

論文 合理的な橋梁桁端構造のための衝撃吸収ブロックの提案

山上 正遵*1・羽田野 英明*2・阪口 裕紀*3・六郷 恵哲*4

要旨:本研究では、橋梁の桁遊間を縮小することを目的とし、大規模地震の際に起こりうる主桁-橋台胸壁の衝突力の緩和効果と、上部構造の応答変位の抑制効果を有し、地震後の復旧性を考慮した特性を有する衝撃吸収ブロックを提案する。衝撃吸収ブロックに対し、水平方向および鉛直方向に静的載荷試験を行い、その特性の検証を行った。また、実橋梁を想定した動的解析を行い実用性も検討した。衝撃吸収ブロックは優れた変形特性を有し、実橋梁に適用した場合には、橋梁の桁遊間縮小だけでなく、主桁-橋台胸壁の衝突力を緩和できる機能も有していることを示した。

キーワード: 橋梁, 遊間, 衝突力, 衝撃吸収ブロック, 繊維補強コンクリート, 発泡スチロール

1. はじめに

現在、わが国には高速道路をはじめ多くの高架橋が存在し、居住区域に近接する高架橋も多い。居住区域に近接する高架橋では、橋梁から放射される騒音に対して、地域住民から改善要求が出されることも少なくない。橋梁から放射される騒音は、走行音、構造音、衝撃音¹⁾に大別することができる。このうち、近隣住民からの改善要求が多い騒音は、伸縮装置通過時の衝撃音である。この衝撃音の大きさは、通常の状態では、伸縮装置の遊間が広いほど、損傷しやすく、衝撃音も大きく²⁾なることが経験的に知られている。

一方、兵庫県南部地震以降、弾性ゴム支承や免震ゴム支承を用いて耐震性を高めた橋梁が主流となっているが、耐震性が向上した反面、地震時の揺れによる水平変位が大きくなるようになった。道路橋示方書³⁾では、地震時の上部構造と橋台との間には、レベル1地震動のみならず、レベル2地震動に対しても衝突が生じないように遊間を設けることを標準としている。上部構造と橋台が衝突しないような遊間を設けると、伸縮装置は、極厚鋼板を用いた鋼製フィンガージョイントやモジュラー型伸縮装置のような大規模なものとなり、走行性や騒音発生による周辺環境への影響、維持管理に問題が生じる場合が多い。

また、レベル2地震時には、伸縮装置が損傷することを前提とした設計法が採用されているが、伸縮装置の損傷が橋台パラペット等の構造部材へ影響を与えないような構造や、確実な桁遊間の確保については、明確な対応が行われていないのが現状である。

このようなことから、橋梁桁端部における伸縮装置構造の耐久性を高め、合理的な桁端構造とし、維持管理性を向上させることが求められている。桁遊間を縮小し、地震時に桁端部が橋台に衝突した場合に、橋台の一部が

裏込め土の方向に滑動し、桁端部の応答変位を吸収するロックオフ構造が有効である。このロックオフ構造は、文献⁴⁾にて基本思想が示されたが、採用事例は少ない。また、ゴム製緩衝材⁵⁾やハニカム型ダンパー⁶⁾を、桁端部と橋台胸壁間に設置し、上部構造の応答変位を抑制するとともに、橋台胸壁の損傷を防いだり、衝突荷重を緩和することが検討されている。

本研究では、伸縮遊間を縮小し、伸縮装置をコンパクト化して、桁端部での耐久性を高めるとともに、レベル2地震に対しては上部工と橋台および上部工相互の衝突を、コンクリート製の衝撃吸収ブロックで吸収する合理的な桁端構造の提案を最終目的とし、本論文では衝撃吸収ブロックの基本的な構造特性と衝撃力緩和効果について報告する。なお、本研究での衝撃吸収ブロックは、伸縮装置の損傷が橋台パラペット等の構造部材へ影響を与えず、確実な桁遊間を確保できる構造とし、施工性や地震後の復旧性に配慮し、図-1に示すような伸縮装置の下面に設置する形式を基本とし、水平方向の変形特性と鉛直方向の荷重支持特性を有する構造としている。

2. 衝撃吸収ブロックの構造特性

2.1 繊維補強セメント材料系衝撃吸収ブロックの特徴

これまでの桁遊間部における橋台胸壁と桁の衝突の影響を緩和することを目的とした研究^{7)~9)}では、桁遊間部に緩衝材を設置して、地震時の衝突力を緩和する研究が多いが、緩衝材の設置位置が橋台胸壁前面や、沓座面とする等、構造的に狭隘な場所に限定されている。衝撃の作用は一般に力、変形あるいはエネルギーで表されるが、本研究で提案する複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料(以下、HPFRCC)を用いた衝撃吸収ブロックは、主に変形の吸収(桁遊間を確保)が期待できるほか、

*1 岐阜大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 (正会員)

*2 中日本建設コンサルタント(株) 建設技術本部 技師長 工修 (正会員)

*3 丸栄コンクリート工業(株) 技術開発部 主任 (非会員)

*4 岐阜大学 工学部社会基盤工学科教授 工博 (正会員)

コンクリート系の材料を使用していることから設置場所は、図-1 に示したように桁の遊間部から橋台背面など多岐にわたり、応用範囲が広い。また、衝撃吸収ブロックは損傷後の取替えが容易なように、プレキャスト製品とし、桁端部と橋台胸壁衝突時に、HPFRCCの特徴である複数微細ひび割れによる繊維の架橋効果が発揮される

ことで、通常のコンクリートやモルタル（以下、NM）を用いた場合と異なり、衝撃吸収ブロック自体の破壊が、靱性的で、脆性的になることは無く、その後の補修が容易となる利点も兼ね備えている。

2.2 実験供試体

図-2 に衝撃吸収ブロックの、常時および大規模地震

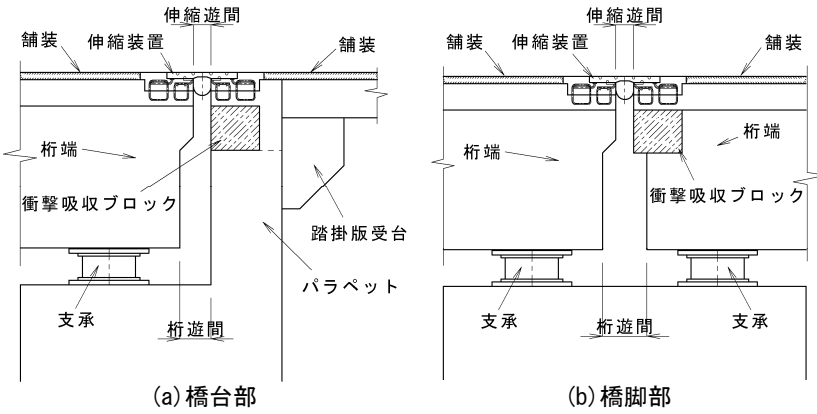


図-1 衝撃吸収ブロックの配置

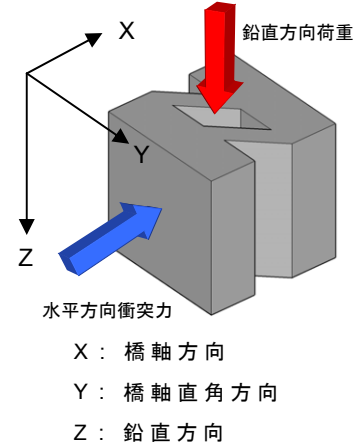


図-2 外力作用イメージ

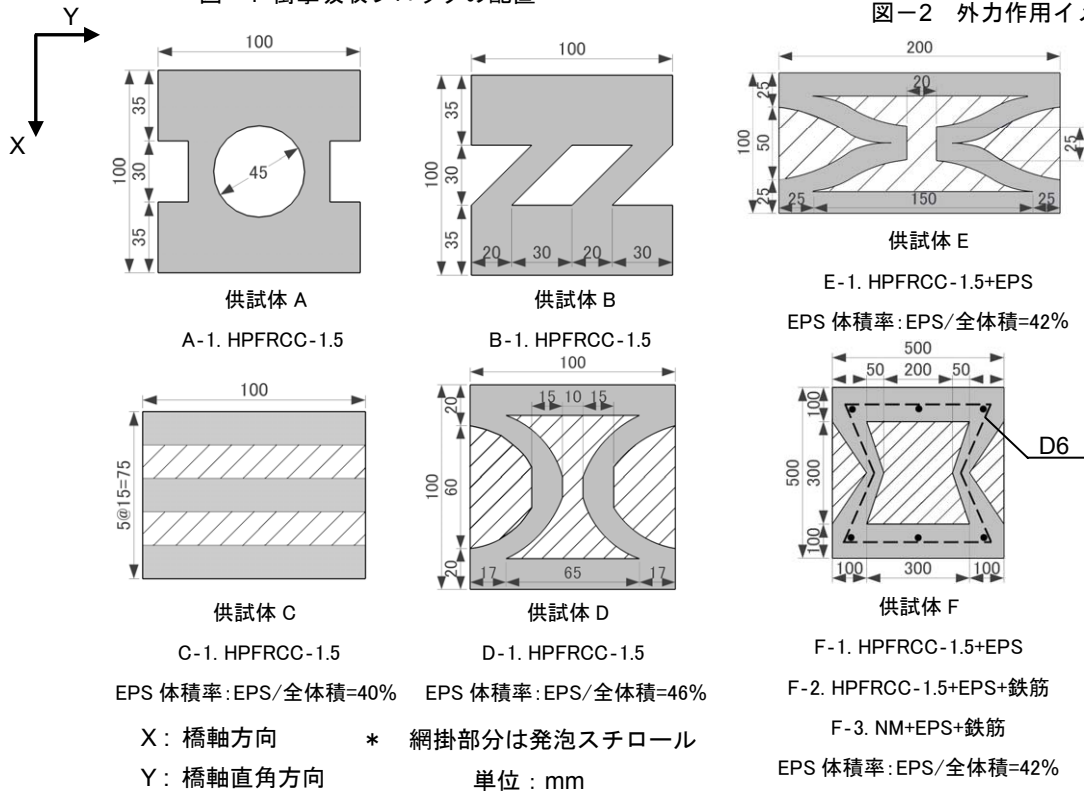


図-3 供試体形状・寸法・水準（鉛直方向断面図）

表-1 配合

種類	水 W (kg/m ³)	セメント C (kg/m ³)	細骨材 S (kg/m ³)	高性能AE減水剤 SP (kg/m ³)	AE減水剤 AD (kg/m ³)	増粘剤 MC (kg/m ³)	繊維混入率 (vol/%)	繊維
NM	273	496	1289	—	1.24	—	—	—
HPFRCC-1.5	342	1264	395	37.9	—	0.9	1.5	PE

表-2 EPS の仕様

製造法	種別	単位体積重量 (kN/m ³)	許容圧縮応力 (kN/m ²)
型内発泡法 (D)	D-30	0.30±0.02	90

時における外力の作用イメージを示し、**図-3** に実験で用いた衝撃吸収ブロック供試体の形状、寸法および材料構成を示す。ここで、供試体 A と B で基本的な破壊モードを把握し、供試体 C~E では復元性能を付加するために型枠兼用の空間充填材として発泡スチロール (以下、EPS) を用いたものである。供試体 F は、実用性を高めるために NM を含めた供試体とした。また、EPS は、その優れた変形特性から、衝撃吸収ブロックが破壊により大変形し荷重が取り除かれると、復元性を発揮する特性を有する。

実験で使用したコンクリートの配合を **表-1** に、EPS の仕様を **表-2** に示す。

2.3 実験方法および検討項目

アムスラー型万能試験機を用い、圧縮荷重試験を行った。この圧縮試験は、大規模地震において桁端部と橋台胸壁が衝突した時、および大規模地震後も鉛直方向の荷重を支持する時の衝撃吸収ブロックの挙動を評価するものである。試験では、衝撃吸収ブロックの水平方向における荷重と変位の関係、およびブロック破壊後の鉛直方向における荷重支持力を確認することとし、供試体の水平方向に荷重してブロックを破壊させた後、供試体 A~D のみ鉛直方向に荷重を行い、荷重と変位を測定した。荷重はロードセルで、供試体の変位は高感度変位計により計測した。

2.4 実験結果

実験結果から、各供試体の破壊モード、異方耐力特性、破壊後の性状、復元性能を評価した。

2.4.1 破壊モード

主桁の衝突力の緩和に最適な形状を把握するために、衝撃吸収ブロックの破壊モードに着目し、各供試体の破壊後の状態および破壊に至るまでの挙動を評価した。破壊モードは圧縮による破壊と曲げによる破壊の 2 種類に分けられ、圧縮による破壊は脆性的な破壊モード、曲げによる破壊は靱性的な破壊モードとなった。**写真-1** に代表的な破壊モードを示し、その応力~ひずみ関係を **図-4** に示す。圧縮により破壊した供試体の応力~ひずみ関係は、ピーク時の応力に比べポストピークの応力が非常に小さな値を示し、その値を保ちながらひずみが増加する特徴がある。一方、曲げにより破壊した供試体の応力~ひずみ関係は、ポストピークにおいても、ピーク時の応力のある程度維持した状態で、ひずみが増大する特徴がある。衝撃吸収ブロックとしては、構造部材に与える衝撃力を吸収する観点から曲げによる破壊モードを示す形状が求められる。

2.4.2 異方耐力特性

衝撃吸収ブロックには、水平方向の変形特性のみならず、常時はもちろん、大規模地震により破壊した後の鉛直方向の荷重支持特性が求められる。そこで、各形状における水平方向の荷重支持特性と破壊後における鉛直方向の荷重支持特性をパラメータとし、破壊後における支持力に

対する異方性を評価した。水平方向の最大圧縮応力を鉛直方向の最大圧縮応力で除した値を異方耐力特性 α と定義し、水平方向荷重時の水平方向の最大ひずみとの関係を比較することとした。**図-5** に各衝撃吸収ブロックの異方耐力特性を示す。図から判るように供試体 A、供試体 B は、異方耐力特性 α は大きな値を示しているものの、最大ひずみの値は小さい。また、供試体 C は最大ひずみが高い値を示しているものの、異方耐力特性 α が小さい。このことから供試体 A、B は衝撃吸収力が高いものの、変形吸収量に問題があり、供試体 C は変形吸収量が大き

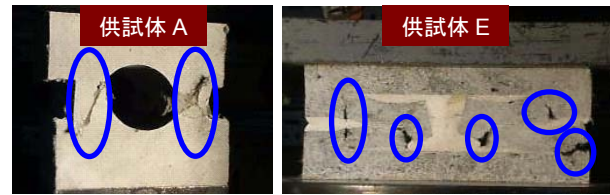


写真-1 衝撃吸収ブロックの破壊モード

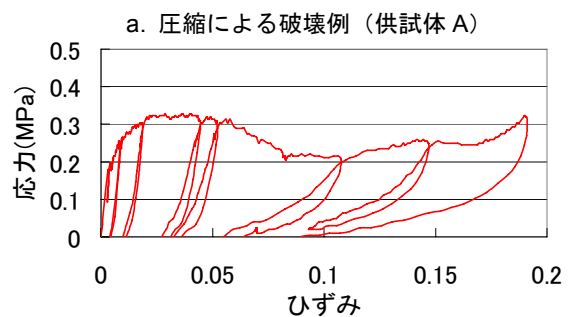
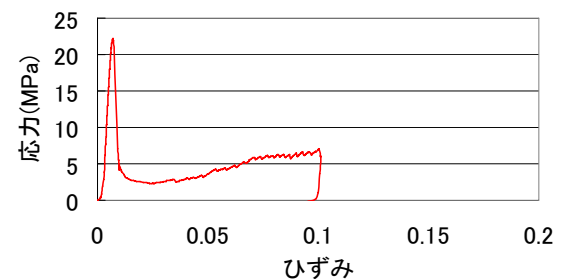


図-4 破壊モード別荷重~変位関係

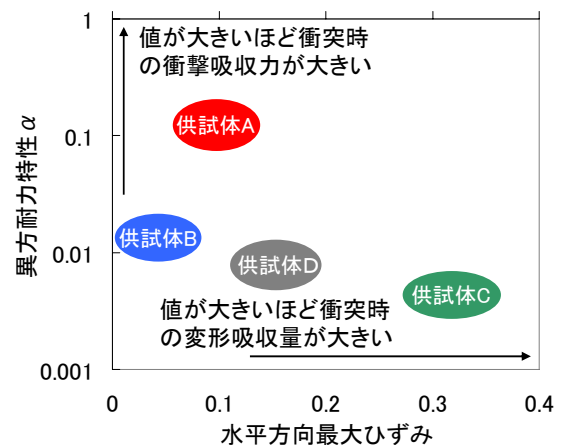


図-5 異方耐力特性

いものの、衝撃吸収力が小さいといえる。この原因として、供試体 A, B は十分に变形領域を確保できない形状であり、供試体 C は、水平方向の荷重をほぼ EPS で受け持つ構造であるためと考えられる。

2.4.3 破壊後の性状

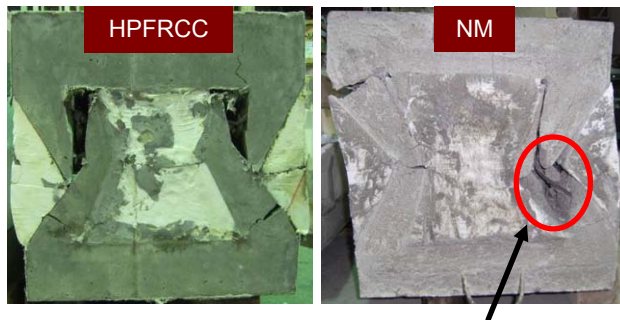
衝撃吸収ブロックの破壊状況に着目し、地震後の復旧作業性を評価した。写真-2 に、使用材料が HPMRCC と NM の衝撃吸収ブロック供試体の荷重試験後の状態を示す。

HPMRCC を用いた供試体では、供試体が大変形した後も繊維の架橋効果により剥落が生じなかったが、NM を用いた供試体では、写真から分かるように、供試体の大変形に伴い多くのコンクリート片が剥落した。地震後の復旧作業性を確保するためには、HPMRCC を用いたブロックが効果的であることが明らかとなった。

2.4.4 発泡スチロールによる復元性能

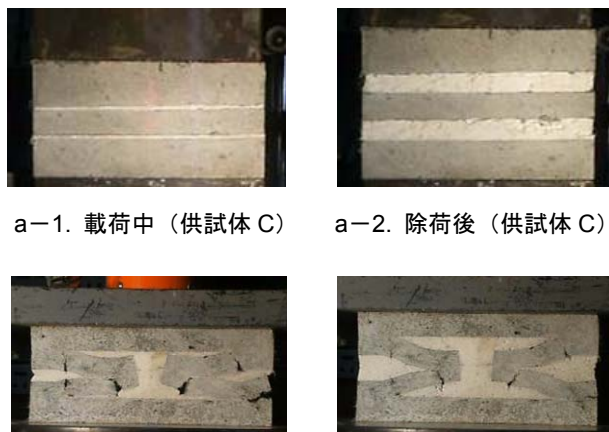
衝撃吸収ブロックの荷重中および除荷後の状態に着目し、EPS による復元性能を評価した。

写真-3 に EPS を用いた衝撃吸収ブロックの復元状況を示し、図-6 にその応力～ひずみ関係を示す。また、EPS を用いたそれぞれの衝撃吸収ブロックにおける復元性能を評価するため、応力～ひずみ関係から得られた、除荷後の衝撃吸収ブロックの残留ひずみを、最大ひずみで除した値を復元率と定義し復元性能を評価することとした。図-7 に各衝撃吸収ブロックの復元率を示す。写真から判るように単純に EPS を積層した供試体だけでなく、変形領域の空間に EPS が充填された供試体でも同様の復元効果が得られた。供試体 A, B のような EPS を使用していない供試体と比べるとその差は歴然であった。また、最大ひずみが大きくなる供試体ほど EPS の復元性能が高くなる傾向があり、これは荷重が増加することにより生じる二軸圧縮状態から復元しようとする力が高くなるためである。以上より、衝撃吸収ブロックの空間部



大変形後においても剥落せず 大変形に伴い多くの剥落あり

写真-2 破壊形態 (供試体 F)



a-1. 荷重中 (供試体 C) a-2. 除荷後 (供試体 C)

b-1. 荷重中 (供試体 E) b-2. 除荷後 (供試体 E)

写真-3 EPS の復元性能

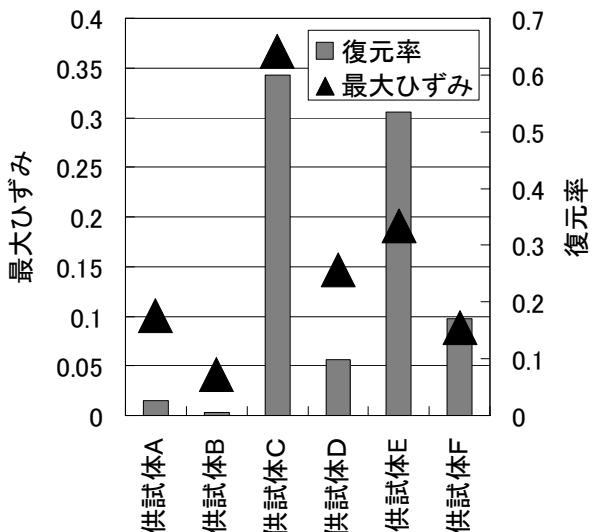
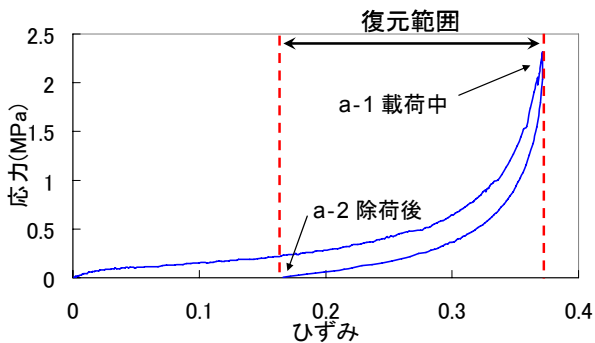
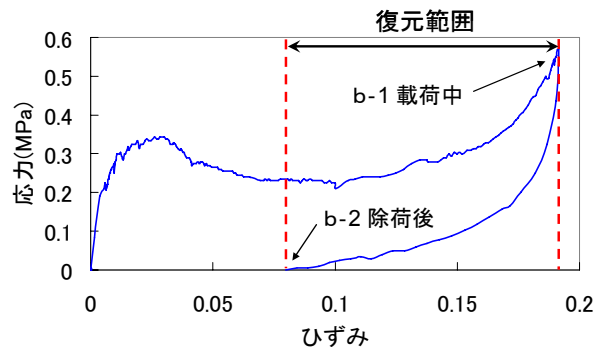


図-7 EPS を用いた衝撃吸収ブロックの復元率



a. EPS の復元性能 1 (供試体 C)



b. EPS の復元性能 2 (供試体 E)

図-6 EPS を用いた衝撃吸収ブロックの荷重～変位関係

に型枠としてEPSを充填した後、コンクリート打設後も取り外すことなく衝撃吸収ブロック内の空間とすることで、大変形した後においても、除荷後に、最大ひずみに対し高い復元性能を発揮できる。

3. 実構造物モデルによる解析

3.1 検討構造物概要

解析対象とした橋梁を図-8に示す。この橋梁は、支間長が40mの五径間連続鉄桁で、文献¹⁰⁾に示される橋梁を基本とした。上部構造総重量は29960kN、橋台断面は幅12m、胸壁厚0.6m、堅壁厚2.1m、橋脚柱断面は、直角幅5.0m×橋軸幅2.2mである。また、支承は、高減衰免震ゴム支承（支承線毎5基）とし、橋台支承部（430mm×430mm×15mm×7層、G8）橋脚支承部（630mm×630mm×23mm×4層、G12）、の構成とした。地盤種別はⅡ種地盤である。桁遊間量は、主桁-橋台胸壁が衝突しない遊間量350mmと、一般的な伸縮装置が利用できる200mmの2種類とした。

3.2 解析概要

解析モデルを図-9に示す。衝突現象を表わすために、衝撃吸収ブロックの実験結果を基に、桁端部に衝突バネを設置し、橋台胸壁は損傷後の非線形挙動を評価できるようにM-φ要素でモデル化した。解析には3次元解析プログラムUC-win/Frames(3D)を用い、非線形動的解析を行った。入力地震波は、道路橋示方書に示されるⅡ種地盤のレベル2地震動タイプⅡを使用した。

3.3 衝突バネのモデル化

実験供試体から得られた荷重～変位関係から衝撃吸収バネモデルを設定した。検討対象橋梁に衝撃吸収ブロックを設置することを想定し、橋梁全幅12m、高さ方向0.3m

になるように衝撃吸収ブロックを設置した。橋軸方向のブロック数は、桁-橋台胸壁が衝突しない場合の解析により求めた桁の地震時水平変位330mmと、設定桁遊間量200mmとの差130mmの変形を吸収できるブロック数とし、高さ方向に30cm、幅員方向に12mにブロックを並べるものとした。この設置条件から図-10に示すように、1次剛性 K_1 、2次剛性 K_2 を設定した。

3.4 解析結果

本解析では、主桁-橋台胸壁の衝突後の主桁の挙動に着目し、衝撃吸収ブロックの衝突力緩和効果を評価することとし、主桁-橋台胸壁の衝突の有無における主桁の最大応答変位および最大応答速度を比較した。

図-11に衝突の有無における時刻歴応答速度曲線および時刻歴応答変位曲線の一例を示す。また、この解析より、表-3に地震波形毎の主桁-橋台胸壁の衝突の有無におけるそれぞれの最大応答変位と最大応答速度の違いと、衝突軽減効果を比率で示す。この表より、衝突無しに比べ衝突ありの最大応答変位、最大応答速度は1～2割程度低下し、衝撃吸収ブロックを設置することで衝突

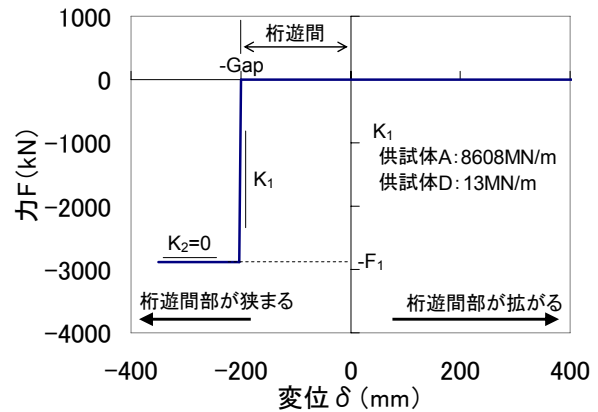


図-10 バネモデル

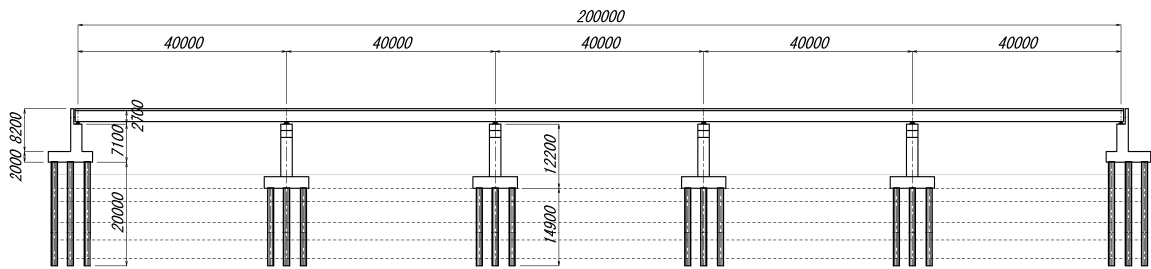


図-8 解析対象橋梁諸元

単位：mm

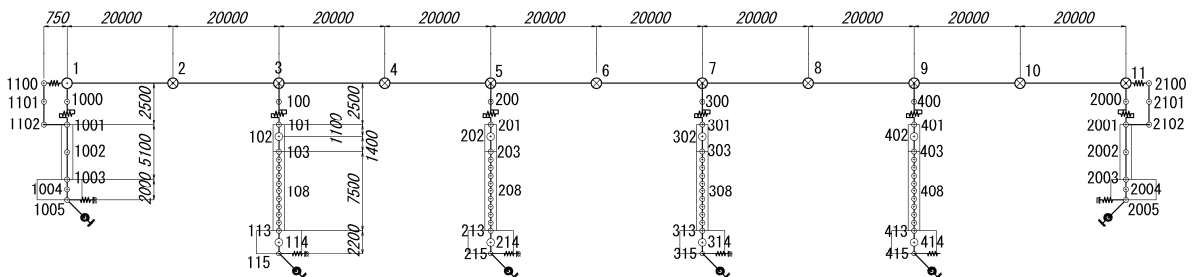


図-9 解析モデル

単位：mm

表-3 衝突力緩和効果の評価

解析対象	地震波	検討項目	速度(m/s)	変位(mm)
衝突無	地震波1	解析値	1.29	-331
	地震波2		1.11	-266
	地震波3		0.98	223
供試体A	地震波1	解析値	1.19	-306
		比率	0.92	0.93
	地震波2	解析値	1.06	-253
		比率	0.95	0.95
	地震波3	解析値	0.80	195
		比率	0.82	0.87
供試体D	地震波1	解析値	1.20	-307
		比率	0.93	0.93
	地震波2	解析値	1.06	-253
		比率	0.95	0.95
	地震波3	解析値	0.82	197
		比率	0.83	0.88

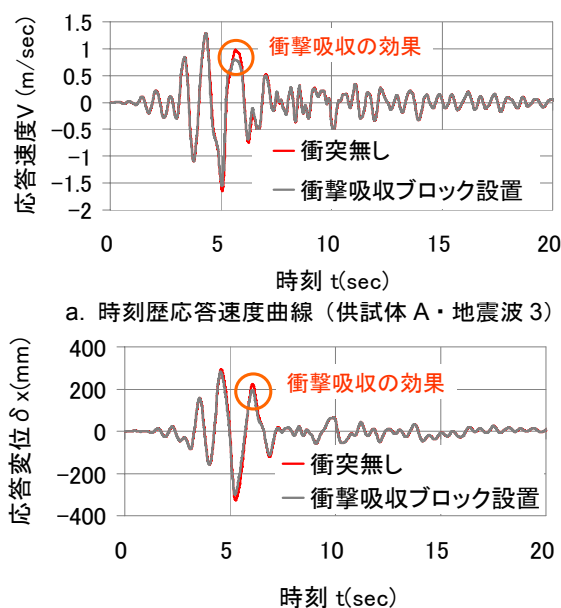
力緩和効果が発揮されることがわかる。また、供試体 B, D, E においても同様の衝突力緩和効果が確認できたが、供試体 C においては、衝撃吸収力が小さいため衝突力緩和効果は確認できなかった。

4. まとめ

本研究は、繊維補強セメント材料系衝撃吸収ブロックの提案を目的とし、使用材料・形状・寸法を実験パラメータとし、その破壊モード・荷重～変位関係を評価した。また、得られた実験結果より衝撃吸収ブロックのパネモデルを作成し、実橋梁へ適用した際の効果を評価した。本研究で得られた知見を以下に示す。

- 1) 衝撃吸収ブロックの破壊モードは圧縮による破壊と曲げによる破壊の2種類に分けられるが、圧縮による破壊は、荷重～変位関係においてポストピークの荷重がピーク時の荷重に比べ非常に小さな値を示し、その値を保ちながら変位が増加し、曲げによる破壊は、ポストピークにおいても、ピーク時の荷重をある程度維持した状態で、変位が増加する。
- 2) 衝撃吸収ブロックに繊維を混入した材料を使用することで、大変形により破壊した際でも分離せず、地震後の応急的な供用性能や復旧性能を発揮することができる。
- 3) 衝撃吸収ブロックの型枠兼空間充填材として EPS を使用した場合、圧縮載荷試験により大変形した後においても、供試体 E のように変形しやすい断面形状を有するブロックでは、除荷することにより 5 割程度の復元性能が確保される。
- 4) 解析結果より、衝撃吸収ブロックを用いることにより、主桁-橋台胸壁の衝突の際、主桁の最大応答変位、最大応答速度を衝突無しの場合と比べ、1～2割緩和することができる。

本研究で提案した、衝撃吸収ブロックのアイデアは、橋梁桁端部への適用だけでなく、種々の適用が可能であると思われる。



b. 時刻歴応答変位曲線（供試体 A・地震波 3）

図-11 時刻歴における応答挙動

参考文献

- 1) 麻生稔彦, 會田忠義, 弘中雅志, 鈴木崇文: 橋梁伸縮装置から発生する騒音に関する検討, 山口大学工学部研究報告, Vol.51, No.1, pp.33-39, 2000
- 2) 羽田野英明: 騒音に配慮した橋梁伸縮装置の計画, 岐阜大学院工学研究科特別応用研究報告, No.070, 2008.3
- 3) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, pp.235-242, 2002.3
- 4) 建設省: 道路橋の免震設計法マニュアル (案), pp.52-53, (財) 土木研究センター, 1992.12
- 5) 青地知也ほか: 橋梁用ゴム緩衝材の機能特性と実橋への適用に関する研究, 構造工学論文集, Vol.55A, pp.768-777, 2009.3
- 6) 窪田賢司, 日本道路公団, 東洋紡株式会社: 橋梁の衝撃吸収構造, 公開特許公報, 特開 2003-184032, 2003-7
- 7) 西本安志ほか: 繰り返り衝撃荷重を受ける積層繊維補強ゴムの衝撃緩衝効果に関する研究, 構造工学論文集 Vol.49A, pp.1333-1342, 2003-3
- 8) 皆川勝, 藤谷健: ゴム鋼併用型耐震緩衝装置の開発に関する研究, 土木学会論文集 No.689/I-57, pp.343-353, 2001-10
- 9) 川畑智亮ほか: 3次元複合材料を緩衝材に用いた橋梁の耐震補強に関する一考察, 第9回地震時保有耐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, pp.1-4, 2006-2
- 10) 社団法人 日本道路協会: 道路橋の耐震設計に関する資料, 1997