

吊橋に適用したケーブル併用制震すべりシステムのデバイスにおける地震時エネルギーに関する研究

榊 一平¹・松田 哲夫²・松田 泰治³・今村 壮宏⁴
坂田 裕彦⁵・宇野 裕恵⁶・松田 宏⁷・打越 丈将⁸

¹正会員 神鋼鋼線工業株式会社 エンジニアリング技術室 (〒660-0091 尼崎市中浜町10-1)
E-mail: sakaki.ippei@shinko-wire.co.jp

²正会員 元 西日本高速道路エンジニアリング九州株式会社 (現 オイレス工業 (株))
E-mail: te.matsud@oiles.co.jp

³正会員 熊本大学大学院 (〒860-8555 熊本市中央区黒髪2-39-1)
E-mail: mazda@kumamoto-u.ac.jp

⁴非会員 西日本高速道路株式会社 (〒751-0816 下関市棕野町2-4-1)
E-mail: t.imamura.ab@w-nexco.co.jp

⁵正会員 西日本高速道路エンジニアリング九州株式会社 (〒810-0073 福岡市中央区舞鶴1-2-22)
E-mail: h.sakata.a@w-e-kyushu.co.jp

⁶正会員 オイレス工業株式会社 免制震事業部 (〒541-0053 大阪市中央区本町4-6-7)
E-mail: h.uno@oiles.co.jp

⁷正会員 株式会社ドゥユー大地 埼玉支社 (〒359-0021 埼玉県所沢市東所沢2-27-12)
E-mail: h.matsuda@cdaichi.co.jp

⁸正会員 JIPテクノサイエンス株式会社 大阪テクノセンタ (〒532-0011 大阪市淀川区西中島2-12-11)
E-mail: takemasa_uchikoshi@cm.jip-ts.co.jp

ケーブル併用制震すべりシステムは、構造体をすべり支承で鉛直支持し、ケーブルに復元力を持たせ、慣性力を制震ダンパーで低減して地震時挙動を制御する耐震構造である。このシステムでは、系に入力される地震エネルギーを弾性ひずみエネルギーに変換して一時的に貯蔵しながら、制震ダンパー等により減衰エネルギーとして消費する。ここで、本研究で用いているすべり支承や制震ダンパーの履歴は剛塑性型の特性を有しているため、大変位領域では長周期の応答となる。本研究では、本システムを吊橋の床組縦桁に適用して補剛桁から絶縁し、非線形時刻歴応答解析により周期特性を把握すると共に、デバイスのエネルギーを時刻歴で分析した。この結果より、床組縦桁の応答を把握し、本システムの制震効果を確認した。

Key Words : cable, seismic damper, slide bearing, structural period, dispersion energy, potential energy

1. まえがき

床組縦桁が支承を介して補剛桁で支持されている吊橋では、縦桁の支承近傍に疲労クラックが生じたり、多用されている伸縮装置からの雨水の浸入などにより部材の劣化が生じ、維持管理の支障となっている。この解消方法として、床組縦桁を吊橋の支間毎に一体化して全ての支承部にすべり支承を適用し、制震ダンパーと固定ケー

ブルにより常時および地震時の挙動を制御する「ケーブル併用制震すべりシステム (以下、CSSという: with Cable, Seismic damper, Slide bearing system)」がある。これまでの検討¹⁾により地震時の挙動が安定していることは確認されているが、地震エネルギーをデバイス間でどのように処理しているかは明確になっていない。そこで、地震時の応答周期の時刻歴推移を把握すると共に、デバイスの機能をエネルギーの観点から整理し、本システム

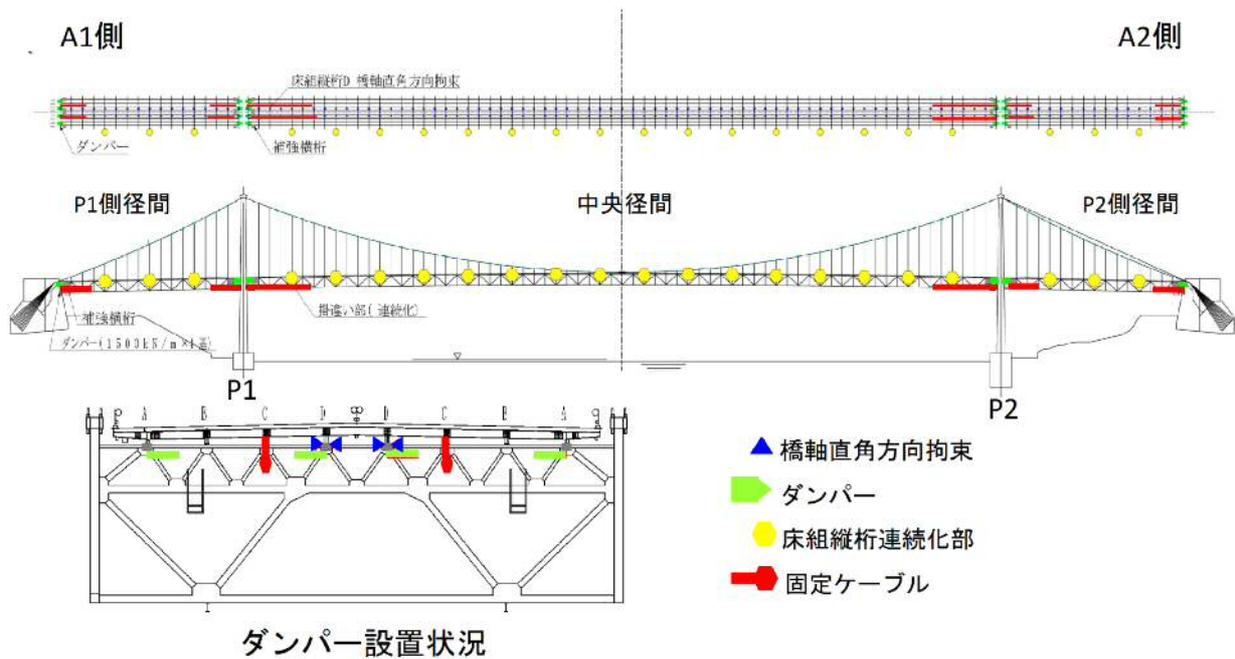


図-1 吊橋の構造一般図

表-1 デバイスの設定条件

BP-B 支承	摩擦係数 $\mu=0.02$ 床組縦桁の全てのすべり支承に適用
制震ダンパー	速度の0.1乗に比例するビンガムダンパー 50km/h時の抵抗力が1,500kN 各径間上下線の床組縦桁の端部にそれぞれ2基設置
固定ケーブル	被覆平行線ケーブル (素線: 直径7mm) 中央径間 $\phi 7 \times 73$, 側径間 $\phi 7 \times 31$ 各径間上下線の床組縦桁の端部にそれぞれ1本設置

の特性の把握を試みた。

2. 検討対象条件

(1) 検討対象橋

検討対象橋は図-1に示す支間178+712+178mを有する鋼3径間吊橋である。図-1には適用したケーブル併用制震すべりシステムの各デバイス配置を併記した。

(2) 設定条件

耐震性の検討では、デバイス毎にパラメータを設定して地震時の応答を確認している¹⁾²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾。ここでは、表-1に示す設定条件で行った動的解析の結果を用いてエネルギーの観点からその挙動を検討する。解析は非線型時刻歴応答解析であり、TDAP III (株) アーク情報システム)を用いている。入力地震波は図-2に示す道示標準波 I-I-3³⁾⁶⁾であり、地震波の継続時間は240secである。

ここで、固定ケーブルは引張力にしか抵抗できないのでプレストレスを導入して、弾性挙動をさせるためにケーブルが長くなりすぎないように、低温時 (-30°C)におけるレベル2地震動に対して固定ケーブルの一部が塑性化してよいものとしている。本論文では固定ケーブルの塑性化も考慮することとし、温度変化-30°Cの状態固定ケーブルが塑性化する応答を用いて検討した。各デバイスの基本履歴特性を表-2に示す。すべり支承は降伏変位を0.01mmとする摩擦履歴、制震ダンパーは抵抗力が速度の0.1乗に比例する速度-抵抗力モデル、固定ケーブルはバイリニア型スリップモデルとしている。

3. 地震時の応答

すべり支承の時刻歴応答変位、制震ダンパーの時刻歴応答抵抗力・応答履歴、固定ケーブルの時刻歴応答抵抗力・履歴をそれぞれ図-3～図-7に示す。

表-2 デバイスの基本履歴

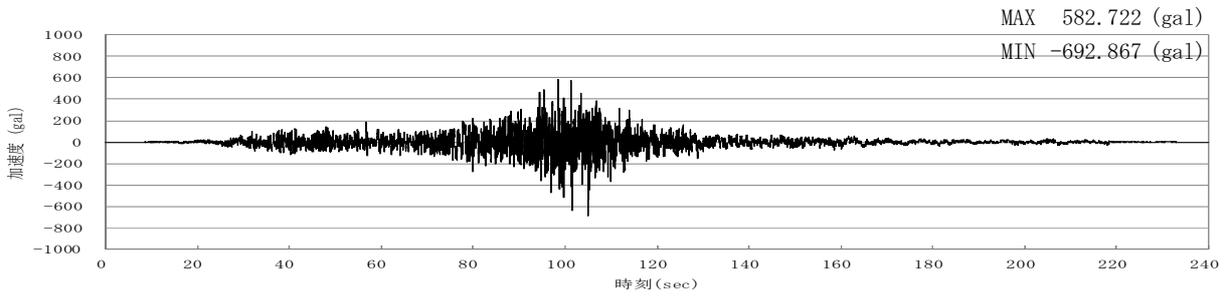
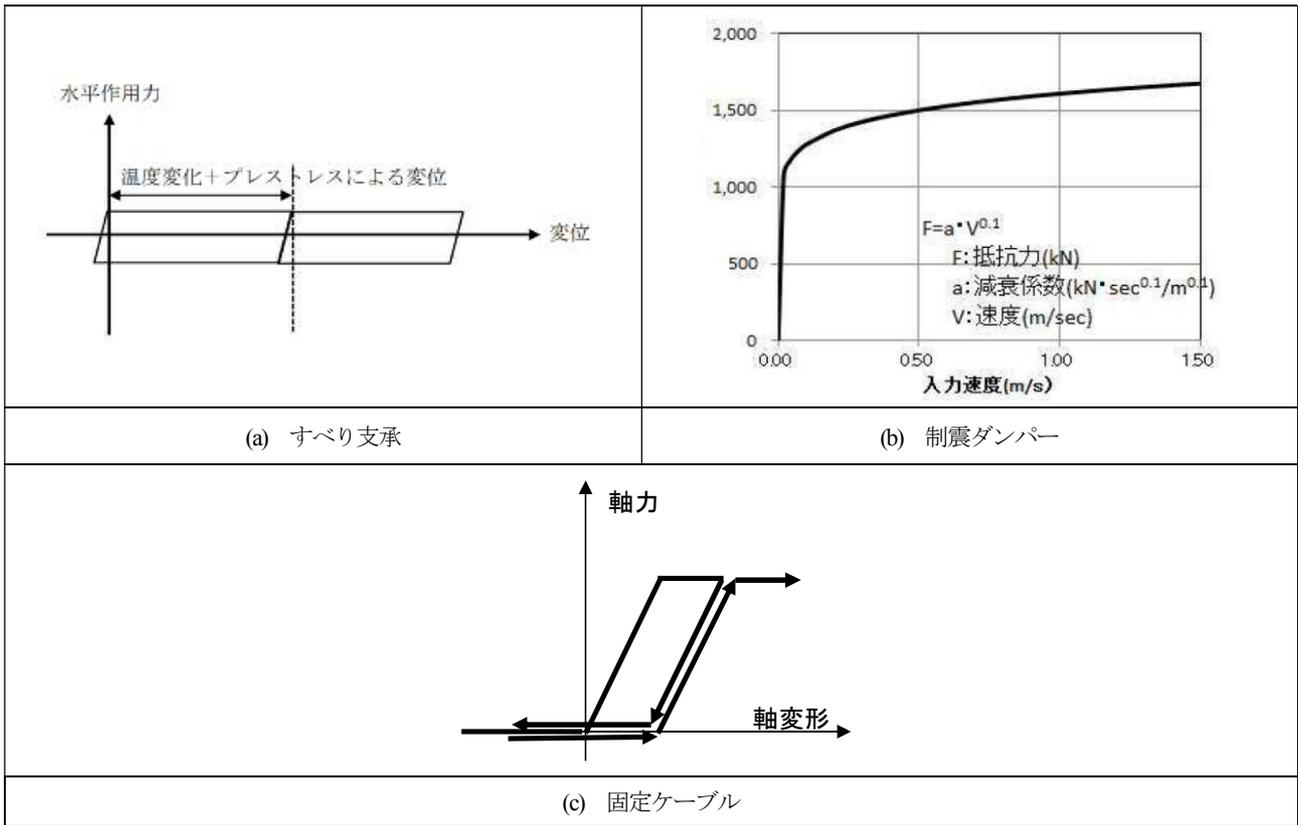


図-2 地震波 I-I-3

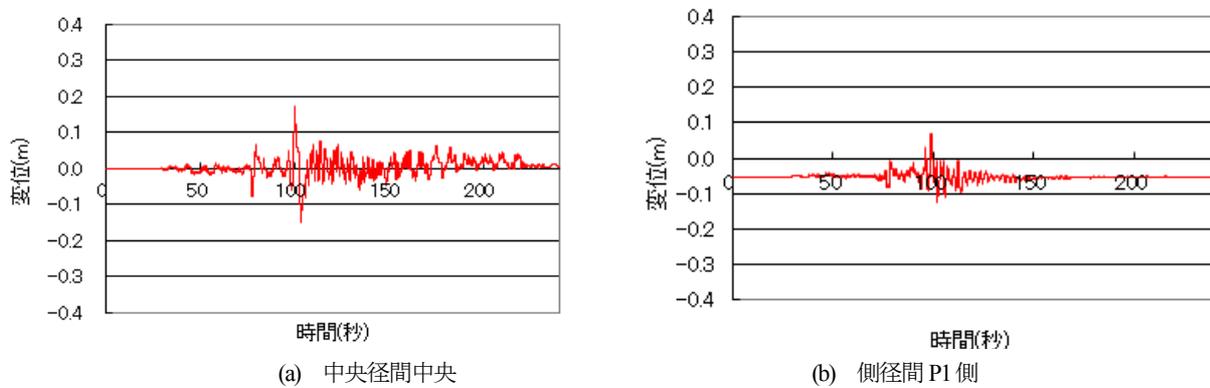
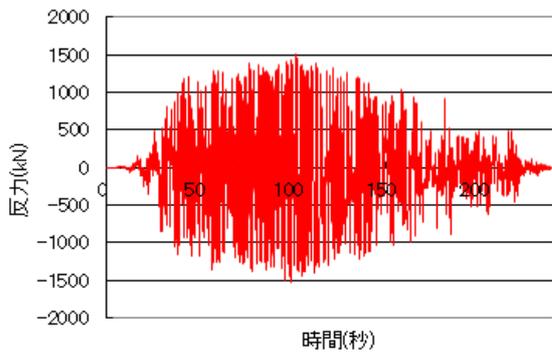
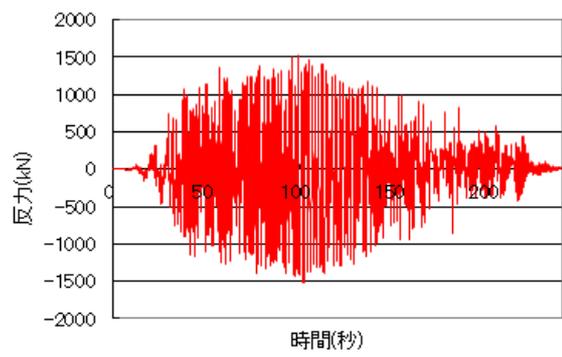


図-3 すべり支承の時刻歴応答変位

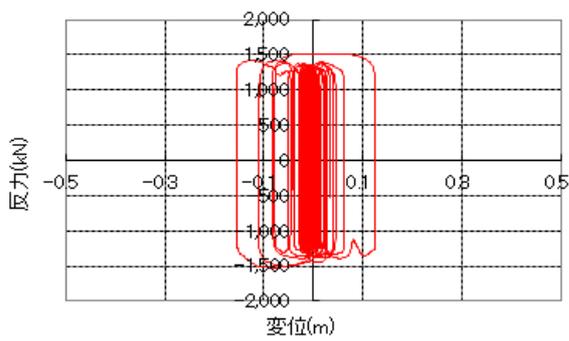


(a) 中央径間 P1 側

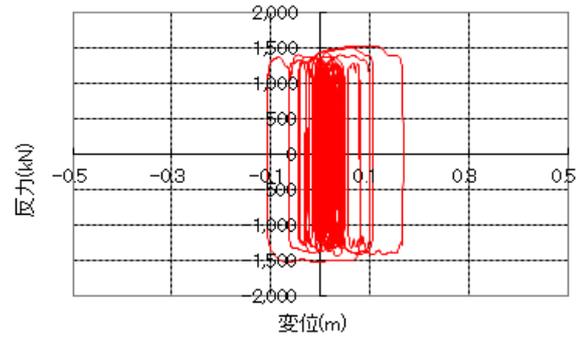


(b) 中央径間 P2 側

図-4 制震ダンパーの時刻歴応答抵抗力

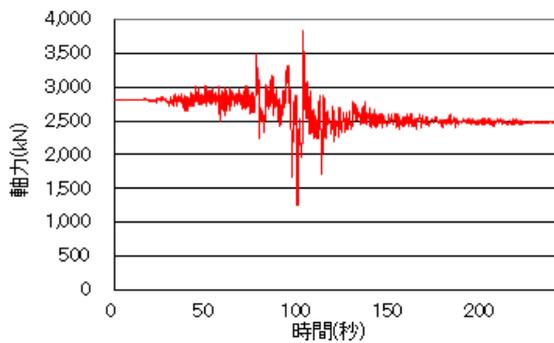


(a) 中央径間 P1 側

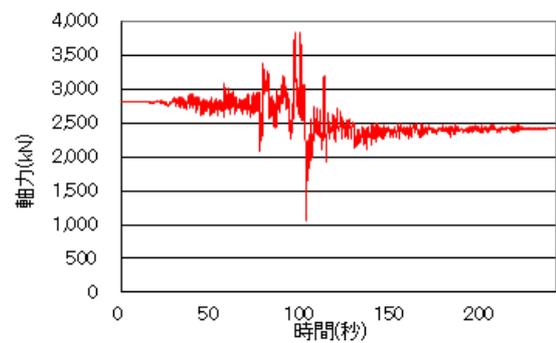


(b) 中央径間 P2 側

図-5 制震ダンパーの応答履歴

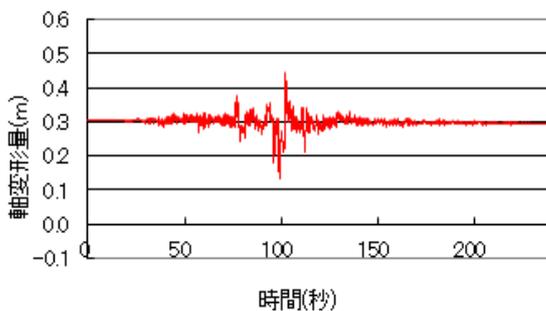


(a) 中央径間 P1 側

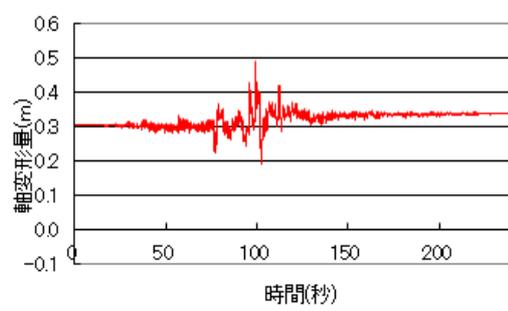


(b) 中央径間 P2 側

図-6 固定ケーブルの時刻歴応答抵抗力



(a) 中央径間 P1 側



(b) 中央径間 P2 側

図-7 固定ケーブルの時刻歴応答変位

4. 応答周期

時刻歴応答変位からウェーブレット変換により⁷⁾橋軸方向の時刻歴応答周期を求める。対象は床組縦桁の中央径間中央の P1 側径間中央、補剛桁の中央径間中央と P1 側径間中央、P1 主塔天端および中央径間 P1 側固定ケーブル P1 とし、それぞれを図-8～図-13に示す。同図では赤で示された領域で当該周期の振動が卓越していることを意味し、青で示された領域は著しい卓越がないことを意味している。

全ての図で時刻 100 秒と 115 秒付近で顕著に卓越する応答周期の卓越を示し、床組縦桁や固定ケーブルでは 100 秒付近で大きい。補剛桁や主塔ではそれに劣らず 115 秒付近で大きく発現し、その他の時刻では大きな応答を発現していない。すなわち、地震波 I-I-3 の 100 秒付近の加速度波形に特に大きく影響を受けている。また、各部位共に周期 2～3 秒付近の周期特性が強く、振動モード解析時の橋軸方向 1 次固有周期 6.1 秒より小さい。これは、すべり支承の摩擦、制震ダンパーの抵抗力およびケーブルの抵抗力を無視して、動的挙動におけるレーリー減衰を安全側に評価できるように算定しているためである。しかし、動的挙動時には摩擦と減衰による変位拘束効果が大きく働くため、応答周期は短くなる。

100秒付近で卓越する応答周期の範囲は補剛桁や主塔では狭いが、床組縦桁や固定ケーブルでは広い。これは、補剛桁や主塔では主ケーブルで一体化された吊橋構造系としての動的挙動が支配的であるために地震時に卓越する応答周期は限定されやすいが、すべり支承や制震ダンパーのような摩擦履歴型のデバイスを有する床組縦桁では変位にしたがい応答が長周期化するためである。この応答周期により、本橋の床組縦桁は吊橋本体から絶縁されていることが確認できる。

5. エネルギーからみた地震時挙動

地震時挙動をデバイスに発現するエネルギーにより分析する。ここでは全エネルギーをひずみエネルギーと粘性減衰エネルギーに区分した。

ここで、デバイスの基数が多いため、グループに分けて評価する。すなわち側径間、中央径間毎の応答および各桁端毎の応答を集計した。

(1) すべり支承

すべり支承の地震波継続時間240秒後の累積ひずみエネルギーを図-14に示す。また、すべり支承の径間毎の時刻歴ひずみエネルギーを図-15に、累積ひずみエネルギーを図-16に示す。一方、すべり支承の径間毎

の時刻歴減衰エネルギーを図-17に、累積ひずみエネルギーを図-18に示す。

すべり支承のひずみエネルギーは図-15のように発現し、時刻 100 秒付近で大きくなり、特に中央径間では側径間の倍程度となる。これを図-16の累積ひずみエネルギーでみると 100 秒付近の増加は大きいがほぼ全時間にわたって増大し、240 秒後には中央径間は側径間の 4 倍程度になる。また、図-14からすべり支承間には大きな差がないが、支承反力に起因して径間長による差異が認められる。

一方、すべり支承の粘性減衰エネルギーはひずみエネルギーより小さいが、図-17に示す粘性減衰エネルギーは図-15のひずみエネルギーと同様な時刻歴応答波形となっている。粘性減衰エネルギーはひずみエネルギーに対して、図-15と図-17より瞬間値では 1/5 ほどであり、平均値あるいは図-16と図-18の累積でみると 1/2 強となる。これは、地震波の継続時間 240 秒のうち応答が小さい時間帯が多いことが影響していると思われる。累積粘性減衰エネルギーは図-18のように時刻に対して線形に近い増加となっている。これは、図-17のように 100 秒あたりでは粘性減衰エネルギーが大きくなるものの、短時間の増大であるため図-18には顕著に現れていないようである。

(2) 制震ダンパー

制震ダンパーの部位毎の累積減衰エネルギーを図-19に示す。また、制震ダンパーの径間毎の減衰エネルギーを図-20に、累積減衰エネルギーを図-21に示す。さらに、制震ダンパーの桁端毎の減衰エネルギーを図-22に、累積減衰エネルギーを図-23に示す。

これより、時刻 100 秒付近で減衰エネルギーが大きくなっており、図4のようにこの時刻付近で制震ダンパーの応答が大きくなっていることを意味する。また、図-21から中央径間の制震ダンパーの累積減衰エネルギーは側径間の倍であるが、全て同じ仕様の制震ダンパーを付けていることから、中央径間の制震ダンパーの地震時移動量がそれに比例して大きいことを意味している。さらに、図-23の制震ダンパーの桁端毎の累積減衰エネルギーより、側径間のアンカレッジに取り付けた制震ダンパーは中央径間の制震ダンパーと大きな差異はなく機能しているが、側径間の主塔に取り付けた制震ダンパーはあまり機能していない。これは、主塔に取り付けられた制震ダンパーの移動量は主塔の変形の影響を受けて、側径間の制震ダンパーの変位が小さくなっているのに対し、アンカレッジは剛体であるので、側径間の床組縦桁の絶対変位に依存してその制震ダンパーの方が大きく機能していると考えられる。

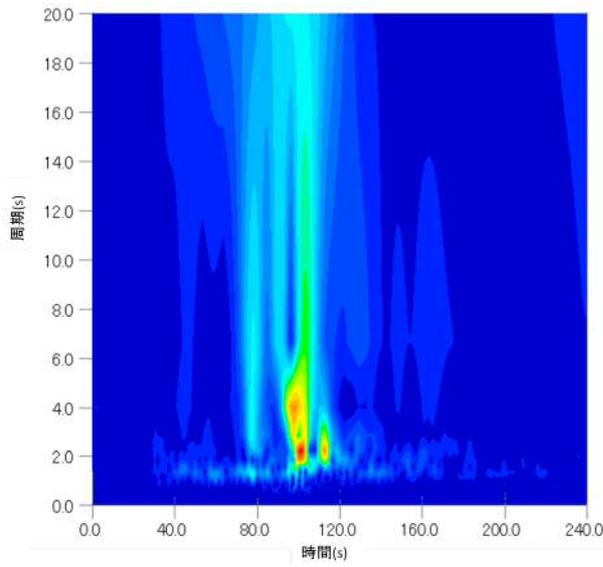


図-8 床組縦桁中央径間中央の応答周期

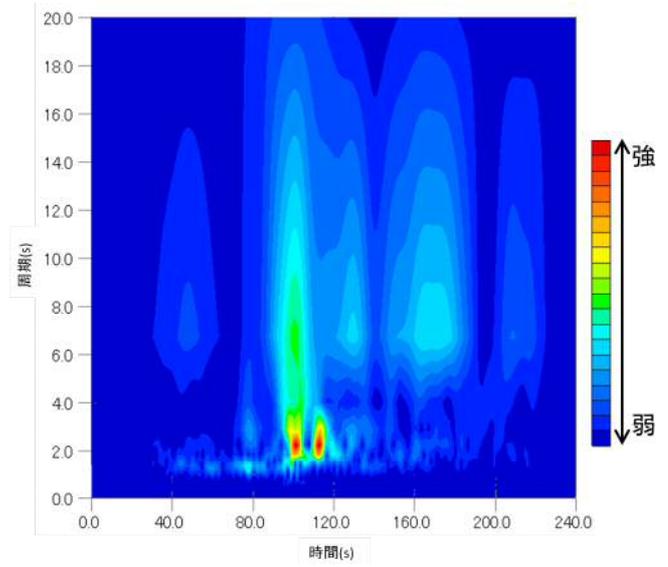


図-9 補剛桁中央径間中央の応答周期

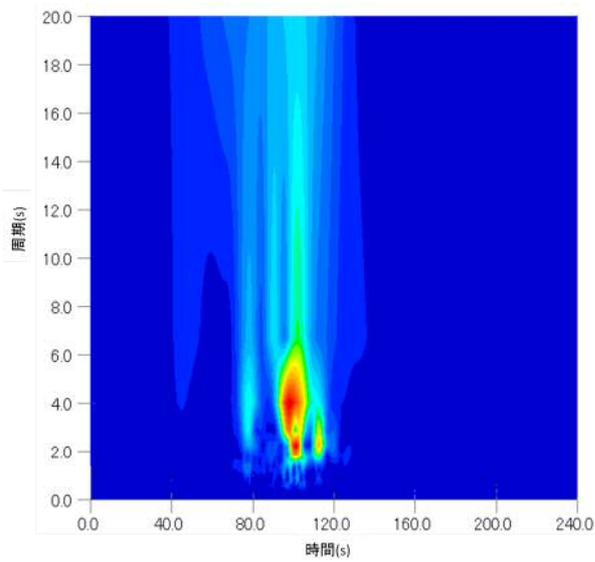


図-10 床組縦桁P1側径間中央の応答周期

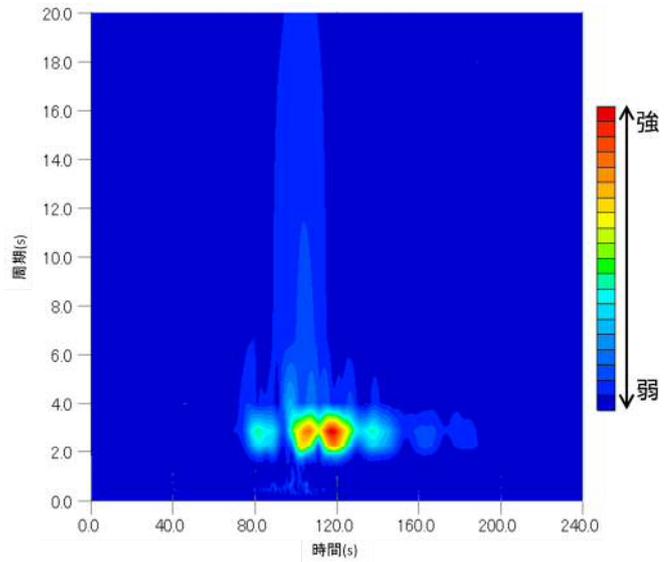


図-11 補剛桁P1側径間中央の応答周期

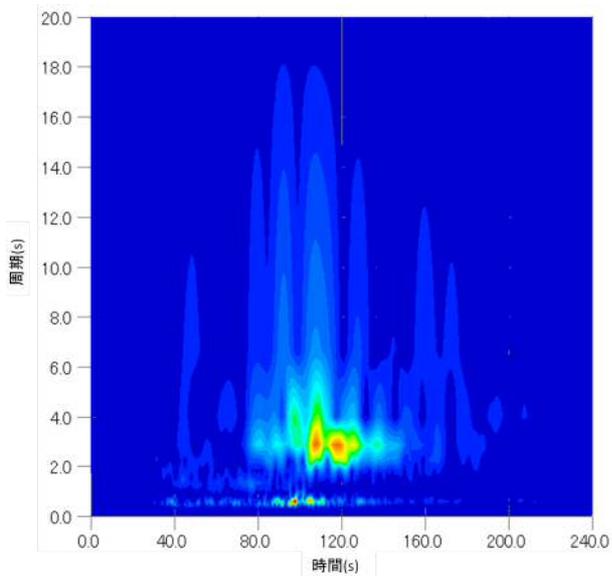


図-12 主塔P1天端の応答周期

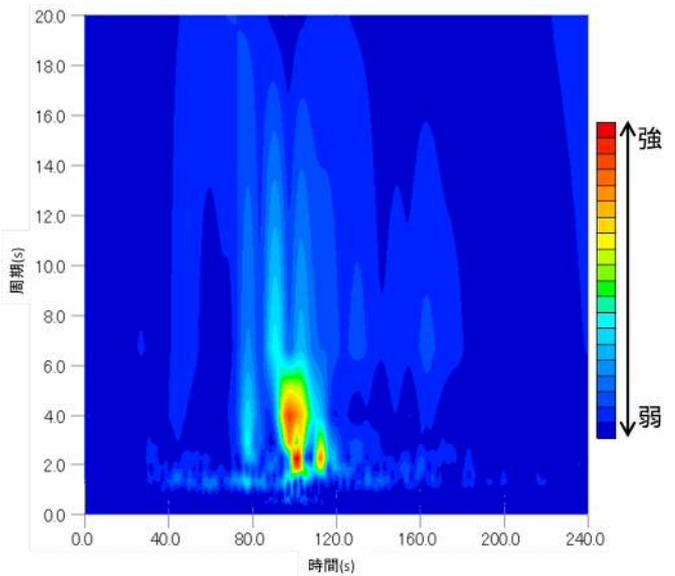


図-13 固定ケーブル中央径間P1側の応答周期

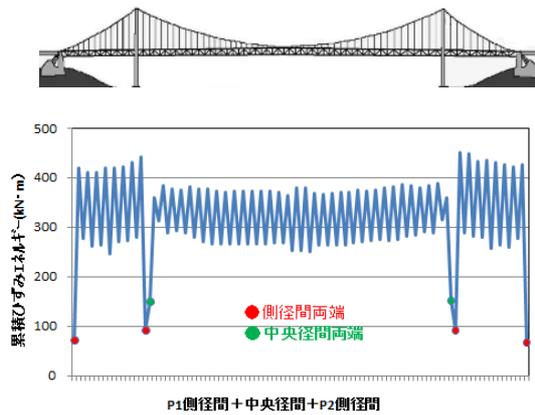


図-14 すべり支承支承線毎の累積ひずみエネルギー

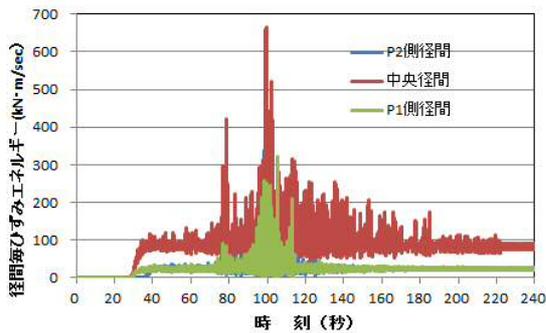


図-15 すべり支承の径間毎のひずみエネルギー

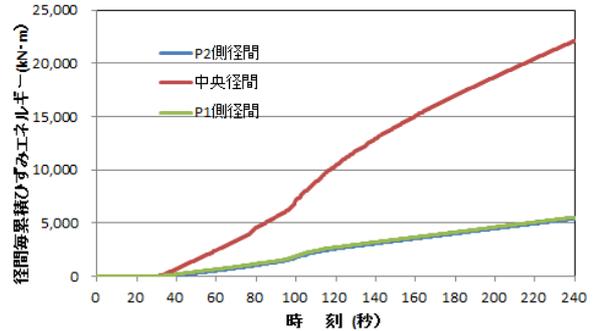


図-16 すべり支承の径間毎の累積ひずみエネルギー

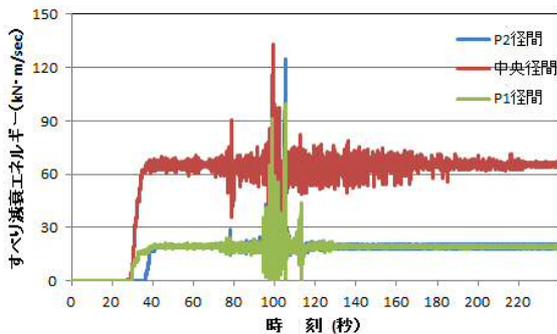


図-17 すべり支承の径間毎の減衰エネルギー

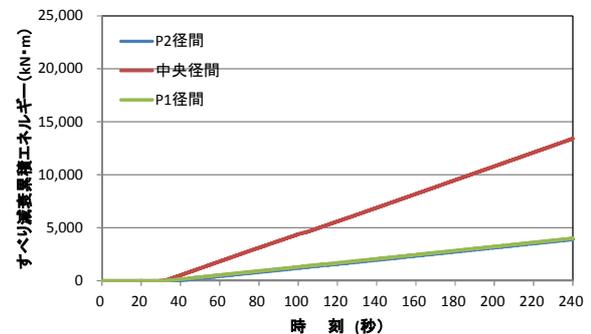


図-18 すべり支承の径間毎の累積減衰エネルギー

(3) 固定ケーブル

固定ケーブルの部位毎の累積ひずみエネルギーを図-24に示し、径間毎のひずみエネルギーを図-25に、累積ひずみエネルギーを図-26に示す。同様に、固定ケーブルの部位毎の累積粘性減衰エネルギーを図-27に示し、粘性減衰エネルギーを図-28に、累積粘性減衰エネルギーを図-29に示す。さらに、桁端毎の粘性減衰エネルギーを図-30に、累積粘性減衰エネルギーを図-31に示す。

固定ケーブルは、時刻100秒付近に大きく機能している。ここで、図-25や図-28からわかるようにひずみエネルギーは大きい、粘性減衰エネルギーは小さい。

これは、ケーブルはほぼ弾性挙動しており、粘性減衰エネルギーをほとんど発現していないためである。ただし、主要動に当たる時刻100秒付近では、急激にひずみエネルギーおよび粘性減衰エネルギーが立ち上がっている。

固定ケーブルの機能は、図-27から取付け部位毎にみると大きく異なっている。径間別でみると、ひずみエネルギー、粘性減衰エネルギー共に中央径間が大きく、次いでP1側径間、P2側径間の順に大きい。ここで、累積ひずみエネルギーは増減を繰り返し増大するが、粘性減衰エネルギーは増大するだけである。

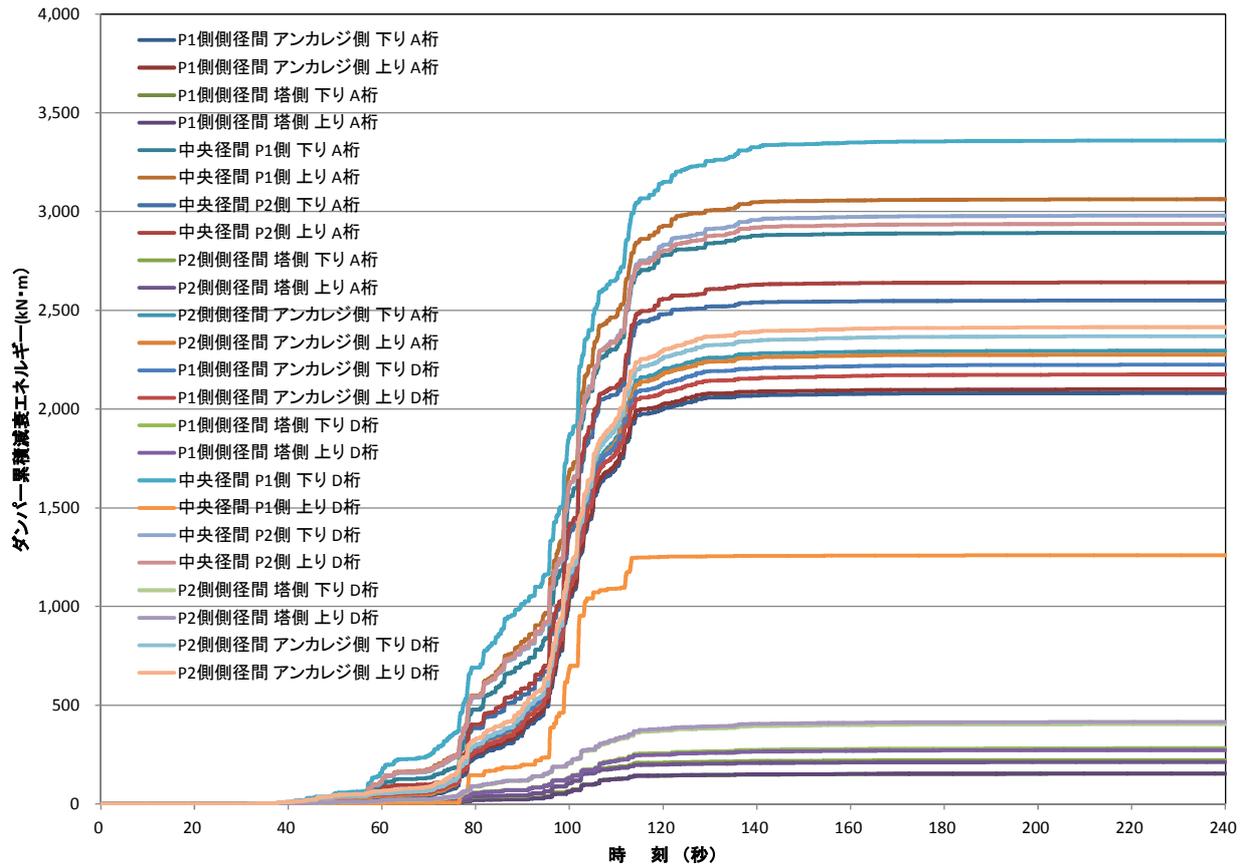


図-19 制震ダンパー各部位の累積減衰エネルギー

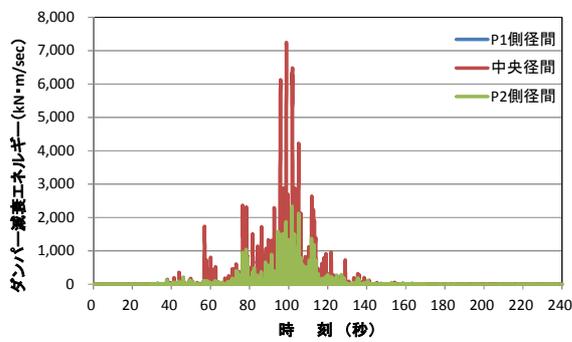


図-20 制震ダンパーの径間毎の減衰エネルギー

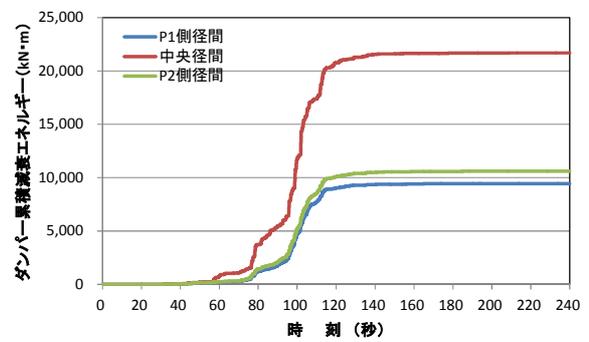


図-21 制震ダンパーの径間毎の累積減衰エネルギー

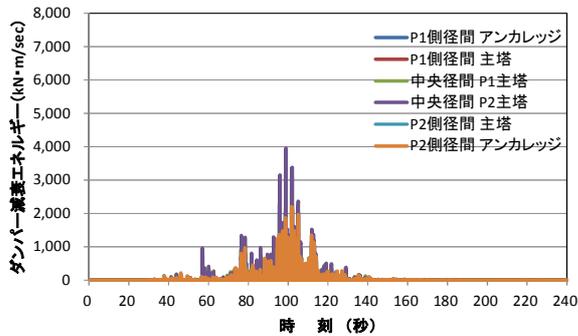


図-22 制震ダンパーの桁端毎の減衰エネルギー

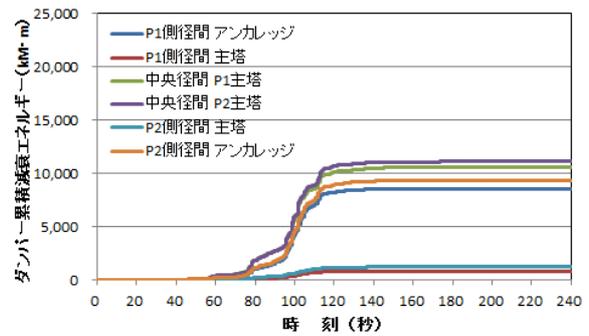


図-23 制震ダンパーの桁端毎の累積減衰エネルギー

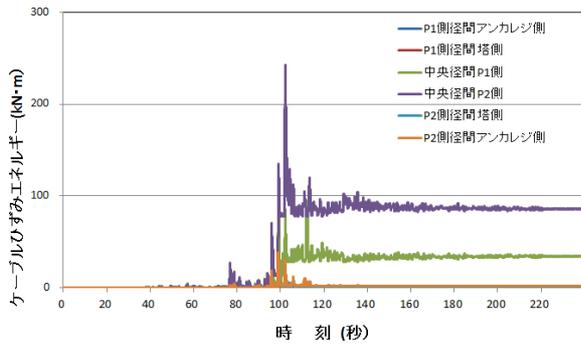


図-2 4 各ケーブルの累積ひずみエネルギー

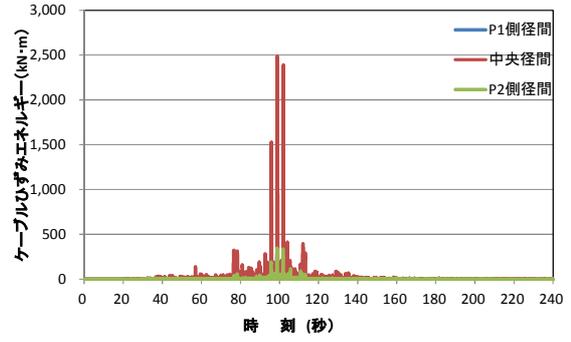


図-2 5 固定ケーブルの径間毎のひずみエネルギー

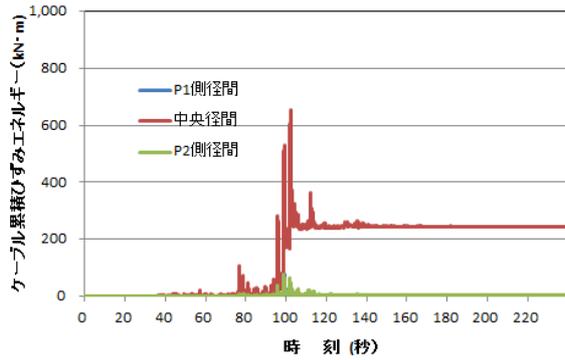


図-2 6 固定ケーブルの径間毎の累積ひずみエネルギー

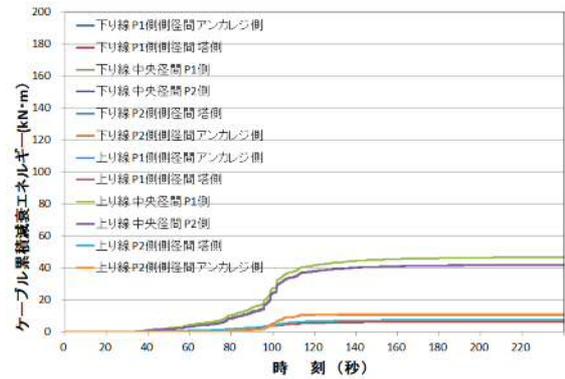


図-2 7 固定ケーブルの各部位毎の累積減衰エネルギー

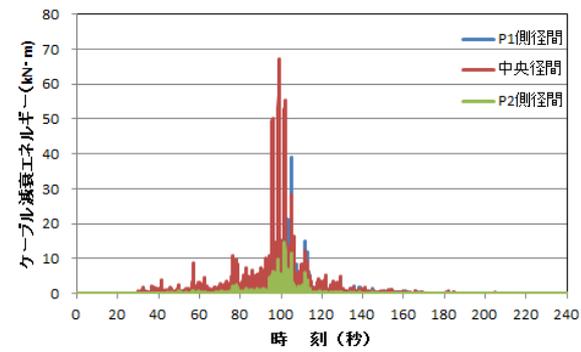


図-2 8 固定ケーブルの径間毎の減衰エネルギー

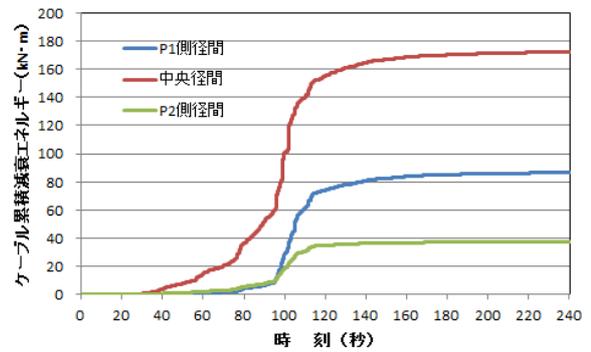


図-2 9 固定ケーブルの径間毎の累積減衰エネルギー

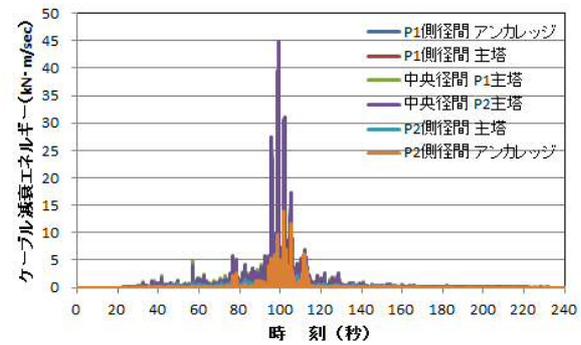


図-3 0 固定ケーブルの桁端毎の減衰エネルギー

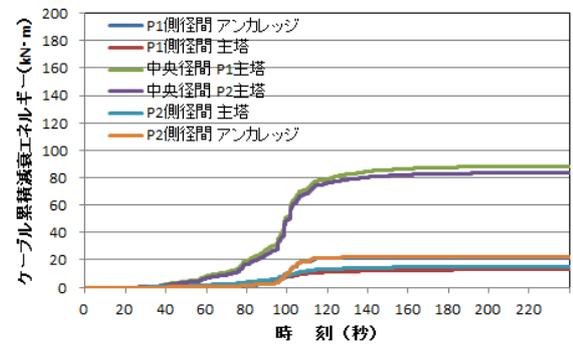


図-3 1 固定ケーブルの桁端毎の累積減衰エネルギー

6. まとめ

- ① 地震波の継続時間 240 秒の内、床組縦桁や固定ケーブルでは時刻 100 秒付近で周期 2~6 秒付近での応答が卓越し、補剛桁や主塔では 100 秒と 115 秒付近で周期 2~3 秒での応答が卓越している。これは、床組縦桁ではすべり支承や制震ダンパーのような剛塑性を示す履歴のデバイスで支持されているために、地震力が大きくなると塑性化して変位が大きくなり、応答周期が入力レベルに応じて長周期化しやすいためである。
- ② すべり支承は制振ダンパーと遜色のないほど大きな減衰エネルギーを発現している。ここで、中央径間のエネルギーは側径間より大きいのは、中央径間の応答が大きいことと中央径間の床組の重量が重いことによる。
- ③ 制震ダンパーは非常に大きいエネルギー吸収効果を発現している。しかし、側径間の主塔に取り付けられた制振ダンパーの機能は小さい。
- ④ 固定ケーブルの粘性減衰エネルギーは小さいが、これは大きく塑性化しないように設定しているためである。
- ⑤ 本解析では累積粘性減衰エネルギーは累積ひずみエネルギーより大きく発現している。これは、減衰エネルギーとして速やかに消費されていることを意味する。

7. あとがき

本検討では、各部位の地震時の応答周期を把握すると

STUDY ON SEISMIC ENERGY IN NEW SEISMIC CONTROLLED SYSTEM USING CABLES, SEISMIC DAMPERS AND SLIDE BEARING FOR THE SUSPENSION BRIDGE

Ippei SAKAKI, Tetsuo MATSUDA, Taiji MAZDA, Takehiro IMAMURA, Hirohiko SAKATA,
Hiroshige UNO, Hiroshi MATSUDA and Takemasa UCHIKOSHI

With cable, seismic damper, slide bearing system is one of the seismic structures that support the weight by slide bearing, owe the restoring force by cable and reduce inertia force by seismic damper. Adapting this system, it will transform the seismic energy to potential energy to save temporarily during shaking and disperses to reduction energy. Here, as the hysteresis of slide bearing and seismic damper is rigid-plastic type, it will become to be long-period structure in the region of large displacement. Then, adapting this system to the floor stringer on the stiffened truss girder of suspension bridge, it will be isolated each other. And, grasping the characteristic of period, energy will be studied historically. As a result, we can understand the response of the floor stringer to be certified the property of this system.

共に、すべり支承、制震ダンパーおよび固定ケーブルのそれぞれの役割をひずみエネルギーと減衰エネルギーにより分析した。最適値を検討するに至っていないが、それぞれの特徴を生かして適切なケーブル併用制震すべりシステムを構築することができる。

参考文献

- 1) 松田哲夫, 松田泰治, 今村壮宏, 坂田裕彦, 宇野裕恵, 松田宏, 打越丈将: 既設吊橋に適用するケーブル併用制震すべりシステムの研究, 土木学会論文集, Vol. 70 No. 4 pp469-486, 2014
- 2) 坂田裕彦, 松田哲夫, 松田泰治, 今村壮宏, 宇野裕恵: ケーブル併用制震すべりシステムを適用した既設吊橋の非線形時刻歴応答解析における解析時間短縮による応答への影響, 平成 26 年度土木学会全国大会 I-184, 2014
- 3) 宇野裕恵, 松田泰治, 今村壮宏, 松田哲夫, 坂田裕彦: ケーブル併用制震すべりシステムを適用した既設吊橋の地震時応答に及ぼすデバイスの効果, 平成 26 年度土木学会全国大会 I-185, 2014
- 4) 榊一平, 松田泰治, 今村壮宏, 松田哲夫, 坂田裕彦: ケーブル併用制震すべりシステムを適用した既設吊橋におけるケーブルの履歴特性が地震時挙動に及ぼす影響, 平成 26 年度土木学会全国大会 I-186, 2014
- 5) 松田宏, 松田泰治, 今村壮宏, 松田哲夫, 坂田裕彦: ケーブル併用制震すべりシステムを適用した既設吊橋の地震時ランダダンシーの評価, 平成 26 年度土木学会全国大会 I-187, 2014
- 6) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 2012
- 7) P. S. アジソン: 図説ウェーブレット変換ハンドブック, 朝倉書店, 2005