

第4編 橋 脚

橋 脚

大阪大学大学院

小野 潔

【要 旨】

平成7年に発生した兵庫県南部地震において、道路橋の鋼製橋脚は初めて大きな被害を受け、2基の矩形断面鋼製橋脚については倒壊に至った。兵庫県南部地震の被害を受け、平成8年に改訂された道路橋示方書・同解説Ⅴ耐震設計編においては、新たに鋼製橋脚の耐震設計に関する規定が設けられた。そして、平成14年道路橋示方書・同解説Ⅴ耐震設計編では鋼製橋脚の具体的な耐震設計手法について幾つか改訂が行われている。

そこで、本章では、平成14年道示Ⅴで規定される鋼製橋脚の耐震設計に関する基本的な考え方と耐震性能照査手法の幾つかについて、兵庫県南部地震における鋼製橋脚の損傷事例や建設省土木研究所（実験当時）で実施された実験等を交えながら紹介する。

【目 次】

1. はじめに
2. 鋼製橋脚の被災例
3. 鋼製橋脚を対象とした正負交番載荷実験
 3. 1 正負交番載荷実験の概要
 3. 2 コンクリートを充填した鋼製橋脚の耐力と変形性能
4. 鋼製橋脚の耐震設計上の基本的な考え方
 4. 1 ぜい性的な破壊モードの回避
 4. 2 じん性の向上
 4. 3 非線形動的解析による耐震性能照査
 4. 4 残留変位の制限
 4. 5 アンカー部の設計
5. 非線形動的解析による鋼製橋脚の耐震性能照査
 5. 1 許容変位
 5. 2 M- ϕ 関係の設定例
 5. 3 M- ϕ 関係による非線形履歴モデル
 5. 4 M- ϕ 関係による計算結果と実験結果等との比較
6. 残留変位の推定手法

[参考文献]

1. はじめに

平成7年兵庫県南部地震で我が国の道路橋の鋼製橋脚もはじめて大きな被害を受け、2基の矩形断面鋼製橋脚については倒壊に至っている〔兵庫県南部地震震災対策委員会，平成7年〕。これら鋼製橋脚の被害を受け、平成8年に改訂された道路橋示方書・同解説V耐震設計編（以下、「H8道示V」という。）では、鋼製橋脚について初めて塑性域での耐力および変形性能を考慮した設計法が導入された〔日本道路協会，平成8年〕。

兵庫県南部地震以降、鋼製橋脚の耐震性能評価に関する研究が活発に行われ有用な知見もいくつかが得られたが、平成8年道示V改訂時点で、鋼製橋脚、特にコンクリートを充填しない鋼製橋脚の塑性域での耐力および変形性能については未解明な部分が多く残されていた。よって、平成8年道示V改訂以降も引き続き鋼製橋脚の耐震性能評価に関する研究が精力的に行われ、兵庫県南部地震以降に行われてきた研究成果等ともあわせてより合理的な鋼製橋脚の耐震設計手法の確立に資する知見等が蓄積および整理されてきた〔建設省土木研究所等，平成9年～平成11年；土木学会，2000a；土木学会，2000b〕。そこで、平成14年に改訂された道示V〔日本道路協会，平成14年〕では、より合理的な鋼製橋脚の耐震設計手法確立のため、これら調査研究から得られた知見等が取り入れられている。

本章では、平成14年道示Vに規定される鋼製橋脚の耐震設計に関する基本的な考え方と耐震性能照査手法〔西川ら，1997；小野，2002c〕について、兵庫県南部地震における鋼製橋脚の損傷事例や建設省土木研究所（実験当時）で実施された実験等を交えながら紹介する。

2. 鋼製橋脚の被災例

地震直後に設置された兵庫県南部地震道路橋震災対策委員会の調査報告〔兵庫県南部地震震災対策委員会，平成7年〕によれば、調査対象の鋼製橋脚355基のうち、比較的被災度の高いB（B：鋼材の座屈や部材の変形が部分的に見られるもの）以上と判定された橋脚は51基（全体の約14%）となっている。このうち、崩壊に至った橋脚は2基であり、いずれも矩形断面橋脚である。写真-2.1はそのうちの1基の崩壊後の状況を示したものであり、補剛板の角溶接付近に生じた割れにより、板状に折り曲げられている。本橋脚の場合、設計で想定した以上の地震力の作用をうけ、ウェブおよびフランジの局部座屈の進展に伴い角溶接部が縦方向にさげ、4面の補剛板がはがれたことが、鉛直報告の支持力を失うきっかけになったと推定されている。

一方、円形断面鋼製橋脚については、倒壊に至った事例はないが、被災度の大きい橋脚の中には、写真-2.2および写真-2.3に示すように、局部座屈による変形の進展に伴い橋脚が大きく傾斜した事例や、局部座屈に伴う変形の進展により円周方向に破断した例が報告されている。

その他の被災した橋脚の多くは、橋脚基部や断面変化部において、鋼材の降伏により塗装がはがれたり、局部座屈により面外方向に変形するといった部分的な損傷を受けている（写真-2.4）が、倒壊には至っていない。設計時の想定をはるかに超えた地震力が加わったことを考えると、一定の耐震性能を有していたこと示していると考えられる。

3. 鋼製橋脚を対象とした正負交番載荷実験

鋼製橋脚の大地震時の弾塑性挙動、抵抗メカニズム等を明らかにして鋼製橋脚の耐震性能向上のための

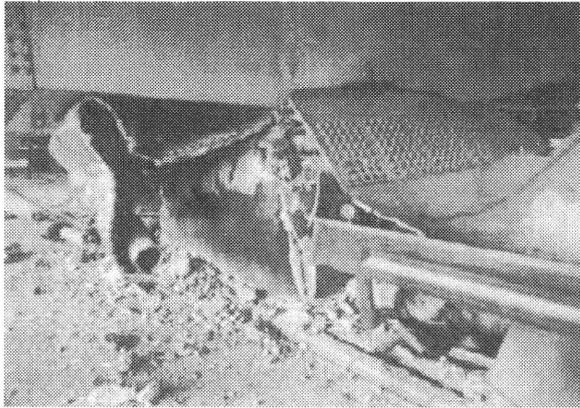


写真-2.1 倒壊した鋼製橋脚の例

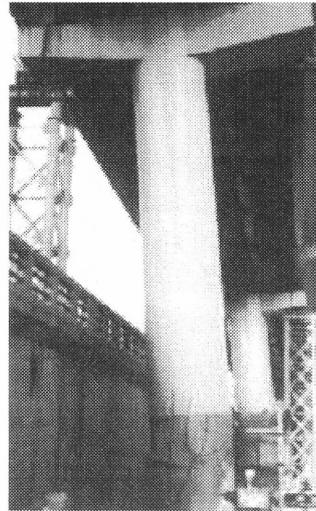


写真-2.2 大きく傾いた鋼製橋脚

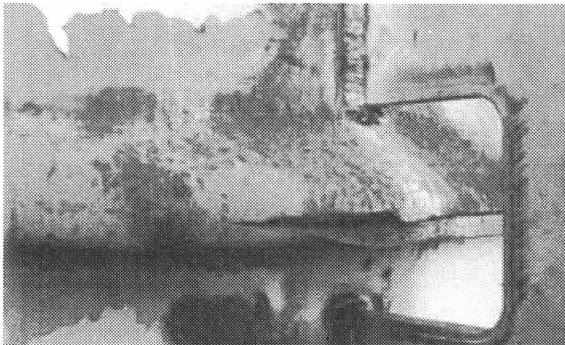


写真-2.3 円周方向の割れ

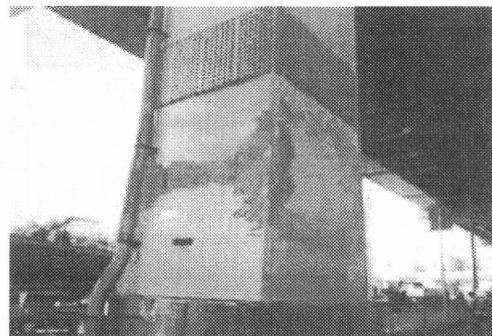


写真-2.4 補剛板の座屈

方法や耐震設計法を確立するため、兵庫県南部地震以降、建設省土木研究所等による共同研究において正負交番載荷実験を中心とした載荷実験が行われた〔建設省土木研究所等、平成9年～平成11年〕。以下にその正負交番載荷実験の概要を示す。

3. 1 正負交番載荷実験の概要

実験供試体は、実構造物における溶接品質の再現性等を考慮して載荷装置の制約条件下でできるだけ大きな断面を与えることとした。載荷は十分に剛な加力フレーム内に実験供試体および油圧ジャッキを設置して行った(図-3.1 参照)。載荷方法は、まず所定の軸力を載荷した後、その軸力を一定に保った状態で、柱部の所定の位置に正負の漸増繰り返し水平荷重を準静的に加えて行った。なお載荷は変位制御にて行った。水平荷重の繰り返し載荷の方法は、式(3.1)から求まる実験供試体の下端が降伏する時の水平荷重載荷位置の変位 δ_{y0} (コンクリートを充填した実験供試体については、コンクリートの影響を無視し鋼断面のみで評価したもの)を片振幅とし、図-3.2に示すように、この δ_{y0} の整数倍の変位を片振幅とした両振りの交番載荷で $\pm 2\delta_{y0}$ 、 $\pm 3\delta_{y0}$ というように振幅を漸増させた。また、各振幅における繰り返し回数は原則として1回とした。

$$\delta_{y0} = \frac{P_{yN} h^3}{3EI} \quad (3.1)$$

$$P_{yN} = \left(\sigma_{yN} - \frac{N}{A} \right) \frac{Z}{h} \quad (3.2)$$

ここで

P_{yN} : 水平降伏力, h : 水平荷重の荷重点高さ, I : 鋼断面の断面2次モーメント

E : 鋼材のヤング係数, σ_{yN} : 鋼材の公称降伏点応力, N : 作用軸力,

Z : 鋼断面の断面係数

3. 2 コンクリートを充填した鋼製橋脚の耐力と変形性能

正負交番荷重実験の実験結果として、コンクリートを充填した矩形断面および円形断面実験供試体の構造諸元とその正負交番荷重実験結果から得られた水平荷重-水平変位の履歴曲線の一例を図-3.3 に示す。この矩形断面および円形断面実験供試体にはいずれも、H14 道示Vの 11.3 に規定するように充填したコンクリート直上の鋼断面が座屈せず実験供試体基部破壊が生じる十分な高さまでコンクリートを充填され

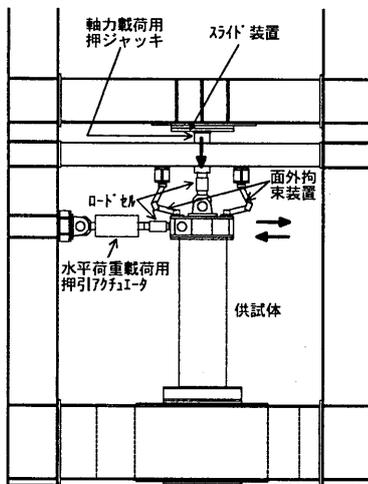


図-3.1 荷重状況

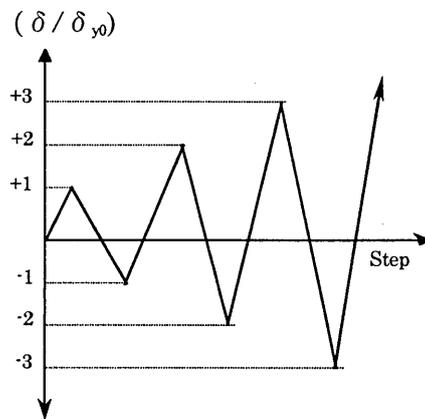
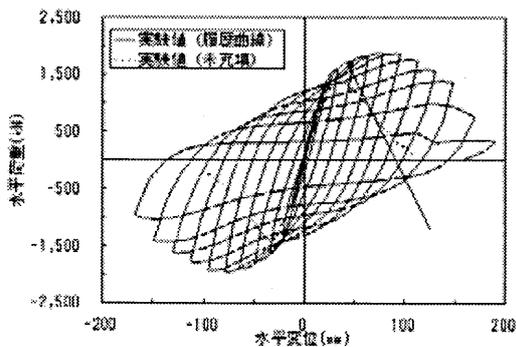
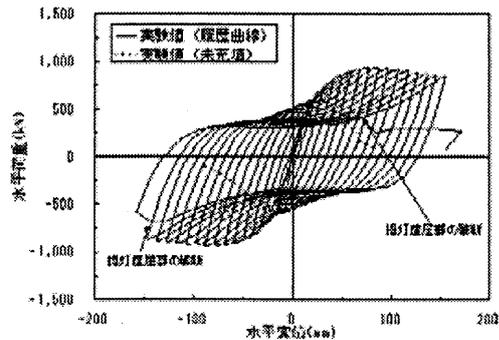


図-3.2 荷重パターン



(a) 矩形断面実験供試体



(b) 円形断面実験供試体

図-3.3 コンクリートを充填した鋼製橋脚の塑性履歴曲線

ている。図中の破線は鋼断面が同一の諸元を持つ実験供試体でコンクリートを充填しない場合の水平荷重—水平変位の履歴曲線の包絡線を示しており、コンクリートを適切な高さまで充填することにより、耐力および変性性能いずれも大幅に向上していることがわかる。

4. 鋼製橋脚の耐震設計上の基本的な考え方

2. で述べたように、大部分の鋼製橋脚は、設計で想定した以上の地震力の作用に対しても局部座屈による変形が部分的に生じたものの倒壊に至らず、落橋という最悪の状況を回避するという最小限の機能は果たしたと推測される。しかしながら、水平地震力により補剛板の角溶接部に割れが生じたり、鋼管の提灯座屈による変形の集中が生じると、上載荷重に対する耐荷力が低下したり、剛性の低下が著しく履歴吸収エネルギーを期待しにくい場合がある。

こうした被災事例や3. で紹介した実験結果等の既往の研究から得られた知見をもとに、道示Vでは鋼製橋脚の耐震設計の基本的な考え方として以下の項目が示されている。

4. 1 ぜい性的な破壊モードの回避

矩形断面および円形断面橋脚について、それぞれ以下のような状態になると、上部構造等の死荷重に対する鉛直方向の耐力を失い、じん性の乏しいぜい性的な破壊モードに至るので、このような破壊モードをぜい性的な破壊モードと呼び、これを避けることができる構造とすることが必要条件とされている。

①矩形断面

矩形断面を鋼製する補剛板の角溶接部が縦方向に裂け、補剛板が分離する結果、上部構造等の死荷重に対する鉛直方向の耐力を失う状態。

②円形断面

最初に発生した一カ所の局部座屈にその後の変形が集中し、それに伴って橋脚が傾斜したり、変形の進展により円周方向の割れが生じた状態。

上記①および②のぜい性的な破壊モードとして図-4.1 が示されている。特に矩形断面では、橋脚基部の車両衝突時の変形防止を目的とした中詰めコンクリートを充填する場合、充填部において補剛板が外側にはらみ出す変形モードが発生しやすい状態になる。このような状態で角割れが生じ鋼中空断面部分に進展す



(a) 矩形断面橋脚における角割れ



(b) 円形断面鋼製橋脚における変形の集中、進展に伴う傾斜、割れ

(a) 矩形断面鋼製橋脚

(b) 円形断面鋼製橋脚

図-4.1 ぜい性的な破壊モード

ると図-4.1 の破壊状態に至る可能性がある。このような破壊モードを防ぐための構造細目の例が道示Vに具体的に示されている。

4. 2 じん性の向上

鋼製橋脚については、平成6年道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編（以下、「H6道示Ⅱ」という。）では座屈または降伏を終局状態とした震度法レベルの設計が行われており、鉄筋コンクリート橋脚のように非線形領域のじん性を考慮した設計は行われていなかった。そこで、兵庫県南部地震の鋼製橋脚の被災例を考慮し、H8道示Vにおいて、鋼製橋脚については、弾性域を超えた後も最大水平耐力付近において急激に耐力が低下することなく、安定した履歴曲線が構造となるように設計することとされている。

4. 3 非線形動的解析による耐震性能照査

H14道示Vでは、鋼製橋脚に塑性化を考慮する橋に対する耐震性能2又は耐震性能3の照査は、基本的に7章に規定する動的照査法により行うこととされている。これは、コンクリートを充填しない鋼製橋脚については、大きな地震力を受けた場合の応答や抵抗メカニズム、じん性の評価等について未解明な部分が多く、非線形応答の簡易推定法であるエネルギー一定則の適用性とその精度についても、まだ十分に検証されていないためである。一方、コンクリートを充填した鋼製橋脚については、H8道示Vでは、鉄筋コンクリート橋脚に準じてエネルギー一定則に基づく地震時保有水平耐力法を適用して耐震性能の照査を行ってよいことを規定されていたが、H14道示Vでは、コンクリートを充填した鋼製橋脚の実特性により近い水平荷重－水平変位関係に基づいて評価することとし、完全弾塑性型のモデルではなく、降伏以降の水平荷重の上昇を考慮したモデルを設定し、このモデルを用いた動的解析によりコンクリートを充填した鋼製橋脚の耐震性能の照査を行うこととされている。また、動的照査法による耐震性能の照査法については、鋼製橋脚の照査の場合には、解析方法としては非線形履歴モデルを用いた時刻歴応答解析法を用いるのがよいとされている。なお、具体的な鋼製橋脚の非線形動的解析による耐震性能照査手法については本稿の5.で紹介する。

4. 4 残留変位の制限

鋼製橋脚に限らず、橋脚に非線形域において過大な変形性能を許容すると、大きな非線形応答変位が生じることになり、それだけ残留変位も大きくなる。地震後の使用性や復旧工事を考えると、変形性能がいくらでも大きくてよいということにはならない。すなわち残留変位をある程度制限し、橋脚の耐力とじん性を適切にバランスさせた設計を行うことが必要である。そこで道示Vでは、兵庫県南部地震における橋脚の被災例等を考慮し、地震後の残留変位を橋脚高（慣性力作用高さ）の1/100に押さえることとされている。なお、具体的な照査手法については本稿の6.で紹介する。

4. 5 アンカー部の耐震設計

アンカー部は橋脚に作用する軸力、曲げモーメント、せん断力を基礎フーチングに伝達させる重要な構造であり、橋脚の耐震性に大きな影響を与える。アンカー部については塑性変形をできるだけ残さないようにアンカー部の耐力が橋脚基部の耐力と同等以上の耐力を有するように設計することが基本とされている。

5. 非線形動的解析による鋼製橋脚の耐震性能照査

5.1 許容変位

H14 道示Vでは、耐震性能2又は耐震性能3の照査に用いる鋼製橋脚の許容変位等の許容値は同等の構造細目を有する供試体を用いた繰返しの影響を考慮した載荷実験データに基づき設定することを原則とするとともに、許容変位は最大水平力となる時の変位を目安に設定するものとされている。そして道示Vに示される許容変位は、下記のようなことを考慮し、土木研究所等で行われた正負交番載荷実験データ〔建設省土木研究所等、平成9年～平成11年；西川ら、1999〕から得られる最大水平力に達した時の水平変位を基に設定されている。

- ・最大水平力付近までの領域であれば、載荷繰返し回数の影響をほとんど受けず安定した塑性履歴特性がえられること〔建設省土木研究所等、平成9年～平成11年；宇佐美ら、1993；葛ら、1994〕
- ・最大水平力以降ではその水平荷重－水平荷重の包絡線は負の勾配を持つが、負の勾配を持つと大きな残留変位が生じる可能性があること〔川島ら、1994〕
- ・コンクリートを充填しない鋼製橋脚については、実験によらなくても適切な解析により鋼製橋脚の塑性履歴特性の比較的精度良く表現が可能であり〔土木学会、2000a；土木学会、2000b、山口ら、2002〕非線形履歴モデル設定等の非線形動的解析に用いる諸数値の設定が可能であること
- ・一般に設計では、はり要素を用いたモデルで移動硬化則等の比較的簡単な硬化則により非線形動的解析を行うことが多いと考えられる。そういったはり要素を用いた非線形動的解析では局部座屈の影響を適切に考慮する困難であるため、局部座屈による変形の大きくなる最大水平力付近以降の鋼製橋脚の弾塑性挙動を精度良く評価するとは難しいと考えられること
- ・許容変位を最大水平荷重以降の変位とするより、最大水平荷重付近の変位とした方が、安全側の評価となること。

5.2 M-φ関係の設定例

非線形時刻歴応答解析を行うには、非線形履歴モデルを設定することが必要である。H14 道示Vではコンクリートを充填しない鋼製橋脚、コンクリートを充填した鋼製橋脚、それぞれについてM-φ関係に基づく非線形履歴モデルの具体的な設定法が例示されている。以下に H14 道示Vに示されるM-φ関係設定手法について紹介する〔深谷ら、2000；小野ら、2001；小野ら、2002a；小野ら2002b〕。

(1) コンクリートを充填しない鋼製橋脚

コンクリートを充填しない鋼製橋脚の塑性化を考慮する鋼断面のM-φ関係の設定例として以下の手法が示されている。

①鋼材の応力度－ひずみ曲線として図-5.1の二次勾配 $E/100$ (E は鋼材のヤング係数) のバイリニア型とする。なお、二次勾配 $E/100$ のバイリニア型にモデル化したのは、鋼材の有するひずみ硬化の影響を考慮するとともに、鋼製橋脚の載荷実験から得られた最大水平力との比較に基づいたものであるとされている。

②鋼製橋脚の断面形状に応じて下記の式より許容ひずみ ε_a を算出する。

[矩形断面]

$$\varepsilon_a / \varepsilon_y = 20 - 25 R_f$$

[円形断面]

$$\varepsilon_a / \varepsilon_y = 20 - 140 R_f$$

ここに、

ϵ_y : 鋼材の降伏ひずみ

R_F, R_R : 塑性化を考慮する鋼断面の道示Ⅱで定義される幅厚比パラメータ

なお、上記の許容ひずみ算出式は正負交番荷重実験データを基に決定されているため、その適用範囲については留意する必要がある。適用範囲を以下に示す。

[矩形断面]

$0.2 \leq R_F \leq 0.5, 0.3 \leq R_R \leq 0.5, 0 \leq N/N_y \leq 0.2, 0.2 \leq \bar{\lambda} \leq 0.4, \gamma_1/\gamma_1^* \geq 1.0$ で、角補強を施していないが縦補剛材およびダイアフラムを有するほぼ正方形断面で、フランジ及びウェブの構造諸元がほぼ等しい矩形断面の鋼製橋脚

[円形断面]

$0.03 \leq R_1 \leq 0.08, 0.2 \leq \bar{\lambda} \leq 0.4, 0 \leq N/N_y \leq 0.2$ で、縦リブを有しない円形断面の鋼製橋脚
 ③①の鋼材の応力度-ひずみ曲線を利用し、平面保持の仮定が成立するものとして軸力の影響を考慮して、圧縮縁および引張縁の鋼材の板厚中心位置におけるひずみがそれぞれ初めて降伏ひずみ ϵ_y に達する時

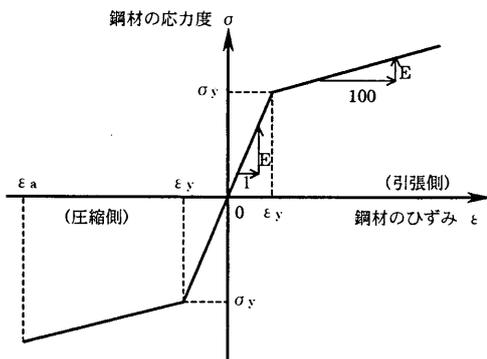


図-5.1 鋼材の応力-ひずみ関係

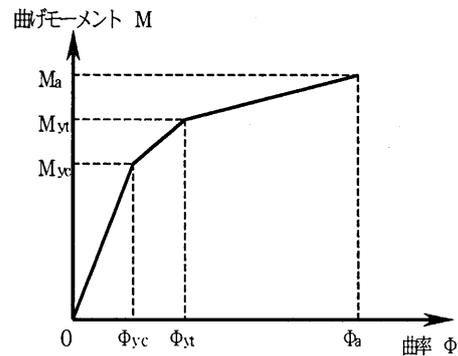


図-5.2 トリリニア型のM-φ関係

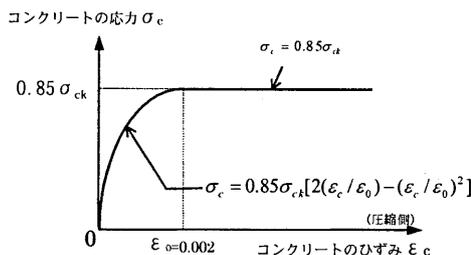


図-5.3 コンクリートの応力-ひずみ関係

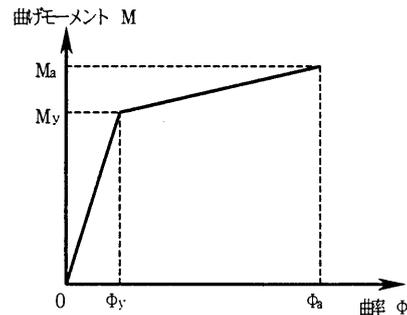


図-5.4 バイリニア型のM-φ関係

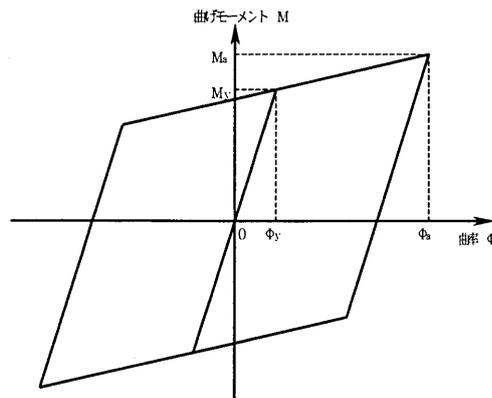


図-5.5 M-φ関係による非線形履歴モデル (コンクリートを充填した鋼製橋脚の例)

の曲率と曲げモーメント (ϕ_{yc} , M_{yc}) 及び (ϕ_{yt} , M_{yt}), 圧縮縁の鋼材の板厚中心位置におけるひずみが初めて②で求めた許容ひずみ ϵ_a に達する時の曲率と曲げモーメント (ϕ_a , M_a) を算出し, その3点を結んで図-5.2 に示すトリリニア型のM- ϕ 関係を設定する.

(2) コンクリートを充填した鋼製橋脚

コンクリートを充填した鋼製橋脚の塑性化を考慮するコンクリートを充填した断面のM- ϕ 関係の設定例として以下の手法が示されている.

①鋼材の応力度-ひずみ曲線として図-1 に示す二次勾配 $E/100$ のバイリニア型, コンクリートの応力度-ひずみ曲線として図-5.3 に示すものとする.

②鋼製橋脚の断面形状に応じて下記の式より許容ひずみ ϵ_a を算出する.

[矩形断面]

$$\epsilon_a / \epsilon_y = 7$$

[円形断面]

$$\epsilon_a / \epsilon_y = 5$$

ここに,

ϵ_y : 鋼材の降伏ひずみ

なお, 上記の許容ひずみ算出式は正負交番載荷実験データを基に決定されているため, その適用範囲については留意する必要がある. 適用範囲を以下に示す.

[矩形断面]

$0.2 \leq R_F \leq 0.7$, $0.3 \leq R_R \leq 0.7$, $0 \leq N/N_y \leq 0.2$, $0.2 \leq \bar{\lambda} \leq 0.4$ で, 角補強を施していないが縦補剛材およびダイアフラムを有するほぼ正方形断面で, フランジ及びウェブの構造諸元がほぼ等しい矩形断面の鋼製橋脚

[円形断面]

$0.03 \leq R_t \leq 0.12$, $0.2 \leq \bar{\lambda} \leq 0.4$, $0 \leq N/N_y \leq 0.2$ で, 縦リブを有しないがダイアフラムを有する円形断面の鋼製橋脚

①の鋼材およびコンクリートの応力度-ひずみ曲線を利用し, 平面保持の仮定が成立するものとして軸力の影響を考慮して, 圧縮縁および引張縁の鋼材の板厚中心位置におけるひずみがそれぞれ初めて降伏ひずみ ϵ_y に達する時の曲率と曲げモーメント (ϕ_{yc} , M_{yc}) 及び (ϕ_{yt} , M_{yt}) のうち小さい方の曲率と曲げモーメント (ϕ_y , M_y), 圧縮縁の鋼材の板厚中心位置におけるひずみが初めて②で求めた許容ひずみ ϵ_a に達する時の曲率と曲げモーメント (ϕ_a , M_a) を算出し, その2点を結んで図-5.4 に示すバイリニア型のM- ϕ 関係を設定する.

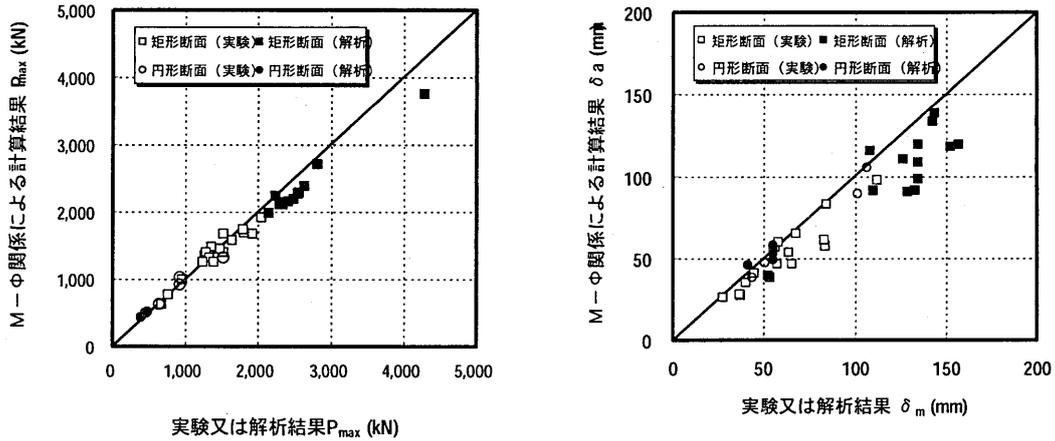
5.3 M- ϕ 関係による非線形履歴モデル

図-5.2 に示すコンクリートを充填しない鋼製橋脚のM- ϕ 関係および図-5.4 に示すコンクリートを充填した鋼製橋脚のM- ϕ を骨格曲線とする非線形履歴モデルの硬化則は, 図-5.5 に示すような移動硬化型を適用することとされている.

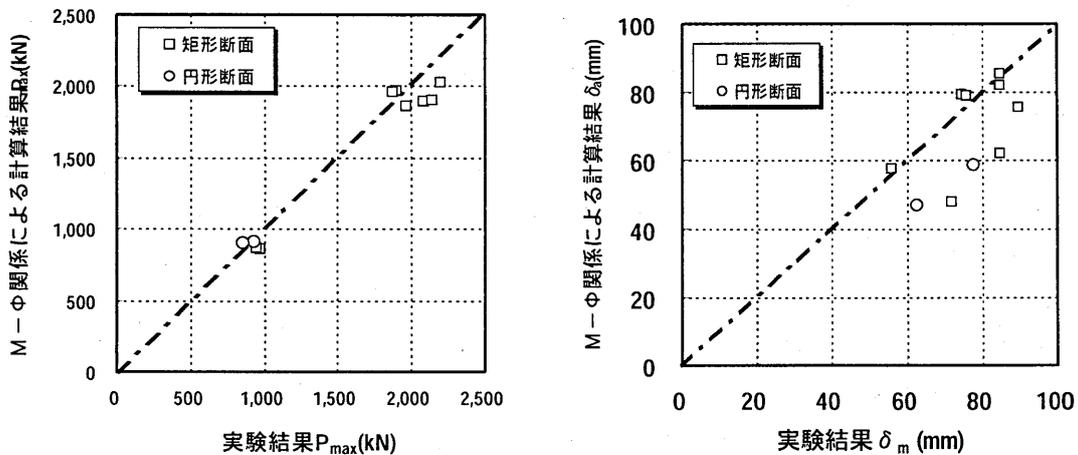
5.4 M- ϕ 関係による計算結果と実験結果等との比較

上述の5.2で紹介したH14道示Vで例示されたM- ϕ 関係から計算される最大水平力 P_{max} 及び許容変位 δ_a と, 正負交番載荷実験から得られる最大水平力 P_{max} 及び最大水平力時変位 δ_m を比較したものを図-5.6 に示す. また, コンクリートを充填しない鋼製橋脚については, 正負交番載荷実験結果を補完する

という観点から、鋼製橋脚の弾塑性有限変位解析結果 [葛ら, 1997; Usami et al., 2000] と比較したもの



(a) コンクリートを充填しない鋼製橋脚



(b) コンクリートを充填した鋼製橋脚

図-5.6 M-φ関係による計算結果と実験結果等との比較

も示す。なお、図-5.6 で対象とした実験供試体又は解析モデルの構造諸元は、許容ひずみ算出式の適用範囲内であるとともに、道示Vの構造細目に関する規定を満足している。

図-5.6 より、コンクリートを充填した鋼製橋脚およびコンクリートを充填しない鋼製橋脚いずれの場合についても、M-φ関係による計算結果の最大水平力及び許容変位は正負交番載荷実験結果又は弾塑性有限変位解析結果の最大水平力及び最大水平力時変位より全体的に小さめの値となっているが、両者は概ね一致していることがわかる。

6. 残留変位の推定手法

H8 道示Vでは、非線形時刻歴応答解析による残留変位の推定は3波程度の入力地震動に対する動的解析結果の平均値を用いて照査してよい旨が解説されていた。その後改訂された H14 道示Vの7章では、動的解析による残留変位の推定を安全側に評価することに配慮し、動的解析から得られる最大応答塑性率から残留変位応答スペクトルを利用して行うこととされ、具体的には動的解析による残留変位は以下の式に

より差算出することとされている。

$$\delta_R = C_R (\mu_R - 1) (1 - r) \delta_y$$

ここに、

C_R : 残留変位補正係数

μ_R : 応答塑性率で、動的解析による場合には動的解析により得られる最大応答塑性率を適用するものとし、3波形に対する動的解析結果の平均値を用いてよい。

r : 橋脚の降伏剛性に対する降伏後の二次剛性の比

δ_y : 橋脚の降伏変位

また、 r 及び C_R の値は H14 道示 V の表-11.2.1 に示されている。なお、コンクリートを充填した鋼製橋脚及びコンクリートを充填しない鋼製橋脚いずれの場合も、単柱式の鋼製橋脚と水平力-水平変位関係等の弾塑性挙動が異なる鋼製橋脚に対する r 及び C_R の値については、別途検討が必要であるとされている。

[参考文献]

- 宇佐美勉, 坂野茂, 是津文章, 青木徹彦: 鋼製橋脚モデルの繰返し弾塑性挙動におよぼす荷重履歴の影響, 構造工学論文集, Vol.39A, 1993年3月.
- 川島一彦, Gregory A. MacRae, 星隈順一, 長屋和宏(1994): 残留変位応答スペクトルの提案とその適用, No.501/I-29, pp.183-192, 1994年10月.
- 葛漢彬, 宇佐美勉, 戸谷和彦: 繰返し荷重を受けるコンクリート充填鋼柱の強度と変形能に関する研究, 構造工学論文集, Vol.40A, 1994年3月.
- 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編, 平成6年.
- 兵庫県南部地震道路橋震災対策委員会: 兵庫県南部地震における道路橋の被災に関する調査報告書(平成7年), 平成7年12月.
- 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説Ⅴ耐震設計編(平成8年), 平成8年12月
- 建設省土木研究所, 首都高速道路公団, 阪神高速道路公団, 名古屋高速道路公社, (社)鋼材倶楽部, (社)日本橋梁建設協会(平成9年~平成11年): 道路橋橋脚に地震時限界状態設計法に関する共同研究報告書(Ⅰ)~(Ⅷ), (総括編), 平成9年4月~平成11年3月.
- 葛漢彬, 高聖彬, 宇佐美勉, 松村寿男(1997): 鋼製パイプ断面橋脚の繰返し弾塑性挙動に関する数値解析的研究, 土木学会論文集, No.577/I-41, pp.181-190, 1997年7月.
- 西川和廣, 村越潤(1997): 鋼製橋脚の耐震設計, pp.74-81, 基礎工, 1997年3月.
- 西川和廣, 村越潤, 山本悟, 上仙靖, 高橋実, 中嶋浩之, 岡田淳(1999): 鋼製橋脚のハイブリッド地震応答実験, 土木研究所資料, 第3583号, 1999年3月.
- 土木学会, 日本鋼構造協会(2000a): 橋梁システムの動的解析と耐震性, 2000.
- 土木学会, 日本鋼構造協会(2000b): 鋼構造物の耐震解析用ベンチマークと耐震設計法の高度化, 2000.
- 深谷茂広, 小野潔, 沈赤, 村越潤, 西川和廣: 矩形断面鋼製橋脚の正負交番載荷実験結果を基にした曲げ-一曲率関係の検討, 構造工学論文集, Vol.46A, pp.1365-1376, 2000年3月.
- Tsutomu Usami, Shengbin Gao and Hanbin Ge(2000); Stiffened steel box columns. Part 2: Ductility evaluation, EARTHQUAKE ENGINEERING AND STRUCTURAL DYNAMICS, Vol.29, pp.1707-1722, 2000.
- 小野潔, 西村宣男, 西川和廣, 高橋実, 中洲啓太(2001): 円形断面鋼製橋脚の正負交番載荷実験結果に基づくM-Φモデル設定手法に関する検討, 鋼構造論文集, 第8巻第31号, pp.97-105, 2001年9月.

小野潔, 西村宣男, 高橋実, 野中哲也, 坂本佳子: コンクリートを充填した鋼製橋脚のM- Φ 関係を利用した耐震性能評価手法に関する検討(2002a), 第4回鋼構造物の非線形数値解析と耐震設計への応用に関する論文集, pp.193-202, 2002年1月.

小野潔, 西村宣男, 西川和廣, 中洲啓太, 野中哲也, 坂本佳子(2002b): コンクリートを充填した矩形断面鋼製橋脚のM- ϕ 関係を利用した耐震性能評価手法に関する検討, 構造工学論文集, Vol.48A, pp.683-692, 2002年3月.

小野潔(2002): 鋼製橋脚の耐震設計, pp.45-48, 基礎工, 2002年6月.

日本道路協会: 道路橋示方書・同解説V耐震設計編(平成14年), 平成14年3月.

山口栄樹, 永松寿隆, 南野能克, 後藤芳顕, 久保喜延: 鋼製円筒橋脚の有限要素解析に関する一考察, 第4回鋼構造物の非線形数値解析と耐震設計への応用に関する論文集, pp.255-259, 2002年1月.