

## 1-5 橋脚アンカー部

### 5.1 基本方針

- (1)アンカー部の耐震設計においては橋脚躯体への影響を考慮し、橋脚全体の耐震性が確保されるようにしなければならない。
- (2)レベル1の地震動に対してアンカー部に損傷が生じないようにするための照査に加えて、レベル2 a, bの地震動に対してはアンカー部に損傷が生じても橋脚全体にせいせいの破壊が生じないように終局挙動を考慮した照査を行う。このとき、構造物の重要性、復旧の難易度を考慮して損傷の許容限界を設定する。

#### 【解説】

(1)アンカー部は橋脚躯体をフーチングに定着するための重要な構造であり、橋脚の耐震性に大きな影響を与える。従って、アンカー部の耐震設計では橋脚への影響を考慮し、かつ、橋脚全体の安全性が確保されるように規定した。なおここで言うアンカー部とは、ベースプレート、アンカービーム、アンカーボルトおよびフーチングコンクリートから成り立っている。

(2) 現行のアンカー部の設計は損傷を受けないことを前提に、橋脚躯体がアンカー部で剛結されたものとしてモデル化されている。しかしながら、都市内などで基礎の寸法が制限を受けるとき、大地震に対してアンカー部が損傷を受けないように設計するのは難しい場合も多い。このような場合、アンカー部が橋脚の地震時挙動に与える影響は無視できないと考えられる。すなわち、アンカー部の変形は橋脚の変形を増加させる一方、橋脚への地震入力を減少させる場合もある。

表一解5.1 アンカー部の耐震設計の最低限の目標

	中地震 (L1地震動)	海洋型の大地震 (L2a地震動)	内陸型の直下大地震 (L2b地震動)
最重要路線にある 構造物 (R1構造物)	D	D	D
重要路線にある 構造物 (R2構造物)	D	D	C
その他の構造物 (R3構造物)	D	C	B

(注)B～Dは目標とする許容損傷度を表し、内容については表3.7参照

したがって、レベル 2 a, bの地震動に対しアンカー部の損傷を許容する場合、より合理的な耐震設計を行い安全性を確保するためには、アンカー部と橋脚躯体との相互作用を考慮して橋脚の耐震設計を行うことが望ましい。このとき、重要な構造物においては、早期に復旧が可能な程度の損傷にとどめる必要がある。さらに、極めて重要な構造物の場合においては、機能が損なわれないようにする必要がある。以上のようなアンカー部の耐震設計に関する一つの目標を表一解5.1に示す。この目標は、アンカー部が橋脚を保持するための重要な構造であることと、アンカー部が損傷を受けた場合はその補修が大規模となることを考慮して、橋脚躯体に比べ安全性がより確保されるように配慮して定めている。

## 5.2 アンカー部の力学モデル

アンカー部の設計においては構造や施工の実情を考慮して妥当な力学モデルを用いる必要がある。

### 【解説】

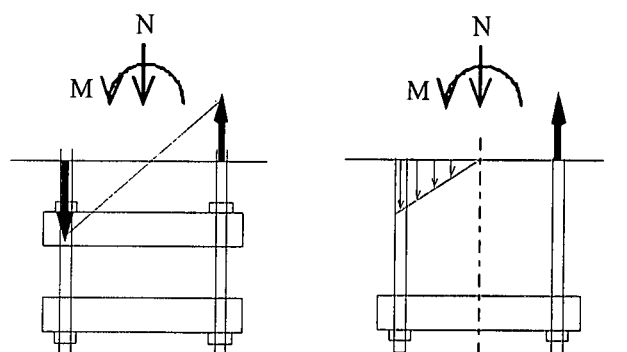
#### (1)アンカー部の構造と現行の設計モデル

鋼製橋脚のアンカー部の構造として現在多く用いられているものは図一解 5.1 に示す杭方式と鉄筋コンクリート方式に分けることができる。

杭方式の場合、コンクリートフーチング内に上下2つのアンカービームが埋め込まれている。脚ベース部の引張り力は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。一方、圧縮力はフーチングコンクリートがベースプレートからの支圧力に抵抗しないものと仮定しているため、すべてアンカーボルトにより上アンカービームに伝達される構造として設計されている。しかしながら、ベースプレート下にモルタルが充填されている場合、実際にはベースプレートからの支圧によっても圧縮力がフーチングに伝達される。

鉄筋コンクリート方式では、引張り力は杭方式と同様、アンカーボルトにより下アンカービームに伝達される構造である。一方、圧縮力については、設計では上アンカービームがないとして、鋼製橋脚のベースプレートからすべて支圧によりフーチングコンクリートに伝達されるものと考えている。この構造の場合にも、仮設用の簡易な上アンカービームがあったり、上下ベースプレート間にモルタルが充填されることからアンカーボルトのねじ部が橋脚ベース部に固定されている。以上から、ベースプレートからの圧縮力の一部はアンカーボルトにも直接伝達されるものと考えられる。

現行のアンカーボルト軸力、ベース下モルタルの支圧応力の算定法と



a. 杭方式

b. 鉄筋コンクリート方式

図一解 5.2 定着部の応力分布

しては、いずれの場合も、梁の仮定（平面保持、直角保持の仮定）と弾性解析を基本としている。杭方式ではベース下コンクリートを無視して、アンカーボルトの引張り圧縮剛性を考慮している。また、鉄筋コンクリート方式ではベース下コンクリートの圧縮剛性とアンカーボルトの引張り剛性を考慮している。この結果得られる応力分布は図一解 3.3.2 のようになる。さらに、アンカー部に作用するせん断力は各アンカーボルトに均等に分担されるものと考えられている。これらのモデルはレベル 1 の地震動に対する照査、あるいはレベル 2 でもアンカー部に損傷が生じない場合には用いることができる。ただ、このような現行の設計モデルは先に述べたように実構造とかなり異なる場合もあり、弾性範囲内の挙動においても無視できない差が生ずることが実験においても確認されている<sup>1),2)</sup>。また、明らかのように、アンカー部の終局時の挙動については扱うことができない。

(2)アンカー部の終局挙動を考慮したモデル<sup>1),2)</sup>

ここでは、設計上の仮定の他に(1)で述べた実状も考慮して弾性状態から終局状態まで一貫して扱える定着部のモデルについて述べる。過去の実験によると、フーチング縁端までのアンカービームの距離が少ない場合を除いて、アンカービーム耐力は十分な場合が多く、また、鋼脚柱の上下ベースプレートの耐力、剛性も十分と考えられる。したがって、アンカービーム、上下ベースプレートは剛体と仮定し、主としてアンカーボルト、ならびにフーチングコンクリートの材料非線形挙動を定着部のモデル化において考慮する。

表一解 5.2 モデル化における仮定

	杭モデル	複鉄筋モデル	単鉄筋モデル
ベースプレート	<ul style="list-style-type: none"> <li>剛体</li> <li>ベースプレート中心は水平には変位しない</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>剛体</li> <li>ベースプレート中心は水平には変位しない</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>剛体</li> <li>ベースプレート中心は水平には変位しない</li> </ul>
アンカービーム	<ul style="list-style-type: none"> <li>剛体</li> <li>変位しない</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>剛体</li> <li>変位しない</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>剛体</li> <li>変位しない</li> </ul>
アンカーボルト	<ul style="list-style-type: none"> <li>軸力のみ伝達する一軸要素</li> <li>圧縮力、引張力に抵抗</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>軸力のみ伝達する一軸要素</li> <li>圧縮力、引張力に抵抗</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>軸力のみ伝達する一軸要素</li> <li>引張力のみ抵抗</li> </ul>
下ベースプレートからコンクリートフーチングへの支圧	<ul style="list-style-type: none"> <li>考慮しない</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>考慮する</li> <li>フーチングは圧縮力のみ抵抗する一軸要素</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>考慮する</li> <li>フーチングは圧縮力のみ抵抗する一軸要素</li> </ul>

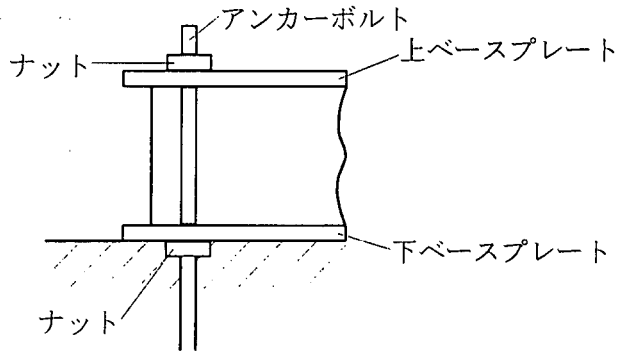


図-解5.3 上下のナットによる ベース部のアンカーボルトへの固定

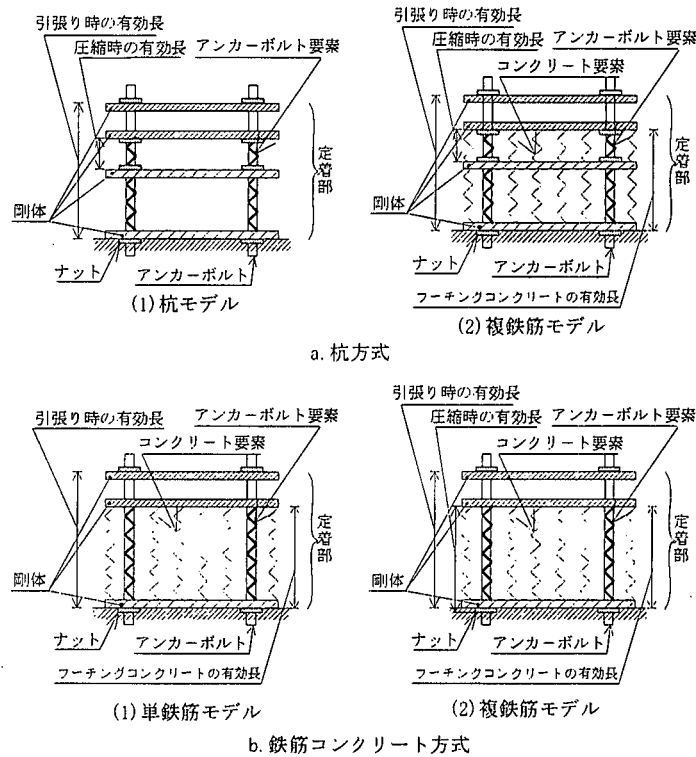


図-解 5.4 定着部の力学モデル

(1)で述べた実構造の挙動を考慮して設定した定着部モデルは杭モデル、単鉄筋モデル、複鉄筋モデルの3種類である。これらの定着部モデルの仮定を表一解5.2に示す。このうち杭モデル、単鉄筋モデルはそれぞれ杭方式と単鉄筋方式の現行の設計モデルと基本的には一致している。複鉄筋モデルはアンカーボルトの圧縮、引張り抵抗に加えて、定着部の下ベースプレートからのコンクリートフーチングへの支圧もモデル化において考慮している。3種類の定着部モデルの杭方式ならびに鉄筋コンクリート方式の定着部への適用方法を以下に述べる。

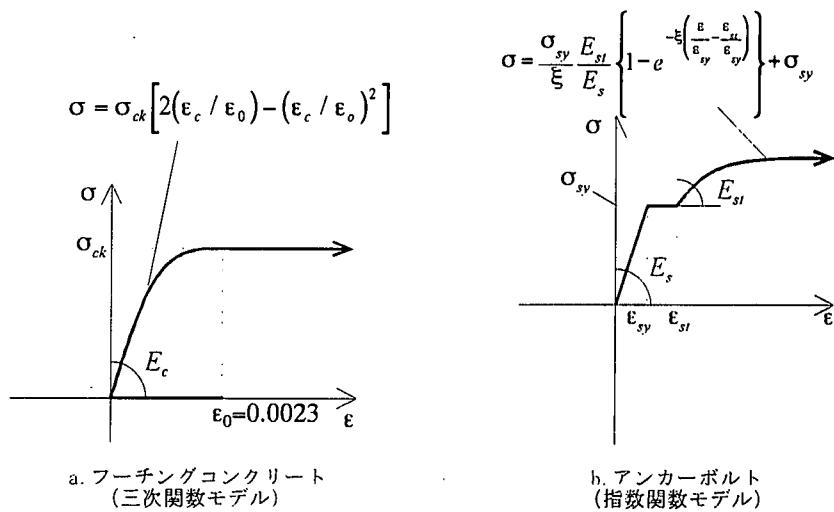
杭方式へ適用するための定着部モデルは杭モデルと複鉄筋モデルである。このとき下ベースプレートとフーチング間にモルタルが十分充填されているときには複鉄筋モデルを、またモルタルが充填されていない場合は杭モデルを適用する。

一方、鉄筋コンクリート方式へ適用するためのモデルは単鉄筋モデルと複鉄筋モデルである。この場合、図-解 5.3 のようにアンカーボルトがベース部に上

下からナットで固定されている場合や、上下ベースプレート間にモルタルが十分に充填されアンカーボルトのねじ部が付着によりベース部に固定されている場合は複鉄筋モデルが適用できる。ただし、付着による圧縮力の伝達は必ずしも確実性のあるものではないため複鉄筋モデルを適用する場合にはこの点に注意する必要がある。ベース部が上部からのみナットでアンカーボルトへ締結されかつ上下ベースプレート間モルタル充填が確実でない場合は単鉄筋モデルを適用する。

以上のような、杭方式と鉄筋コンクリート方式のアンカー部へ表一解 5.2 に示す定着部モデルを適用した結果を図一解 5.4 に図示する。図一解 5.4 に示すアンカーボルトの有効長はフーチングコンクリートとアンカーボルト間に付着がない場合の有効長で、アンカーボルトの固定端間距離に対応している。この場合、杭方式ではアンカーボルトの引張に対しては下アンカービームで、圧縮に対しては上アンカービームで固定されるため、アンカーボルトの有効長は圧縮と引張に応じて異なっている。また、鉄筋コンクリート方式に用いる複鉄筋モデルにおいても、アンカーボルト有効長は圧縮、引張りにより異なっている。すなわち、圧縮力は上下ベースプレート間の付着でアンカーボルトに伝達され、フーチングへの伝達は、アンカーボルト平行部の付着を無視すると、アンカーボルト先端部のナット取り付け部から支圧でなされる。これより圧縮時の有効長は下ベースプレートと先端部ナット取り付け部の間、引張時の有効長は上ベースプレートとアンカービーム間のそれぞれの長さが対応する。

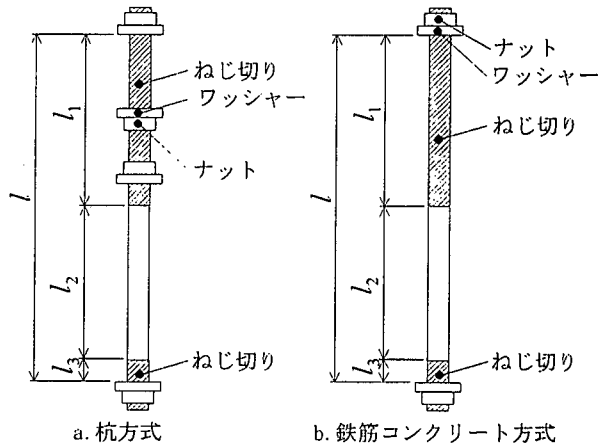
アンカーボルトとフーチングコンクリートの一軸応力-ひずみ関係はそれぞれ図一解 5.5 に示す指数関数モデルと二次関数モデルを用いる。アンカーボルトでは、保有水平耐力の照査では初期降伏後の挙動も正確に把握する必要があるため、材料試験の結果をより正確に表現できるように配慮している。アンカーボルトの構成則の材料定数は文献 2)において各材質ごとに表一解 5.3 のように与えられている。なお、アンカーボルトは図一解 5.6 のように、定着用ナットのためねじ切りがしてあり、断面積は一様ではない。したがって、アンカーボルトのモデル化において断面積の変化を考慮する。断面積の変化を近似的に考慮する方法として文献 2)では等価断面積による方法が提案されている。フーチングコンクリートの応力-ひずみ関係として、文献 2)では二次関数モデルより、曲線の近似精度の良い三次関数モデルを用いているが、ここでは、I-4 におけるコンクリートのモデルとの整合性を考慮して二次関数モデルを用いる。



図一解 5.5 材料の応力-ひずみ関係

表一解 5.3 アンカーボルトの材料定数

材質	$\xi$	$E/E_{st}$	$\epsilon_{st}/\epsilon_{sy}$
SS400	0.06	40	10
S35C	0.06	30	9.5
S45C	0.05	17	4



図一解 5.6 アンカーボルト

### 5.3 アンカー部の構造細目

- (1) 本指針で定める以外のアンカー部の構造細目については、杭方式に関しては首都高速道路公団の鋼構造物設計基準、下部構造設計基準、鉄筋コンクリート方式に関しては阪神高速道路公団の構造物設計基準（橋梁編）の規定に従う。
- (2) 杭方式、鉄筋コンクリート方式いずれにおいても下ベースプレートとフーチング間に所定の強度を持つ無収縮モルタルを入念に充填する。
- (3) アンカーボルトが貫通するリブで囲まれた上下ベースプレート間には所定の強度を持つ無収縮モルタルを入念に充填する。

#### 【解説】

(2)下ベースプレートから圧縮力が支圧により確実にフーチングに伝達されるように規定した。杭方式では、現行設計において下ベースプレートからの支圧による圧縮力の伝達を考慮していないため、下ベースプレートとフーチング間にモルタルを充填する規定はなく、モルタルの充填は任意である。しかしながら、モルタルの充填は杭方式によるアンカー部の強度剛性の向上に大きく寄与する<sup>1),2)</sup>ので、ここでは本規定を導入した。この場合、アンカー部の力学モデルとして複鉄筋モデルを用いることができる。

(3)上下ベースプレート間には慣用的に防錆のためにモルタルが充填される。このモルタルは力学的にも、ベース部の剛性保持ならびにアンカーボルトのベース部への固定に重要である<sup>2)</sup>。したがって、モルタルの充填が確実に施工されるように規定した。

### 5.4 レベル1の地震動に対する照査

レベル1の地震動に対しては震度法に基づきアンカー部に損傷が生じないように設計する。

#### 【解説】

レベル1の地震動を対象とした震度法によるアンカー部の設計に用いる荷重、設計条件及び設計震度は道路橋示方書V耐震設計編による。また、許容応力度、終局状態に対する安全性の照査について、杭方式に関しては首都高速道路公団の鋼構造物設計基準<sup>3)</sup>、下部構造設計基準<sup>4)</sup>、鉄筋コンクリート方式に関しては阪神高速道路公団の構造物設計基準（橋梁編）<sup>5)</sup>の規定に従う。設計に用いるアンカー部の力学モデルとしては5.2【解説】(1)の現行の設計モデルに加えて実状を考慮した(2)に述べたモデルを用いることができる。

### 5.5 レベル2の地震動に対する照査

(1)アンカー部に損傷を許容しない場合にはレベル1の地震動に対する照査法と同様、アンカー部で橋脚が剛結されたものと考え設計することができる。

(2)アンカー部に損傷を許容する場合にはに損傷が生じても橋脚全体にせいせいな破壊が生じないように照査を行う。このとき、構造物の重要性、復旧の難易度を考慮して設定された限界状態に到達しないことを検討する必要がある。

(3)アンカー部の挙動が橋脚躯体の挙動に及ぼす影響が無視できない場合には、橋脚の終局挙動の評価においてアンカー部と橋脚躯体との相互作用を考慮する必要がある。このとき、弾塑性有限変位理論にもとづく動的解析によるのが望ま

しいが、つぎの 5.6に示す終局挙動を考慮した地震時保有水平耐力の照査法などの簡便な方法も用いることもできる。

#### 【解説】

(1) 最重要路線や、重要路線の構造物でアンカー部に損傷を許容しない場合には、アンカー部の固定度は十分と考えられるので、橋脚はアンカー部で剛結されたものとしてアンカー部の設計荷重を算定する。設計地震荷重としては橋脚の水平耐力を用い5.7(2)における限界状態に対して照査する。これはアンカー部を橋脚の耐力以上に設計することを意味している。アンカー部の力学モデルとしては5.2(2)で述べたものを用いる。

(2)5.1 耐震設計の基本方針に基づき規定した。重要な路線にある構造物は、塑性変形が残留しても、地震後早期に復旧可能であることを原則としているため、橋脚の最大地震応答ならびに残留変形が許容されるそれぞれの限界値を超えないことを、アンカー部の変形にも配慮して照査する。これ以外の構造物は損傷をしても構造全体系が崩壊しないことを原則とする。なお、アンカー部の物理量は5.7(2)に示す限界値を越えないものとする。

(3)アンカー部が損傷すると、鋼脚基部の固定度が減少し、基部の変形が橋脚の挙動に与える影響が無視できなくなることが考えられるので、鋼脚柱躯体とアンカー部の相互作用を考慮したの弾塑性有限変位解析により終局挙動を評価することを規定した。

### 5.6 アンカー部の挙動を考慮した橋脚の地震時保有水平耐力の照査<sup>6)</sup>

(1)保有水平耐力および塑性率算定のための鋼製橋脚のモデルとしてはI-4に示した橋脚躯体のモデルのアンカー部に5.2で述べたモデルを考慮したものを用いる。このときの荷重条件もI-4に述べたとおりである。

(2)アンカー部の挙動を考慮した鋼製橋脚の降伏水平力  $H_y$  および降伏水平変位  $\delta_y$ 、ならびに終局水平耐力  $H_u$  および終局変位  $\delta_u$  は、次の条件により上部構の慣性力の作用位置において算出するものとする。

(a) 降伏水平力  $H_y$  および降伏水平変位  $\delta_y$  は、鋼製橋脚躯体あるいはアンカーボルトが降伏するときの水平力および水平変位とする。

(b)終局水平耐力  $H_u$  および終局変位  $\delta_u$  は、鋼製橋脚躯体の一部がI-4に示す終局状態あるいはアンカー部の一部が5.7(2)に示す限界状態に到達したときの水平力および水平変位とする。ただし、このような終局状態に到達する以前



に、鋼製橋脚天ばの水平変位が限界値に到達した場合にはそのときの水平力、水平変位を終局水平耐力、終局変位とする。

【解説】

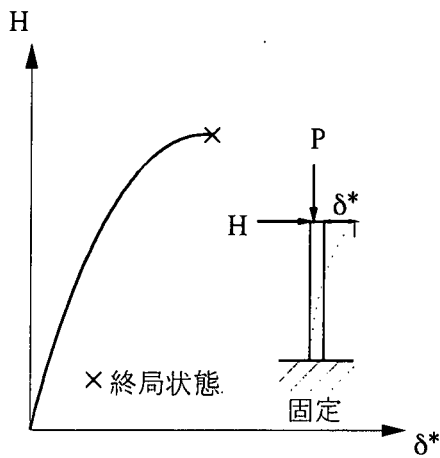
アンカー部の挙動を考慮して鋼製橋脚の水平力-水平変位関係を解析し、保有水平耐力および塑性率を算定する。このとき、既に示した橋脚躯体のモデルにアンカー部のモデルを考慮したものをを用い、複合非線形解析を実施する。厳密には、アンカー部を考慮した鋼製橋脚全体系を解析する必要があるが、近似的に、アンカー部を完全固定としたI-4で求めた鋼製橋脚の水平力-水平変位関係( $H-\delta^*$ )とアンカー部のモーメント-相対回転角( $M-\theta$ )の関係を用いて解析することもできる。以下に、このような近似手法を示す。

アンカー部を完全固定とした鋼製橋脚の水平力-水平変位関係( $H-\delta^*$ )とアンカー部のモーメント-相対回転角( $M-\theta$ )の関係が、それぞれ図一解5.7, 5.8のように既知であると考え、この関係をもとに、アンカー部の変形を考慮した鋼製橋脚の水平力-水平変位関係( $H-\delta$ )を算定する。

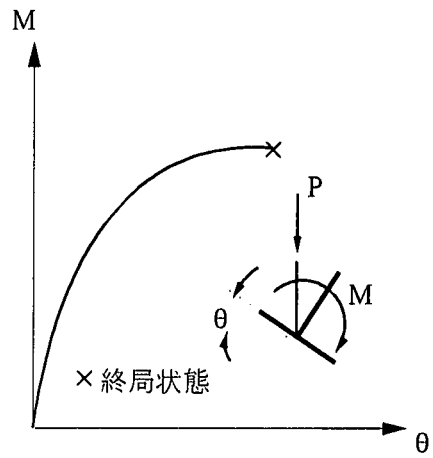
図一解5.9に示す変形後の釣り合いを考えることにより、アンカー部のモーメント $M$ は次式のように表すことができる。

$$M = Hl + P(l\theta + \delta^*) \quad \text{解 (5.1)}$$

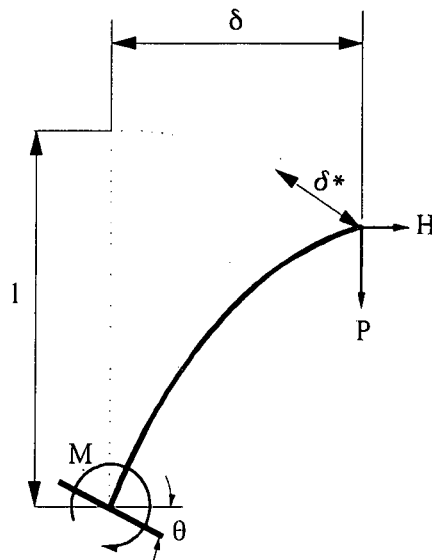
式-解 (3.3.1)をもとに $\delta = l\theta + \delta^*$ であることを考慮して $H-\delta$ の関係を繰り返し計算により求める。すなわち、まず、図一解5.7から、水平力 $H$ に対応した $\delta^*$ を得ることができる。つぎに、 $M$ の第一近似を $M \cong Hl + P\delta^*$ として計算し、この値に対応する $\theta$ を図一解5.8より求める。さらに、この $\theta$ を式一解 (5.1)に代入して $M$ を第二次近似とする。これに対応する $\theta$ を図一解5.8より得、前回の $\theta$ と比較する。この手順を $\theta$ が収束するまで繰り返し、収束した $\theta$ の値を $\delta = l\theta + \delta^*$ の関係に用いて、水平力 $H$ に対応した $\delta$ を求める。以上の手法により、 $H_y$ から荷重を漸増させ、鋼製橋脚躯体、アンカー部の一部あるいは橋脚全体がの限界状態に到達したときの $H_u$ および $\delta_u$ を算定する。



図一解5.7 アンカー部を固定した鋼製橋脚の水平力-水平変位関係



図一解5.8 アンカー部のモーメント相対回転角の関係



図一解5.9 アンカー部の変形を考慮した鋼製橋脚のつり合いの形状

### 5.7 レベル2の地震動に対するアンカー部の限界状態

アンカー部の限界状態は以下に示すいずれかの場合が対応する。

- (1) アンカー部の損傷を許容する場合には、アンカー部の変形を考慮した橋脚の最大応答変位や残留変位が構造物の重要度に応じて規定された制限値に到達したとき。
- (2) 下記の物理量のいずれかが終局強度限界や補修の難易度を考慮して定められた限界値に到達したときと見なす。
  - (a) アンカーボルトの軸ひずみ
  - (b) アンカーボルトの合成応力
  - (c) ベースプレート下の支圧によるコンクリートの圧縮応力
  - (d) フーチングのせん断応力

## 【解説】

(1)アンカー部は橋脚の最大応答変位や残留変位が支持する構造物の重要度に応じて規定された制限値以内になるように設計する。このとき、橋脚の最大応答変位や残留変位はアンカー部と橋脚との相互作用を考慮して算定する必要がある。アンカー部が損傷を受けない場合にはこの項目に対して照査する必要はない。

(2)各物理量の限界値は以下のように設定する。

(a) アンカーボルトの軸ひずみの限界値はアンカー部に許容される損傷度に応じて決定される。アンカーボルトの補修が容易にできる軸ひずみの目安として1%程度が限界値といえよう。長期間の補修を許容すると3%程度が限界値と考えられる。なお、損傷を許容しない場合にはこの項目に対して照査する必要はない。

(b) アンカーボルトの合成応力として軸方向応力 $\sigma_s$ とせん断応力 $\tau_s$ との合応力について照査する。軸方向応力は5.2【解説】(2)で述べた力学モデルを用いて算定する。せん断応力については、アンカー部のせん断力が各アンカーボルトで均等に分担されるものとして算定する。合応力の照査式は以下ようになる。

$$\left(\sigma_s^2 + 3\tau_s^2\right)^{1/2} \leq \sigma_{sa} \quad \text{解(5.2)}$$

ここに、

$\sigma_s$  : アンカーボルトの軸方向応力

$\tau_s$  : アンカーボルトのせん断応力

$\sigma_{sa}$  : 合応力の限界値でアンカーボルトに損傷を許容するか否かによって、次のように与えられる。

$$\begin{aligned} (\text{損傷を許容しない場合}) & \quad \sigma_{sa} = \sigma_{sy} \text{ (降伏応力)} \\ (\text{損傷を許容する場合}) & \quad \sigma_{sa} = kf(\epsilon_0) \end{aligned}$$

ここに、

$f(\epsilon)$ は図-解5.5、表-解5.3で与えられる関数で、

$$f(\epsilon) = \frac{\sigma_{sy}}{\xi} \frac{E_{st}}{E_s} \left\{ 1 - e^{-\xi \left( \frac{\epsilon - \epsilon_{st}}{\epsilon_{sy} - \epsilon_{st}} \right)} \right\} + \sigma_{sy}$$

$k=1.1$  (せん断変形を考慮した割り増し係数)

$\epsilon_0 = (a)$ で規定される軸ひずみの限界値

なお、 $k$ の値についてはさらに検討をする必要がある。

(c) ベース下コンクリートの圧縮応力の限界値は以下のように与えられる。

$$(\text{損傷を許容しない場合}) \quad \sigma_{ca} = \alpha \sigma_{ck}$$

$\alpha$  = 低減係数で例えば0.8~0.9程度の値が考えられる。

$$(\text{損傷を許容する場合}) \quad \sigma_{ca} = \sigma_{ck}$$

損傷を許容する場合には、図-解5.5より圧縮ひずみが0.0035以内になることも照査する。

- (d) フーチングコンクリートのせん断応力の限界値としては検討が不十分であるので復旧指針に準じて、道路示方書の許容せん断応力度を用いる。
- (e) アンカービームの応力の限界値については、降伏応力  $\sigma_{sy}$  を用いる。

#### 参考文献

- 1) 後藤芳顯、日比幸一、上條崇、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り返し載荷実験、構造工学論文集、Vol.41A, pp.1137-1143,1995.
- 2) 後藤芳顯、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) 首都高速道路公団：鋼構造物設計基準、平成4年
- 4) 首都高速道路公団：下部構造設計基準、平成4年
- 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）、平成2年
- 6) 後藤芳顯：V. 落橋防止装置とアンカー部、平成7年度第2回技術講座「阪神大震災から得た教訓と今後の耐震設計—橋梁構造物—」、土木学会中部支部、pp.89-96, 1996.
- 7) 日本道路協会：「兵庫県南部地災により被災した道路橋の復旧に係る仕様」の準用に関する参考資料（案）、平成7年6月