

鋼製橋脚の地震時保有水平耐力の解析法

北田俊行*

* 工博 大阪市立大学助教授 工学部土木工学科 (〒558 大阪市住吉区杉本3-3-138)

本論文では、平成8年12月に出版された新しい道路橋示方書・V耐震設計編に基づいた、 $\text{I} \times \text{H} 2$ の地震に対する鋼製橋脚の地震時保有水平耐力の解析法、および照査法に関する現状について取りまとめている。まず、本論文で対象とする構造物の範囲を明確にしている。つぎに、解析モデルの作成方法と問題点、各種限界状態の定義、ならびに構造材料、および部材断面の構成則の現状と問題点との整理を行っている。つづいて、弾塑性有限変位理論に基づく保有水平耐力の解析法、および照査法について述べている。また、弾塑性有限変位解析を行わない簡便な照査法の提案を行っている。さらに、2層門型ラーメン橋脚の解析例を通じて、実際の面からの検討・考察も加えている。最後に、今後の検討課題をまとめている。

Key Words : Restoring force, Steel pier, Analytical method, Seismic design, Elasto-plastic and finite displacement analysis

1. はじめに

1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震により、鋼橋構造物、とりわけ鋼製橋脚は、橋脚柱の圧壊(2例)、橋脚柱の局部座屈、ラーメン橋脚横梁腹板のせん断座屈、ならびに橋脚柱基部、およびラーメン橋脚隅角部における脆性的な亀裂の発生など、多くの被害を被った。

地震以前の耐震設計法に対して、これらの鋼橋の被害から学ぶべき反省点として、以下の諸点があげられる。

- ①許容応力度設計法で決まる終局限界状態における崩壊モードと、実際の終局限界状態における崩壊モードとが大きく異なる場合がある。
- ②基礎の側方移動、あるいは支承の崩壊などによって、地震力が作用している間に、構造系が設計時と大きく異なる場合がある。
- ③耐力は、座屈や降伏のみで決まるものではなく、ラーメン隅角部の割れ、ニールソローゼ橋のケブルのゆるみや抜け、あるいは支承の崩壊などとの連成で決まる場合がある。
- ④薄肉構造部材の終局強度は、最終的に、構成する補剛板パネルの局部座屈によって支配されることが多い。したがって、終局限界状態付近の挙動を明らかにするためには、板要素の局部座屈と梁・柱の部材座屈、および橋梁の全体座屈との連成現象が精度よくシミュレートできる解析方法の開発が必要である。

地震直後、土木学会では、従来の設計対象地震である弾性応答加速度が200~300galの震度法レベルの地震、および弾性応答加速度が700~1,000galの関東地震のようなプレート境界型の大地震に加えて、今回の地震のような内陸直下型地震をも対象とし、震源付近での地震動(弾性応

答加速度が1,500~2,000gal)をも考慮すべきであることを提言^{1), 2)}している。

一方、日本道路協会でも、地震直後、建設省の指導のもとに、「兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に係る仕様」^{3), 4)}を取りまとめている。

これらを踏えて、このような内陸直下型の地震に対しても、軽微な損傷にとどまるような橋脚、とくに鋼製橋脚の新たな設計法を確立するために、建設省土木研究所、首都高速道路公団、阪神高速道路公団、鋼材クラブ、および日本橋梁建設協会などが中心となって、実験的研究が活発に行われている。

しかしながら、単柱形式の鋼製橋脚の場合、局部座屈が発生したり、溶接部に脆性的な割れが生じたりするために、RC橋脚に比して、変形性能がない。すなわち、終局変位 δ_u (最大荷重時の変位)を降伏変位 δ_y で無次元化した δ_u/δ_y が、3~5程度しか確保できない。そのため、RC橋脚と同様なニューマークのエネルギー一定則にしたがう設計法では、どうしても今回の地震のような内陸直下型の地震動に対しても安全な断面設計が困難であることが明らかにされた。そこで、より大きな耐力と変形性能とが期待できる合成断面の採用(コンクリート充填方式)、変形性能が大きい鋼製断面の開発、および弾塑性動的応答解析などを行って、ニューマークのエネルギー一定則を用いない新しい鋼製橋脚のための耐震設計法に関する研究が行われている^{5), 6)}。

このような趨勢の中、今後建設される新設の橋脚においても、土木学会の提言や上述の研究成果を踏まえた設計をできるだけ早く行うべく、1996年12月には、道路橋示方書・V耐震設計編⁷⁾が改訂・出版された。ここで、

従来の震度法Ⅱの地震をⅡ1の地震、プレート境界型の大地震をⅡ2（タイプⅠ）の地震、また内陸直下型の地震をレベル2（タイプⅡ）の地震と定義されている。その中で、鋼製橋脚に関しては、コンクリートを充填して合成断面とすることを薦めている。ただし、基礎構造が軟弱であったり、スパンの関係上、どうしても鋼断面単独構造とせざるを得ない場合には、①縦補剛材間の板バネの幅厚比を小さくし、また縦補剛材の寸法を大きくする。それとともに、②角溶接部が割れないように角補強を行って変形性能を向上し、さらに③弾塑性動的応答解析を用いた設計を行うことを薦めている。

このような状況を踏まえて、本論文では、Ⅱ2の地震に対する鋼製橋脚の地震時保有水平耐力の解析法、および照査法に関する現状について取りまとめている。

ただし、本論文では、検討範囲を、以下のように限定している。

- (1) 免震支承は、対象外とする。
- (2) 補剛箱形断面からなる橋脚のみを対象とする。すなわち、円形断面の橋脚は対象外とする。
- (3) 橋脚基部は、固定支持とする。したがって、アンカーボルト、およびフーチング以下の基礎構造は対象外とする。

また、単独柱形式の橋脚の照査、およびラーメン橋脚においても橋軸方向のⅡ2の地震に対する照査を保有水平耐力法で行うと、変形性能 δ_u / δ_y が小さく、設計が不可能になる場合が多い。したがって、ここで示す保有水平耐力法は、主としてラーメン橋脚の橋軸直角方向のⅡ2の地震に対する照査を行う際に参考になるものと考えられる。

2. 限界状態の定義と断面の寸法制限

道路橋示方書・V耐震設計編⁷⁾では、図-1に示すように、終局限界状態Uに対して安全率を考慮した設計終局限界状態Rを基準にして、保有水平耐力 P_{ud} の照査を行っている。また、地震後の橋脚の残留変位 δ_R が橋脚高さ H の1/100以下となることの照査も必要とされる。一方、震度法Ⅱの地震に対しては、降伏限界状態Yに1.13の安全率を考慮した設計降伏限界状態Sを目標に断面設計がなされる。

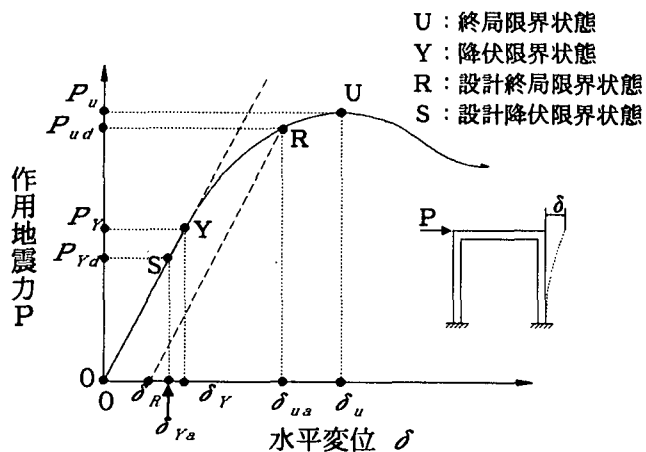


図-1 各種限界状態の定義

終局限界状態は、図-1のように、一般に最高荷重状態に設定されるが、高次不静定の高層ビルディングでは、最初にある部材が全塑性状態になる変位の2倍の変位になる状態にとられている。

また、終局限界状態は、橋脚柱を構成する板要素の局部座屈を無視した骨組み構造としての最高荷重状態となるようにするのが望ましいと考えられる。なぜなら、終局限界状態までに柱断面の局部座屈が発生すると、地震荷重による繰返し載荷の差異によって、終局強度が変化し、設計でそれを考慮するのが難しくなるためである。

終局限界状態までに局部座屈が発生しない断面の寸法制限としては、以下の式(1)～(3)に示すものが、妥当であると考えられる⁶⁾。

$$R_R = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{\sigma_Y}{E} \frac{12(1-\mu^2)}{\pi^2 \cdot 4}} = 0.526 \frac{b}{t} \sqrt{\frac{\sigma_Y}{E}} \leq 0.4 \quad (1)$$

$$R_F = \frac{B}{t} \sqrt{\frac{\sigma_Y}{E} \frac{12(1-\mu^2)}{\pi^2 \cdot k_F}} \leq 0.4 \quad (2)$$

$$R_S = \frac{h}{t_s} \sqrt{\frac{\sigma_Y}{E} \frac{12(1-\mu^2)}{\pi^2 \cdot k_S}} = 1.613 \frac{h}{t_s} \sqrt{\frac{\sigma_Y}{E}} \leq 0.5 \quad (3)$$

ここに、寸法に関する記号は、図-2に示すとおりであり、その他の記号は、以下のとおりである。

σ_Y : 降伏点

E : ヤング係数

μ : ポアソン比

k_F : 補剛板バネ全体の座屈係数

k_S : 自由突出板の座屈係数 (=0.425)

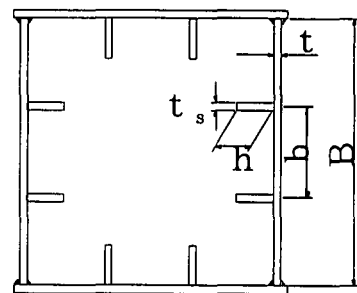


図-2 鋼製箱形断面

また、文献5)には、鋼断面部、および合成断面部の損傷度、それぞれ D_s 、および D_c を用いて、これらの断面の終局限界状態を判定し、これらのうち最初に1になった状態を橋脚の終局限界状態とする方法が提案されている。

なお、現行の道路橋示方書⁷⁾では、図-1に示した構造物の各種限界状態と橋梁構造物としての機能との関係が明確にされていないため、地震時において守らなくては

いけない機能を確保する目的の新しい構造、および工法の開発がなされにくい状況にあると考えられる。

3. 解析モデルの作成

図-3に示すように、実際に兵庫県南部地震によって損傷を受けたラーメン橋脚^{8), 9)}を例に取り上げて、解析モデルの作成法について検討する。この橋脚の橋軸方向の支承の支持条件は、図-4に示すとおりである。

また、この橋脚は、上部構造の設計水平震度を $k_{ho}=0.3$ 、および橋脚自身のそれを $k_{ho}=0.25$ として設計されている。

橋軸方向、とくに橋軸直角方向の地震に対する解析モデルの作成には、桁端部の遊間が狭く、隣接橋梁が衝突したり、連続桁のようになり、どこまでを1振動単位と考えて解析モデルを作成するかという問題がある。しかし、これは、今後の検討課題として、本論文の対象外としている。橋軸方向の地震に対する解析モデルとして、図-5に示す3つが考えられる。

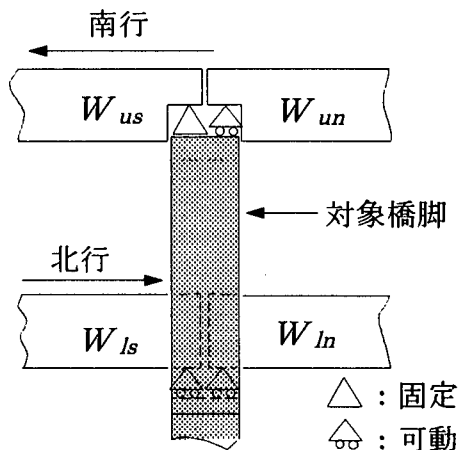


図-4 支承条件

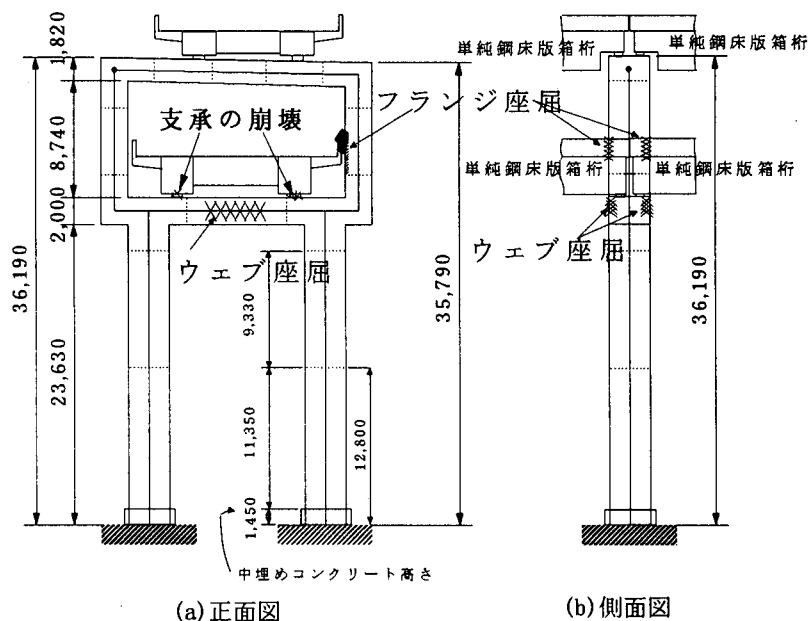


図-3 対象とする鋼製ラーメン橋脚の例（寸法単位：mm）

この図において、

k_{ho} : 震度法に用いる設計水平震度

f : 可動支承の静的摩擦係数

W_{us} 、 W_{un} 、 W_{ls} 、 W_{ln} : 図-4に示す上部構造の重量

k_{he} : 保有水平耐力法に用いる等価水平震度

図(a)は、震度法で用いる解析モデルである。図(b)、および(c)は、道路橋示方書・V耐震設計編⁷⁾の「3.3.3 慣性力の算定方法」に従って作成した保有水平耐力法に用いる解析モデルである。3.3.3の解説(1) ii)を参考にすると、どちらの解析モデルも作成することができる。これらの解析モデルの違いを調べるため、それぞれ以下の静的地震力 P を作用させて弾塑性有限変位解析¹⁰⁾を行った。

$$P = k_h \left[W_{us} + \left\{ f \cdot W_{un} / 2 + f \cdot (W_{ln} + W_{ls}) / 2 \right\} / k_{ho} \right] \quad (4)$$

$$P = k_h W_{us} \quad (5)$$

$$P = k_h \left\{ W_{us} + (W_{ln} + W_{ls}) / 4 \right\} \quad (6)$$

ここに、 k_h は、荷重パラメータとしての漸増水平震度である。

解析結果を図-6に示す。この図において、 α_h は、等価水平加速度である。この図より、解析モデルの設定法によって橋脚の剛性、および終局強度が大きく変化することがわかる。

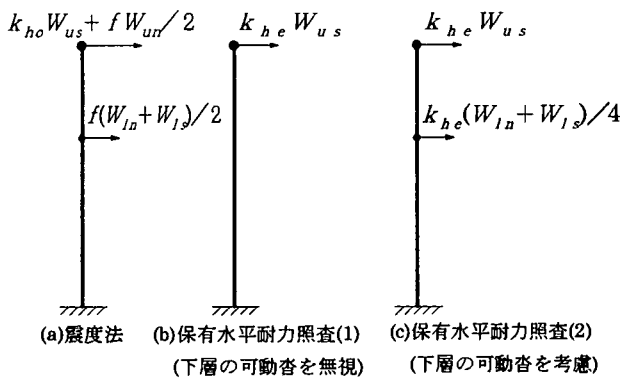


図-5 地震荷重の設定法

実際に橋軸方向に $\mu 2$ の地震が作用すると、支承が機能している間は、図-5(b)の解析モデルに近い構造系で振動し、支承が崩壊すると、どちらかという、図-5(c)に近い構造系で振動するものと考えられる。

以上のことから、どの解析モデルを用いて設計するかは、支承の機能によって決めるべきであることがわかる。したがって、 $\mu 2$ の地震下における支承の機能を明確にし、その機能が確保できるように支承を確実に設計・製作・架設することが必要である。

4. 構成則

道路橋示方書・V耐震設計編⁷⁾では、角補強を行った鋼製橋脚の動的解析に用いる構成則として、降伏限界状態を $1.1P_y$ と $1.1\delta_y$ 、終局限界状態を、タイプⅠの地震の場合 $1.4P_y$ と $4\delta_y$ 、タイプⅡの地震の場合 $1.4P_y$ と $5\delta_y$ とで決まるバイリニア型の曲線を与えている。しかし、この構成則は、 $P-\delta$ 曲線で与えられており、橋脚の高さが変化すると必ずしも適用できなくなる場合がある。したがって、その適用範囲を明確にする必要がある。

また、コンクリートを充填した合成断面には、図-7に示す構成則を用いるものとしている。合成断面の圧縮側の鋼板の構成則は、図-7(b)のように軟化することではなく、逆にひずみ硬化が期待できるようになる¹¹⁾。文献5)では、式(1)～(3)に示したような条件を満足し、変形性能のある鋼断面には、図-8に示す構成則を用いることを提案している。合成断面の鋼板の構成則にも、図-8に示す構成則を用いるべきであると考えられる。また、円形断面でなく、箱形断面の合成柱では、充填コンクリートが三軸応力状態になり圧縮強度 σ_{ck} が上昇することは期待できない¹¹⁾。したがって、充填コンクリートには、図-7(c)の構成則でなく、文献5)で提案されている図-9に示す構成則を用いるべきである。

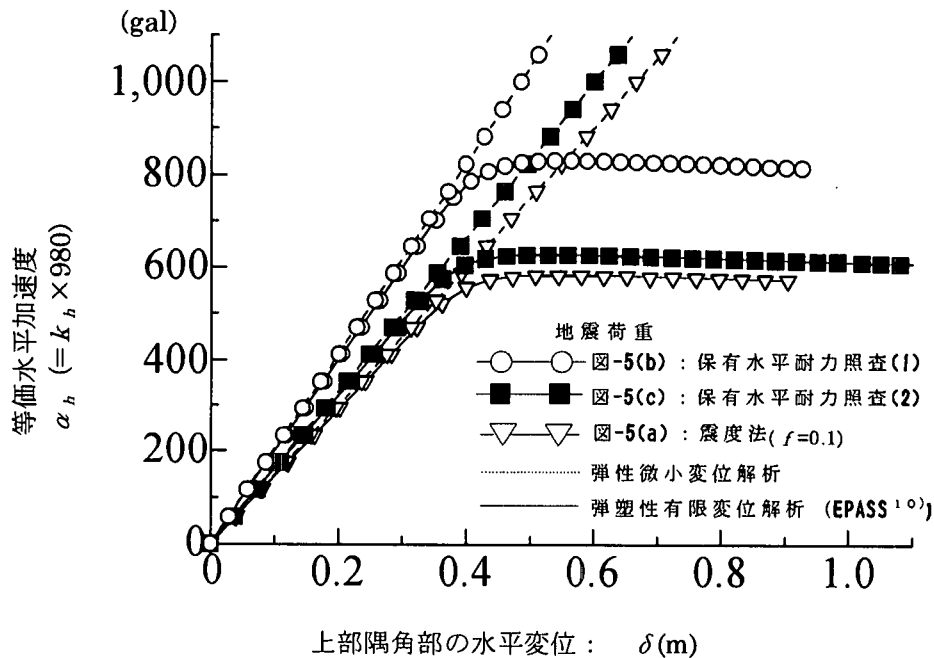
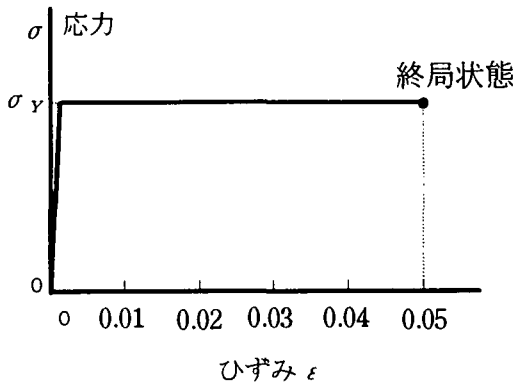


図-6 地震荷重の設定法の違いによる挙動、および終局強度の差異



(a) 引張側の鋼板

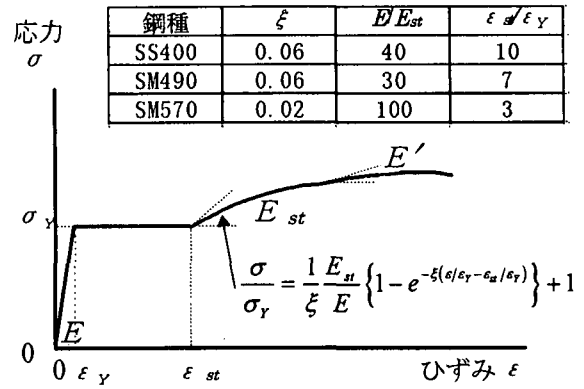
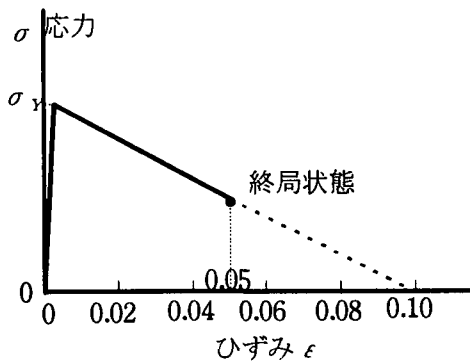


図-8 鋼材の構成則⁵⁾



(b) 圧縮側の鋼板

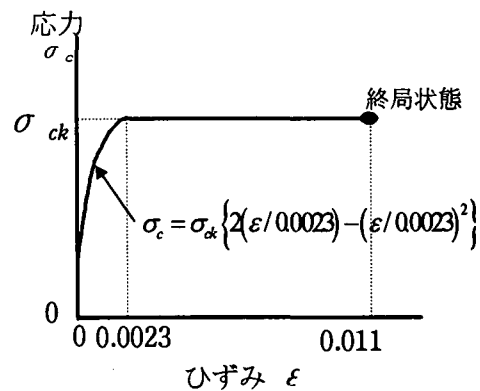
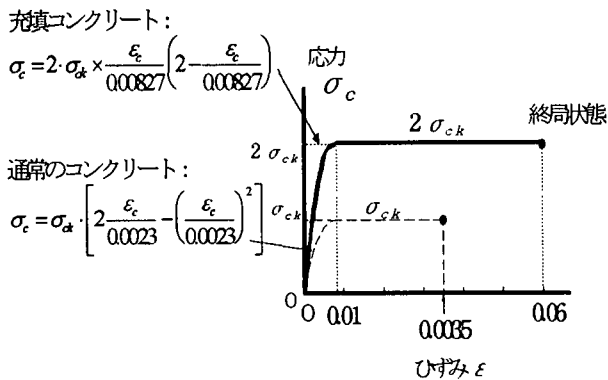


図-9 充填コンクリートの構成則⁵⁾



(c) 充填コンクリート

図-7 合成断面の構成則⁷⁾

以上のように、鋼断面、および合成断面の構成則は、現在のところ統一された適切なものが設計に用いられていないのが現状である。今後、早急に、検討し、統一した構成則を提案することが必要であると考えられる。

5. 解析法

図-10には、地震時保有水平耐力照査法の1例を示している。このフローの中には、局部座屈を認めた場合の照査フローも入れている。ただし、現時点では、局部座屈を認めた設計ができるほど十分な研究成果が得られているとは考えられない。

終局限界状態に至るまでの挙動を解析する方法として、文献6)、および12)には、終局限界状態まで局部座屈が発生しない部材からなる鋼製橋脚の弾塑性有限変位解析法が示されている。一方、建築分野では、崩壊モードを仮定する塑性解析も用いられている¹³⁾。

また、作用地震力 H_{ep} は、次式で評価できるようになると便利である。

$$H_{ep} = \beta_d \cdot \beta_r \cdot k_{hc} \cdot M \quad (7)$$

ここに、

β_d : 弾性動的応答の弾塑性動的応答に対する誤差を補正するための係数

β_r : 弾塑性挙動を考慮するためニューマークのエネルギー一定則によって求める低減係数

k_{hc} : 弾性応答解析によって求める地震時保有水平耐力法に用いる設計水平震度

M : 上部構造の質量

ただし、当分は、 $\beta_d=1.0$ とせざるを得ないが、そのうち構造物ごとに異なる精度の良い β_d の値(≤ 1.0)を提案できると便利である。また、 β_r も弾塑性有限変位解析を行うことなく、構造物の不静定次数、および使用構造部材の断面の幅厚比などで自動的に決まるようにできると、便利である。

さらに、橋脚基部、およびラーメン橋脚隅角部の割れは、細部構造の工夫などによって防止することが可能である。しかし、場合によっては、次式などで応力集中が発生する溶接部の割れに対する照査を行うことも必要であると考えられる。

$$\varepsilon_{ep} < \beta_s \cdot \varepsilon_Y \quad (8)$$

ここに、

ε_{ep} : 着目点の公称ひずみ(ホット・スポットひずみ)

β_s : 部位の割れに対する強度によって異なる係数

ε_Y : 降伏ひずみ

また、文献5)には、弾性応答変位 δ_E から、弾塑性を考慮した最大応答変位 δ_{max} 、および残留変位 δ_R を計算する近似式が提案されている。

6. 解析例

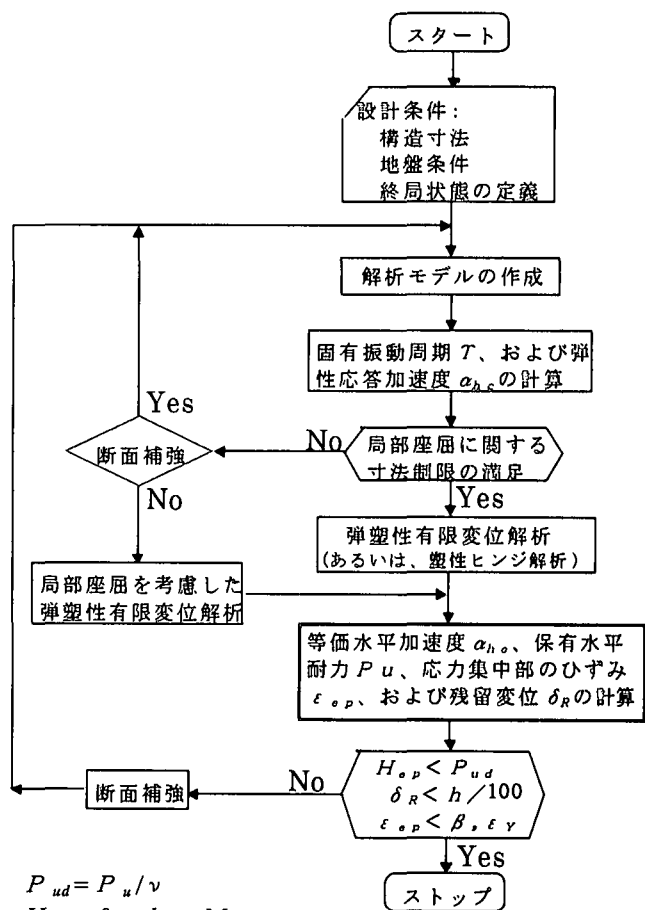
図-11、および図-12には、図-3に示したラーメン橋脚を図-5(a)のようにモデル化して弾塑性有限変位解析を行った結果を示している^{10), 14)}。橋軸方向には $k_h=0.83$ 程度、橋軸直角方向には $k_h=2.96$ 程度の地震までは、ほぼ安全であることがわかる。すなわち、橋軸方向には、レベル2の地震に対して何らかの補強が必要であることがわかる。

また、図-13に示すニルセン・ローゼ橋にニューマークのエネルギー一定則を適用した場合の解析結果を図-14に示している。

これらの解析結果から、 β_r を求めると、以下のような値となる。

$\beta_r \approx 0.7$: 単柱形式の鋼製橋脚、橋軸方向に地震を受けるラーメン橋脚、および橋軸直角方向に地震を受けるニルセン・ローゼ橋

$\beta_r \approx 0.3$: 橋軸直角方向に地震を受けるラーメン橋脚



$$P_{ud} = P_u / \nu$$

$$H_{ep} = \beta_d \cdot k_{hc} \cdot M$$

$$= \beta_d \cdot \beta_r \cdot k_{hc} \cdot M$$

ν : 安全率

β_r : エネルギー一定則による低減率

β_d : 弾塑性動的解析との誤差を補正する係数

M : 質量

図-10 保有水平耐力照査法のフロー

今後、種々の鋼構造物に対して、適切な β_r を求めておくことが便利である。

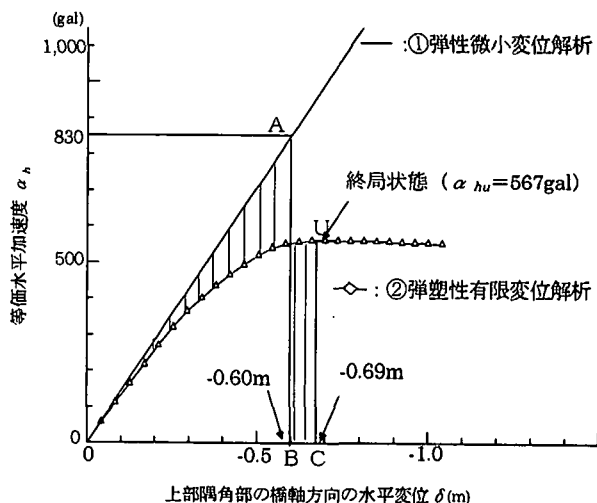


図-11 等価水平加速度 a_h と水平変位 δ との関係 (橋軸方向、図-5(a)の地震荷重)

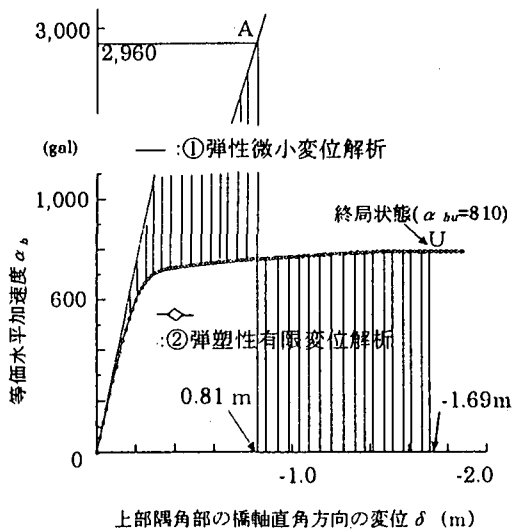


図-12 等価水平加速度 α_h と水平変位 δ との関係
(橋軸直角方向)

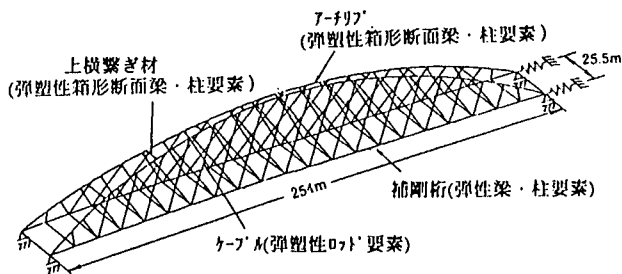


図-13 ニルセンローゼ橋の解析モデル

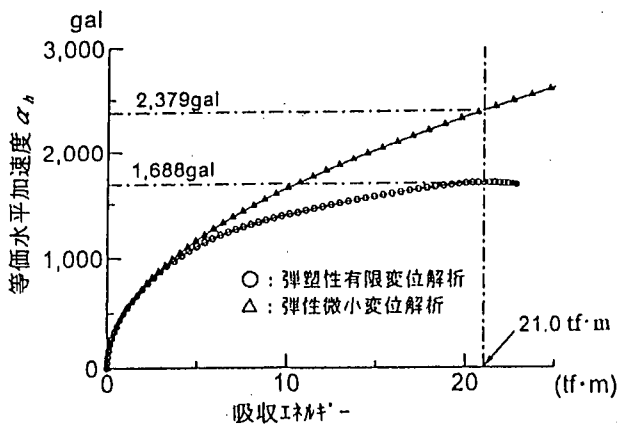


図-14 等価水平加速度と地震応答エネルギーとの関係

7. 今後の検討課題

いへ2の地震に対する鋼製橋脚の地震時保有水平耐力法をより合理化するための、今後の検討課題としては、以下のテーマが考えられる。

- (1) 各限界状態における支承の力学的条件の明確化、および、それらに対応した支承の設計法
- (2) 隣接橋梁との衝突なども考慮した1振動単位の取り方
- (3) 支承、および橋脚の種々の限界状態と橋梁の機能との関連の明確化
- (4) 繰り返し履歴によって吸収される地震エネルギーが考慮できる地震時保有水平耐力法の開発
- (5) 鋼製断面、および合成断面の厳密、および簡便な構成則の開発
- (6) 免震支承を用いた橋脚の解析モデルの作成方法
- (7) アンカボルトの設計法、およびモデル化
- (8) 基礎構造のモデル化
- (9) 弾塑性動的応答解析による地震時保有水平耐力法の精度の検証

8. まとめ

本論文は、道路橋示方書・V耐震設計編⁷⁾に基づく地震時保有水平耐力法の現状と問題点とについて、著者の考えつく範囲で、まとめてみたものである。本文中には、著者の考え違いや誤りなども多々あるかもしれない。しかし、シボジウムにおいて、本文をたたき台に、活発な意見を出していただき、今後の鋼製橋脚のより良き設計・照査法を開発する上で、本論文に、少しでも資するところがあれば、幸いである。

本論文の作成に当たり、大阪市立大学大学院・工学研究科の松村政秀氏に種々の協力をいただいた。ここに記して、感謝の意を表します。

また、本研究は、平成8年度の文部省・科学研究費補助金・基盤研究(B) (研究代表者：宇佐美 勉) として研究補助を受けて行ったものである。

参考文献

- 1) 土木学会・耐震基準等基本問題検討会議：土木構造物の耐震基準等に関する提言、(第一次提言)、平成7年5月23日
- 2) 土木学会・耐震基準等基本問題検討会議：土木構造物の耐震基準等に関する提言、(第二次提言)、平成8年1月22日
- 3) 兵庫県南部地震道路橋震災対策委員会：兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に係る仕様(案)、平成7年2月27日
- 4) 日本道路協会：「兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に係る仕様・解説」に基づく設計計算例、平成7年6月
- 5) 土木学会鋼構造委員会・鋼構造新技術小委員会・耐震

設計研究WG：鋼橋の耐震設計指針案と耐震設計のための新技術、平成8年7月

- 6) (財) 阪神高速道路管理技術センター・(社) 日本鋼構造協会：鋼製橋脚の塑性時の変形性能に関する業務報告、平成7年3月
- 7) 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12月
- 8) 阪神高速道路公団・神戸建設部：兵庫県高速湾岸線、六甲アイランド橋（その2）、鋼桁及び鋼製橋脚工事、RP8 鋼製橋脚、設計計算書、平成3年
- 9) 北田俊行・中井 博・石崎 浩・江口慎介：鋼-コンクリート橋、および鋼脚柱の限界状態に関する基礎的研究、構造工学論文集、Vol. 42A、土木学会、P. 91～98、1996年3月
- 10) 北田俊行・大南亮一・丹生光則・田中克弘：ケーブルを用いた鋼橋の耐荷力解析用の汎用プログラム開発、構造工学における数値解析法シンポジウム論文集、第13巻、日本鋼構造協会、pp. 89～94、1996年7月
- 11) 北田俊行・中井 博・才村幸生・吉田康樹：突起付鋼

板を用いた合成角形矩形短柱の耐荷力に関する実験的研究、第2回合成構造の活用に関するシンポジウム講演論文集、土木学会構造工学委員会、pp. 189～194、1989年9月

- 12) 土木学会・鋼構造委員会・鋼構造終局強度研究小委員会：鋼構造の終局強度と設計、土木学会、1994年7月
- 13) 北田俊行・青木武生・赤松洋一・葛西俊一郎・柄 一：鋼製橋脚の合理的耐震設計法に関する考察、鋼構造年次論文報告集、第1巻、日本鋼構造協会、pp. 497～504、1993年7月
- 14) Kitada, T. : On Seismic Design Method for Steel Bridges under Large Earthquake Based on Elastoplastic Finite Displacement Analysis, Proceedings of 5th International Colloquium on Stability and Ductility of Steel Structures, Nagoya, Japan, July 29-31, 1997 (掲載予定)

(1997年3月31日受付)

A METHOD FOR CALCULATING SEISMIC RESTORING HORIZONTAL FORCE OF STEEL BRIDGE PIERS

Toshiyuki KITADA

This paper concerns an analytical and checking method of seismic restoring force of steel bridge piers against the level 2 earthquake on the basis of the new version on Seismic Design of Specifications for Highway Bridges in Japan (JSHB). First, the scope of bridge piers under consideration, issues on analytical models, definition of ultimate and yield limit states are discussed. Then, a simplified checking method is proposed. Then, an investigation on the proposed method is carried out through a numerical example using an existing rigid framed bridge pier with one span and two stories. Finally future research needs are summarized.