

桁衝突とエネルギー吸収を考慮した落橋防止構造に関する一考察

Dynamic Behavior of Viaducts with PC Cables in Consideration of Pounding of Girders and Energy Absorption

北海道大学大学院工学研究科 フェロー 林川俊郎 (Toshiro Hayashikawa)
 北海道大学大学院工学研究科 ○学生員 広岡崇史 (Takashi Hirooka)
 (独)北海道開発土木研究所 正員 池田憲二 (Kenji Ikeda)
 北海道大学大学院工学研究科 学生員 シェハタ・エルラーヘム (Shehata E. Abdel Raheem)

1. まえがき

兵庫県南部地震では橋梁構造物が甚大な被害を受けた。震災では想定外の地震力が作用し、鋼製橋脚の局部座屈による被害ばかりではなく、支承や落橋防止装置などの各構造要素の損傷も目立ち上部構造の逸脱や落橋が見られた¹⁾。その結果、緊急交通へ非常に大きな支障を来したことから、災害時においても高架橋全体システムとしての機能を果たすことが重要視されるようになった。これを契機として不測の事態に対するフェイルセーフ機構として落橋防止システムの機能が注目されている²⁾。

ここで落橋防止構造は、上下部構造間に予期しない大きな相対変位が生じた場合に、けたかかり長を超えるような変位が生じないようにするための構造形式²⁾であり、2連の上部構造を連結する構造形式にはPC鋼材が使用されることが多い。現在、地震時における上部構造の挙動に対し、相互の桁を吊り下げて落橋を防止するPCケーブルが数多く使用されている。PCケーブルは柔軟性のある構造であるが、桁の応答変位が増大した場合には隣接する桁同士で衝突が発生する可能性がある。

兵庫県南部地震の際にも桁衝突により桁端部や橋台が損傷する被害が数多く見られた¹⁾。現在、桁の衝突作用に関する研究³⁾がさまざまなされており、桁の衝突効果により長周期化した構造物の応答変位を低減させる効果も期待されている⁴⁾。しかし、上部構造の振動を抑制できるが、衝突により各構造要素に悪影響を及ぼすことが考えられ、その特性を把握することが重要である。

以上の観点から、隣接する桁の衝突を考慮した高架橋全体構造システムとしての大地震時応答性状を把握する必要があるものと考えられる。そこで本研究では、落橋防止構造が高架橋の動的挙動に与える影響について考察する。解析モデルは、隣接する桁の挙動の相互作用について考慮できる2径間高架橋を対象とし、落橋防止構造にはPCケーブルを用いる。現在、エネルギー吸収性能を有する落橋防止構造の研究⁵⁾が盛んに行われており、落橋防止構造が耐震装置として主要な構造要素となり得るかが焦点となっている。本研究においてもPCケーブルにおける履歴吸収型のモデルを構築し、地震エネルギーの低減効果が計れるか検討を行う。解析に際しては、幾何学的非線形性および材料非線形性を考慮した弾塑性有限変位動的応答解析を行い、上部構造、橋脚、支承およびPCケーブルの応答に着目し、大地震時における高架橋全体システムとしての動的挙動について比較検討する。

2. 解析モデル

本研究の目的は高架橋全体構造の動的挙動を知ることである。よって、上部構造、支承、橋脚および落橋防止構造としてのPCケーブル、さらに隣接する桁の挙動の相互作用を考慮できる最も簡単な2径間高架橋を解析モデルとした。

2.1 上部構造・橋脚

本研究では、図-1に示すような2径間高架橋を解析モデルとする。上部構造は、2車線道路を想定して幅員8.5m、主桁間隔2.1mの鋼主桁4本と鉄筋コンクリート床版から成る合成桁である。左側の桁G1を40m、右側の桁G2を30mとし、上部構造の総重量は5.145MNである。なお、解析に際しては断面2次モーメントと死荷重合計が等価な鋼断面に換算した。橋脚は鋼製橋脚を対象とし、断面幅を2.2m、板厚を0.05mの正方形箱形断面とした。上部構造と橋脚の断面諸元を図-2に示す。なお、上部構造および橋脚をはり柱要素(ファイバー要素)にモデル化し、上部構造を14要素に分割し、橋脚は5分割とした。桁や橋脚に用いる鋼材は、応力-ひずみ関係がバイリニア型になるものとし、ヤング率を $2.0 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ 、降伏応力を 235 N/mm^2 、ひずみ硬化を1%とした。

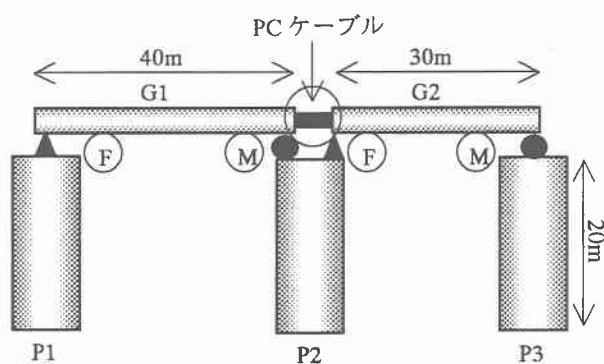


図-1 2径間高架橋

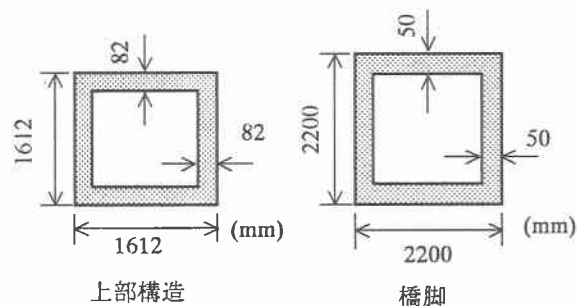


図-2 上部構造と橋脚断面

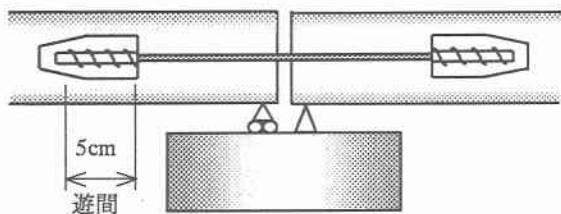


図-3 PC ケーブル

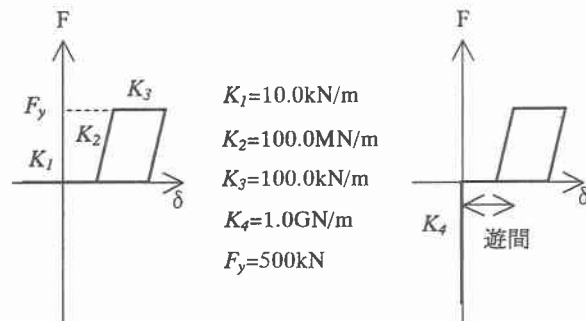


図-4 PC ケーブルの解析モデル

2.2 支承

支承は鋼製の固定支承と可動支承を対象とし、P1 橋脚に固定支承、P2 橋脚には固定・可動支承の双方を、P3 橋脚に可動支承を設置した。水平、鉛直、回転の3方向のばね要素を持たせる。可動支承は非線形ばねでモデル化し、第1次剛性を鉛直反力により生じる摩擦の剛性10.0MN/m、第2次剛性を地震時においてすべりの状態が支配的であると考えて小さな値10.0kN/mとした。固定支承については線形ばねでモデル化し、十分剛であると考えてその剛性を1.0GN/mとした。鉛直方向は十分剛であるため剛性を10.0GN/m、回転方向にはヒンジの条件を考慮し剛性を100.0kN・m/radとした。

2.3 落橋防止構造・桁の衝突

本研究において落橋防止構造としてPCケーブルを採用した(図-3参照)。水平、鉛直、回転の3方向ばね要素を持たせ、その水平力-変位の関係を図-4に示す。PCケーブルに引張力が作用したときに+側に変位し、圧縮力が作用したときに-側に変位するものとする。PCケーブルは繰り返しの地震動により塑性履歴ループを描くモデルを用いた。 K_1 はPCケーブルにある遊間(5cm)の剛性であり小さな値を設定した。 K_2 はPCケーブルに引張力が作用し遊間を超えて変位が及ぶと作用する剛性である。さらに引張力が作用し降伏荷重 F_y に達した後の剛性を K_3 とする。また圧縮力が作用したときはほとんど抵抗しないため、小さい第1次剛性 K_1 の値を用いた。

大地震動によりPCケーブルに圧縮力が作用した場合、桁の衝突が発生する可能性もある。本研究では、桁衝突が高架橋システムに及ぼす特性を知るために、桁衝突を考慮した解析も対象と考えた。その解析モデルとしてPCケーブルが圧縮側に変形すると桁の衝突が発生するものとし、大きなばね剛性 K_4 を設定し衝突を模擬する。

なお鉛直方向は十分剛であるため剛性を10.0GN/m、回転方向にはヒンジの条件を考慮し剛性を100.0kN・m/radとした。衝突を考慮しないPCケーブルの解析モ

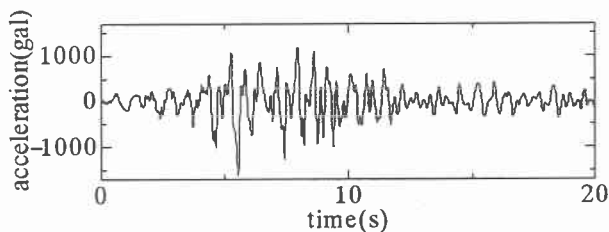


図-5 入力地震波

デルをType1、衝突を考慮したモデルをType2として解析を行うこととする。

3. 解析方法

本研究において採用した非線形動的応答解析は、材料非線形性と幾何学的非線形性を考慮し、はり柱要素の有限要素法とNewmark β 法および修正Newton-Raphson法を併用した平面骨組構造のための弾塑性有限変位動的応答解析である。また構造減衰に関しては質量比例型を仮定し、1次の固有振動モードに対する減衰定数を0.05とした。入力地震波は、本高架橋システムが想定外の大地震動に対してどのような挙動を示すか把握するために、兵庫県南部地震時に観測された地震波をもとに作成された1種地盤用標準波の2倍の加速度を持つ地震波を用い、解析モデルの橋軸方向に作用させた。その加速度波形を図-5に示す。なお最大加速度は1624galである。

4. 解析結果

4.1 固有振動解析結果

PCケーブルを設置したモデルの固有振動解析を行った。PCケーブルの剛性は両Typeともに上部構造がPCケーブルで連結されている状態が支配的であると考えて、第2次剛性 K_2 の値を用いた。固定支承における剛性は十分剛であると考えて1.0GN/mとし、可動支承においては地震時におけるすべりの状態を想定し剛性を10.0kN/mとした。解析モデルにおける1次モードの固有周期は0.63秒、固有振動数は1.58Hzとなった。これはPCケーブルを設置していない解析モデルと比較するとモデル全体の剛性が高まるため固有周期は短くなっている。またPCケーブルの存在により、左右の上部構造が一体となって振動するモード形状となった。

4.2 落橋防止構造に作用する水平力

PCケーブルに作用する水平力と変位の関係および水平力の時刻歴応答を図-6に示す。ここでの変位とは相対変位のことをいい、PCケーブルは+側で引張、-側で圧縮に作用する。Type1(衝突なし)では、8~11秒付近でPCケーブルに引張力が作用し塑性変形をしているのが確認できる。降伏荷重は0.5MNである。PCケーブルは圧縮側にはほとんど抵抗をしないため14cmもの応答変位が発生した。Type2(衝突あり)は、8秒付近から大きな衝突が起こり、最大6.1MNもの衝突力が発生した。衝突は大小あわせて41回発生したのが確認された。Type2はType1に比べてPCケーブルの相対変位は小さく、履歴ループも小さいものとなっている。桁の衝突現象がPCケーブルに作用する引張力を低減させる結果となった。

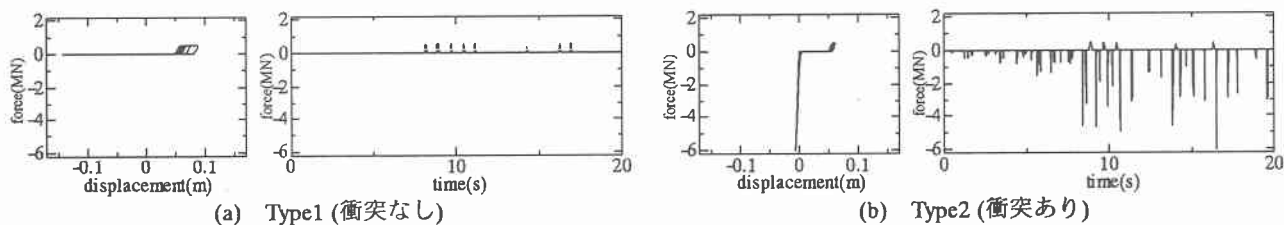


図-6 PCケーブルのF- δ 関係と水平力の時刻歴応答

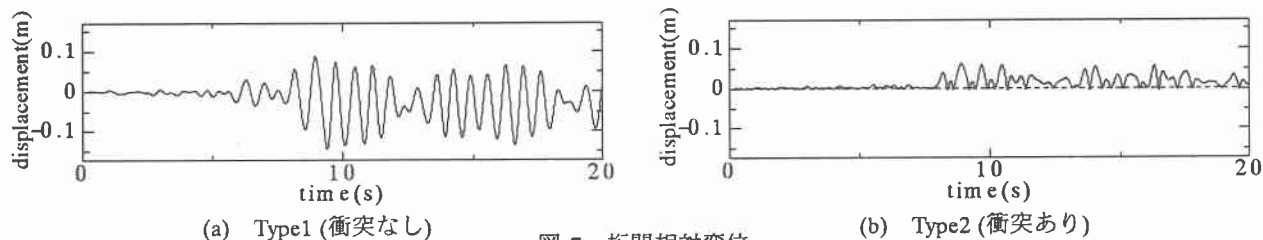


図-7 桁間相対変位

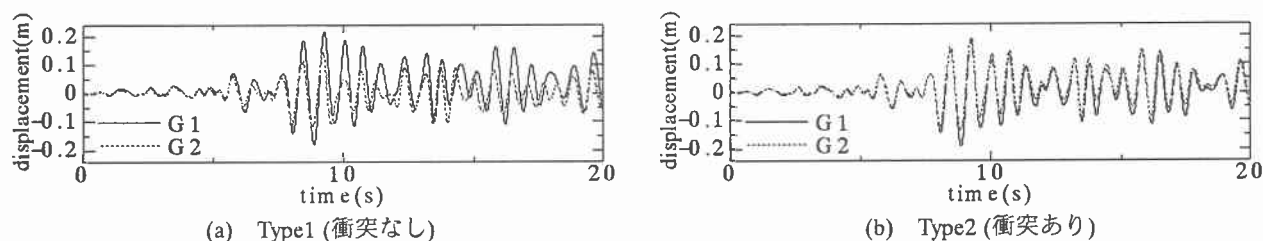


図-8 上部構造の時刻歴応答変位

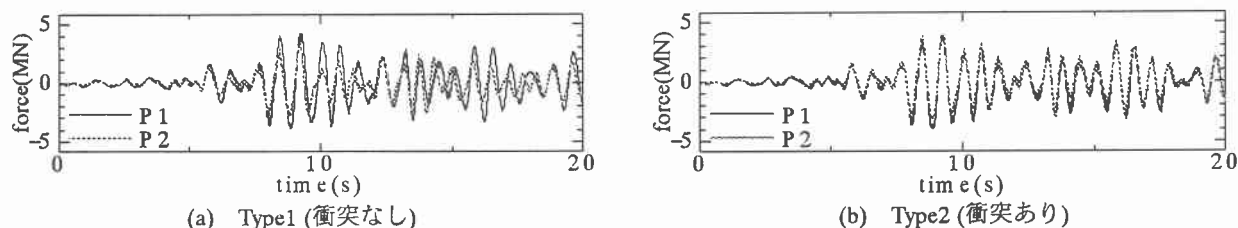


図-9 固定支承に作用する水平力の時刻歴応答

4.3 桁間相対変位

図-7に桁間の相対変位を示す。桁の間隔が大きく変位するときに+側に、小さくなるときに-側に変位するものとする。なお、Type2(衝突あり)では桁の衝突が発生する地点を破線で表した。Type1(衝突なし)では、8秒付近から応答変位が大きくなるのが確認できる。PCケーブルは圧縮側ではほとんど抵抗をしないため最大応答変位は14cmほどであるのに対し、引張側ではPCケーブルが抵抗を示すため最大応答変位10cmと減少している。またP1橋脚が大きく塑性変形をしたことにより、残留変位の影響が見られる。Type2(衝突あり)において、圧縮側は変位が抑制されているため衝突の模倣が確認できる。引張側での最大応答変位は6cm程度で、Type1に比べて小さくなった。これはType1では桁の挙動に対しPCケーブルが引張力のみで抵抗するのにに対し、Type2では圧縮側でも負担するからである。

4.4 上部構造の応答変位

図-8に桁G1および桁G2の時刻歴応答変位を示す。Type1(衝突なし)において、桁G1の応答にはP1橋脚の塑性変形による残留変位の影響が見られる。桁G1の最大応答変位は22cmであるのに対して桁G2は15cmであり、

左右の桁の応答には差が生じている。これは桁G1の重量が大きいためより慣性力が作用し、桁G1の挙動がより大きくなったものと考えられる。しかしType2(衝突あり)においては、両桁の最大応答変位は19cmとなり、桁の衝突現象により桁G2の挙動が大きくなる結果となった。またType1に比べて左右の桁の地震時挙動がより連動していることが確認できた。

4.5 固定支承に作用する水平力

地震が発生すると上部構造に慣性力が働き、桁G1および桁G2が動き始める。上部構造の挙動にともない固定支承には水平力が大きく作用するものと考えられる。そこで、P1およびP2橋脚の上部に設置してある固定支承に作用する水平力に着目し、図-9には固定支承に作用する水平力の時刻歴応答を示す。Type1(衝突なし)では、P1橋脚上部の固定支承に作用する水平力の方がP2橋脚上部の固定支承に作用する水平力よりも大きくなった。これは桁G1の重量が大きいためより大きな慣性力が作用したためである。最大水平力はP1橋脚上部の固定支承では4.3MN、P2橋脚上部の固定支承では3.4MNとなっている。Type2(衝突あり)では、両橋脚上部の固定支承に作用する水平力は近づく傾向となった。桁の衝突が発生

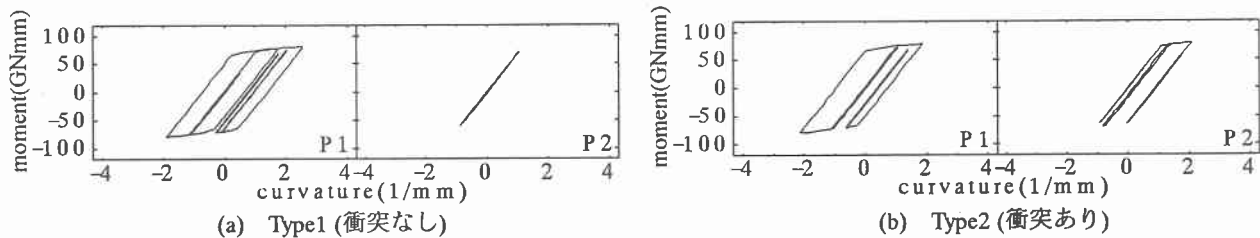


図-10 橋脚基部に作用する曲げモーメントと曲率の関係

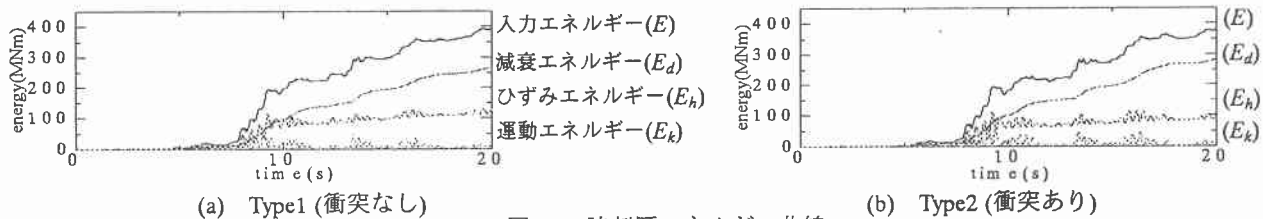


図-11 時刻歴エネルギー曲線

する地点においては、固定支承にも大きな水平力が作用していることが確認できた。このことから桁の衝突効果により固定支承にもその影響が現れ、P2 橋脚上部の固定支承にはより大きな水平力が作用したものと考えられる。

4.6 橋脚基部に作用する曲げモーメント

図-10 に橋脚基部に作用する曲げモーメントと曲率の関係を示す。固定支承が配置された橋脚基部に大きく曲げモーメントが作用するため、P1 および P2 橋脚基部に着目し考察を行う。なお橋脚の降伏曲げモーメントは $70.8 \text{ GN} \cdot \text{mm}$ である。Type1(衝突なし)では、P1 橋脚基部は塑性変形を示したのに対し、P2 橋脚は弾性領域内に変形は留まった。これは、P2 橋脚上部にある固定支承に作用する水平力が 3.4 MN と降伏荷重の 3.5 MN よりも小さかったためである。Type2(衝突あり)では、両橋脚基部が塑性変形を示した。Type1 に比べて P1 橋脚基部は若干小さな履歴ループを描く結果となったが、P2 橋脚基部は大きく塑性変形を起こした。これは桁の衝突の影響が P2 橋脚基部にも及び、大きな塑性変形を起こしたと考えられる。

4.7 エネルギー吸収

図-11 に時刻歴エネルギー曲線を示す。ここでのエネルギーとは、構造物が吸収するエネルギーを意味する。各吸収エネルギーに着目すると、全体に占める割合が一番大きいのは減衰エネルギーで、次いでひずみエネルギーであり、運動エネルギーは非常に小さいものとなっている。また本研究の解析において、両 Type ともに橋脚基部が大きく塑性変形を示したことから、履歴吸収エネルギーの大部分は橋脚の塑性化によるものと考えられる。Type1(衝突なし)の方が Type2(衝突あり)に比べてひずみエネルギーが大きいのが確認できる。これは、Type1 の P1 橋脚基部が大きく塑性変形したためであると考えられる。本研究では履歴吸収型の PC ケーブルを用いたが、履歴吸収効果は構造物が吸収するエネルギーに比べて小さく、落橋防止構造により地震エネルギーを低減させる効果はあまり期待できない結果となった。

5. あとがき

本研究では、2 径間高架橋を対象とし、地震時におけ

る PC ケーブルの耐震性能を検討するとともに、桁の衝突が高架橋の動的挙動に与える影響について考察を行った。PC ケーブルは非線形ばねでモデル化し、圧縮側は小さなばね剛性とし、引張側では履歴吸収を目的としたばね定数を設定した。また大きなばね剛性を用いて桁の衝突を模擬した。

PC ケーブルは、地震の挙動により桁間隔が広がる時には有効に作用し、その応答を抑制することができる。本研究では、PC ケーブルの塑性化によりひずみエネルギーとして地震エネルギーの低減を目指した。しかし、構造物全体が吸収するエネルギーの割合の中でその位置付けは小さなものであり、PC ケーブルのみで地震時のエネルギー吸収を見込むことは難しく、他の構造部材と補完し合い地震エネルギー吸収を期待することが望ましいと考えられる。また大地震により桁が衝突すると、上部構造の応答が抑制されるとともに桁間相対変位も低減される。しかしながら本来、落橋防止構造が負担する上部構造の慣性力が低減し、上下部構造を連結する支承にもその衝撃力が伝達し、更には橋脚基部にまで悪影響を与える結果となった。また衝突時に発生する水平力は 6.1 MN と大きいもので桁端の損傷が懸念されることも含めて、桁衝突を回避する設計が望ましいと考えられる。

今後の課題としては、落橋防止構造ばかりではなく、変位制限構造や支承なども含めたシステムでの耐震性能の向上を目指した解析も検討していく必要がある。

参考文献

- 1) 土木学会：阪神・淡路大震災調査報告、pp1-20、1996.1.
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書 V 耐震設計編、2002.
- 3) 大島俊之ら：橋梁端部周辺に着目した大地震時水平衝突応答解析、応用力学論文集、Vol.5、pp519-526、2002.8.
- 4) 佐藤雅士ら：桁と橋台の衝突を考慮した橋梁の地震時挙動に関する解析的検討、第 26 回地震工学研究発表会講演論文集、pp1161-1164、2001.8.
- 5) 頭井洋ら：単純鋼桁・橋脚系のエネルギー吸収型落橋防止構造に関する一検討、鋼構造論文集、第 6 巻、第 24 号、pp.55-64、1999.12.