

2004年 11月 29日

土木学会鋼構造委員会 鋼構造イブニングセミナー(第2回)
「鋼橋の耐震設計の基礎とその応用」
質問と回答

平成 16年 11月 4, 9日に行われた標記の講習会において, 質問された事項の回答を以下に示します. なお, 回答は, 講師が各自の考えに基づいて作成したもので, 必ずしも講師全員の見解を反映したものではありません.

1. 概論 (回答者: 宇佐美勉)

Q1: 終局ひずみの算定式について(テキスト p.54 表 2.5.1(1)式) 正確な値は覚えていないのですが, (1)式において鋼材に SM400 材を使用した場合, $R_f \bar{\lambda}_s^{0.18} < 0.18$ なる断面を構成出来たと思います.(T型橋脚 柱 30000×2800, 板厚 45mm)
このような場合, $\varepsilon_u/\varepsilon_y$ を算出出来なくなりますが, $\varepsilon_u/\varepsilon_y = 20$ としても問題がないかどうか, ご回答をお願いします.

A1: そのような処置で問題ありません. ただし, テキスト p.12 に書きましたように, あまり厚肉の部材を变形性能ぎりぎりまで使うと脆性的破壊の心配が出てきますし, 残留変形も大きくなりますので, 幅厚比パラメータは 0.35 前後にし, 応答ひずみを低減する工夫をするのがよいと思います.

Q2: 残留変位の照査について

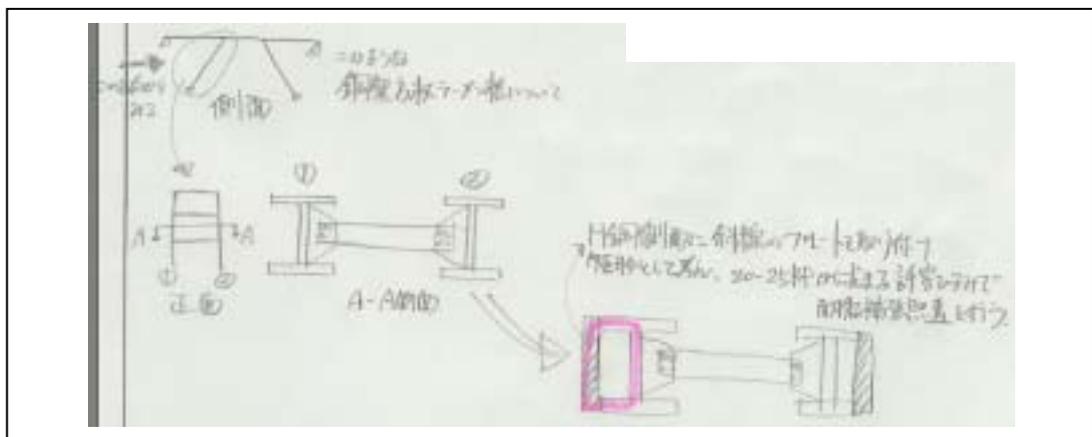
テキスト p.48 の残留変位の算定式はラーメン橋脚(面内)やラーメン橋(橋軸)にも適用可能でしょうか? その際の y はラーメン構造としての y (pushover 解析等で算出)として考えてよいのでしょうか?

A2: そのような処置で結構かと思います.

Q3: 照査法において, ラーメン梁部が健全度 3 とあるが, 鉄道の場合, 軌道を支持するということで梁は健全度 2 としているように思います. 道路と鉄道の考え方の違いなのか? また, 違いがあれば教えてください.

A3: 鉄道橋と道路橋は橋に持たせるべき耐震性能に違いがあるものと思います。提案設計法の場合も、最重要構造物に対しては耐震性能2ということで、橋脚に要求される健全度は2です。一般の鋼製橋脚でも、例えば名古屋高速道路公社の設計基準では主たる塑性変形は橋脚にさせ、梁はできるだけ損傷させない設計法をとっています。これは、鉄道橋の場合と同じ理由であると考えます。

Q4: H鋼の橋脚で下図のような補強することに関して何か意見があればお願いします。



A4: 地震応答解析して応答ひずみとひずみ限界値を用いて性能照査をすればよいと思います。現在、H型断面部材についても変形性能照査式を作成中で、将来的にはH鋼部材に対しても耐震性能照査ができるようにしたいと思っています。

2. 解析法 (回答者: 中島章典)

Q1: レイリー減衰の2つのモードを選ぶ根拠に困ることが多いです。橋脚が単体で動くモードなどは刺激係数が高くても有効質量が伴わないこともあります。なにか明確な基準はあるのでしょうか？

A1: 残念ながら明確な基準はないと思います。なお、刺激係数と有効質量の定義式を見ただけであればわかるように思いますが、刺激係数は大きいけれども有効質量は小さいということはないと思います。

動的解析時の減衰として、1)粘性減衰を仮定する、2)同種の橋梁形式について、低次の

振動モードの減衰定数に関する実測値の情報がある，3)対象とする構造物の動的挙動に支配的な振動モード（低次モードあるいは刺激係数・有効質量が大きい）の仮定する減衰定数が，そのモードの実測値に近い，という条件でレーリー減衰を仮定するのが1つの考え方であると思います．

同種の橋梁形式の減衰定数に関する実測値がなければ，例えば，橋脚の振動あるいは基礎部分の振動が卓越する振動モードなどの減衰定数が，一般的に用いられている値になるように設定するしかないと思います．

3. 照査法（回答者：野中哲也）

Q 1：ファイバーモデルについて

例えば，鋼製橋脚のファイバーモデルを作成する際の適切なファイバー分割方法を定めたものはあるのでしょうか？細かく分割すれば精度良く結果が得られるが，その分，解析に時間がかかり，設計の手段として使いにくくなる．

A 1：鋼製橋脚に対するファイバーモデルの断面分割については，以下の文献が参考になります．この文献からも，断面方向には1 2分割，部材軸方向の要素分割（単柱形式の場合）は2 0分割程度で精度的には十分であると思います．実務の耐震設計においても，この程度の分割をすることが多いようです．最近ではコンピュータの性能が向上してきたため，以前よりは多少細かく分割しても気にならなくなってきたと思います．

（文献）

1) 土木学会・日本鋼構造協会：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，土木学会鋼構造委員会・日本鋼構造協会次世代土木鋼構造特別委員会（委員長：宇佐美勉），pp.123-125，2000.4.

Q 2：ファイバーモデルで板厚を分割する必要があるのでしょうか？（テキスト p .55）その理由を教えてください．

A 2：フランジの板厚方向においても，多少の応力勾配はあります．応力を評価する点（積分点）を，2点にするとその勾配が表現でき，計算精度が高くなります．解析時間も関係しますので，通常は2分割で十分です．以下の文献にも，2分割で十分であることが示されています．

なお、テキスト p.55 の分割例は、2方向（橋軸方向と橋軸直角方向）から荷重を作用した場合にも適用できるような分割になっておりました。この例に限れば橋軸直角方向の荷重を考えているので、ウェブに対しては板厚方向に分割する必要はありません。ただし、解析ソフトによっては、2分割以上にする方が計算上も安定して解けるような場合があり、板厚方向には2分割することをお勧めします。

（文献）

1) 土木学会・日本鋼構造協会：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，土木学会鋼構造委員会・日本鋼構造協会次世代土木鋼構造特別委員会（委員長：宇佐美勉），pp.123-125，2000.4.

Q 3：Q: テキスト p.45 ,表 2.1.1 において道示の M- モデルはラーメン構造に対し「×」となっていますが，ラーメン構造には M- モデルは全く使用できないということでしょうか？

A 3：道示方式の M- モデルでは，計算上，軸力変動が考慮できないことから，適用不可の「×」としましたが，以下のような文献で発表されていること，および以下の条件を満足すればラーメン橋脚に対しても適用可能であることから，適用不可の「×」ではなく，限定的に適用可の「○」が正確だと思います。このように訂正させていただきます。

（条件）

- 1) 軸力が制限値 $0.2N_y$ を超えない。
- 2) 柱隅角部および梁部の塑性化を考慮しない。
- 3) 軸力変動を考慮しない。

（文献）

1) 小野潔，西村宣男，高橋実，野中哲也，坂本佳子：M - 関係を利用した矩形断面鋼製ラーメン橋脚面内方向の耐震性能評価に関する一検討，第5回地震時保有水平耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，pp.81-88，2002.1.

Q 4：テキスト p.43 の「新設に限れば日本道路公団や阪神高速道路公団が JSSC 方式を用いている」とありますが，正しいのでしょうか？

A 4：日本道路公団および阪神高速道路公団の新設高架橋の設計において、メーカーが JSSC 方式を採用した事例があったため、このような記述にしました。正確にこのように言い切るには、さらに事実関係を調査する必要があるかと思っております。したがって、事実関係がはっきりしない現況においては、この部分「新設に限れば日本道路公団や阪神高速道路公団」の記述を省略させていただきます。

4. 橋脚（回答者：小野潔）

Q1: 橋脚の実験に関する説明で、従来どれくらいのスケールで実験を行うのが標準だったのか教えてください。

A1: 実験供試体の大きさは、載荷装置、試験機の性能等に大きく影響されるため、標準的なスケールを提示するのは困難かと思えます。ただ、例を紹介するということであれば、板厚 4.5mm、外形寸法 170mm×110mm、高さ 760mm 程度のスケールの実験供試体を用いて実験を行った例もあります。

Q2: 動解時の鋼製橋脚のモデル化において、鋼製橋脚はコンクリート橋脚と違い、塑性ヒンジという考え方がありませんが、全部材を M-モデル化して照査する場合、 y を超えているか否かの照査を行う必要はありますか？（コンクリート橋脚では塑性ヒンジ以外の箇所の降伏判定を行うため）

A2: 設計上、対象とする部材を塑性化させないとするのであれば、当然、その部材については塑性化していないことを確認する必要があると思えます。

Q3: H14 道示より設定された残留変位の照査式

$$\delta_r = c_R(\mu_r - 1)(1 - r)\delta_y$$

について、式中の降伏変位はモデル化で示されている M-関係から求めるものであると考えますが、具体的な算出方法を教えてください。また、上記による y の算出は汎用ソフト等がなく、非常に煩雑な作業であります。実務上どのような対応がなされているかお聞かせ下さい。

A3: y の算出方法については、道示 V の 11 章の解説に記述がありますので、そちらを

参照いただければと思います。

- ・ y の算出の汎用ソフトの質問については、ソフトメーカーの方にご確認いただければと思います。

5. 連続桁橋（回答者：川神雅秀）

Q1: 制震ダンパーの種類、使用例、設計方法を詳しく知りたいので資料、例等を教えてください。

A1: 制震ダンパーには粘性型ダンパーと履歴型ダンパーがあります。粘性型ダンパーとしては、オイルダンパーや粘弾性体ダンパーが代表的です。履歴型ダンパーは、鋼材ダンパー（座屈拘束ブレース等）、鉛ダンパー、摩擦ダンパーなどがあります。これらの装置の製造または販売メーカーとしては、下記が代表的です。

粘性型ダンパー：カヤバ工業、川口金属、トキコ、オイレス工業、他

履歴型ダンパー・鉛ダンパー・摩擦ダンパー：オイレス工業、他

鋼材ダンパー：鉄鋼メーカー（新日鐵，JFE，住金，神鋼）ゼネコン（竹中，鹿島等）

国内の橋梁に耐震用の制震ダンパーを採用した実績は欧州等に比べて少ないようですが、最近では耐震補強を行う際に利用される事例が徐々に増えてきました。制震ダンパーの種類、使用例、設計方法を理解するには、下記の文献が役立つと思います。

（文献）

全般的な内容

1) 日本鋼構造協会・鋼橋の性能照査型耐震設計法検討委員会：土木鋼構造物の動的耐震性能照査法と耐震性向上策,第3編 展開 2.制震構造,pp.278-297,2003.10

2) 建設コンサルタント協会近畿支部：鋼・複合橋梁の性能照査型設計法確立に向けて,鋼・複合橋梁の性能照査型設計法調査研究委員会報告書,第4編,pp.212-227,2004.9

粘性型ダンパー

3) 藤井他：河川を横過する既設橋梁の支承改造による耐震性強化事例，

4) 免震・制震コロキウム講演論文集, Vol.2, pp. 233-240, 2000

伊関治郎：粘性せん断型ストッパー・多径間連続橋への一提案,橋梁,1980,2

5) 伊関治郎：ダンパーを用いた多径間連続橋の耐震設計,橋梁と基礎,1982,5

履歴ダンパー

6) 斎藤他：摩擦履歴形ダンパーの適用とその事例，第6回地震時保有水平耐力法に

基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, 2003.1

7) 吉崎他 : 3次元大型振動台試験によるダンパーを併用した免震支承の動的挙動の確認, 橋梁と基礎, 2003.10

8) 高木他 : ダンパ - 制震によるフレキシブル構造の全体系を考慮した耐震補強, 土木学会第 58 回年次学術講演会, I-035, 2003.9

9) 栗山他 : 制震構造による橋梁耐震補強の検討, 土木学会第 59 回年次学術講演会, I-035, 2004.9

Q2: 桁衝突させたときの桁またはパラペットの照査方法を教えてください。

A2: 桁またはパラペットの照査方法については、現在のところ統一的な設計方法としては整備されていません。設計にあたっては、橋台パラペットの損傷を許容するかどうかの是非、橋脚の損傷を軽減させるために必要な桁遊間量の算定、桁の遊間量を制限することで温度変化等により桁に生じる拘束応力の把握、さらには桁遊間量と衝突力との相互関係、衝突力を緩和するための緩衝装置の必要性等を総合的に検討したうえで設計作業に入る手順となります。

耐震性の向上策として、両端橋台により上部構造の地震時変位を拘束し橋脚の損傷を軽減させる対策を講じる場合は、例えば、以下の文献等を参考にすればよいと思います。

(文献)

1) 田崎賢治・幸左賢二等: 台湾集集地震における長庚橋の桁衝突解析, 構造工学論文集 Vol.49A, pp.573-580, 2003.3

2) 田崎賢治・幸左賢二等: 桁衝突解析における橋台部の抵抗特性とモデル化に関する一考察, 第 59 回年次学術講演会 (土木学会), 2004.9

3) 大塚久哲・田中智行等: 有限要素法による鋼連続箱桁橋の桁端衝突解析, 橋梁と基礎, pp.39-45, 2002.12

4) 西岡勉・運上茂樹: 両端部に橋台を有する既設連続桁橋梁の地震時挙動に関する研究, 既設構造物の耐震補強に関するシンポジウム論文集, pp.23-30, 2002.11

5) 庄司学・川島一彦: 桁間衝突を低減するための緩衝装置の有効性, 第 1 回地震時保有水平耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文, pp.203-206, 1998.1

6) 小林寛・運上茂樹・西岡勉: 両端部に橋台を有する既設橋梁の橋全体系に着目した耐震補強法の検討, 第 7 回地震時保有水平耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, 2004.1

Q3: R C 橋脚の耐震性能照査に関して、動的解析を用いる場合について教えてください。

A3: R C 橋脚の耐震性能照査は、道路橋示方書・同解説 耐震設計編の「5.5 耐震性能の照査方法」で示すように、ゴム支承を用いた地震時水平力分散構造を有する橋の場合には動的照査法を適用する必要があります。従って、静的照査法は地震時の挙動が複雑でない橋、例えば、固定支持構造に適用することとなります。なお、解説にも述べられていますが、動的解析は地震時の挙動が複雑でない橋に対しても適用することができます。

Q4: 分散構造の支承設計であるが免震支承を適用する場合、下部工へ与える影響はありませんか？

A4: L 2 地震に対する耐震安全性を担保する方法として免震支承を使用する場合のご質問かと思えます。この場合の免震支承は、エネルギー吸収による地震力の低減を期待しない地震時水平力分散ゴム支承としての扱いとなります。即ち、道路橋示方書・同解説 耐震設計編の 9.1 では、免震橋の減衰定数に基づく設計地震動の低減は行わないこととし、通常のゴム支承の減衰定数程度を用いるものとしています。

このような構造を採用した場合は、以下について注意が必要と考えます。

免震支承はゴム支承に比べ初期剛性が大きいため、常時における上部構造の二次応力（温度変化や乾燥収縮等により発生する拘束応力）が増加する可能性があり、この二次応力が下部構造に影響を及ぼさないかについて事前に検証を行っておく必要があると考えます。

免震支承を地震力の低減を期待しない地震時水平力分散ゴム支承として使用する場合、下部構造の設計は、道路橋示方書・同解説 耐震設計編の 9.1 によると、ゴム支承を有する橋脚と同様の許容塑性率を算定することとしています。このことは、橋脚基部の塑性化域と免震支承部の二箇所地震エネルギーを吸収することとなり、免震支承単独での慣性力低減効果は少ないものと思われるので、事前に効果を確認することが必要と考えます。

高橋脚や特殊な形式で下部構造のたわみ性が大きく固有周期の長い橋、あるいは、地盤が軟弱な場合では、長周期化による慣性力の低減効果が小さく、あえて耐震安全性を担保する方法として免震支承を採用しても効果が薄いのではと思われるので、事前に確認することが必要と考えます。

6. アーチ橋（回答者：深谷茂広）

Q1: アーチ橋に関して、部材の塑性化を考慮した設計について教えてください。

A1: 橋に要求する耐震性能を現行の道路橋示方書に照らし合わせて設定し、その性能を満足させるために、上部構造のどの部材に塑性化を許容し、どの程度の塑性化を許容するかを検討して、決める必要があります。また、上部構造に塑性化を許容する場合には、その部材に対する塑性域での耐力および変形性能が分かっていることが前提になります。

例えば、道路橋の耐震性能 2 が要求される鋼アーチ橋では、落橋に対する安全性、地震後の橋としての機能を速やかに回復できる供用性、機能回復のための修復が応急修復で対応できる短期修復性、比較的容易に恒久復旧を行うことができる長期修復性を満たすことができるように、上部構造の塑性化を許容する部材と塑性化の程度を検討する必要があります。また、塑性化を許容する場合は塑性域での耐力及び変形性能について実験又は適切な手法による解析に基づいて設定する必要があります。

道路橋示方書に基づく新設の鋼アーチ橋の設計は、現状では全ての部材に対して弾性設計されているのが一般的のようです。鋼アーチ橋の上部構造に塑性化を考慮しないで耐震設計を行う場合、弾性範囲内にあることの照査だけでなく、座屈に対する照査も必要になります。従いまして、道路橋では主桁やアーチリブだけでなく、ラテラル、斜材、支材についても弾性域とするとともに、座屈しないように設計されているのが一般的のようです。

日本鋼構造協会の鋼橋の性能照査型耐震設計法検討委員会において、上部構造の軽微な損傷と考えられる許容ひずみについて、地震後の使用性という観点で残留変位を尺度として非線形動的解析をもとに検討されています。軽微な損傷としては、地震後の残留変位が橋脚高 h の 300 分の 1 以下と考え、それを満足する鋼製橋脚の最大応答ひずみは降伏ひずみの 2 倍までという結果が得られています。

しかし、アーチ橋を構成する多くの部材は軸方向力が卓越し、地震時には曲げモーメントだけでなく軸方向力の繰返し作用を受ける。このような部材を対象とした繰返し載荷実験あるいは適切な手法による解析に基づいた耐力および変形性能に関する調査研究は少なく、このような部材の塑性化を考慮した耐震設計に用いることができる状況に至っていないのが現状と考えられます。

（文献）

1) 日本鋼構造協会：土木鋼構造物の動的耐震性能照査法と耐震性向上策，鋼橋の性

能照査型耐震設計法検討委員会（委員長：宇佐美勉），2003.10.

Q2: 塑性化した部材は取り替えるのでしょうか？取り替えずに供用して良いかの判断はどのようにするのでしょうか？

A2: 兵庫県南部地震により鋼製橋脚はかなりの数で塑性化しておりますが，崩壊した橋脚を除き，大多数は塗装の補修，断面の修復ないし補強により，供用されています．鋼製橋脚の繰返し载荷の結果によれば，補剛板の局部座屈が生じ始めるレベルまでは，橋脚の耐力および変形性能は塑性化前の橋脚とほぼ同等と考えて良い．そのため，塑性化の程度が小さい範囲では，耐力にはほとんど影響しないので供用することは可能，さらに塑性化が進み補剛板の局部座屈による残留変位，部材の残留変位が観察される状態でも，部材として必要な耐力が維持されていれば供用可能と考えられ，それ以上の残留変位あるいは溶接割れが生じていれば断面修復あるいは補強により供用することが可能と考えられます．

取り替えについて検討する必要がある損傷とは，補剛板の局部座屈による残留変位，部材の残留変位あるいは溶接割れに対する修復あるいは補強が困難なレベルにある場合と考えられます．

供用して良いかどうかを判断するには，橋が必要な安全性を確保しているかどうかについて判定する必要があります．少なくとも損傷を受けた部材が要求される耐力を保持できていれば，あるいは補修・補強により必要な耐力が確保されれば，橋としての安全性が確保されると考えられるので供用可能と考えられます．損傷を受けた部材が必要な耐力を確保できているかどうかは，類似する断面に対する実験結果あるいは適切な解析結果をもとに判断することが望ましいと考えます．

Q3: 耐震設計されていないアーチ橋はレベル2地震対応の補強をするべきなのでしょうか？

A3: 将来，内陸直下のレベル2地震動が生じないことが保証されている地域は無いと思います．そのため，レベル2の地震動に対する耐震診断，耐震性が確保されていない橋に対する耐震性向上あるいは耐震補強が必要と考えます．アーチ橋の耐震補強は確かに大がかりになる可能性があります，コンクリート充填補強などの比較的容易で効果的な補強を検討するほか，免震支承の設置あるいはエネルギー吸収デバイスの設置による

耐震性向上を図り、アーチリブや下部構造の補強あるいは支承の取り替えを必要としないで済むような方法は十分考えられます。耐震性向上に関しては、下記の文献が参考になります。

(文献)

1) 日本鋼構造協会・鋼橋の性能照査型耐震設計法検討委員会：土木鋼構造物の動的耐震性能照査法と耐震性向上策，2003.10.

2) 金治英貞，北沢正彦，鈴木直人：長大ゲルバートラス橋の耐震補強に関する地震応答解析と損傷制御設計，土木学会既設構造物の耐震補強に関するシンポジウム，2002.11.

Q4: 下路式アーチ橋に較べ上路式アーチ橋の方が耐震性に劣る理由を教えてください。

A4: セミナーにおいて、下路式に比べ上路式アーチ橋の方が耐震性に劣ると表現したとすれば、言葉足らずでしたので、この表現は撤回致します。

講演者が言いたかったことは、次の点です。

- ・アーチ橋の慣性力の大部分は床版と補剛桁の慣性力である。
- ・下路式アーチ橋では、床版・補剛桁の慣性力は、アーチリブをほとんど経由しないで、直接支承を介して下部構造に伝達される。
- ・上路式アーチ橋では、床版・補剛桁の慣性力の大部分はセンターポストおよび鉛直材を介してアーチリブに伝達され、アーチの支承を介して下部構造に伝達される。
- ・そのため、上路式アーチ橋では、アーチリブ、鉛直材および端柱の耐力および変形性能が橋の耐震性能に大きく影響する。

上路式アーチ橋は振動性状が複雑なため、耐震設計は動的解析が必要です。

Q5: 横構とアーチリブの結合はピン結合となっていますが、バネ等で結合した解析事例はありますか？(横構に曲げが入るとさらに横構の塑性域が広がると思いますが、いかがでしょうか？)

A5: 横構とアーチリブとの結合はピン結合が一般的ですが、剛結合で曲げの影響を考慮する事例は見かけます。バネで結合した解析事例に関しては、講演者は把握していません。

以上