は、座金およびナットの一部がアンカー孔に落ちてしまい、アンカーボルトに大きな曲げが生じることが明らかとなったため、拡大孔はネジ径+10mm より小さくする必要がある。ただし、D25 (M24) 以上のアンカーボルトでは、拡大孔がネジ径+10mm の場合であっても、問題はない。通常はさらに大きなサイズのアンカーボルトを使用するため、拡大孔の影響で、座金およびナットの一部がアンカー孔に落ちてしまう現象は生じない。
- (3) せん断力が作用する鋼製ブラケットのアンカーボルト接合部について、拡大孔の影響を検討した結果、拡大孔がネジ径+10mm の場合で、3本のボルトのうち、1本が片利きした状態でせん断力が働くと、最初は、片利きしたボルトのみで荷重を受け持つが、そのボルトが塑性変形し、残りのボルトにもせん断力が均等に働いていくことが明らかとなった。この現象は、3本が荷重方向に配置されていても、荷重直角方向に配置されていても同様である。しかし、拡大孔が大きくなると、残りのボルトに荷重が分配される前に、片利きしたボルトが破断する可能性があるため、注意が必要である。
- (4) 拡大孔を設けた場合、アンカーボルトとアンカー孔径の間の隙間（クリアランス）を樹脂等で埋めることで、上記の懸念はある程度解消されることが予想されるが、今後その効果を定量的に評価することが望まれる。

6-2. 斜角を有する橋梁に設置する鋼製ブラケットの設計方法

- (1) 斜角を有する橋梁に鋼製ブラケットを設置する場合の設計では、力の作用方向に伴う分力を考慮して設計されるが、技術者に広く知られた設計事例が存在しない。したがって、1)落橋防止構造と 2)水平力分担構造・横変位拘束構造に対して、設計事例を作成した。
- (2) アンカーボルト群に作用する軸方向、軸直角方向、およびねじりモーメントに対して設計する現在の設計法で計算された各アンカーボルトの作用力について、斜角が大きい場合でも正確に評価できるかについて、今後実験的に検証されることが望まれる。