

エネルギー基準による耐震設計の提案

倉西 茂

フェロー 工博 関東学院大学教授 土木工学科(〒2368501 横浜)

レベル2のような強い地震動加速度を有する地震に対する耐震設計法の概念を述べられている。すなわち、地震動により構造物に励起される最大速度を評価し、その状態で構造物の持つ運動エネルギーをその構造物の変形エネルギーにより吸収できるかどうかという終局状態を耐震性の基準とする。これにより、一般の強度設計で行われている限界状態設計法の強度評価と同様なフォーマットで耐震基準を書くことができる。

Keywords: kinematic energy, dissipating energy, aseismic design, ultimate state, design format

1. まえがき

現在の耐震設計法の基本は震度法によっている。土木構造物の耐震規定の基をなしている「道示」耐震設計編¹では前記の震度法による設計に加えて、阪神大震災のような起こる確率の低い巨大地震に対しては構造物の変形能力を考慮した設計法をも採用するように規定している。構造物の塑性変形強度を基準として、その強度の下で十分に塑性変形することを前提として、塑性変形能力に応じて軽減された地震応答加速度による慣性力と、橋脚等の塑性変形強度である「地震時保有水平耐力」を比較して設計するように定めている。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振動ひずみエネルギーは塑性応答による振動ひずみエネルギーと等価であるということに基づいている。

しかし、現行の示方書で規定しているように、一定の大きさの降伏強度以上での塑性変形能力を持つということに限定することは特に理論的根拠を持っていないものではない。それは多分に、この条件の下では地震時に構造物は損傷の少ない、すなわち健全な状態で振動を持続していると云うことを期待していることによる。

鋼構造物のように、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、構造の軟化特性の評価が困難であるという理由だけで、地震によって構造物に入力された、その大きな変形に伴う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。構造物の多様性を考慮した合理的な設計法の開発が待たれるところである。

兵庫県南部地震での構造物の被害で見られるように、鋼橋脚の一部には座屈が生じたが、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、特に使用上の問題点があるとは思われない。特に、せん断座屈の場合は大きな工座屈強度が期待できるし、圧縮座屈においても耐荷力の低下はあるものの、変形能力を失うものではない。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し、不静定構造物ではなお十分な耐火力を持っていると考えられる。また一部の鋼製橋脚ではその高力ボルト摩擦接合部に滑りが生じ、継手部でエネルギー吸収が行われていることが観測された。

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、すなわち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の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、構造物が崩壊するかどうかと云う点をその基準とすることができるので、一般的終局限界状態設計法と適

合性も高いものとなる。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。そこでここにエネルギーを規範にとった設計法の提案を行うものである。

2.基本方針

ここで提案する構造物の耐震能力は、構造物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、これを構造物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、構造物が崩壊に至る最後の変形過程のみを考えると云うことであり、ある速度で動き出された構造物を静止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。

励起される最大運動エネルギー ≤ 吸収エネルギー

・・・ (1)

「励起される最大運動エネルギー」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) 構造物が最大速度を得るまでに、構造物が十分弾性的と見られるほど健全か？

(2) 構造物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？と云う点であろう。

(1)の点に関しては、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到る一周期前の状態は、それから起こる共振状態での大きな振幅の増加を考えると、一応弾性的に近い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、「耐震設計」でタイプ2としているような地震に対しても、最も大きな応答速度に対して構造物が崩壊するかどうかと云うこと

は耐震性の評価基準として十分に成り立つものである。最大速度に達するまでに構造物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、構造物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構造物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す。もちろん、ここで、構造物の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影響されるような構造では崩壊を決定する事はできない。また、運動

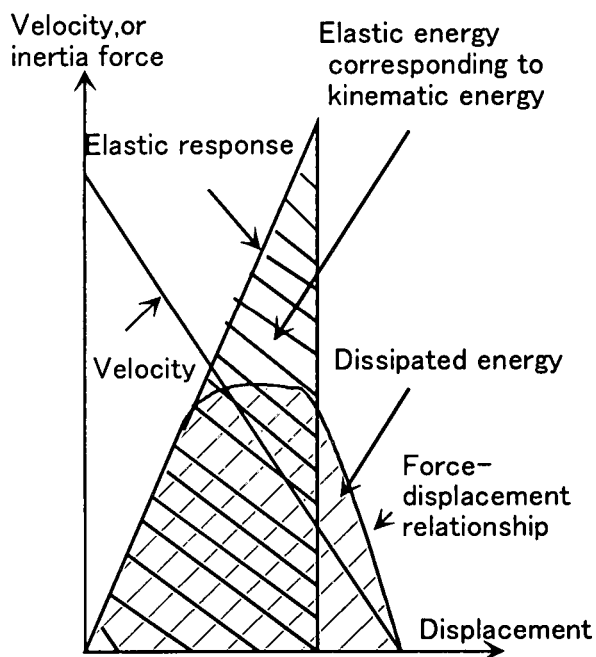


図1 エネルギー基準による耐震設計法の概念図

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、それが滑り抵抗と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にここで提案する耐震設計法の概念図が示されている。構造物が得る最大運動エネルギーは、もし構造物が弾性的に挙動するならば弾性ひずみエネルギーとして構造物に蓄えられる。このエネルギーを構造物が弾性的であると否とに拘わらず吸収できる限界が終

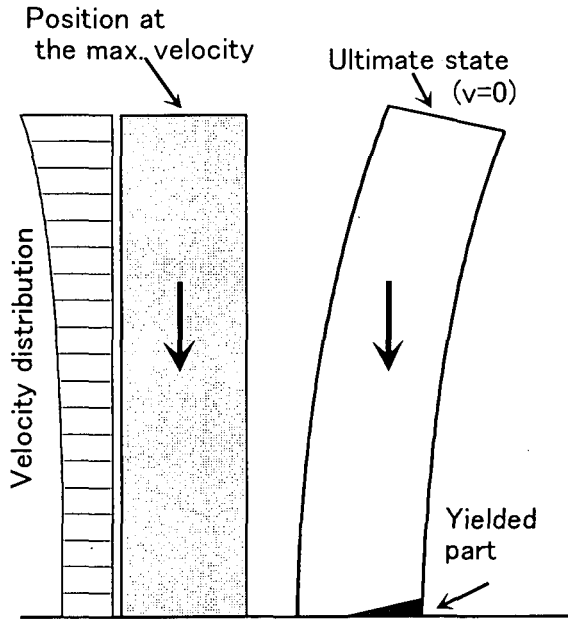


図2 最大運動エネルギーを持った状態と終局変形状態の関係

局限界状態であると見なすことができよう。図2は速度最大すなわち運動エネルギー最大位置と崩壊時の状態を描いた概念図である。

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。

$$\gamma_1 \times \gamma_k \times E_k = E_s / \gamma_s \cdots (2)$$

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、通常の粘性減衰率により、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、

震度法のように構造物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基礎も含めた構造物に蓄えられるひずみエネルギーである。構造物の抵抗力によって構造物の持つ速度を減じて行くことになる。この値は構造物の荷重・変形関係が分かっているなら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。震度法による設計では、基本的に一様な加速度分布と、それによる応力を求め許容応力設計法により設計を行い、実強度の算定というよりは、ある側方への公称強度を与えていることを考えると、変形により構造物が吸収するエネルギーの算定をある基準で行えばよいのであって、耐震設計では正確に荷重変形関係を求める必要のないものと考えられる。計算法等の不確かさは後述で述べるこれらを表す係数によって評価することになる。

γ_1 は構造物の持つ重要度に関する係数である。限界状態設計法の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。

γ_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か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か性により決定することになる。

γ_s は構造物の変形エネルギー算出の不確か性に関する係数である。 γ_k と γ_s は現時点では1に取り総ての不確か性は γ_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。

(i)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。

(ii) 弾塑性分離解析：(i)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。

$$E_S = \gamma_e E_e + \gamma_y E_y + \gamma_0 E_0 - \gamma_p E_p \quad \dots (3)$$

ここで

E_e は構造物・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_y は構造物・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。構造系のある部分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関係曲線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化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_0 はエネルギー吸収機構による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。

γ_e 、 γ_y 、 γ_0 、 γ_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(3)に従えば、構造物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でき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構造物が持つ最大運動エネルギーを、速度と位相角が 90° ずれている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の提案を行った。さらに、これを限界状態設計法で採用されているフォーマットで表した。

すなわち、地震による構造物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。本耐震設計法の採用により、いわゆるレベル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。

謝辞：本論文は著者が委員長となっていた土木学会鋼構造委員会終局強度研究委員会耐震設計分科会の報告書を基に作成した。内容の一部は本委員の意見を受けた。ここに関係方面の方々に感謝の意を表するものである。

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(委員長倉西茂)平成8年5月