

5章 耐震性能の照査に関連づけて

質問 5.1 橋の限界状態とは具体的にはどのように設定するのですか？

回答 5.1

道示では、設計地震動をレベル1とレベル2に分けて、発生頻度の大きいレベル1の地震動に対する橋は耐震性能1を保有し、発生頻度は少ないが橋に大被害を与える可能性のあるレベル2の地震動に対しては耐震性能2または3を保有しなければならないとしています。ここでいう、耐震性能1とは、橋の機能性を保持できる状態で、その限界状態は、橋全体系の力学的挙動は弾性域を超えない限界と定めています。また、耐震性能2とは、弾性域を超えて塑性化する部材でのエネルギー吸収を期待し、部分的な塑性変形を許容するが、地震後に修復可能な範囲に留めることができる“修復性能”を保有すること、耐震性能3は、転倒防止と安全性の性能を保有することとなっています。したがって、橋の限界状態とは、上記の耐震性能の許容限界状態と言うことができ、道示は、このような耐震性能を有する橋の設計手法を規定しています。

質問 5.2 道示、耐震設計編(H24年版)、P.37の図一解5.1.1には、耐震設計の流れが示されており、レベル1またはレベル2地震動での橋の挙動が複雑である場合は、動的解析による照査を、複雑でない場合は、静的照査によるとありますが、橋の挙動が単純とか複雑とかはどのように判定するのですか？

回答 5.2

地震時の挙動が複雑でない場合とは、基本的には、地震時の挙動が1自由度系の振動問題として扱えることができることを意味しています。1自由度系の振動モデルとは、前述した図4.1-2(b)に示したように、一つの質量(M)と一つの弾性バネ係数(k)からなる最も簡単なモデルであり、上部工(重量 W)を支える単一の下部工に当てはめると、 $M = W/g$ 、 g ：重力加速度で、 k は上部工の重心において単位の水平変位を引き起こすための水平力の大きさと定義されます。このような1自由度系の振動モデルに対して、地盤面で水平地震加速度($\ddot{z} = \partial^2 z / \partial t^2$, z ：地盤面の水平変位)を受けると、上部工の水平応答変位(δ)は1自由度系の運動方程式により求めることができます。道示では、上部工の水平慣性力 $W(\ddot{z} + \ddot{\delta})/g$ 、ここに $\ddot{\delta} = \partial^2 \delta / \partial t^2$ 、を受け持つすべての橋脚と下部工からなる構造単位に対して、橋の地震時の主たる挙動が1自由度系の振動モデルで表せる場合を、地震時の挙動が複雑でない場合としています。

たとえば、図5.2-1に示すような単純支持桁の上部工と下部工からなる場合は、橋軸方向には上部工

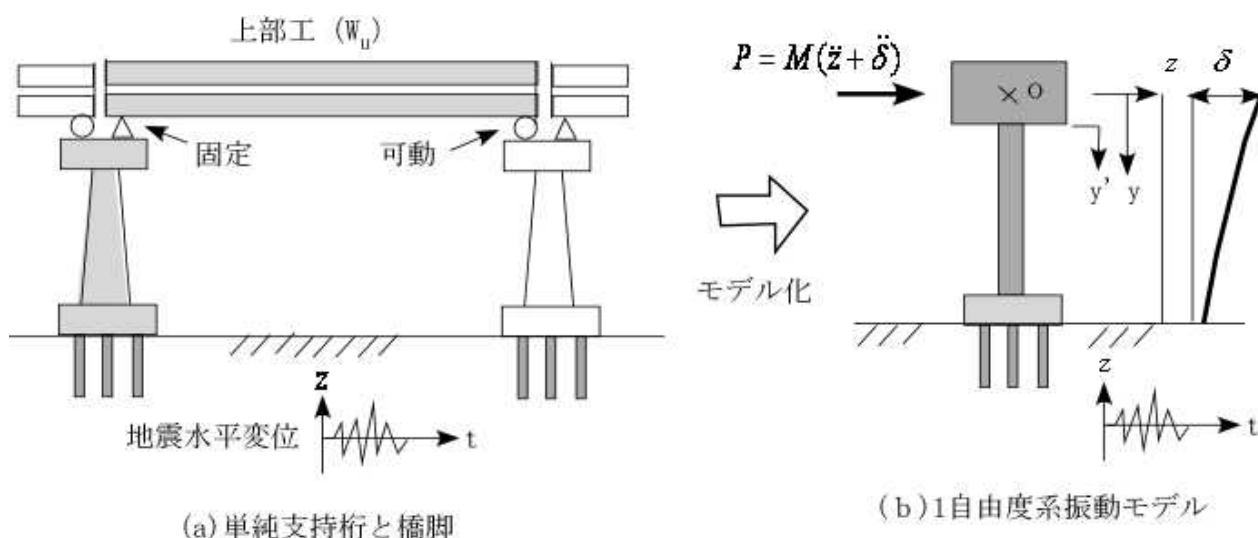


図 5.2-1 地震時の挙動が複雑でない場合の1自由度系の振動モデルの例

の全重量 (W_u) による慣性力は固定支承を通じて下部工に伝達するので、前述した図 4.1-2(b) で示した 1 自由度系の振動モデルを適用し、水平地震加速度 (\ddot{z}) による上部工の水平慣性力: $P = M(\ddot{z} + \ddot{\delta})$, ここに $M = W_u / g$, は上部工の重心 0 に作用し、復元力に寄与する弾性バネ係数 (k) は、重心 0 に単位の水平変位 ($\delta = 1$) を発生させる水平荷重 ($\bar{P} = k$) になります。

なお、上部工の水平慣性力 (P) は重心 0 に作用しますが、橋軸方向には、 P は固定支承を通じて橋脚上端に伝達し、上部工の重心 0 から固定支承までの偏心距離によるモーメントは隣接する複数の橋脚の軸力で支持されるので、橋脚および基礎の作用する曲げモーメントは $P \times y'$, ここに y' は橋脚上端からの距離になりますが、橋軸直角方向については、着目する橋脚が支持する上部工の自重 (W_u) による慣性力が上部工の重心 0 に作用し、橋脚断面および基礎に働く曲げモーメントは、重心 0 からの距離 (y) に慣性力を掛けた、 $P \times y$ になることに留意しなければなりません。

つぎに、地震時の挙動が複雑で、動的照査を必要とする橋は、5.6 耐震性能の照査方法, P. 52 の解説には、(1) 固有周期の長い橋 (1.5 秒以上)、たとえば、高さ 30m 以上の高橋脚、(2) 弾性支承を用いた地震時水平分散構造を有する橋、(3) 免震橋、(4) ラーメン橋、(5) 鋼製橋脚に支持される橋、(6) 斜張橋、吊橋等のケーブル系の橋、(7) アーチ橋、(8) トラス橋、(9) 曲線橋、などが挙げられています。これらの橋の地震時の挙動はいずれも 1 自由度系の振動問題では不十分で高次のモードの影響を考慮した多自由度系の振動問題として取り扱いが必要であるとしています。たとえば、図 5.2-2 に示すような橋脚の高さが 30m 以上になる高橋脚では、質量を上部工の重心に集中させた 1 自由度系の振動モデルは十分でなく、橋脚の分散質量も考慮した多自由度系の振動解析が必要になります。すなわち、多自由度系の振

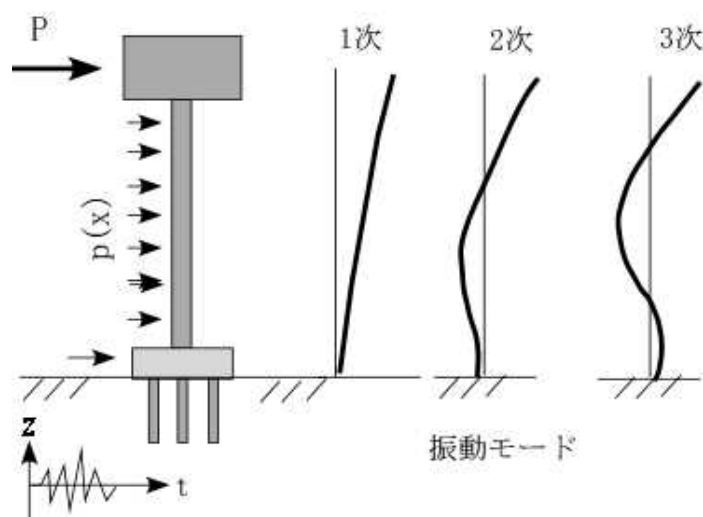


図 5.2-2 高橋脚の振動モード (概念図)

動モデルでは、橋脚上端の変位がピークになる 1 次モードだけではなく、橋脚の中間部に複数のピークが現われる 2 および 3 次以上の高次モードが現われ、それらの重なり合った変位モードに伴う断面力が支配する場合があります。なお、多自由度系の振動解析法については、後述の補足 A-2 で説明します。

なお、道示、6 章 静的照査法による耐震性能の照査方法では、1 自由度系の振動モデルで表される設計振動単位の例として、表一解 6.2.1 が示されていますが、単柱式橋脚、ラーメン橋脚や壁式橋脚などで支えられた直線状の桁橋の大部分は、地震時の挙動が複雑でない場合に当てはまるものと思われます。

質問 5.3 耐震性能 1 における橋の限界状態は地震時の挙動が弾性域を越えないことと規定されていますが、弾性域とはどのようなものですか？

回答 5.3

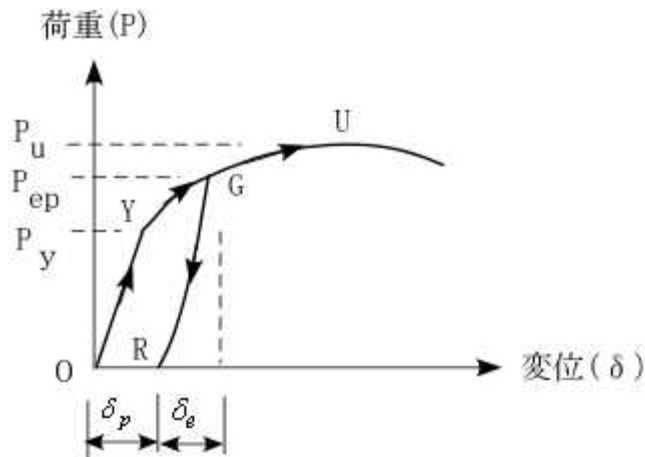


図 5.3-1 一般的な荷重－変位曲線

耐震性能 1 は、しばしば起こり得る地震に対する橋の限界性能であり、橋の構造部材に損傷があつてはならないという理由で、別途定めた構造部材の許容応力度および許容変位量を超えないように規定されており、それらの許容値は構造部材の変形の弾性範囲に留め、残留変形は認めず、地震終了後は元と状態に復元することが求められています。なお、鉄筋コンクリート橋脚部材では、荷重レベルの低い段階からコンクリートにひび割れが発生し、厳密には荷重－変位曲線は非線形になりますが、巨視的に見て、荷重－変位曲線がほぼ直線で、かつ塑性変形の影響が無視できると見なせる領域を弾性域と呼んでいます。

図 5.3-1 には、橋脚などに作用する水平荷重(P)と水平変位(δ)の一般的な関係を示していますが、荷重の小さい領域では $P-\delta$ 曲線はほぼ直線を示し、荷重を取り除く(除荷と呼ぶ)と原点 0 に戻り、残留変位は現われませんが、荷重がある大きさ(P_y)を越えてから除荷すると、変位の一部(δ_e)は戻りますが、残留する変位(δ_p)が現われます。ここに、 δ_e を弾性変位、 δ_p を塑性変位(または残留変位)と呼んでいます。弾性域とは、図 5.3-1 の領域 0-Y を意味し、領域 Y-U、U は最大荷重、を弾塑性域と呼んでいます。道示では、レベル 1 の地震に対しては、全ての部材で弾性域にとどめ、レベル 2 地震動に対しては、一部の部材では弾塑性域に入ることを許容するが、橋の安全性と機能性の保持のために、残留変位(δ_p)の大きさに制限を加えるという設計思想を採用しています。

質問 5.4 耐震性能 2 に対する橋の限界状態では、橋の構造部材の一部に塑性変形が発生しても、地震後には修復が容易である範囲内で認めるとしており、塑性化する部材は、エネルギー吸収が期待できる部材とされていますが、地震時の部材のエネルギー吸収とはどのような効果をもたらすのですか？

回答 5.4

地震時に部材が塑性化(前述の図 5.3-1 では領域 Y-U に入る)すると、地震後には変形が残留し望ましいことではありません。しかし、レベル 2 のような巨大地震に対しても部材の塑性化を認めず弾性域に止めるならば、部材断面が非常に大きくなり経済的な設計にはなりません。そこで、発生確率は低いですが、起こると甚大な被害を及ぼす巨大地震の際には、一部の部材に塑性化が起こり残留変形を伴う損傷が発生しても、地震後に修復が容易な程度の損傷に留めることができれば、部分的な塑性化を認める規定が採用されています。

塑性化によるエネルギー吸収とは何か?という質問に対しては、図 5.4-1 に示すように、弾性域を越えて塑性域に入った部材の荷重(P)－変形(δ)の関係において、負荷履歴: 0-Y-A と除荷履歴: A-B-P が異なる径路を辿り、負荷時の変形エネルギー(全ひずみエネルギー)は、除荷によって回復するエネルギー(A-B-P が描く面積)と散逸するエネルギー(0-Y-A-P-0 が描く面積)の和になり、回復エネルギーが弾性エネルギーで、散逸エネルギーが塑性エネルギーであり、荷重履歴による散逸エネルギーを吸収エネルギーと呼んでいます。また、正負交番繰返載荷を受ける部材の $P-\delta$ 曲線は図 5.4-2 のようになり、履歴曲線が描く面積(影を付けた部分)が 1 サイクルによる吸収エネルギー

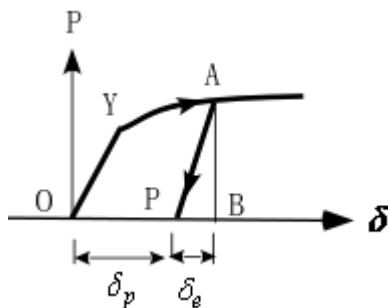


図 5.4-1 弾塑性部材の負荷と除荷履歴

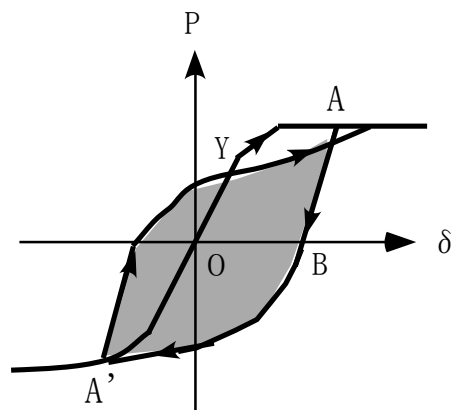


図 5.4-2 正負交番負荷による履歴曲線の例
(鉄筋コンクリート部材)

に相当します。吸収エネルギーは橋の振動を減衰させ、地震動による動的応答荷重を減少させる効果を発揮するので、弾性域を越えて塑性域に入っても、部材は一定の強度を保持したまま変形できるようなねばり強い特性を有する橋脚を採用すれば、地震応答荷重の大きさを減少させることにより、経済設計が可能になります。

質問 5.5 前問に関連させて、主たる塑性化を認める部材と副次的な塑性化を認める部材があり、それらを組み合わせてエネルギー吸収を考慮するようになっていますが、主たる塑性化と副次的な塑性化とはどのように違うのですか？

回答 5.5

主たる塑性化の部材とは、**回答 5.4** での図 5.4-1 の $P-\delta$ 曲線において、大きな塑性変形 (δ_p) を認め、有意なエネルギー吸収を期待する部材を意味します。例として、単柱式 RC 橋脚においては、柱下端部に塑性ヒンジ（詳細は後述します）を発生させ、大きな塑性変形によるエネルギー吸収を期待できます。一方、副次的な塑性化のみを認める部材とは、弾性限界を越えることは認めてもわずかな塑性変形量に制限し、エネルギー吸収は期待しないが、部材の機能を損なわないような最小限の損傷に留める部材であり、たとえば、ラーメン橋においては、車両の通行機能を有するはり部材が該当します。前述したように、レベル 2 地震のような巨大地震時には、全ての部材が弾性範囲に留めるような設計は不経済であり、エネルギー吸収による耐震性能を発揮するためには、地震後の損傷の修復が容易なように、塑性化する部材を適切に組み合わせねばなりません。道示、**図一解 5.3.1** には、部材の組み合わせの例が示されており、たとえば、単柱式橋脚では、柱下端の塑性ヒンジのような主たる塑性化を認め、基礎は副次的な塑性化に留め、ラーメン橋では、橋軸方向の地震時には、主たる塑性化は柱の上下端の塑性ヒンジにより、副次的な塑性化ははり部に留めるようにしています。

道示、**耐震設計編 (H24 版)** では、旧規定にはない新たな条項：**5.5 地震の影響を支配的に受ける部材の基本**、が設けられており、その中で、(1)地震の影響を支配的に受ける部材については、1)実験等の検証により、破壊形態が明らかであり、それに応じた安全性が確保されること、2)耐震設計で設定する限界状態までは、安定的に挙動することが確保されること、(2)地震の影響を支配的に受ける部材については、部材抵抗特性の評価法が明らかでなければならないとしています。

以上のように、レベル 2 地震動でのエネルギー吸収を期待する設計では、必要な耐力を保持しながら十分な塑性変形能が確保できる部材の組み合わせを求められており、安全性の照査のための構造解析は弾塑性非線形理論に頼らなければならないだけでなく、適用する解析モデルは事前に慎重に吟味しなければならないと言えます。

以上