

## 論文 橋の桁端部に間詰め材を充填する地震慣性力の低減効果

田崎 賢治<sup>\*1</sup>・幸左 賢二<sup>\*2</sup>・阿部 弘典<sup>\*3</sup>・新井 伸博<sup>\*4</sup>

要旨：既設の多径間桁橋を対象に、桁遊間部にゴム材等の間詰め材を充填する耐震補強工法を提案し、地震当初から上部構造の応答に抵抗させる場合の地震慣性力の低減効果について検討した。具体的には、ゴム製間詰め材の軸方向剛性を変化させることにより、地震慣性力の低減効果と既設橋台の安定計算に与える影響について感度分析を行った。その結果、間詰め材の軸方向剛性が大きくなるに従い、上部構造および橋脚の最大応答値は小さくなるが、橋台に対して桁の温度伸縮に伴う作用力が大きくなる。したがって、橋脚の地震応答と橋台の安定計算の両方を満足する間詰め材を設置することにより、合理的な耐震補強が可能となることを示した。

キーワード：桁衝突、地震応答解析、間詰め材、橋台抵抗バネ、応答低減効果

## 1. はじめに

兵庫県南部地震以降、地震時保有水平耐力法や動的解析により、大規模地震に対する耐震設計が行われており、上部構造の水平変位が大きくなることにより、ゴム支承や橋脚断面、基礎構造が震災前と比べて大きくなっている。特に、既設の耐震補強では、河川橋や湖面橋等大規模な仮締切りが必要となる施工条件の厳しい橋梁において、一般的な耐震補強方法では多額の工事費を必要とするといった課題がある。

したがって、限られた予算の中で、これまでの耐震補強方法に比べてより合理的、経済的な耐震補強技術の開発が求められている。

本研究では、既設の多径間桁橋を対象に、まず、桁遊間量に着目した桁衝突解析を実施し、大規模地震時の応答特性を把握する。次に、桁遊間部にゴム材等の間詰め材を設置する耐震補強工法を提案し、地震当初から上部構造の応答に抵抗させる場合の地震慣性力の低減効果について検討を行った。ここで、間詰め材は桁の温度伸縮等、常時の変位に対し、可動支持の下部構造に対して安定計算上影響の小さいデバイスであることが条件となる。

したがって、本文では、ゴム材の厚さや設置個数を調整し、間詰め材の軸方向剛性を変化させることにより、既設の橋台の安定計算に与える影響と地震慣性力の低減効果の感度分析結果について述べる。

## 2. 対象橋梁

対象橋梁は図 - 1 に示すような支間長 40m の既設の PC2 径間単純ポステン T 桁橋である。本橋は P1 橋脚が河川内に位置し、両端部に橋台を有する。また、P1 橋脚を中心に左右対称の構造である。支承構造は P1 橋脚が固定で、両橋台が可動構造である。

構造諸元は図 - 2 に示すように、上部構造は PC ポステン T 桁（4 主桁）、支承構造はゴムパッド支承、下部構造は RC 小判型橋脚、基礎構造は橋脚部がケーソン基礎（杭長  $L=30\text{m}$ ）、橋台部が場所打ち杭基礎（杭長  $L=30\text{m}$ ）、橋台はウイングおよび控え壁を有する逆 T 式で、昭和 46 年の道路橋耐震設計指針に準じて修正震度法により耐震設計が行われている橋梁である。

また、地盤条件は 種地盤であり、地震時に液状化は生じないことを想定している。

\*1 大日本コンサルタント(株) 九州支社 構造技術部 工修 (正会員)

\*2 九州工業大学 工学部 建設社会工学科 Ph.D. (正会員)

\*3 九州工業大学 工学部 建設社会工学科

\*4 大日本コンサルタント(株) 構造事業部 工博

### 3. 現況の耐震性能照査結果とRC巻き立て

#### 工法による補強検討結果

#### 3.1 現況の耐震性能照査結果

現況の橋梁に対してレベル2地震に対する耐震性能照査を行った。性能照査方法は動的照査法とし、非線形時刻歴応答解析を実施した。橋軸方向の照査結果として、図-3にP1橋脚基部の曲げモーメント-回転角関係の応答履歴結果を示す。照査の結果、既設の橋脚は曲げ破壊型であるが、固定橋脚であるP1橋脚は道路橋示方書・同解説 耐震設計編<sup>1)</sup>(以下、道示耐震編と称する)に規定される許容塑性率を満足しない結果となる。一方、橋軸直角方向については、許容値を満足する結果が得られている。なお、基礎については、橋軸方向および橋軸直角方向とも現橋の橋脚に対して降伏しない結果となる。

#### 3.2 RC巻き立て工法による耐震補強

先述のように、現況の照査結果を踏まえ、本橋は橋軸方向に対する曲げ耐力が不足していることから、一般的なRC巻き立て工法を考慮する場合、RC巻き立て厚は250mm、軸方向鉄筋はD38の1段配筋、帯鉄筋はD22の150mmピッチの補強が必要となる。この場合、橋脚の曲げ耐力が大きくなったことにより、基礎への負担が大きくなる。したがって、基礎の保有水平耐力が橋脚よりも小さくなり、基礎の耐震性能照査を満足しない結果となる。

### 4. 橋の桁端部に間詰め材を充填する場合の地震時慣性力の低減方法

#### 4.1 検討概要と設計条件

以上の現況照査および一般的な耐震補強対策の検討結果を踏まえ、桁遊間部にゴム材等の間詰め材を設置する耐震補強工法を提案する。本工法は地震応答解析の中に橋台部の水平抵抗を考慮するものであり、地震当初から上部構造の応答に抵抗させることにより、地震慣性力の低減効果を図る。具体的な検討方法として、ゴム材の軸方向剛性を変化させることにより、既設の橋台の安定計算に与える影響と地震慣性力の

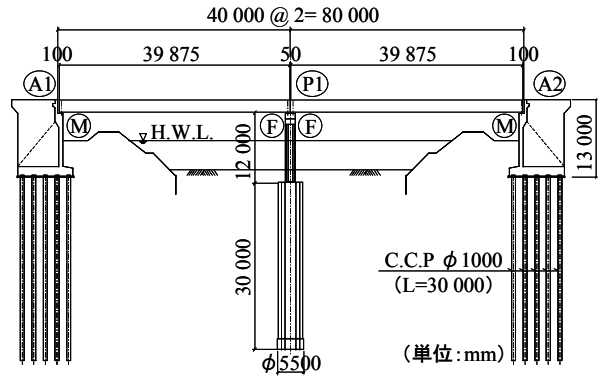


図-1 対象橋梁

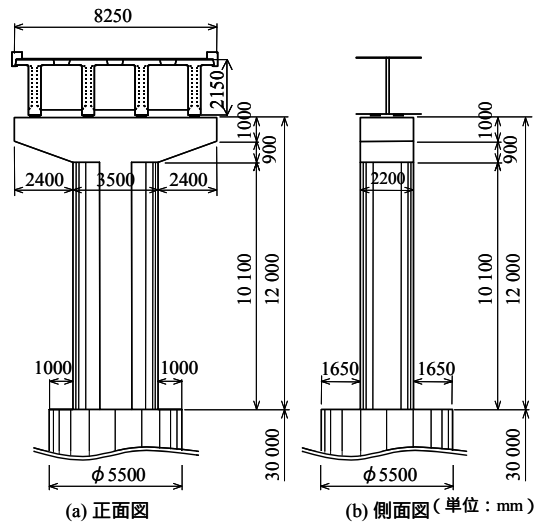


図-2 橋脚構造一般図

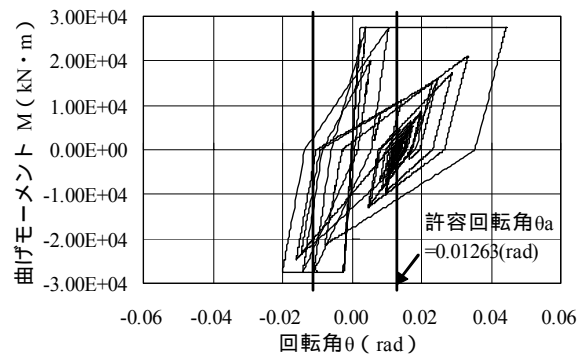


図-3 P1橋脚の応答履歴(無補強)

低減効果の感度分析を行った。ここで、本解析で設けた仮定は次のとおりである。

- (1) 橋軸方向の橋脚曲げ耐力に対する効果を対象とする。
- (2) 桁衝突時においても支承は健全である。
- (3) 橋台部はパラペット基部で壊れるモデルとし、橋台全体として安定計算を満足する。

#### 4.2 全体モデル

解析モデルは図-4に示すように、橋全体系のフレームモデルを用いる。各モデルの設定方

法は後述するが、橋台パラペット部には衝突バネに加え、橋台パラペットおよび橋台背面土を考慮した抵抗バネを設置している。各橋脚基部には、道示耐震編に準じて完全弾塑性型の曲げモーメント - 回転角関係を有する非線形バネ要素を設け、その履歴特性は武田モデルを用いている。その他の橋脚梁部とフーチング部は剛はり要素を用いている。

#### 4.3 橋台パラペットのモデル化

橋台パラペットのモデル化は、桁衝突時のパラペットの破壊形態を考慮して設定する。国内ではパラペットの破壊事例がないため、1999年の台湾集集地震により被害を生じた長庚大橋の被害を参考に設定する<sup>2)</sup>。長庚大橋では、桁とパラペットの衝突により、パラペットがせん断破壊し、約1m背面土側にめり込む被害が生じている。これは表-1に示すように、式(1)~(3)により算出したパラペットのせん断耐力が曲げ耐力よりも小さいためと考えられる。ここで、衝撃の考慮としては、衝撃力という作用外力の方に含まれるものと考え、一般的なせん断耐力の評価式を用いている。したがって、本解析においても同様に、せん断破壊損傷するモデルを用いることとし、大規模地震時にパラペットが破壊し、遊間量が広がった場合は、鉄板等を敷くことにより緊急自動車は通行できるものとする。なお、せん断耐力の算出に際しては、別途FEM解析により、衝突荷重をパラペットとウイングで抵抗することが確認されたことから、パラペットとウイングの耐力を考慮している。

一方、橋台背面土は十分に締め固められた砂質土と仮定し、標準慣入試験によるN値を15、せん断摩擦角 $\phi = 30^\circ$ 、粘性定数 $C = 0$ とした。道路橋示方書 下部構造編<sup>3)</sup>に規定されるケーソン基礎の水平方向地盤反力係数から、パラペットの背面面積を考慮して初期剛性 $K_1$ は $8.14 \times 10^5 \text{ kN/m}$ となる。また、土圧抵抗の最大耐力は同様にケーソン前面の水平地盤抵抗力の上限値を用いて算出し、パラペット高 $h = 2.638 \text{ m}$ のみを考慮して $4.478 \times 10^3 \text{ kN}$ と設定した。

$$P_s = S_c + S_s \quad (1)$$

$$S_c = 0.82 \times P_t^{1/3} \times (1/d)^{1/3} \times (ck)^{1/3} \times b \times d \quad (2)$$

$$S_s = A_w \times s_y \times d \times (\sin \theta + \cos \theta) / 10 \times 1.15 \times a \quad (3)$$

- ここに、 $S_c$ ：コンクリートの負担するせん断耐力  
 $S_s$ ：せん断耐筋筋の負担するせん断耐力  
 $P_t$ ：引張主鉄筋比=0.197%(D16@150mm)  
 $d$ ：パラペット断面有効高=0.50m  
 $b$ ：パラペット断面幅=8.30m  
 $A_w$ ：帯鉄筋の断面積=90.26cm<sup>2</sup>  
 $ck$ ：コンクリート設計基準強度=21N/mm<sup>2</sup>  
 $s_y$ ：帯鉄筋の降伏点=300N/mm<sup>2</sup>  
 $\theta$ ：帯鉄筋と鉛直軸とのなす角度=90度  
 $a$ ：帯鉄筋の間隔=250mm

#### 4.4 間詰め材のモデル化

間詰め材は主桁の端部とパラペット前面部の隙間部に設置する。ここで、間詰め材としてゴム製を考える。これはゴム製間詰め材の圧縮性能が高ひずみ・高面圧下においても荷重の繰り

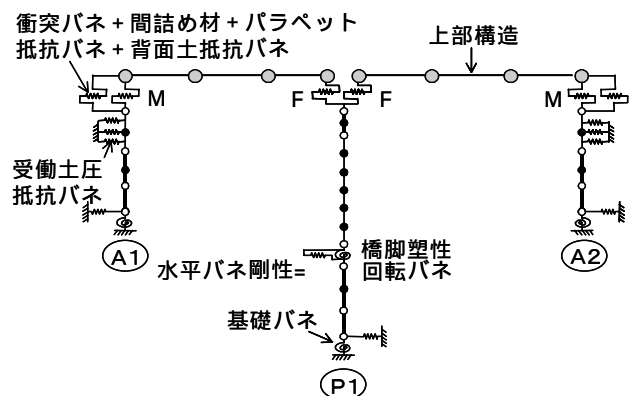


図-4 解析フレームモデル

表-1 橋台パラペットの破壊形態

	長庚大橋	解析対象橋梁
引張主鉄筋比(%)	0.200	0.197
帯鉄筋体積比(%)	0.000	0.405
曲げ耐力 $P_y$ (kN)	4805.3	12443.1
せん断耐力 $P_s$ (kN)	1908.0	9129.2
破壊形態	せん断破壊	せん断破壊

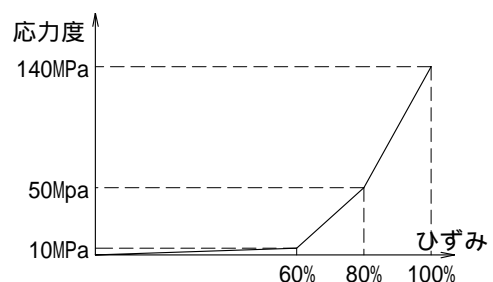


図-5 間詰め材の圧縮応力度 - ひずみ関係

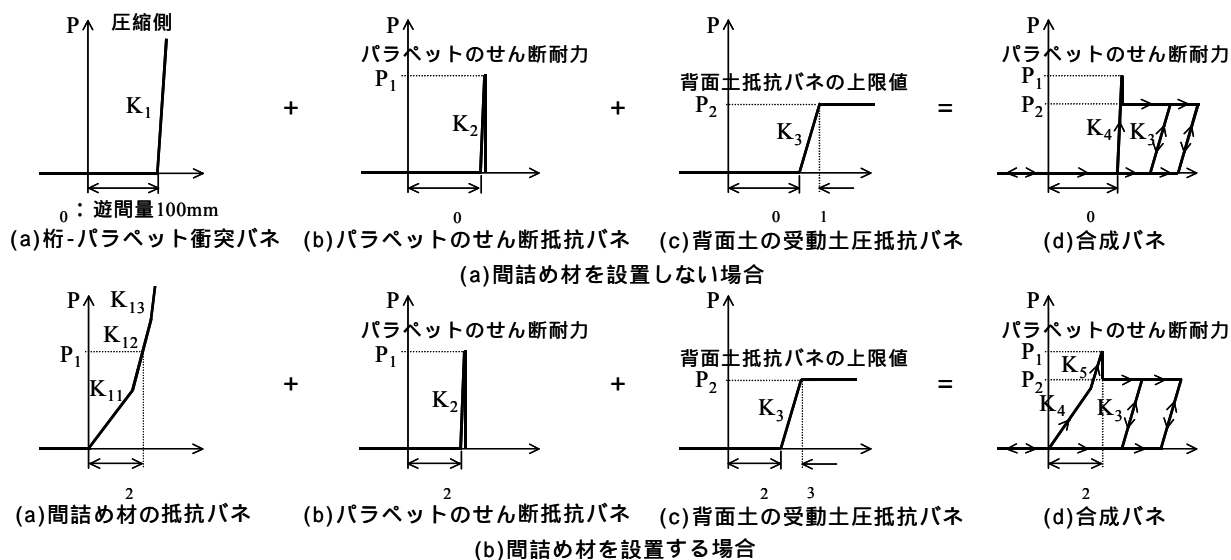


図 - 6 橋台部の合成バネモデル

返し回数や载荷速度に対して安定しているためである。したがって、本検討に用いる間詰め材は一般的な天然ゴムを想定し、ゴムの圧縮応力-ひずみ関係は図 - 5 に示す既往の材料試験および定式化の検討結果<sup>4)</sup>(ゴム形状：250mm×150mm×厚さ 100mm)を参考に設定した。

#### 4.5 橋台部のモデル化

橋台パラペット部のモデル化は図 - 6 に示すように、間詰め材を設置する場合としない場合で異なり、衝突バネあるいは間詰め材の抵抗バネとパラペットのせん断抵抗バネ、背面土の抵抗バネの計 3 種類のバネを合成し、一個のバネにモデル化している。ここで、対象橋梁の場合はパラペットの耐力の方が背面土の耐力よりも大きいことから、合成バネの履歴特性はパラペットが壊れる前後で異なり、パラペットがせん断破壊後は、前の履歴の最大変位まで変位した後に背面土のみで抵抗するモデルとしている。

#### 4.6 解析ケース

解析ケースとしては、間詰め材を設置せず、遊間量に着目したケースと、表 - 2 に示すように、ゴム製間詰め材の設置個数を 12 個から 48 個まで変化させた 4 ケースについて、橋台の安定計算に対する影響と地震慣性力の低減効果について感度分析を行った。

#### 4.7 解析方法

入力地震波形は「道路橋の耐震設計に関する

表 - 2 解析ケース(間詰め材の設置個数変化)

解析ケース	Case1	Case2	Case3	Case4
設置個数	12個	24個	36個	48個
面積(m <sup>2</sup> )	0.45	0.90	1.35	1.80
間詰め材圧縮ひずみ	60%	60%	60%	60%
バネ定数(MN/m)	75.0	150.0	225.0	300.0
水平反力(MN)	4.5	9.0	13.5	18.0
水平変位(m)	0.060	0.060	0.060	0.060
1 次の固有周期(sec)	0.516	0.431	0.378	0.340
間詰め材を設置しない場合の 1 次の固有周期：0.686(sec)				

資料」<sup>5)</sup>に示されるレベル 2，タイプ 地震動のうち，種地盤用 No.1 標準波形(最大加速度 686.831gal)を用いている。また，時刻歴応答解析における数値積分には，ニューマークの法(γ=1/4)を用い，積分時間間隔は解の収束性と桁の応答加速度の精度を向上させるため，t=1/20000 秒としている。また，各非線形部材の履歴減衰の他に粘性減衰定数として，橋脚は 2%，基礎は 20%，橋台たて壁は 5%，橋台パラペット部および剛部材は 0%とし，橋全体の粘性減衰としてレーリー減衰を用いている。

### 5. 解析結果

#### 5.1 桁遊間量に着目した応答結果

まず，間詰め材を設置せず，遊間量に着目した解析を実施し，応答特性を把握した。図 - 7 に遊間量 100mm を標準とし，前後 20mm ずつ変化させた場合の遊間量と P1 橋脚の最大応答塑性率の関係を示す。図より，遊間量，即ち桁の増幅距離が小さくなるに従って最大応答塑性率

は小さくなり、遊間量を 20mm まで小さくした場合に、橋脚の許容塑性率  $\mu_a=4.299$  を下回る結果となる。ここで、遊間量が 100mm の場合の上部構造の応答変位と応答速度、応答加速度の関係をプロットしたものをそれぞれ図 - 8 と図 - 9 に示す。まず、図 - 8 に示す応答速度について、遊間量が 100mm に相当する応答変位 0.10m 直前付近で最大値 1.63m/s に達し、また、図 - 9 に示す応答加速度についても同様に、応答変位 0.10m 付近で最大値  $14.91\text{m/s}^2$  に達している。以上より、応答速度はパラペットに衝突する直前に、また、応答加速度はパラペット衝突時に最大応答に達する結果となる。

図 - 10 には、遊間量と上部構造の最大エネルギー、最大応答加速度の関係を示す。ここで、最大エネルギーとは、上部構造の最大運動エネルギーを示しており、式(4)により算出している。

$$W = 1/2 \cdot m \cdot v^2 \quad (4)$$

ここに、 $m$ ：上部構造の質量 = 62400kg  
 $v$ ：上部構造の最大応答速度

図より、両者とも遊間量が小さくなるに従って小さくなるのがわかる。

## 5.2 間詰め材をパラメータとした応答結果

次に、標準ケースの遊間量 100mm に対して、遊間部にゴム製の間詰め材を充填し、間詰め材の設置個数をパラメータとした応答結果を示す。

まず、図 - 11 に間詰め材の軸方向剛性と上部構造の最大応答変位の関係を示す。図より、間詰め材の軸方向剛性が大きくなるに従って最大応答変位は小さくなる。次に、図 - 12 に間詰め材の設置個数と上部構造の最大運動エネルギー、最大応答加速度の関係を示す。図より、両者とも応答変位の傾向と同様に、間詰め材の軸方向剛性が大きくなるに従って小さくなる。これは間詰め材の軸方向剛性が付加されたことで橋全体の固有周期が表 - 2 に示すように小さくなり、地震応答が低減されたものと考えられる。

また、図 - 13 に間詰め材の軸方向剛性と P1 橋脚の最大応答塑性率の関係を示す。傾向は上部構造の応答変位の結果と同様であり、間詰め

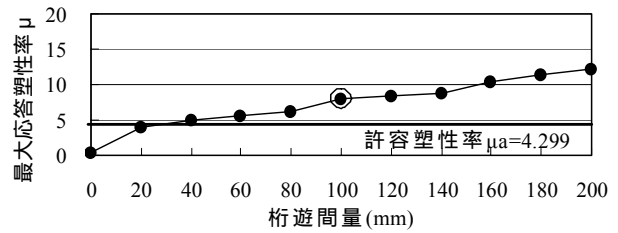


図 - 7 遊間量と P1 橋脚の最大応答塑性率

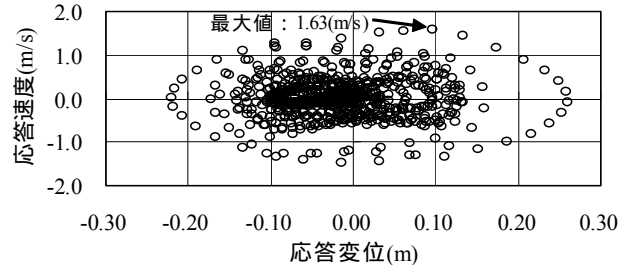


図 - 8 応答変位 - 応答速度関係

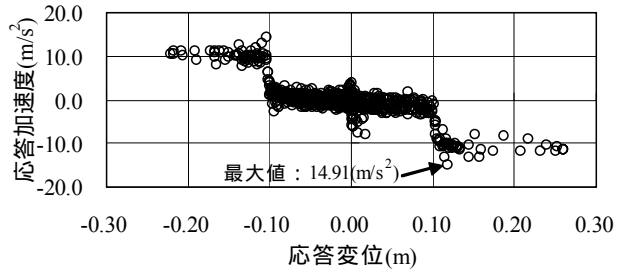


図 - 9 応答変位 - 応答加速度関係

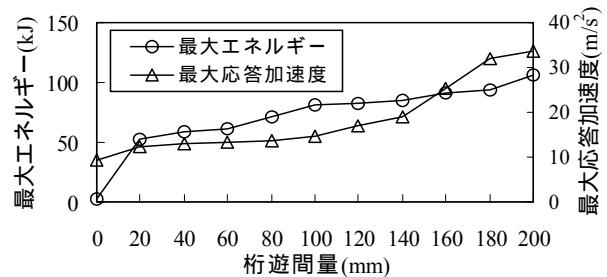


図 - 10 遊間量と上部構造の最大エネルギー、最大応答加速度の関係

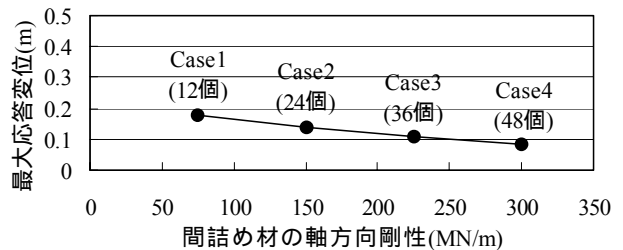


図 - 11 間詰め材と上部構造の最大応答変位

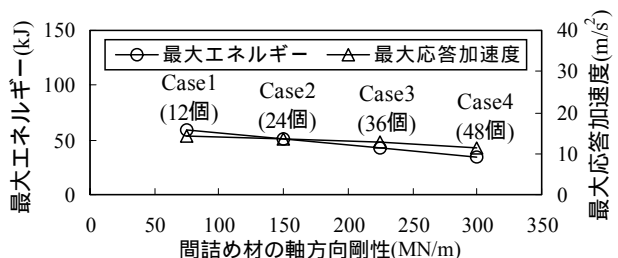


図 - 12 間詰め材と上部構造の最大エネルギー、最大応答加速度

材を桁端部に24個設置した場合に、橋脚の許容塑性率  $\mu_a=4.299$  を下回る結果となる。

一方、図-14に示すように、地震時に橋台基部に作用する水平力と曲げモーメントは Case1を除いて地震時の安定計算から逆算した作用力の許容値以下となることを確認した。

### 5.3 常時の変位量に対する検討結果

図-15に間詰め材の軸方向剛性とA1橋台基部（可動支持）の作用力の関係を示す。図中には、常時の桁の温度伸縮量である約20mmに対して、橋台基部に作用する水平力と曲げモーメントの関係を示している。これによると、間詰め材の軸方向剛性が大きくなるに従って水平力、曲げモーメントとも大きくなるが、常時の安定計算上の許容値から逆算した許容水平力に対しては、すべてのケースで許容値を下回るものの、許容曲げモーメントに対しては Case3以上で許容値を満足しない結果となる。

以上の傾向を踏まえ、橋脚の地震応答と橋台の安定計算の両方を満足する間詰め材を設置することにより、合理的な耐震補強が可能となる。

なお、本解析結果は一種類の地震波形に対するものであるが、地震波によっては最適な間詰め材の設置個数が変化する可能性は考えられる。

## 6. まとめ

- (1) 間詰め材を設置しないケースでは、桁遊間量が小さくなるに従って、上部構造の最大運動エネルギーおよび最大応答加速度が小さくなるため、橋脚の最大応答塑性率は小さくなる。
- (2) 間詰め材を桁遊間部に充填する場合、間詰め材の設置個数、即ち軸方向剛性が大きくなるに従って、上部構造の最大応答変位および橋脚の最大応答塑性率は小さくなり、地震応答を低減できることを確認した。
- (3) 間詰め材の設置個数の増加に従って、上部構造の最大運動エネルギーおよび最大応答加速度は小さくなるが、橋台に対して常時の桁の移動量に伴う作用力が大きくなる。

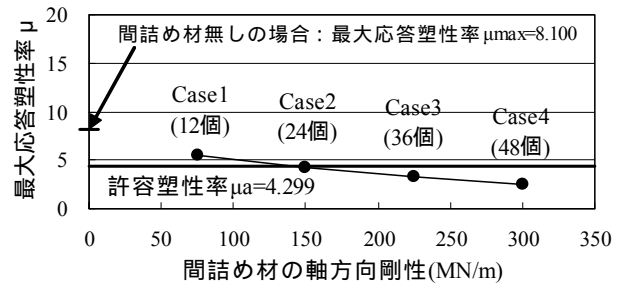


図-13 間詰め材とP1橋脚の最大応答塑性率

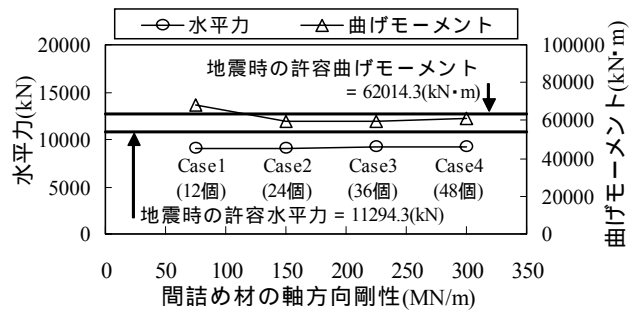


図-14 橋台に作用する地震時の最大作用力

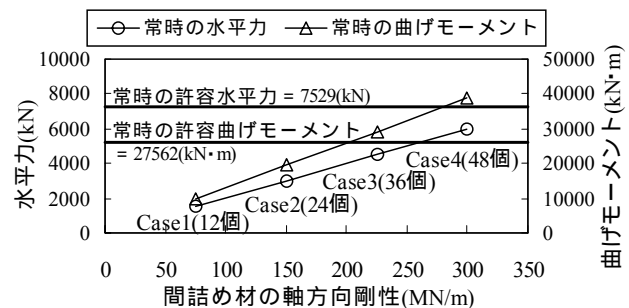


図-15 上部構造の温度伸縮に伴う橋台作用力

今後、本工法を実用化するために、解決すべき諸課題としては、間詰め材の経年劣化の影響や橋台背面土の抵抗特性を実験等により正確に評価することが必要であると考えられる。

## 参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，耐震設計編，pp.99-100，2002.3
- 2) 田崎賢治，幸左賢二，手嶋康博，小郷政弘：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
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，下部構造編，pp.308-313，2002.3
- 4) 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集，pp.203-206，1998.1
- 5) 日本道路協会：道路橋の耐震設計に関する資料，pp.10.6，1997.3