

# エネルギー評価による鋼橋脚の耐震設計の提案

倉西 茂\*

\*工博 関東学院大学工学部土木工学科 (〒236 横浜市金沢区六浦町4834)

地震により構造物に励起される運動エネルギーを構造物がそのひずみエネルギー等で吸収できるかどうかを基準とする耐震設計法の提案を行う。ここでは、鋼橋脚を構成する鋼板の座屈後の耐力低下も取り入れる。また、崩壊過程でエネルギーを吸収できる機構の評価も行う。

key word: steel bridge pier, anti-seismic design, kinematic energy, strain energy, earthquake motion, responded velocity, limit state design

## 1. まえがき

現在の耐震設計法は地震により構造物に励起される加速度、すなわち慣性力に対して、構造物が規定されているある強度を持っているかどうかと言うことを基本的には基準にしている。「道示」耐震設計編<sup>1)</sup>等では、その強度は構造物の降伏強度を基準として、その強度の下での変形することを前提としている。その論拠として、地震により構造物に生じる弾性応答によるひずみエネルギーは塑性応答によるひずみエネルギーと等価であると言うことに基づいている。構造物の耐震性と言う点に関しては、一定の大きさを保つ降伏強度の下での、あるいはそれ以上の強度のもとで、変形能力を持つと言うことに限定することは特に理論的根拠を持っているものではない。コンクリート構造のように、鉄筋による変形能力及び強度を期待し、コンクリートのひずみがある限度を超えた点で急激にコンクリートの圧壊が起こるようなものでは、ひずみの限界が構造物の崩壊となることは当然予想されることである。

鋼橋脚のように、鋼板の座屈による鋼座屈強度の低下を伴いながら変形が持続するようなものでは、その特性が十分に生かされる耐震設計法を考えるべきであろう。しかし、その評価が困難であるという理由だけで、すなわち、変形能力の規定が困難になると言う理由だけで、その大きな変形に伴う地震によって構造物に入力されたエネルギーの吸収能力を評価しないのは合理的な取り扱いとは言えない。一部で行われているように降伏強度以上の強度を持つ点までを変形能力の限度とするのも理論的に特に意味があるものとは思われない。しかし、現「道示」耐震設計編<sup>1)</sup>ではコンクリートを充填しない鋼橋脚に関しては変形能力を期待した設計法は採用されていない。

、兵庫県南部地震での被害で分かるように、鋼橋脚の一部には座屈が生じたが、特に、それらの橋脚に、座

屈と云うものが鋼構造の致命的な損傷という偏見を除いて見れば、使用上の問題点があるとは思われない。急激な脆性破壊が起きない限り鋼橋脚は十分な耐震性を有していると考えられる。そこで、このような鋼橋脚の特性を反映できる設計法としては、単に弾性応答と塑性変形能力を考慮した抵抗能力を基準とするのではなく、耐震性で重要な意味を持つ地震により励起される運動エネルギーを構造物が吸収できるかどうかを基準とするが合理的なものと言えよう。

現在構造物の設計法は限界状態設計法に移り変わりつつある。すなわち、設計において崩壊といった明らかに限界と考えられるようなものを基準として合理的に設計しようとするものである。エネルギー評価による耐震設計法では、構造物の崩壊するかどうかと云う点はその基準とする事ができるので、一般的終局限界状態設計法と適合性も高いものとなる。特に、兵庫県南部地震のような、いわゆるタイプ2の地震のように、比較的短周期で大きな地震加速度を持つがその発生確率の極めて低い大地震に対して、従来の設計法では、構造物が徒に強度の高いものとなり、経済的かつ合理的なものとは成らない可能性が高いと思われる。しかも、後述するように、ここで提案する設計法は構造物が最大運動エネルギーを持った中立位置の状態より崩壊変形に至る間に構造物に吸収されるエネルギーの計算のみで耐震設計ができる。これは震度法が慣性力さえ求められれば静的解析だけで耐震設計ができるという一般の設計者にとって取り扱い易い方法となっている利点を有している。この件に関しては既に土木学会鋼構造委員会で、その設計法の提案<sup>2)</sup>を行っているが本論文はその骨子を紹介するものである。

## 2. 基本方針

ここで提案する鋼橋脚の耐震能力は、鋼橋脚に励起さ

れる地震による応答最大速度より最大運動エネルギーを求め、これを鋼鋼脚が崩壊に至るまでに吸収するエネルギー等と比較することによって評価する。すなわち、鋼鋼脚が崩壊に至る最後の四分の一サイクルのみを考えると言うことであり、ある速度で動き出された鋼鋼脚を止めることができるかどうかと云うことを基準とする。すなわ、耐震性は次式で評価する。

$$\text{励起される最大エネルギー} \leq \text{吸収エネルギー} \quad (1)$$

ここで、「励起される最大エネルギー」は何回かの応答振動の後、通常の弾性応答計算で得られる最大値を用いることにする。ここで問題になるのは

(1) 鋼鋼脚が最大速度を得るまでに、鋼鋼脚が十分弾性的と見られるほど健全か？

(2) 鋼鋼脚に最大速度が生じている状態は変形がゼロの状態なので、それが最大変位となる崩壊変形をするまでの間に入力される地震動による運動エネルギーをどう評価するか？

と言う点であろう。(1)点に関しては、特に兵庫県南部地震のような急激な地震加速度の増加がありそれが数回の繰り返しで最大値に達するような地震をここでは先ず想定している。そこでは崩壊に関係するような最後に到達する最大速度に成る一周期前の状態は共振に地震加速度の増幅率を考えれば、一応弾性的な状態にあると考えることは許されよう。大きな振幅の振動が繰り返し生じると考えられる、プレート境界層で起きるような地震に対してもそれらのもっとも大きな応答速度になるときに鋼鋼脚が耐えられるかどうかと云うことは耐震性の評価基準とした十分に成り立つものである。最大速度に達するまでに鋼鋼脚に生じる多少の損傷は応答計算における減衰率で評価することが可能であろう。(2)に関しては、変形ゼロの状態より、鋼鋼脚の一部が降伏点に達するまでは、確かに地震力は共振に近い増幅作用を持つが、それを過ぎれば周期を持たない状態になり、地震力の増幅作用は小さなものとなる可能性がある。しかし、最大速度に達してから、崩壊寸前の状態までに地震により供給されるエネルギーはそれぞれの地震動の特性により変化するものであることを考えると、これは後で触れる応答最大エネルギーを評価する係数の中に含めて考えるのが適当であろう。

最大速度で動き出した鋼鋼脚は先ず降伏点まではその運動エネルギーを弾性ひずみエネルギーに変えながら変形する。それ以後は、もし最大応力を受けている点に塑性ヒンジが生じれば、その抵抗能力と回転の積によるひずみエネルギーに変換される。もし自由に変形しうる、あるいは崩壊変形を起こしうる、構造部分

の運動エネルギーが塑性あるいは鋼板要素等の後座屈状態で吸収されなければ、それが構造物の終局状態となる。もちろん、ここで、ひずみエネルギーばかりでなく、橋脚も含め構造物の持つ自重の失うポテンシャルエネルギーを考慮する必要がある。またこれを考慮せずに、橋脚のように、特に構造の安定性で主にその強度が定まるような構造では崩壊を決定する事はできない。コンクリート構造のように材料の破壊により強度が定まるものとの違いもここにある。また、運動エネルギーを吸収するのはひずみエネルギーばかりではなく、大きな応力を受けている部分に高張力ボルト摩擦接合部があり、それが滑り変形をするのであれば、クーロン摩擦によるエネルギー吸収を考慮に入れることは可能である。図1に神戸市内の橋脚部の継ぎ手に滑りが生じた例を示しているが、これらの橋脚は周辺の鉄筋コンクリート橋脚に脆性ヒンジが生じているのに対して、この滑り以外大きな損傷が観測されていない。

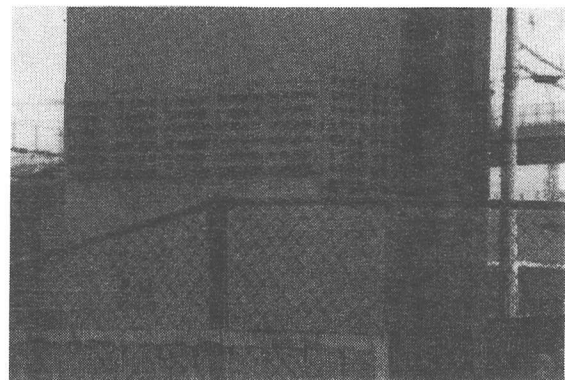


図1 高力ボルト継手に生じた滑り

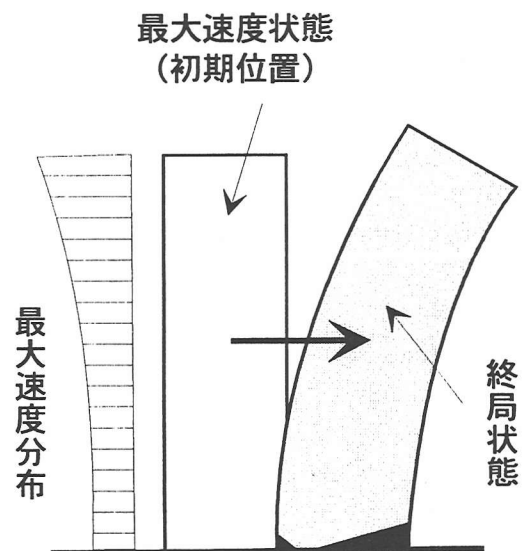


図2 提案耐震設計法の概念図(1)

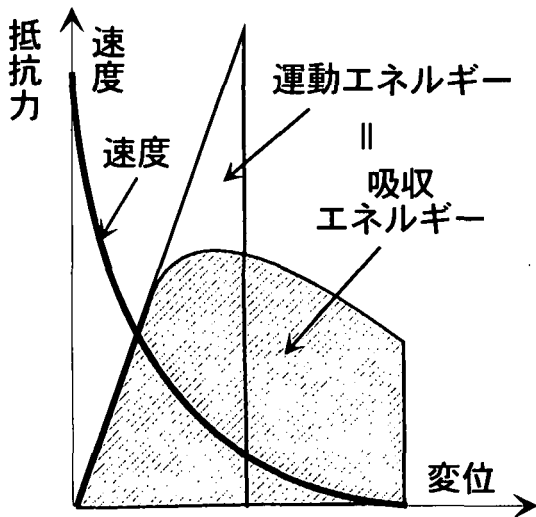


図2 基本概念説明図(2)

図2にここで提案する耐震設計法概念図が示されている。鋼橋脚の場合はフーチングやその下部に杭基礎等を持っていると考えられる。すると図3に示したように、構造でクリチカルな部分は構造系の幾つかの場所、橋脚下部とか杭頭の周辺部と言うことになる。橋脚下部にできる塑性変形部による吸収エネルギーを考える場合はそれより上にある構造が持つ運動エネルギーがその対象となる。杭頭部付近ではそれより上の部分の運動エネルギーと地盤に吸収されるひずみエネルギーが対象となる。

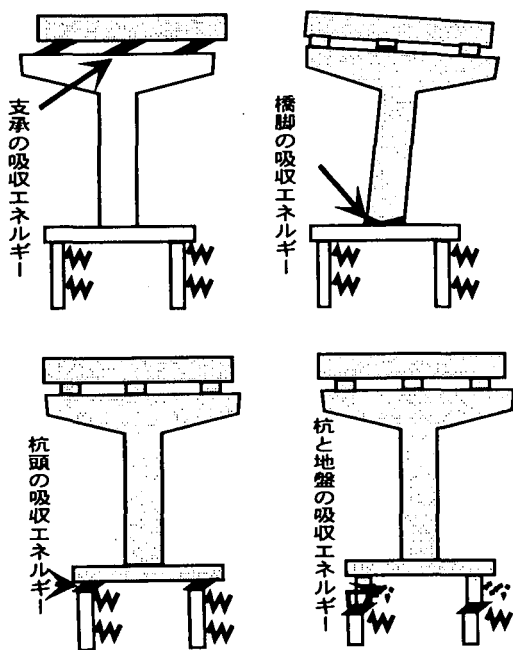


図3 予想終局限界状態

### 3. 設計フォーマット

以上の耐震設計法を終局限界状態設計法のフォーマットの形で書くと次式のようになる。

$$\gamma_1 \times \gamma_k \times E_k = E_s / \gamma_s \dots (1)$$

ここで、

$E_k$ は地震動によって鋼橋脚及び基礎等に励起される最大運動エネルギーである。実際には、弾性応答計算によって求めることになる。そのとき、減衰率で崩壊に至るまでの履歴ヒステリシチ減衰等を考慮する。場合によっては、崩壊変形に近い振動モードのものを用いてもよいし、震度法のように橋脚が一定の速度を持つと仮定してもよい。

$E_s$ は最大速度で動き出した鋼橋脚及び基礎等に蓄えられるひずみエネルギーである。橋脚等の抵抗力によって速度を減じて行くことになる。この値は橋脚等の荷重・変形関係が分かれば数値計算により求めることができる。静的解析等で行われている、例えば塑性ヒンジの概念による解析等に準じて適宜近似計算も可能である。ここで、荷重・変位曲線は近似的にその処女曲線か履歴曲線の包絡線によることになる。構造全体の自重の失うポテンシャルエネルギーやその他変形によりエネルギーを吸収する機構のそれに含める。

$\gamma_1$ は橋脚の持つ重要度に関する係数である。限界状態設計法概念に基づいているので、崩壊を基準としているが、設計される構造は重要度に応じて限界に対していわゆる安全率を持つことになる。

$\gamma_k$ は応答最大速度すなわち応答最大運動エネルギーの評価の不確実性に関する係数である。弾性仮定による応答最大速度の算出とそこで使用される減衰率及び最大速度に達してより崩壊に至るまでに地震動により供給される運動エネルギー等の不確実性により決定することになる。

$\gamma_s$ は橋脚等の変形エネルギー算出の不確実性に関する係数である。 $\gamma_k$ と $\gamma_s$ は現時点では1に取り総ての不確実性は $\gamma_1$ で評価することも可能である。

### 4. 変形エネルギーの算出

変形エネルギーの算出には幾つかの方法が考えられる。一つは全体として解析するものと現在行われている近似解析手法を利用する方法である。

(1) 総合的弾塑性有限変位解析：最大応答速度を初期値としてその変形エネルギーを時刻歴応答解析により求めるものである。ここでは材料及び幾何学的非線形性は考慮されることになる。もし、速度を取り扱わない場合は、振動周期より速度分布をを加速度分布に換算して慣性力としてこれを橋脚に載荷して行き、終局状

態に至るまでの変形エネルギーを求めることもできる。後者の場合は慣性力分布が一定となるので変形過程での応力の再配分は考慮されないことになる。

(2) 弾塑性分離解析：(1)の後者による解析は更に弾性変形と塑性変形と分けて解析することも可能であろう。この場合でも速度分布を加速度分布に換算する場合と応答変位の相似の変位の増加を仮定して解析することもできよう。これらの場合は変形エネルギーは次式で表すことができる。

$$E_s = \gamma_e E_e + \gamma_v E_v + \gamma_o E_o - \gamma_p E_p \dots (2)$$

ここで

$E_e$ は橋脚・基礎及び地盤の弾性範囲での弾性変形によるひずみエネルギーである。

$E_v$ は橋脚・基礎及び地盤の塑性変形によるひずみエネルギーである。構造系のある部の応力が弾性範囲を超え塑性化したとき、塑性化された部分のひずみエネルギーを計算することになる。この場合、塑性ヒンジの概念により塑性ヒンジとその部分の角度変化との積により塑性ひずみエネルギーは求められる。ここで、塑性ヒンジにその軟化も考慮することができる。あるいは、局部座屈長を考えその範囲での鋼板の荷重変位曲関係を利用して塑性ひずみエネルギーは計算することができる。基礎に対しても同様な計算ができる。地盤に対しても地盤バネを仮定しているならばそのバネの塑性かで地盤に吸収されるエネルギーは求めることができることになる。

$E_o$ はエネルギー吸収機構により吸収エネルギーである。これには高力ボルト継手の滑り、支承の移動や落橋防止装置の破壊等によるその他諸々の吸収エネルギーを、崩壊変形に至る過程を考慮することにより計算することが可能である。

$E_p$ は構造系の変形により失うポテンシャルエネルギーである。変形に伴い各質量は位置が下がるために重力のポテンシャルエネルギーを失う。構造物が崩壊する

と云うことは構造系が不安定になると云うことであり、このエネルギーを考慮しなければ崩壊を算定することはできないことになる。

$\gamma_e$ 、 $\gamma_v$ 、 $\gamma_o$ 、 $\gamma_p$ はそれぞれのエネルギーの算出に伴う不確定さに関する係数である。これらを定めるには多くの研究が必要となるが、一応限界状態設計法のフォーマットに従って導入してある。

式(2)に従えば、橋脚等が崩壊に至るまでに吸収する変形エネルギーは簡単な手計算で得ることが耐震性を検討することが可能となる利点を有している。

## 5. 結論

応答速度が最大になる点での最大運動エネルギーを変形がゼロの状態より出発して終局限界状態までに橋脚等に蓄えられる変形エネルギーで吸収できるかどうかを耐震性の判断の基準としている耐震設計法を提案を行った。すなわち、地震による橋脚等の応答は振動現象であるが、複雑な振動現象を取り扱うことなく準静的なエネルギー計算で橋脚等の構造系の耐震性を計算できるところに特徴がある。このような計算は一般の構造技術者にとって理解しやすいものであり、かつ従来より長い年月にわたり蓄積されてきた終局限界状態に関する研究を反映することが可能な方法である。本耐震設計法を採用により、いわゆるタイプ2の地震に対しても鋼橋脚等を合理的にかつ経済的に設計できるものと思われる。

なお本研究は土木学会鋼構造委員会・終局限界状態設計法研究小委員会・耐震終局限界状態設計法分科会の報告の一部である。

## 5. 参考文献

- 1) 道路橋示方書・同解説、V耐震設計編、日本道路協会、平成8年12月
- 2) 耐震終局限界状態設計分科会報告、土木学会、鋼構造委員会鋼構造終局強度研究小委員会平成8年5月

(1997年3月31日受付)

# A PROPOSAL OF AN ANTI-SEISMIC DESIGN METHOD OF STEEL BRIDGE PIERS BASED ON ENERGY CRITERION

Shigeru Kuranishi

An anti-seismic design method for steel bridge piers is proposed in this paper. The criterion of this method is based on whether the kinematic energy generated by earthquake motions can be dissipated by the strain energy which the pier can get in the process to the collapse. The design format of the limit state design is adopted.