

8. 橋梁免震・制震

とりまとめ：三上 卓 ((株)エイト日本技術開発)

論文題目：“アルミニウム合金製BRBの低サイクル疲労特性”

著者：舟山淳起，今瀬史晃，宇佐美勉，王春林  
 掲載：Vol.58A, pp.448-458, 2012年3月

◆討議 [坂野昌弘 (関西大学)]

S-N線図の縦軸のひずみはこのひずみですか。

◆回答： $\Delta\epsilon$ -N線図の縦軸はBRB芯材平行部の平均軸ひずみ（平行部の軸方向変形量/平行部の長さ1,375mm）を基に算定したひずみ範囲（図-7）です。本来Manson-Coffin則は局部的なひずみ範囲と疲労寿命の間に成り立つ関係ですが，実務への適用の見地からは，上で定義した平均ひずみで表した関係式が便利であることは明白です。

◆討議 [中村聖三 (長崎大学)]

- 1) 今回対象としたBRBで，Miner則が成立するのか否か
- 2) BRBの使用板厚，長さ等の諸元が変わると局部ひずみは平均ひずみが同じでも異なり，評価式が変化するのではないか？

◆回答：

- 1) 比較的小さいひずみ振幅の繰り返しで破壊が生ずる低サイクル疲労領域ではMiner則が成立すると言われていきます（文献D1および同文献中の引用文献9編）。文献D1)では，局所ひずみの最大絶対値 $|\epsilon_{max}|$ が0.127以下であればMiner則が適用できるとしています。これは鋼材に対する提案ですが，2)の討議とも関連するので，BRBの局所ひずみがどの程度の大きさになるか算定してみます。文献D2)，D3)には，鋼製BRBの平均ひずみと局所ひずみの次の関係式が提案されています。

$$\Delta\epsilon^{local} = \alpha_c \cdot \Delta\epsilon \quad (1)$$

$$\alpha_c = 1 + 3 \frac{\sigma_y}{E_t \cdot \Delta\epsilon} \left\{ 2 \frac{d}{t} - \left( \frac{d}{t} \right)^2 \right\} \quad (2)$$

ここに， $\Delta\epsilon^{local}$  = BRBに生ずる局部的なひずみ範囲（最大値）， $\alpha_c$  = 平均ひずみ範囲を局部的なひずみ範囲に変換する係数， $E_t$  = BRBの接線剛性， $d$  = 隙間量， $t$  = BRBの厚さ， $\sigma_y$  = 降伏応力です。SS400 (=235MPa)のBRBに対して提案されている  $E/40$  を用いて式(2)を数値計算したものが図-D1です。

本研究のBRBはアルミニウム合金で鋼製BRBとは必ずしも性質が同じではありませんが，本BRBでは  $d/t = 0.1$  であるので，値は，1.3~2.3程度であるこ

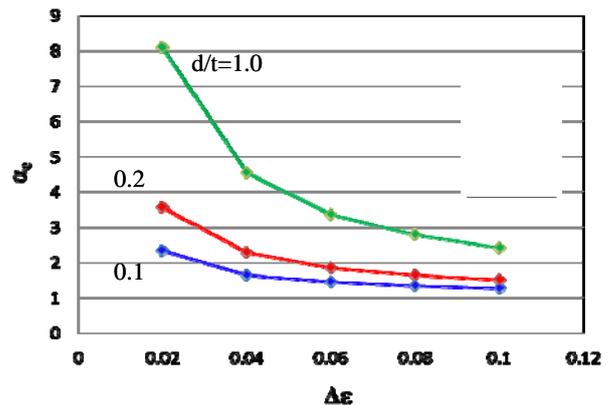


図-D1 平均ひずみを局所ひずみに変換する係数

とが分かります。例えば，高機能BRBの限界ひずみ  $\epsilon_u = 0.03$  ( $\Delta\epsilon = 0.06$ )では，1.45であるので，局所ひずみは0.0435，局所ひずみ範囲は0.087です。この局所ひずみの値は，文献1)のMiner則が適用できる限界局所ひずみ $|\epsilon_{max}| = 0.127$ より遙かに小さいひずみです。従って，Miner則の適用は文献1)に従えば問題ないと考えています。

- 2) 式(2)より明らかのように， $d/t$ を一定にする限り $\alpha_c$ は変わらず，局所ひずみと平均ひずみの比は変わりません。ちなみに，鋼製BRBに対しては， $d/t \leq 0.2$ が提案されています<sup>D4)</sup>。

参考文献

D1) 判治 剛：鋼材の極低サイクル疲労強度に関する研究，名古屋大学提出学位論文，2006.1  
 D2) Matsui, R. and Takeuchi, T.: Effect of local buckling of core plates on cumulative deformation capacity in buckling-restrained braces, STESSA 2012, Chile, 2012, pp. 609-613.  
 D3) Wang, C.L., Usami, T. and Funayama, J.: Improving Low-cycle Fatigue Performance of Buckling-restrained Braces by Toe-finished Method, Journal of Earthquake Engineering (in press)  
 D4) 宇佐美勉，加藤基規，葛西昭：制震ダンパーとしての座屈拘束ブレースの要求性能，構造工学論文集，Vol.50A, pp.527-538, 2004.3

論文題目：「サブストラクチャ応答実験による高機能座屈拘束ブレースの地震時応答解析」

著者：渡辺孝一，吉野廣一，篠田将旭，山口亮太  
掲載：Vol.58A, pp.459-470, 2012年3月

◆討議 [武田篤史 ((株)大林組) ]

バイリニアモデルと実験値では、実験値の方がBRBのエネルギー吸収が小さいため、バイリニアモデルでの設計は危険側になるのではないのでしょうか。

◆回答：ご質問に対し、論文にお示した「図-14」あるいは、「図-15」に示す地震時応答履歴、ならびに「表-7 エネルギー吸収量集計」により回答させていただきます。地震時応答履歴から、サブストラクチャー応答実験(図中のキャプションの「Hybrid」)と、バイリニアモデルを仮定した解析モデル「Analysis」では、明かにバイリニアモデルによる骨格曲線が、サブストラクチャー応答実験よりも大きなエネルギー吸収であることがわかります。この両者の差異を集計したものが表-7です。表-7に関して、入力地震波の違いにより若干の違いはあるものの、バイリニアモデル(解析)の吸収量が大きめとなることを論文中に明記しています。しかし、直ちに危険側の推定となるという判断の結論づけはしていません。

ところで、サブストラクチャー実験の特徴は解析のように様々なパラメータを考慮した構成則を必要とせず、材料の物性や対象となる供試体の幾何学的初期不正などを含めて、運動方程式から得られる計算変位に対する実際の反力(応力)を取得して、逐次地震時応答を推定できることが利点です。本論文で取り扱った高機能座屈拘束ブレース(BRB)の場合は、橋梁等構造物の地震時エネルギーを吸収するダンパーそのものであり、その応答は制震効果を判断する上で重要と思われます。特に、地震時の最大応答と残留変位は構造物の損傷程度に直接関わります。論文では、最大応答について「図-14(a)」および「図-15(a)」で示しているように、応答実験と解析との両者の推定値は同程度であることを示しています。一方、残留変位は解析が大きいいため、論文で示した結果では、解析側が安全側に評価していることとなります。しかしながら残留変位の大小は様々な条件によって変化するため、安全、危険を議論するには、検証不十分と判断しています。

以上のように、構造物の設計は比較する手法による、エネルギー吸収量の大小のみで判断できない部分が多々あります。サブストラクチャー実験の利点と解析の簡便性の双方のメリットを活かした設計手法を確立することが必要であると考えております。

論文題目：「履歴型ダンパーを有する鋼管集成橋脚の地震応答特性」

著者：篠原聖二，金治英貞，鬼木浩二，杉浦邦征  
掲載：Vol.58A, pp.471-483, 2012年3月

◆討議 [武田篤史 ((株)大林組) ]

パラスタを行った時、応答スペクトルが同じでも位相特性の違いによるバラツキが出てくると思います。どの様に考えるべきか、コメントをお願い致します。

◆回答：本論「4.3 非線形非線形時刻歴応答解析」において、同じ加速度応答スペクトルを有し、振幅調整する前の強震記録波形が異なる入力地震波が、鋼管集成橋脚の地震応答特性に与える影響を検討した結果を示しています。今回用いた道路橋示方書Vのレベル2タイプIIのNo.1~No.3の範疇では、入力地震波の加速度応答スペクトルが同じであれば、位相特性の違いによる地震応答特性のバラツキはあまりみられませんでした。

◆討議 [葛西 昭 (熊本大学) ]

- 1) 集成する橋脚の本数を4本とされた理由を教えてください。
- 2) 桁と集成橋脚の向きの違いによる検討はされたのでしょうか。

◆回答：

- 1) 鋼管柱と横梁との接続や、箱桁との剛結構造の板組を勘案し、4本を基本単位としました。ただし、構造条件によっては3本や6本等の構造も考えられます。
- 2) 桁に対して鋼管集成橋脚を45度回転して配置したものについて、動的解析による比較検討を行いました。地震応答特性の明確な違いはみられませんでした。

◆討議 [宇佐美 勉 (名城大学) ]

- 1) 履歴型ダンパーを付与したときの橋脚の目標性能および各脚の限界性能(限界ひずみ等)を提示してください。
- 2) せん断パネルに生ずる最大応答せん断ひずみのどの程度でしょうか。

◆回答：

- 1) 鋼管集成橋脚ではレベル1地震動に対しては「無損傷」、レベル2地震動に対してはせん断パネルだけに損傷を集約し、鋼管柱は構造弾性範囲にとどめる「小損傷」を目標性能としています。ここで構造弾性範囲とは、部材には局所的に塑性化(初期の部分塑性)が生じ

るの、構造体としては弾性的に挙動し、耐力および変形性能に対して健全性を損なわない状態のことをいい、機能面では、地震後において復旧なしで供用できる状態のことをいいます。鋼管柱については、過年度に行った実験<sup>1)</sup>等の結果から状態を確認し、構造弾性範囲として圧縮最外縁位置において $2\epsilon_y$ を許容限界ひずみとしています。

- 2) 本論で行ったパラメータスタディにおけるせん断パネルの最大応答せん断ひずみは図-13, 21に示すように2~10%の範囲でした。なお、実際の設計では、せん断パネルはレベル1地震動に対しては降伏耐力以下、レベル2地震動に対しては、過年度に行った実験<sup>2)</sup>の結果から、安全余裕度をみて最大ひずみが8%以下となるように設計を行います。パラメータスタディでは、鋼管集成橋脚の地震応答特性を把握するために、一般的な設計条件として考慮される上部構造重量より大きなケースも設定していることから、8%を上回る最大ひずみが発生しています。

#### 参考文献

- 1) 金治英貞, 米谷作記子, 林訓裕, 豊島径, 西海健二: 鋼管集成橋脚の縮小モデル載荷試験による力学的特性と設計妥当性の検討, 鋼構造論文集, 第13巻第49号, 2006.
- 2) 西海健二, 豊島径, 金治英貞, 林訓裕: 鋼管集成橋脚における接続部のエネルギー吸収性能に関する実験的研究, 第9回地震時保有水平体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, 2006.

#### 論文題目: “繊維部材による免震支承の減衰性能向上に関する検討”

著者: 滝本和志, 若原敏裕, 山田博, 岩本朋久  
掲載: Vol.58A, pp.484-491, 2012年3月

#### ◆討議 [家村浩和 (近畿職業能力開発大学校)]

- 1) 一本の繊維が切れるごとに、反力が低下するので、負剛性となり、複数の繊維部材の破断は一気に進むのではないか。
- 2) どのような外力レベルで利用する計画があるのか。

#### ◆回答:

- 1) 繊維部材は縀り線状の1本のアラミド繊維ストランドを所定の強度となるようループ状に必要な回数重ねたもので、ストランドがばらけないうポリエステル繊維で被覆したものです。繊維部材が破断強度に達した後も急激な荷重低下は示さずに徐々に荷重が低下するよう、ストランドを樹脂で固めまていません。繊維部材単体の引張試験を実施して、徐々に荷重が低下することを確認しています。
- 2) レベル2地震のような大地震で効果を発揮させることを考えています。レベル1地震動までは通常の免震支承として働くように、繊維部材にはたるみを持たせます。

レベル2地震のような大地震の際に繊維部材が荷重を一部分担し、さらに大きな変位に対しては繊維部材が破断することでエネルギー吸収して減衰効果を発揮し、大地震時の安全性を高める構造です。

#### 論文題目: “皿バネボルトセットを用いた摩擦型ダンパーの性能評価”

著者: 武田篤史, 佐野剛志  
掲載: Vol.58A, pp.492-503, 2012年3月

#### ◆討議 [池田 学 (鉄道総研)]

ご提案のダンパーについて、摩擦係数が速度によって低下していますが、すべり摩擦型のダンパーでは逆の傾向となるものもあると思います。本ダンパーでは、何故、速度によって摩擦係数が低下するのでしょうか。

◆回答: 速度と摩擦係数の関係は用いる摩擦材によって変化いたします。摩擦材を焼結金属とした場合は、速度が速くなるにつれて摩擦係数が小さくなりますが、PTFEなどの樹脂を用いた場合はある速度で摩擦係数が最大となります<sup>1)</sup>。

本研究で用いた摩擦材はフェノール樹脂ですが、厳密には他の樹脂と同様にある速度で摩擦係数が最大となります。しかし、摩擦係数が最大となる速度は非常に小さく、実用的には速度が速くなるにつれて摩擦係数が低減することができます。摩擦係数低減の原因は摩擦により発生する熱の影響であり、熱により摩擦材の弾性係数が小さくなることによるものと考えられます。摩擦面の温度を測ることは現実的にはほぼ不可能ですが、摩擦面周辺の温度は計測しております。その結果、同じ速度に対してでも、温度が60~70度程度上昇すると摩擦係数は低下することが確認できています。

#### 参考文献

- 1) 土木研究所, 構造計画研究所, パシフィックコンサルタンツ, 八千代エンジニアリング, オイレス工業, 川口金属工業, 三協オイルレス工業, 日本鑄造, ビービーエム: すべり系支承を用いた地震力遮断機構を有する橋梁の免震設計法の開発に関する共同研究報告書「すべり系支承を用いた地震力遮断機構を有する橋梁の免震設計法マニュアル(案)」, 土木研究所共同研究報告書, 整理番号第351号, 2006.10

#### ◆討議 [家村浩和 (近畿職業能力開発大学校)]

摩擦面の材料は? その耐摩耗性は十分か? 軸力レベルとの組み合わせは?

◆回答: 摩擦の材料には、フェノール樹脂を用いており、相手材はステンレスです。  
耐摩耗性については、本論文においては扱っておりませんが、5,000m程度の摺動距離に対して摩耗量、摩擦係数の

変化とも問題がないことを確認しております。この5,000mの撓動距離とは、橋長200m程度の橋梁が200年間に受ける温度変化の影響による累積変位量と同じレベルです。

軸力との組み合わせについては、ご指摘の通り注意をしなければならないと考えております。一般に、摩擦係数は面圧に依存するためです。そこで、本論文に記載のブレーキダンパーの設計時には、面圧ボルトの締め付け力を一定としたまま、摩擦面数および皿バネボルトセットの個数を変化させることで必要な撓動時減衰力を得られるようにすることとしています。よって、本論文の評価においては面圧依存性については評価しておりません。

◆討議 [樋口 匡輝 (オイレス工業(株)) ]

構造物と地震動を決めれば摩擦係数が決まるというストーリーでしょうか。

◆回答：本論文において、地震時摩擦係数の評価は、2つの方法で示しています。1つは、最大応答速度から摩擦係数を評価するという方法です。しかし、この場合、図-22に示すような繰返し計算が必要となり、簡便とは言えません。

もう1つの方法は、構造物の固有周期と地震動(H14道路橋示方書)によって、摩擦係数を決めるとする評価法です。構造物の固有周期と地震動が定まれば最大速度も概ね定まるため、このような考え方も可能となります。この方法の場合、繰返し計算は不要であり簡便に設計することが可能です。一方で、H14道路橋示方書の地震動以外には対応しておりませんし、複雑な構造物にも対応することができません。

これら2つの方法は、それぞれの適用範囲を考慮したうえでどちらを使うかを選択することとしています。

論文題目：“パッシブ型負剛性摩擦ダンパーの適用による鉄道橋の耐震性評価”

著者：池田学，豊岡亮洋，松本信之，市川篤司，長谷川淳史，西村昭彦，家村浩和

掲載：Vol.58A, pp.504-517, 2012年3月

◆討議 [武田篤史 ((株)大林組) ]

1) 非常に剛性が小さく摩擦型となると、残留変位は大きくなるのではないのでしょうか。

2)  $\alpha$  を小さくして支承の全体剛性が0に近づくと、解析結果は工学的に無視できるレベルの条件によって大きく変わる様な挙動が出て来るのではないのでしょうか。

◆回答：

1) 全ケースについて確認できていませんが、全体的な傾向としては、剛性が小さい(負剛性摩擦支承の剛性が小さい)ほど、支承部における残留変位(相対変位)は大きくなります。

2) ご指摘の通りと思いますが、本論文の解析は、支承部全体の剛性が0に近い条件でのケースは非常に少なく、ご指摘のような挙動がほとんどない条件での結果を示しています。なお、支承部の剛性が0に近いケースが少ない理由は、負剛性摩擦支承の剛性が極端に小さくなると、ゴム支承への負担が大きくなりせん断変形が限界値を満足できなくなるため、本検討ではこれを満足するように負剛性摩擦支承の剛性をある程度抑えているためです。

◆討議 [姫野岳彦 ((株)川金コアテック) ]

1) 低下係数 $\alpha=-0.3$ を境にして、応答性状が変化しているのはどのような理由からでしょうか。

◆回答：構造物によってこの応答性状が変化する係数値は多少変わるものと思いますが、本検討の範囲では、

- ・負剛性係数 $\alpha=-0.3$ 程度では、支承全体の剛性は、二次剛性が免震支承の1/2程度となるため、これより小さいと免震支承の応答(せん断変形量)が大きくなること

- ・今回の検討対象構造は、支承の耐力と下部構造の耐力が同程度であり、上記の支承の応答(水平力)の違いが下部構造の応答に影響すること

が考えられます。実際に、図-13や図-14より、

- ・ $\alpha$ がこの数値より小さいとゴム支承の応答が急激に大きくなる

- ・ $\alpha$ がこの数値より大きいと下部構造の応答が急激に大きくなる

傾向が認められます。詳細な理由の分析は今後の検討課題と考えています。