

◆ 設計法特集 ◆

上部構造端部と橋台の衝突が橋全体の地震時挙動に及ぼす影響

運上茂樹* 近藤益央** 三上 卓***

1. はじめに

現在の道路橋の設計では、桁と橋台間または隣接する桁間の遊間は、大規模地震時でもここで衝突が生じないように設定される場合が多い。この理由としては、隣接する桁間や桁と橋台間で衝突が生じた場合の橋全体の地震時挙動が明らかではなく、例えば、一方の桁の振動が隣接するもう一方の桁の振動に設計では想定していないような悪影響を及ぼす可能性もあること、桁の衝突の影響も考慮した橋台の設計法が確立されていないことなどが挙げられる。しかしながら、ゴム系の支承を用いた地震時水平力分散構造の橋では、一般に大規模地震時に支承の変形量が大きくなることから、桁間等の衝突を回避するためには桁遊間を大きく設定することが必要とされる。このような桁端部においては、大変位に対応可能な大規模な伸縮装置が必要となり、経済性や耐久性等の観点で好ましくない場合も生じ得る。

本研究は、道路橋の桁端部構造の合理化を図ることを目的とし、両端に橋台を有する道路橋を対象に桁端部の遊間を大規模地震時に生じる相対変位より小さく設定した場合の桁と橋台間の衝突が橋全体の地震時挙動に及ぼす影響について解析的に検討するとともに、衝突による衝撃力を緩和するために設置する緩衝装置の効果について検討した結果をまとめたものである。

2. 解析方法

桁端部における衝突現象を考慮して橋の地震時挙動を解析的に追跡するために、本研究では図-1に示すような骨組モデルを用いた弾塑性地震応答解析を行うこととした。

衝突現象を解析的に追跡するためには、衝突現象を再現できる適切なモデル化を図る必要があり、本研究では以下のように仮定した。

衝突現象は、桁と橋台間に図-2に示すような非線形の履歴特性を有する衝突バネを設置し、上部構造の変位が遊間量を超えて橋台のパラペットの方向に移動した際、衝突バネに反力が生じるものと仮定した。図-2(a)は、遊間に緩衝装置がない場合を想定したモデルであり、上部構造の応答が遊間変位より小さい場合には衝突バネには反力が生じないが、遊間量を超えるとバネ定数 K を有する衝突バネに反力が生じるものと仮定した。また、衝突の影響を緩和するために緩衝装置を設置する場合を考慮することとし、緩衝装置の特性として、

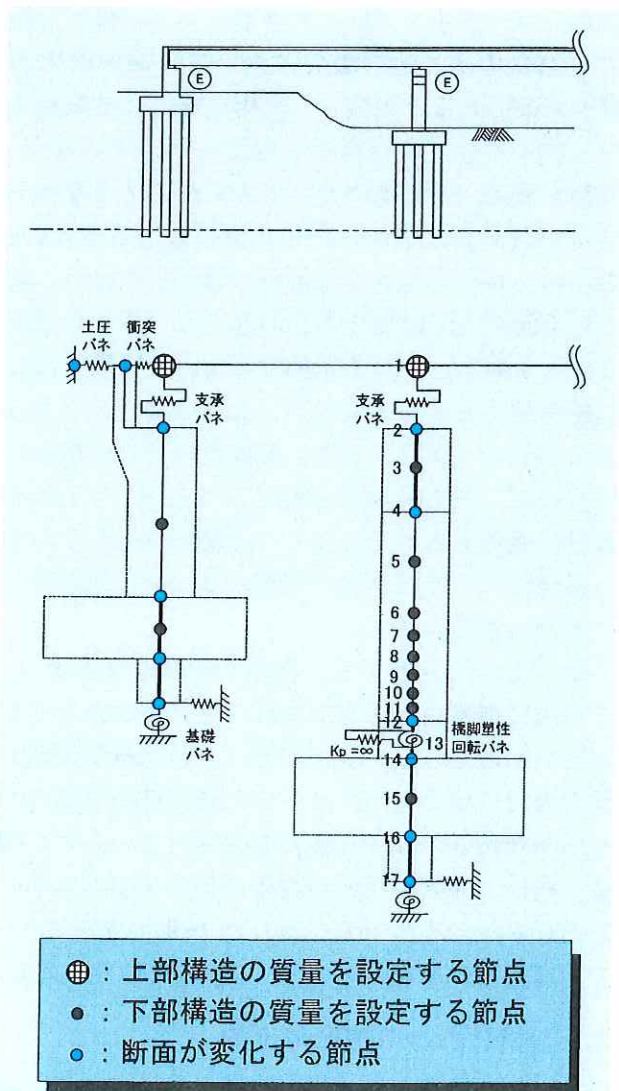


図-1 上部構造と橋台の衝突を考慮するための解析モデル

Earthquake Response Characteristics considering the Collision between Bridge Girder and Abutment

図-2(b) および (c) に示すようなハードニング型および降伏型のバネ特性を仮定した。ハードニング型は、ある厚さを有するゴムパッドのような緩衝装置で、圧縮変位を加えることにより徐々に硬くなる履歴特性を有する装置を想定している。降伏型は、円筒型のゴム製の緩衝装置で、これが軸方向力を受けると、ある変位量で降伏が生じ、その降伏抵抗を保つことが可能な履歴特性を有する装置を想定している¹⁾。

上部構造や橋脚、橋台等の構造部材については非線形履歴特性を考慮できる梁要素で、基礎については弾性バネでモデル化した。ゴム系支承は弾性バネとしてモデル化した。橋台については、背面に裏込め土があることから、この影響を押し込み側は受働土圧を上限として降伏する地盤反力を表すバネに、引出し側は抵抗しないバネとしてモデル化した²⁾。

衝突現象は非常に短時間で生じる衝撃的な現象であるため、これを解析で適切に再現するためには、衝突バネのバネ定数や解析時の積分時間間隔、減衰の設定などが重要となる。衝突バネ定数 K としては、上部構造の軸方向剛性を基本に波動伝播を考慮した剛性として文献 3), 4) で提案されている次式を用いた。

$$K = \gamma EA/L \quad (1)$$

ここに、

EA : 上部構造の軸方向断面剛性

L : 上部構造の長さ

γ : 衝突バネと上部構造の軸剛性の比

(ここでは 20 に設定)

また、解析時の積分時間間隔については、詳細は省略するが、試算を行い解析結果が安定して求められる 1/1000 秒に設定した。

減衰定数は上部構造が主に水平変位する 1 次振動モードと橋脚が主に変形する 2 次振動モードを対象にレイリー型の減衰マトリックスを設定した。

3. 解析対象橋および解析条件

3.1 解析対象橋

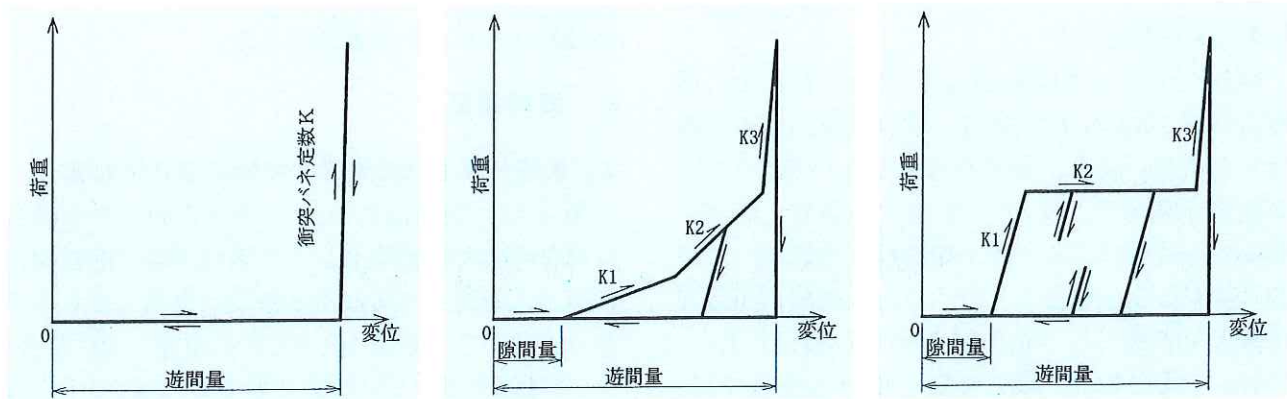
解析対象橋としては、一般的な橋を対象とすることとし、文献 5) に示される 5 径間連続の地震時水平力分散構造の橋を基本に設定した (図-3 参照)。桁端部での衝突は、桁と左右両端の橋台間で生じるものと仮定した。橋脚高さの影響を検討するために、橋脚高さを 10m とした場合と 35m とした場合の 2 種類のモデルを設定した。解析対象橋の設計条件は表-1 のとおりである。

3.2 解析条件

桁と橋台間の衝突が橋全体の地震時挙動に及ぼす影響と、緩衝装置の効果について解析的に検討

表-1 解析対象橋の設計条件

| | |
|---------------|-----------------------------|
| 上部構造形式 | 5 径間連続鋼 I 桁橋 |
| 橋長および支間長 | 40m × 5 径間 = 200m |
| 橋台形式 | 逆 T 式 |
| 橋脚形式および橋脚躯体高さ | 単柱橋脚 (高橋脚は中空断面) 10m および 35m |
| 基礎形式 | 杭基礎 |
| 支承形式 | 積層ゴム支承 |
| 支承条件 | ゴム支承による地震時水平力分散構造 |
| 地盤種別 | II 種地盤 |

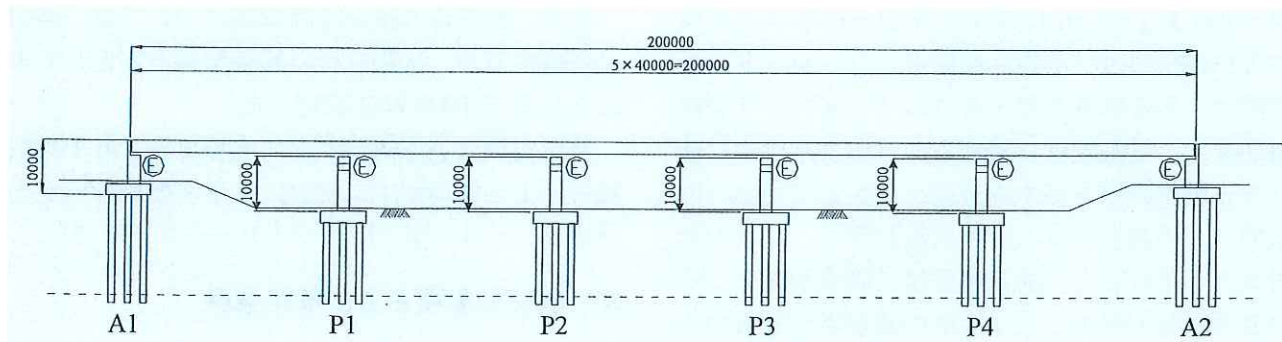


(a) 緩衝装置がない場合

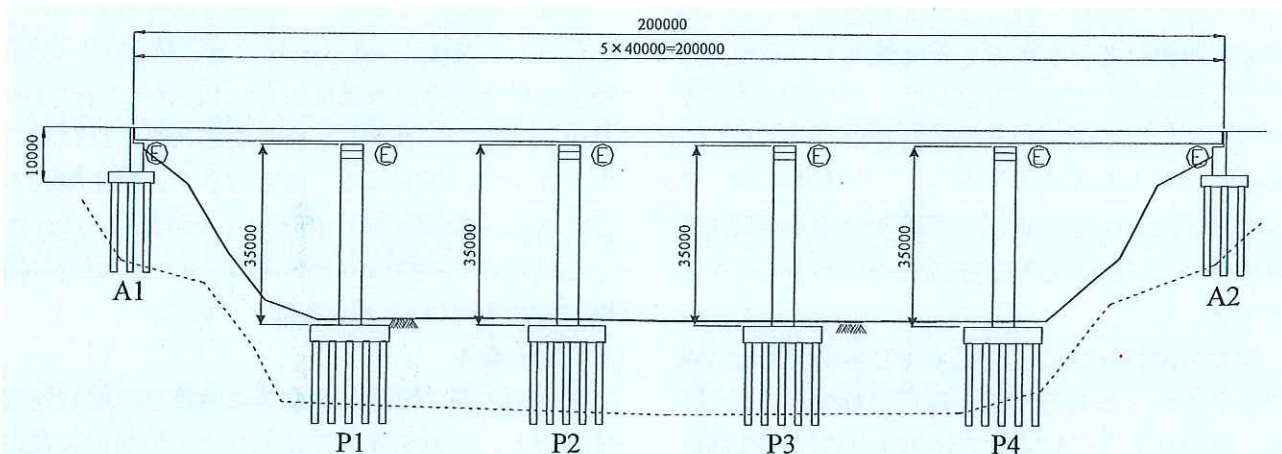
(b) ハードニング型の緩衝装置を設置した場合

(c) 降伏型の緩衝装置を設置した場合

図-2 衝突バネのモデル化



(a) 橋脚高さ 10m



(a) 橋脚高さ 35m

図-3 解析対象橋

表-2 解析パラメータ

| 橋脚高さ | 橋台背面土 | 衝突の影響 |
|------|---------|--|
| 10m | 考慮しない場合 | 考慮しない場合 |
| 35m | 考慮する場合 | 考慮する場合 ・ 緩衝装置のない場合 ・ ハードニング型緩衝装置を設置した場合 ・ 降伏型緩衝装置を設置した場合 (緩衝装置については 厚さ 20cm、支圧面積 10m ²) |

するために、以下のように解析ケースならびに解析条件を設定した。

解析パラメータは表-2 に示す通りとした。橋脚高さが 10m および 35m、橋台背面土がある場合およびない場合、衝突を考慮しない場合 (十分な遊間を確保する場合) と考慮する場合、衝突を考慮する場合については、緩衝装置を設置した場合と設置しない場合とした。また、初期の桁遊間は衝突を考慮しない場合、考慮する場合ともに、25cm に仮定した。緩衝装置を用いる場合には、その厚さを 20cm に、支圧面積は 10m² とした。

衝突が起こると橋台のパラペット部が破壊することが想定されるが、背面土圧が降伏することを

想定し、本解析ではパラペット部は弾性モデルと仮定した。

解析に用いる入力地震動としては、文献 5) に示されるタイプ II の標準加速度波形 3 波を用いた。最大応答値で評価を行う場合には 3 波の応答値の平均値を用いた。減衰定数は、いずれのモデル橋に対してもモード減衰定数を算出した結果、上部構造が主に水平変位する 1 次振動モードは約 4%、橋脚が主に変形する 2 次振動モードは約 14% のモード減衰定数となり、これをもとにレイリー型の減衰マトリックスを設定した。

4. 解析結果

4.1 衝突が橋全体の地震時挙動に及ぼす影響

図-4 は、橋脚高さ 10m、橋台背面土を考慮した場合の橋台側桁端部および橋台天端の応答変位波形と、衝突バネ反力の応答波形を示したものである。ここで、図-4 (b) は衝突を考慮しない場合、(c) は緩衝装置のない衝突を考慮した場合、(d) は降伏型緩衝装置を用いた場合である。入力加速度は、II 種地盤標準加速度波形 (タイプ II) である。

衝突が生じない場合には、解析上時刻 6 秒付近

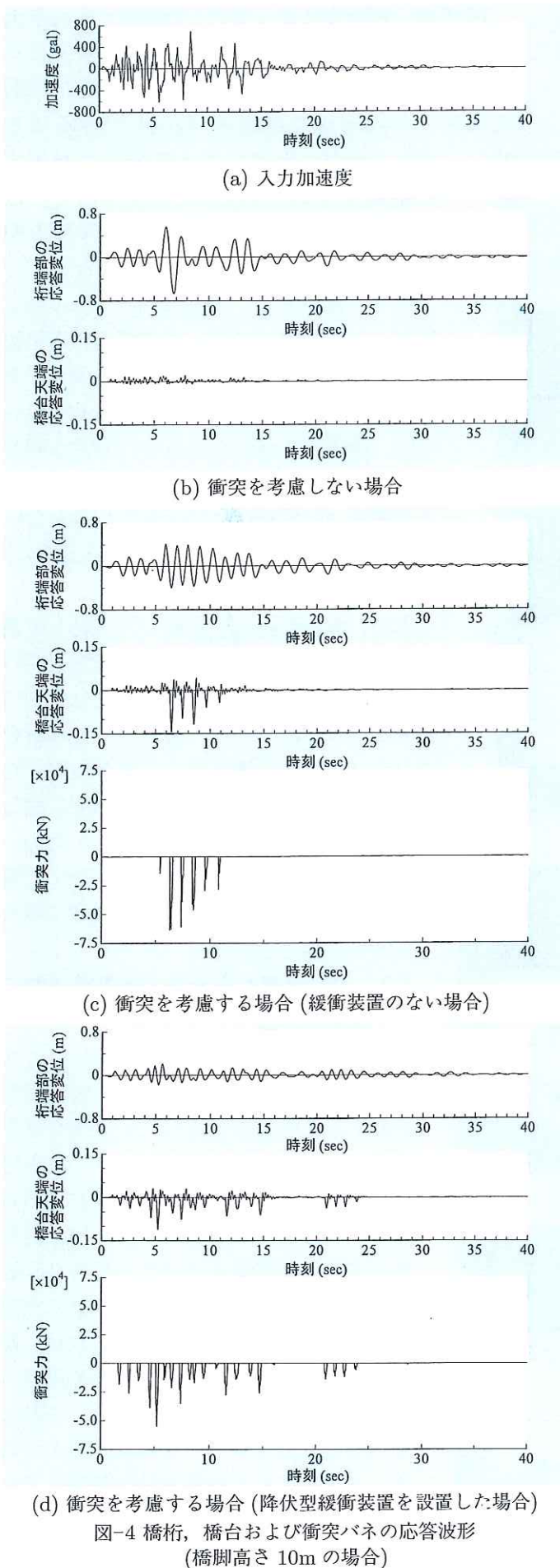


図-4 橋桁、橋台および衝突バネの応答波形
(橋脚高さ 10m の場合)

において約 67cm と大きな最大応答変位が生じている。橋台天端については、2cm 程度の最大変位である。

緩衝装置のない状態で衝突が生じる場合には、最初にまず時刻 5 秒付近でわずかに衝突が生じていることがわかる。時刻 6 秒付近では約 40cm の最大応答変位が生じ、これと同時に橋台天端に変位が生じるとともに、衝突バネにも大きな反力が生じている。当初の遊間は 25cm に仮定しているため、約 15cm 程度パラペットを押し込んだ状態となっている。その後、4 回程度衝突が生じた後は、応答変位が緩やかに減少している。

降伏型の緩衝装置を用いた場合には、緩衝装置の厚さを 20cm に仮定したため、小刻みに何度か衝突が生じる応答となっている。桁の最大応答変位は 21cm に低減され、衝突が生じない場合の約 1/3 以下の応答変位となることがわかる。

次に、衝突が橋の地震時の最大応答値に及ぼす影響を考察する。

図-5 は、桁中央における最大応答加速度と衝突の有無および緩衝材の有無の関係を示したものである。衝突が無い場合の最大応答加速度は 13m/s^2 程度であるが、桁衝突の発生により $35\sim 45\text{m/s}^2$ 程度の最大応答加速度が発生した。緩衝装置を設置することにより最大加速度は低減され、 35m/s^2 程度以下となった。

図-6 は、桁中央における最大応答変位を示したものである。桁の最大応答変位は、衝突を考慮すると橋台により変位を拘束することになり、65~70%程度に低減された。さらに、緩衝装置を設けることにより、最大応答変位はさらに減少し、衝突を考慮しない場合と比較して約 40%に小さくなった。

図-7 および図-8 は、それぞれ、橋脚天端の応答変位および橋脚基部の塑性ヒンジの回転角を示したものである。ここでは、P1 橋脚から P4 橋脚のうちで最大値をプロットしている。上部構造の変位が橋台による拘束により抑制されるため、橋脚の応

答変位と基部塑性ヒンジの応答回転角は衝突の発生により低減された。低減の度合いは、図-6 に示した桁の変位と同様の傾向を示している。また、緩衝装置を設置するとさらに応答値は低減した。

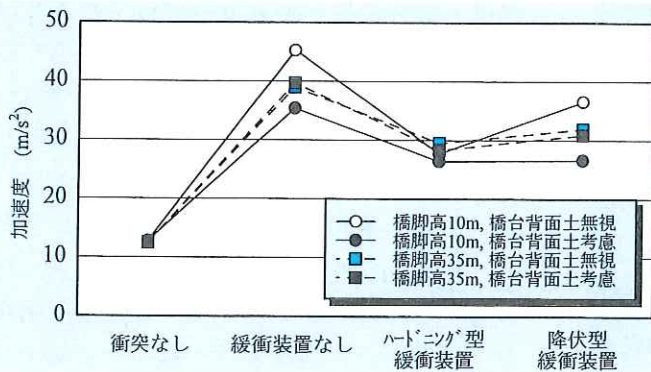


図-5 主桁中央の応答加速度

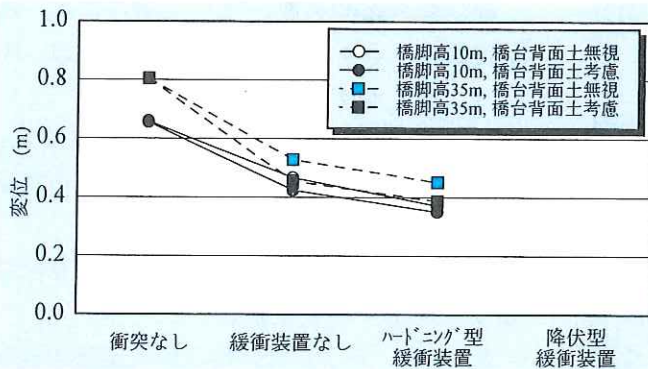


図-6 主桁中央の応答変位

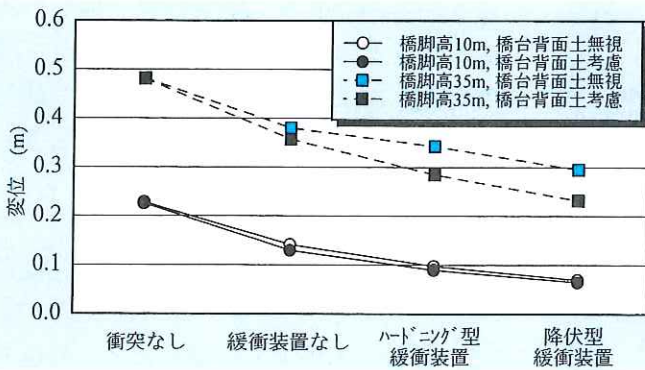


図-7 橋脚天端の応答変位 (P1~P4の最大値)

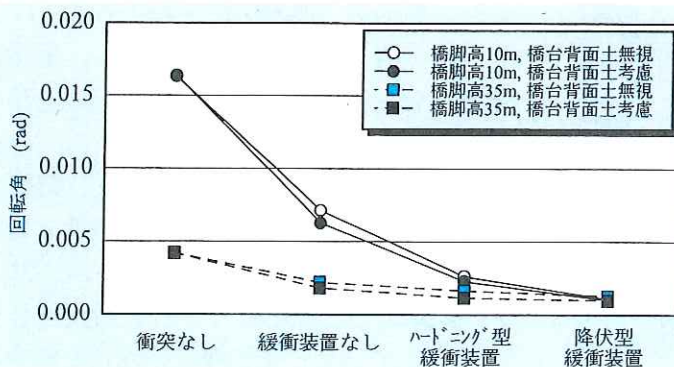


図-8 橋脚基部塑性ヒンジの回転角 (P1~P4の最大値)

図-9 は、桁衝突によって生じた衝突バネの最大反力 (衝突力) を示したものである。桁衝突により発生する最大衝突力は 60,000kN~100,000kN となり、上部構造の質量が 3,140t であること

から、衝突に起因して上部構造に発生する加速度は 20~30m/s² に相当する。緩衝装置を設置することにより衝撃力が 50,000kN~70,000kN まで低減された。

以上の解析では、橋脚高さを 10m および 35m に変化させたが、上部構造の応答加速度や応答変位、衝突力に関する両者の差違は顕著ではなかった。橋脚の変位については、橋脚高さが高くなる分、剛性が相対的に低くなるため大きな変位が生じるが、上部構造の応答変位には大きな相違がないため、逆に塑性ヒンジ部の回転角は小さくなっている。

また、橋台背面土を無視した場合と考慮した場合の 2 ケースをそれぞれ解析しているが、これについても両者の差違は小さい結果となった。これは、衝突が生じる橋台のパラペット部を弾性としてモデル化したために基礎を含めた橋台全体で衝突に対して抵抗したためと考えられる。このため、

パラペット部に降伏が生じる場合には橋台背面土による拘束の影響が顕著に現れるものと推定される。

4.2 緩衝装置が橋全体の地震時挙動に及ぼす影響

緩衝装置として、図-2 に示したようにハードニング型と降伏型の履歴特性を有する 2 種類を仮定した。緩衝装置を設置しない場合に比較していずれも応答変位や衝突力を低減する効果が認められた。上部構造の変位に関しては、降伏型の方が緩衝装置を設けない場合に比較して約 60% に、ハードニング型に比較して約 70% に低減している。これは、降伏型の場合には、振動の初期の段階から桁が緩衝装置に小刻みに衝突し、これによって振動エネルギーを吸収することによって全体として応答変位を低減しているためと考えられる。ハードニング型の場合には衝突に抵抗する構造とはなる

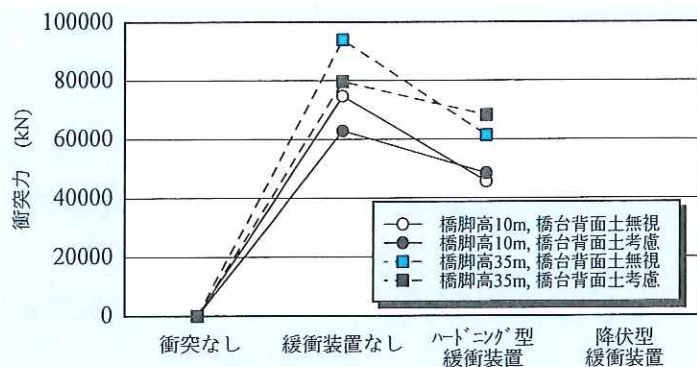


図-9 衝突パネの反力 (衝突力)

が、振動の初期の段階ではそれほど大きな振動エネルギーの吸収効果を期待できないため、降伏型よりは振動低減効果は小さかったものと推定される。

5. まとめ

上部構造と橋台の衝突が橋全体の地震時挙動に及ぼす影響と緩衝装置の効果に関して、以下のようない知見を得た。

- ① 上部構造と橋台に衝突を考慮することにより、上部構造の応答変位が約40%低減した。また、橋脚天端の変位、橋脚基部塑性ヒンジの回転角等を顕著に低減させる効果が認められた。一方、桁端部に発生する衝撃力により上部構造に4G程度の加速度が生じ、大きい衝突力が発生した。
- ② 緩衝装置を設置することにより、これを設置しない場合に比較して上部構造変位や橋脚の変位等を効果的に低減する効果が確認できた。
- ③ 緩衝装置としては、降伏型の方が応答変位の低減効果が高かった。これは、降伏型緩衝装置の方がエネルギー吸収効果が高いことによると考えられる。

今回の解析からは、上部構造と橋台の衝突を考慮することにより橋全体の地震時応答を効果的に低減可能であることが確認できた。今後、こうした衝突を考慮した耐震設計法を開発するために、橋台背面土や橋台パラペットのモデル化と設計法、効果的な緩衝装置の構造とその設計法、また、桁衝突により上部構造に発生する局所的な断面力や想定される損傷状況を明らかにし、桁端部の補強方法等

について検討することが必要と考えられる。

参考文献

- 1) 越峠雅博、運上茂樹、足立幸郎、長屋和宏：弾塑性型特性を有する円筒型ゴム製緩衝装置の衝撃緩衝効果に関する実験研究, 土木学会論文集, No.675/I-55, pp.99-112, 2001.4
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書, IV 下部構造編, V 耐震設計編, 平成8年12月
- 3) 川島一彦、庄司学：衝突緩衝用落橋防止システムによる桁間衝突の影響の低減効果, 土木学会論文集, No.612/I-46, pp.129-142, 1999.1
- 4) 川島一彦：桁間衝突と落橋防止構造の作用力, 第3回橋梁構造等の耐震設計法に関する講習会, 2000.10
- 5) 日本道路協会：道路橋の耐震設計に関する資料, 平成9年3月

運上茂樹*



独立行政法人土木研究所耐震研究グループ耐震チーム
 上席研究員, 工博
 Dr.Shigeki UNJOH

近藤益央**



同 企画部研究企画課主査
 (前 国土交通省土木研究所耐震技術研究センター耐震研究室主任研究員)
 Masuo KONDOH

三上 卓***



同 耐震研究グループ
 耐震チーム研究員, 工博
 Dr.Taku MIKAMI