

3DSole を潰して減衰させる新しい耐震補強方法

技術本部 技術研究所 久保明英

概要: 3DSole は、弾性体であるガラス繊維ロッドを 3次元に組み、これを粘性体であるエポキシ樹脂で固めた複合材料で、その特性は弾性的であると同時に粘性的でもある。特に、変形能が大きい点、衝撃・振動エネルギーを減衰させる効果が大きい点が、一般の弾性体と趣を異としている。当社が開発した「3DSole 弾性連結構造」は、衝撃力を抑え、曲げを伝達しない、柔らかい連結方法として、平成 13 年、扇大橋、続いて新荒川大橋の耐震補強工事で実践している。現在、3DSole が潰れるまでに吸収するエネルギーが大きいことに注目し、新しい耐震補強方法を開発中である。これは、3DSole を衝突させて潰し、これにより構造物に蓄積された地震エネルギーを吸収し、構造物の応答を低減する考えである。本稿では、3DSole の特性、実績をまとめ、新しい耐震補強方法を紹介する。

Key Words: 3DSole, 弾性連結, 緩衝装置, 耐震補強, 橋脚の負担軽減, 橋端部制振

1. まえがき

3DSole の 3D は 3次元、Sole は足の裏を意味しており、適度に柔らかく、緩衝効果があり、振動エネルギーを吸収する特性を有する複合材料である。これは三菱電機が宇宙開発事業の一環で開発した製品で、人工衛星で機器類を固定するのに 3DSole を敷いて使っていたとのことである。国土交通省との共同研究「長大橋の免震技術の開発」に当社が参加した際、3DSole 減衰装置の研究を行った経緯がある。その後、3DSole 弾性連結について特許を出願し、ピーエス三菱の特許となっている。平成 13 年、扇大橋、続いて新荒川大橋の耐震補強工事で採用されている。

耐震補強が必要な橋で、現在も未補強で残されているのは、大河川の多脚橋であるが、この形式ではどの橋脚も基礎が深く、補強が必要な判定となるケースが多い。脚数が多く軽微な補強でも工費は莫大になってしまう。これらの橋に対して、「3DSole 弾性連結装置を用いて上部構造を連続化した上で、橋端部に配置した 3DSole 緩衝装置を潰して地震エネルギーを減衰させ、上部工に繋がった総ての橋脚の応答を一斉に低減する」、新たな補強法を提案している。この補強方法による場合、橋台が損傷を被ることを覚悟する必要があるかもしれない。しかし一般に、河川中に在り基礎が深く軟弱な橋脚に較べ、陸に在る橋台を補強することは容易であり、また壊れた時の復旧についても容易である。衝突させて応答を低減するという考えは新しい試みではあるが、大強度地震襲来確立が小さいにも関わらず工費があまりに膨大となる場合には、有効と考えている。積層ゴムタイプの免震支承は、数センチ以上の振幅で振動した場合に減衰効果を発揮するが、3DSole は、数ミリの振幅で等価減衰定数 20% の減衰効果を発揮し、それを超えて非可逆変形した場合は、変形量に応じた塑性化エネルギーを吸収する。さらに緩衝装置タイプは、遊間に在って遊間が狭まるのを阻止する装置であり、当然ながら、変位制限効果及び衝突防止効果は免震支承に較べて直接的かつ確実である。3DSole 緩衝装置を用いると、ハニカム緩衝材あるいは防舷材型緩衝材に較べ、コンパクトな寸法で同等のエネルギーを吸収できる。特に、吸収エネルギー、反力、最大変位の設計が簡易となる。

2. 3DSole

(1) 一般

3DSole は、直径 1.8mm のガラス繊維強化プラスチックロッドを立方体の対角 4 方向に密に配置し、その空隙に可



久保明英

撓性エポキシ樹脂を充填して固めた三次元の複合材料である。

3DSole は圧縮強度がコンクリートの約 10 倍(200~120N/mm²)、弾性係数は約 1/150(210N/mm²)、歪みで約 60%まで変形する、高耐荷重・低剛性・高変形能を有する材料である。また、圧縮繰返し変形でエネルギーを吸収する減衰デバイスでもある。衝撃緩衝機能も有している。3DSole 50mm 立法体は潰れるまでに約 7.5~8.0kJ のエネルギーを吸収する。単位重量は 1.7tf/m³ である。アルカリ、紫外線等から保護するために表面を塗装して供用する。

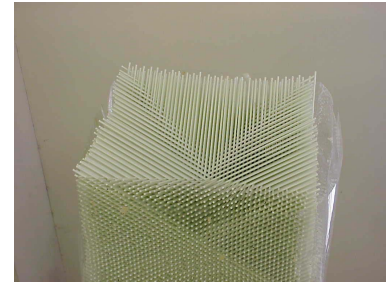


写真-1 ガラス繊維ロッド

(2) 基本特性

(A) 弾性係数

3DSole は強化材が 3 次的に上下左右方向に等方性の配向となっており、等方性材料の (式 1)を用いてせん断弾性係数(G)を求めることができる。またバネ係数(K)を(式 2)で計算できる。ここで、E:弾性係数、ν:ポアソン比(=0.3)、A:断面積、L:部材の長さである。

$$G = E / 2(1 + \nu) \quad \text{(式 1)}$$

$$K = E \cdot A / L \quad \text{(式 2)}$$

面圧 2.94N/mm²における弾性係数は、E=210N/mm²である(150mm×150mm、L=100~150mm)。なお、ガラス繊維強化プラスチックロッドの直径 1.8mm と較べて、十分大きいと言えない寸法の 3DSole の特性値は、寸法効果のため、異なる値となる。数センチ程の小さいもので、弾性係数は E=50N/mm²程である。

(B) 降伏点

除荷後、十分時間が経過した後も、1%を超える非復元歪みが残る状態を降伏と定義する。3DSole は 12.7N/mm² を超える負荷を行うとこの状態となる。これは、降伏点を境にロッドとエポキシ樹脂の間に付着切れが生じ始めるためと考えられる。なお、3DSole の降伏点は、非復元歪みを生じ始める臨界値にすぎず、降伏点を超えても弾性係数はほぼ同じであり、圧縮強度に対してまだ 10~15 倍の安全度を残している。

(C) 圧縮強度

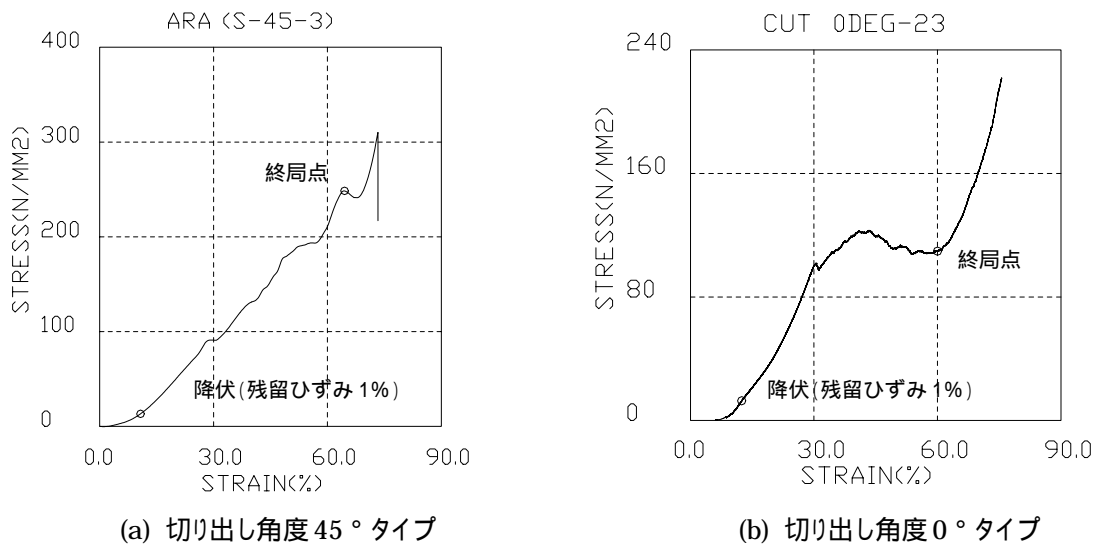
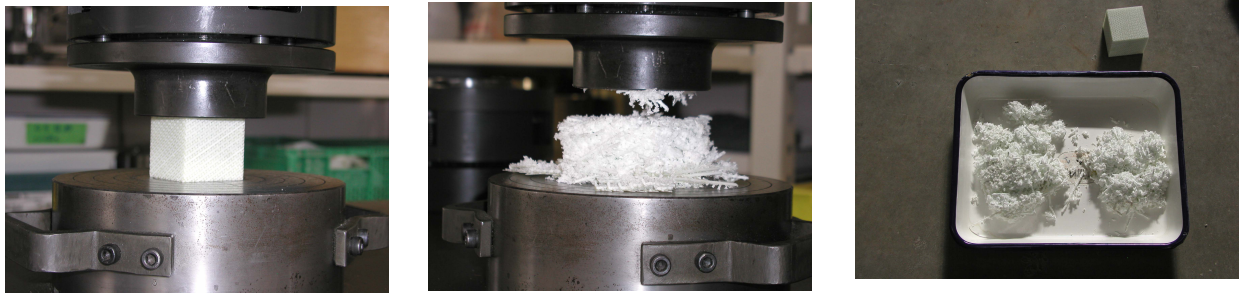


図-1 3DSole の応力-ひずみ曲

3DSole は、ロッドが折れた時点で弾性・復元性を失い、'エポキシ樹脂塊'となる。ロッドが短く折れた後、応力-ひずみ曲線の傾斜が急増し始める。ロッドが短く折れた時点が 3DSole の終局であるが、実務上は応力-ひずみ曲線の傾斜が急増し始める変曲点を 3DSole の終局点として読みとっている。また終局以前の最大応力度を、3DSole の圧縮強度と定義している。なお、3DSole は潰れた後も、粘土状のエポキシ樹脂塊となって載荷版間に残るため、これが抜け落ちない限り急激な耐力低下を起こさない。なお、ガラス繊維ロッドの製造バッチが異なるとロッドの強度が多少異なるため、3DSole の圧縮強度にもバラツキが生じる。

3DSole の圧縮強度は、45°タイプ(ロッドと切り出し面の角度が45°)で176~216N/mm², 0°タイプ(ロッドと切り出し面の角度が0°)で108~147N/mm²である。なお、3DSole は低剛性であるため、載荷試験では載荷版に傾斜を生じて偏載荷とならないように注意が必要である。3DSole (50mm×50mm×50mm)の圧縮強度試験で得られた応力-ひずみ曲線を図-1に示す。試験は変位制御で載荷速度2mm/minで行った。



載荷前

歪みで80%の載荷を行った後にヘッドを上げた時の状況

ロッドが短切・粘土状(2個分)

写真-2 0°タイプ 3DSole の圧縮強度試験

(D) クリープ特性

外形40mm×内径7mm×高さ13mmの円筒状3DSoleに、2.94 N/mm²の圧縮応力を持続的に作用させた場合の、クリープ経時変化を図-2に示す。計測最終点におけるスランプイン関数の接線上の値から、10年後(10⁵時間後)の圧縮によるひずみを予想すると約2%となる。この値は、低クリープ防振ゴムに比べて数分の一の小さな値である。このことから、3DSole は形状保持特性に優れた材料といえる。

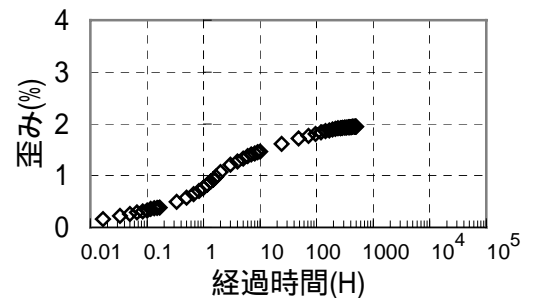


図-2 クリープ特性

(E)破壊吸収エネルギー

3DSole 50mm立方体の圧縮強度試験の応力-ひずみ曲線から計算した破壊吸収エネルギーは、45°タイプで約7.5kJ, 0°タイプで約8.0kJである。

3. 3DSole 弾性連結による橋梁の耐震補強の実績

(1) 実績概要

3DSole が採用された理由は次の通りである。地震力・制震力を伝達する際の衝撃を抑えるための柔らかさ、高変形能を有すること。地震時交番力への対処としてプリ圧縮力を与えて使用するが、クリープ変形が小さくプリ圧縮力を持続する能力が高いこと。圧縮強度が高く、適度なせん断剛性を有しておりコンパクトな寸法で用いることができること。寸法を調整することでバネ係数、変形能等を容易に設計できること。なお、取り付け前の約1ヶ月間、3DSole を圧縮して、取り付け後のクリープ変形が小さくなる処置を施した。

実績2件の耐震補強工事では、3DSole 弾性連結を使って上部構造を連続化した上で、固定ピン支承を高減衰ゴム支承へと改修している。これにより、基礎が深く補強費用が莫大となる中央2橋脚の地震荷重を、他の橋脚に分担させ、中央2橋脚に集中していた荷重を軽減することができた。結果として、両端の橋脚については荷重増となるためRC巻き立て補強を行ったが、中央2橋脚については補強を行わないで済んだ。

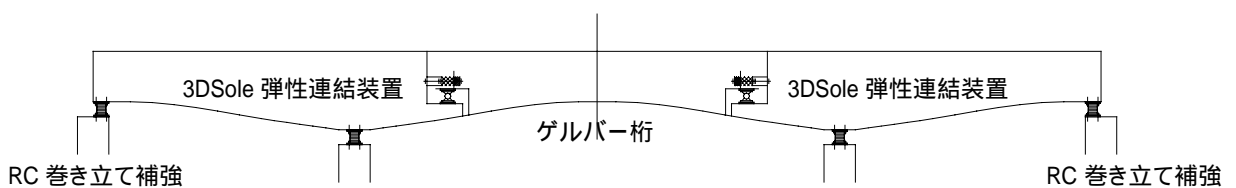


図-3 新荒川大橋の構造模式図と3DSole 弾性連結装置

(2) 扇大橋

扇大橋は上り車線桁, 下り車線桁があり, それぞれ1室鋼箱桁となっている。ゲルバー部の1桁1接合箇所当たり, 受圧面寸法150mm×150mm, 厚さ100mmの3DSoleを8個挟んでいる。扇大橋で使用した総数は32個である。耐震連結ケーブルは1桁1接合箇所当たりSEEEのF200TDを2本配置している。

ゲルバー部の隙間をジャッキで押し広げ弾性複合材を挟む。次に他方のゲルバー部の隙間も同様にジャッキで押し広げて 3DSole を挟む。最後に, 連結ケーブルを所定の緊張力で締めて, 連結が完了する。ゲルバー桁の固定ピン沓については, 変位制限用の爪を切り可動としてある。

耐震連結ケーブルを締めることで 3DSole には約 2.94 N/mm²(30kgf/cm²)のプリ圧縮を与えており, 震度法レベルの地震に対しては隙間を生じることなく一体性が保たれる。保耐法レベル地震時において, 引張力は主に耐震連結ケーブルで伝達され, 圧縮力は主に 3DSole を介して伝達される。なお, 耐震連結ケーブルは張力が失われた状態で落橋防止用耐震ケーブルの耐力を保持する設計となっている。



写真-3 扇大橋の PC 連結ケーブル



写真-4 扇大橋の弾性連結装置



写真-5 新荒川大橋の弾性連結装置



写真-6 新荒川大橋の弾性連結装置

(3) 新荒川大橋

新荒川大橋は上り車線桁, 下り車線桁があり, それぞれ2室鋼箱桁となっている。ゲルバー部の1室1接合箇所当たり, 受圧面寸法150mm×150mm, 厚さ150mmの3DSoleを8個挟んでいる。新荒川大橋で使用した総数は64個である。連結ボルトを締めて3DSoleに4.2 N/mm²(43kgf/cm²)のプリ圧縮を与えている。なお, 新荒川大橋では落橋防止用耐震ケーブルが, 3DSole弾性連結用の連結ボルトとは完全に独立して取り付けられている。

ゲルバー桁の端壁を挟む態様で弾性複合材を配置し, 連結ボルトを通し, トルクレンチでナットを締め, 3DSole に所定の圧縮応力度を与える。次に連結ボルトをカプラーで接続して延長し, これを連結ブロック, 橋脚側主桁の端壁に通す。最後に橋脚側主桁からナットを締めて連結ボルトを引き寄せることで連結が完了する。

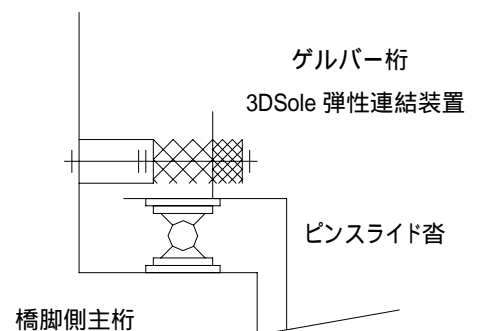


図-4 新荒川大橋の 3DSole 弾性連結装置模式図

4. 3DSole 緩衝装置を使った新たな耐震補強法の提案

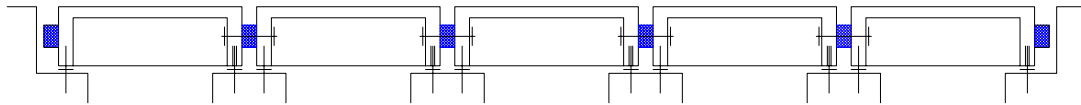
(1) 新たな耐震補強法の提案

(a) 衝突減衰型

3DSole 緩衝装置

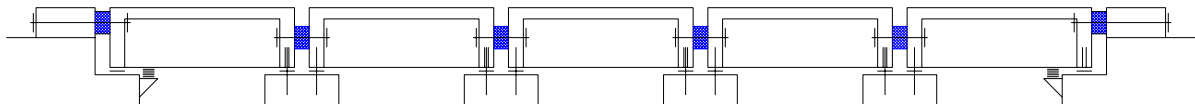
3DSole 弾性連結装置^{特1)}

3DSole 緩衝装置



(b) 破壊減衰型(ノックオフ構造, パラペット破壊)

(c) 摩擦・破壊減衰型(制振・延長床版構造)^{特2)}



機能分離型せん断バネ支承

特1) ピーエス三菱の特許

特2) ピーエス三菱他の共同特許

図-5 多脚橋梁を対象とした新しい耐震補強方法概念図

3DSole弾性連結装置については、主に、橋梁上部工を連続化する目的で使用する。柔らかく、高変形能であるため馴染みが良い。高耐荷であるため小寸法で使用でき、また軽量であるため扱いが容易である。欠落や亀裂を生じない。上部工がヒンジで連続化されることで、免震設計、地震力分散設計が可能となる。3DSole弾性連結部は、曲げ抵抗の小さいヒンジ構造として挙動し、旧来の桁端拘束状態を大きく変更しない。3DSoleは弾性域における圧縮繰り返し変形でエネルギーを吸収する材料であり、その等価減衰定数は20%である。3DSole弾性連結装置を用いることによる、構造減衰定数の向上は、約1%程である。

3DSole緩衝装置については、大規模地震時に、ここを衝突させて3DSoleを潰し、潰すためのエネルギーとして、橋梁に蓄えられた地震エネルギーを消耗・減衰させる目的で使用する。衝突問題では、2つの物体がある相対速度で衝突(接触)した時、瞬時に運動量の移動が起こり、次の瞬間にはそれぞれが新たな速度で動き始めている。運動量は、速度と質量の積、あるいは力と時間の積で表される。短い時間に大きい運動量の移動が起こると、運動量の移動経路には極めて大きい力(衝撃力)が作用する。衝突させることの意義は、衝突時に生じる極めて大きい力を利用して、緩衝材を潰し、あるいはパラペット等の障りの少ない部分を壊すことにある。一般的に、物が壊れる時には大きいエネルギーを吸収するが、壊すには、これもまた大きい力が必要となるので、衝突時の大きい力を利用する。しかし誤ると、過大な力(衝撃力)が作用して、橋梁本体に亀裂、破断、ひび割れ等の重要な損傷を与えてしまう危険もある。なお、桁間に配置した3DSole弾性連結装置についても、衝突が起こった際は、潰れて、緩衝効果及び減衰効果を発揮すると期待できる。

図-5で、橋脚天端に移動制限装置(アンカーボルト)が描かれているが、上部工と橋脚天端の相対変位を固定とするか可動とするかについては、設計で決めることである。上部工と橋脚天端の相対変位を固定した場合は、上部工が衝突した際、橋脚天端の移動制限装置に衝撃力が作用する危険があることに注意が必要である。上部工と橋脚天端の相対変位を可動とした場合は、上部工が衝突する以前まで各橋脚が揃って振動していた(橋軸方向1次振動モード)ものが、衝突以後、各橋脚が別々に(それぞれの橋脚振動モードを強めて)振動し始めることに注意が必要である。これらの衝突後の挙動をシミュレーションすることは、現状の技術で十分可能と思われる。緩衝装置を介して橋台に衝突させる場合、特に橋梁本体に重要な損傷が生じないように配慮する必要がある。

図-5の下の方で、橋台上のブロックと3DSoleの間に隙間を設けたのが(b)であり、この型の場合は衝突させて3DSole

eを潰し、ブロックを滑らせて、あるいはパラペットを壊して地震エネルギーを吸収させる。図-5の下の図で、橋台上のブロックと3DSoleの間に隙間が無いのが(c)であり、この型の場合は橋体と共にブロックが動き、ブロックとその滑動面に働く摩擦で地震エネルギーを吸収する。

(2) 3DSole 緩衝装置の特徴

3DSole の寸法を調節することで自由に性能を設計できる。

- ・吸収エネルギー量を 3DSole の体積換算で設計できる。
- ・バネ係数, 変形量, 反力を設計できる。

(例 1) 0°タイプ, 150mm×150mm×180mm(L)の 3DSole が, 180mm 72mm (L の歪み 60%相当長さ)と変形するまでに吸収するエネルギーは $8.0\text{kJ} \times 32.4$ (体積換算相当個数) = 259.2 kJ となる。複数の異なる 3DSole 緩衝装置を組み合わせることでさらに自由な性能設計が可能である。

(例 1) 3DSole の長さが異なる装置を配置し, 接触時期をずらせることで, 効果を調節する。

(例 2) 3DSole 緩衝装置を当てる部位を, パラペットと台部のようにずらせることで, 効果を調節する。潰れた 3DSole の屑が隙間に残れば急激な耐力喪失・衝突は起こらない。クッション効果は残る。

(3) 大きい温度伸縮に適用するための改良

支承改修を行わず, 旧来の支承状態(固定あるいは可動)を残して連続化する場合, 固定-固定間の温度伸縮を 3DSole 弾性連結装置で吸収させる必要がある。従来のもより大きい変形能を持たせるために, 図-6 に示すような, 3層型の 3DSole 弾性連結装置を用いる。当該連結装置の PC 連結鋼材の長さは一定となっている。寒い季節に上部工が短縮した状態では上部工(左) 3DSole(左) PC 連結鋼材 3DSole(右) 上部工(右)へと地震力が伝達する。暖かい季節に上部工が伸びた状態では上部工(左) 3DSole(中) 上部工(右)へと地震力が伝達する。暖かい季節においては, PC 連結鋼材及び左右の 3DSole は効いてなくてもよい。

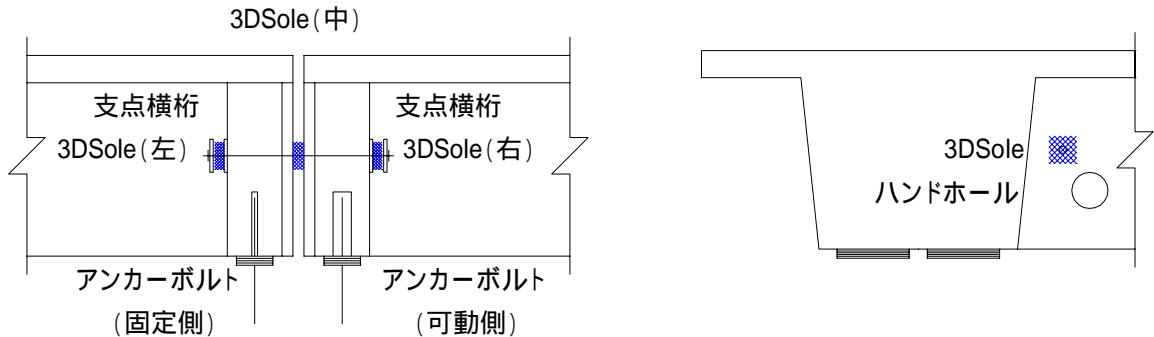


図-6 PC 橋の 3DSole 弾性連結装置の説明図

(4) PC 橋への 3DSole 弾性連結装置の適用について

鋼橋に 3DSole 弾性連結装置を適用する場合には, 取り付け空間が広く, 治具の取り付け, 補強も溶接で対処でき, 実施上の難点は少ない。PC 橋に 3DSole 弾性連結装置を適用する場合, どこに 3DSole を挟み, どこどこを PC 連結鋼材で連結するかが問題となる。現状では次の方法で連結することになっている。3DSole は支点横桁と支点横桁の間に挟む。耐力を期待できない支点横桁については, 下側から床版までの部分を壊して, 耐力を高めて再打設する。この際, 移動制限装置アンカーキャップ等を交換して可動量を調節する。3DSole を維持・管理するためのハンドホールを設けておく。PC 連結鋼材を通すための孔を設けておく。

橋面計画高を変えるような補修・補強方法を実施することは一般的に難しい。PC 橋では, 旧来の支承の厚さが小さく, これを厚さの大きい免震支承と替えることは, 橋面計画高を変えることとなる。従って, 地震力分散あるいは減衰性能向上等の目的で, 支承の改修が必要な場合には, 機能分離型の支承に対処する必要がある。

(5) PC 連結鋼材と耐震連結鋼材との兼用について

落橋防止装置として機能させるために必要量の耐震連結鋼材を配置することが規準に定められている。その一部あるいは全てを 3DSole 弾性連結装置の PC 連結鋼材として兼用できる。耐震連結鋼材と PC 連結鋼材の両方がある場合、PC 連結鋼材が先に、これについては大方揃って破断強度に至ることに留意が必要である。なお、耐震連結鋼材が大規模地震時のみ効くのに対し、3DSole 弾性連結装置の PC 連結鋼材は、常に 3DSole を圧縮しており、常時また小規模地震時においても貢献する点、より稼働効率の高い使用法と言える。

あとがき

3DSole 弾性連結装置と 3DSole 緩衝装置を組み合わせた補強方法、パラペットを 1 次的に壊す補強方法、橋台-上部工一体化補強方法について、九州支店 PC 事業部と共に、設計、施工方法、工費等の具体的検討を行っている。本稿は検討結果を反映させたものとなっている。

参考文献

- 1) 久保明英・山下秀:「圧縮変形で減衰を生じる複合材料を用いた制震構造」,土木学会耐震工学委員会第一回免震・制震コロキウム講演論文集(1996)
- 2) 藤井佐規・春和則・清水隆史・立山晃・葛野敦:「免震支承取替えによる3径間連続鋼箱桁橋の耐震補強設計」,土木学会第4回地震時保有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(2000)
- 3) 久保明英・小山亜季・立山 晃:弾性連結による3径間連続鋼ゲルバー橋の耐震補強,プレストレストコンクリート技術協会第11回プレストレストコンクリート技術の発展に関するシンポジウム論文集,2001
- 4) 久保明英・赤嶺文繁・有馬周二:弾性連結による橋梁の耐震補強,技術資料第18号,株式会社ピー・エス,2002