特集≫≫ 解体，3R，建設発生土・廃棄物処理

精密衝撃破砕工法による馬蹄形ジベル式合成桁橋のRC床版解体・撤去

波動伝播経路誘導による精密衝撃破砕のための装薬設計理論と実際

阪本 良・上西幸司・中森純一郎・山地宏志

馬蹄形ジベル式合成桁橋の床版取替工において，既設床版解体・撤去は，最初に実施される作業でありながら，これに適した工法がなく，全体工程のボトルネックとなっている。われわれは非火薬の放電破砕工法EDICSとその特殊装薬法であるSMartDとを用いた精密衝撃破砕工法を，当該解体工に適用することで，低環境負荷で効率的な解体・撤去を実施し得ると考えた。このため，同形式のRC床版を合理的に解体・撤去し得る施工シナリオと，それを可能とする装薬配置法を開発した。これを，高速道路床版の取替工事に適用し，既に3,000 mを超える区間の床版を，計画をやや上回る効率で解体・撤去し，当該工法の妥当性を実証した。

キーワード：放電衝撃破砕工法EDICS，精密衝撃破砕工法SMartD，馬蹄形ジベル式合成桁橋RC床版

1. はじめに

昭和38年（1963年）7月に，わが国初の高速道路とされる名神高速道路栗東-尼崎間が開通[1]して以降，全国を結んで整備された高速道路網の多くは，建設後40年以上が経過し，老朽化の時期を迎えつつある。また，この間の経済発展による車両の大型化と，陸上輸送量の激増は，設計時に期待された床版の長期健全性を担保することを困難とし[2]，今日，全国で高速道路橋床版の取替工事が行われている。

初期の高速道路橋に多く採用されている馬蹄形ジベル式合成桁橋は，主桁とRC床版がジベルで強固に接合され一体となって荷重に抵抗する構造であるため，非合成桁橋のように，ジャッキ等で床版をフランジから引き剥がして撤去することができない。このため，主桁近傍のコンクリートを一定幅残して，床版をワイヤーソー等で切断・撤去してから，残された桁上コンクリートをウォータージェット工法（以下，WJ工法）や人力作業等で解体・撤去する二段階の解体・撤去法が，主として採用されている。

WJ工法は，吐出圧$P = 250\ MPa$程度に加圧した高圧水を，小口径のノズルから噴出させ，その水圧でコンクリートを粉砕・除去する工法であり，鋼主桁を保全してコンクリートだけを破砕することを可能とするが，莫大な上水道品質の水を必要とし，その水源確保と供給が難しい。また，使用後の汚染水回収・処理にも問題が多く，特に跨川工事では，微量の汚染水の漏出が，流域の水環境劣化や，生態系への影響を生じさせる可能性もある。

一方，コンクリートブレーカーやピックハンマー等を用いた人力によるハツリ工は，最も確実な解体工法であるが，近年，これに従事する作業員の高齢化や，新規従事者の激減により，所要の作業人員を確保することさえ，困難となりつつある。また，所要人員を確保し得たとしても，その作業の特殊性から，今日基準で，振動作業等の健康阻害因を排除して，作業員の心身の健康を保全し得る，快適で効率的な作業体制を構築するためには種々の困難が付きまとう。

このような現状に鑑み，われわれは放電衝撃破砕工法EDICS（Electric Discharge Impulse Crushing System）[3]と，その精密装薬設計法SMartD（Sakamoto-Mikio Advanced shock wave Reflecting Technique for Demolition）[4]を合成桁橋の床版解体工に適用することで，その解体・撤去作業を効率・安全化すると同時に，労務の負荷軽減と省人化も実現し得るのではないかと考えた。本稿では，第2章でEDICSとSMartDの概要を説明し，第3章において馬蹄形ジベル式合成桁橋の床版解体シナリオ，ならびにこれを可能とする破砕機構とその装薬配置について示し，第4章ではその施工適用における実際を示す。

2. 放電破砕工法 EDICS と精密衝撃破砕工法 SMartD

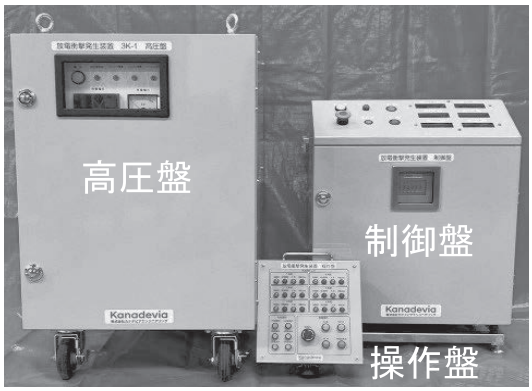
(1) 放電破砕工法 EDICS のパルス圧発生機構

放電破砕工法 EDICS は，発破工法の一種であるが，衝撃発生源として，爆轟反応を生じる火薬ではなく，爆燃域の反応を呈する自己反応性薬液を用い，これを E = 3,000 V の高圧放電で励起することで，コンクリートや岩を破砕する点に特徴がある。**写真**―１および**図**―１に，EDICS の放電衝撃発生装置と，そのブロック回路図を示し，**図**―２には EDICS の反応過程と，その圧力上昇過程の測定例の一つを示す。

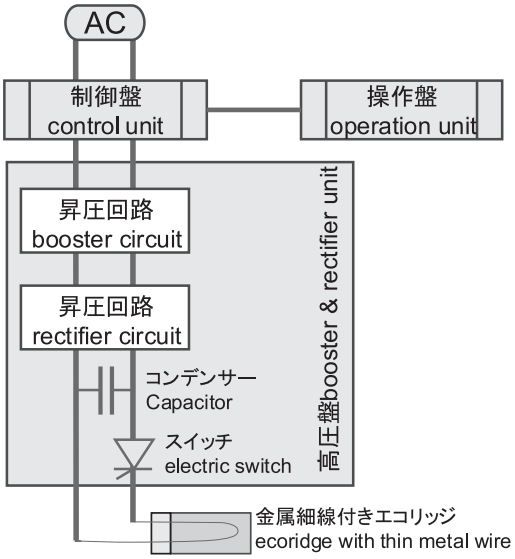
自己反応性薬液は，装薬孔への装填が容易なようにエコリッジとよばれるカートリッジに充填されて提供される。このカートリッジ内には，**写真**―２のように，一対のリード線が封入されており，その先端は金属細線で結ばれている。この系に放電衝撃発生装置から，E = 3,000 V の高圧放電でエネルギーが供給されると，**図**―２[5] のように，金属細線が，反応時間 ΔT = 30 μs 程度で，溶融気化し，エコリッジ内は一気に高温・高圧状態に遷移する。これをトリッガーとして，薬液が劇的な酸化反応（爆燃）を呈し，瞬間的に大量のガスが生成され，爆発的な体積膨張が発生する。

発破法では，予め薬液を装薬孔内に閉じ込めるため，この膨張エネルギーは，装薬孔壁に圧力として，パルス的に作用する。Q = 5 mL の薬液に放電した場合，**図**―２[5] の例のように，金属細線の溶融気化後 ω Δt = 120 - 130 μs で圧力はピークを示し，その値は P_{max} = 1.5 - 2.1 GPa に達する。

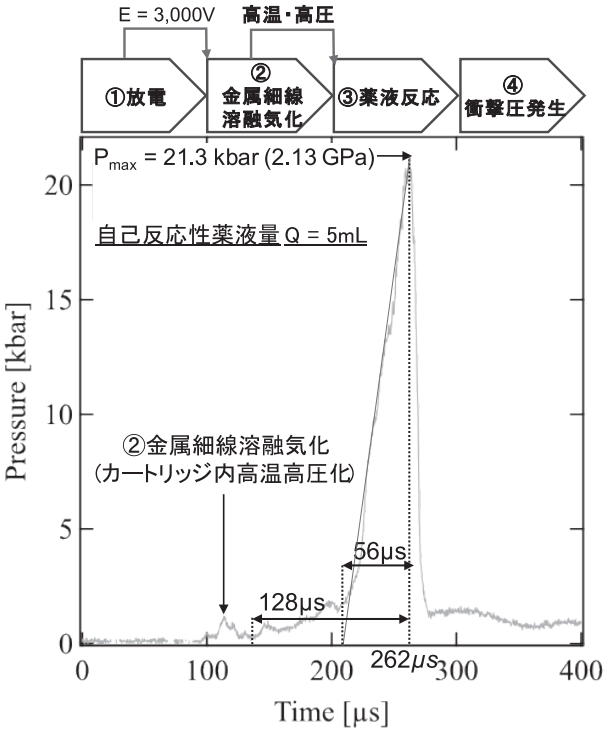
なお，この放電衝撃発生に要するエネルギーは家庭用交流電源から供給可能であり，特殊な電源は必要としない。また，EDICS は，以下のような特徴を有す。



写真―１　放電衝撃発生装置[3]



図―１　放電衝撃発生装置ブロック回路図[3]



図―２　薬液反応過程とエコリッジ底面の圧力上昇例[5]



写真―２　金属細線を装着したエコリッジ

すなわち，1）火薬類取締法の規制を受けない，2）破砕力を制御可能である，3）振動・騒音，および粉塵発生を制御可能な低環境負荷な工法である。さらに4）大型重機が使用できない狭小空間や屋内でも施工が可能である。

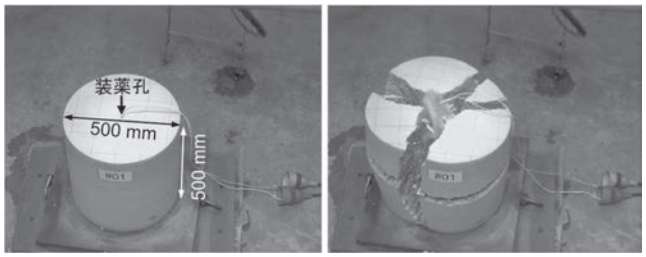
(2) 精密衝撃破砕工法 SMartD の設計原理

前述のように，EDICS で用いられる自己反応性薬剤は，反応速度が音速以下の爆燃と呼ばれる反応を呈し，その作用は，主としてガス膨張であり，衝撃波を伴わない[6]。したがって，その破砕能力は，岩やコンクリートを圧縮破砕するほどの圧力には達しない。

写真―3[4]は，円柱試験体（ϕ500 mm × 500 mm (H)）の中心に Q = 1.2 mL の自己反応性薬剤を装填し，放電した際の破砕状況を示すものである。また，**写真―4**[4]には，ハイスピードカメラにより撮影した，円柱供試体上面のひび割れの発生と成長過程を示す。**写真―4** をみると，ひび割れは起爆孔から外周へ向かって成長するだけでなく（outbound crack），外周から中心に向かっても成長する（inbound crack）ことが確認できる。

前節で述べたように，放電による薬液反応により，装薬孔壁には，最大 1.5 ～ 2.0 GPa 程度の圧力がパルス的に作用する。この圧は，孔壁で運動エネルギーに変換され，圧縮波として媒体内を伝播するが，自由面等で反射すると，ほぼ同じ大きさの引張波に変換され，媒体内部へと伝播していく。引張強度の低いコンクリートでは，この引張波により破砕面が形成され，その伝播経路上に成長し得るものと考えられる。したがって，外周から中心に向かっても成長するひび割れ（inbound crack）は，このようなメカニズムにより形成されたものと評価される。すなわち，少量の爆燃域薬剤でコンクリートを破砕することが可能である。

SMartD は，解体対象の構造や解体条件に合わせて，引張波の伝播経路を誘導し，効率的に対象構造物を解体し得る破砕面を形成するよう，薬剤の装薬配置や孔内薬量，斉発数，ならびに補助破砕法などを定量的に設計・計画する技術である。地盤掘削などでは，引張波の伝播経路を誘導する手法として，小孔群を設ける等の手法がよく用いられるが，RC 構造解体では，鉄筋とコンクリートの波動伝播速度，ならびに伝播特性の違いを利用する装薬配置が有効であることが多く，馬蹄形ジベル式合成桁橋の RC 床版解体のための装薬配置も，この考え方を踏襲して開発した。



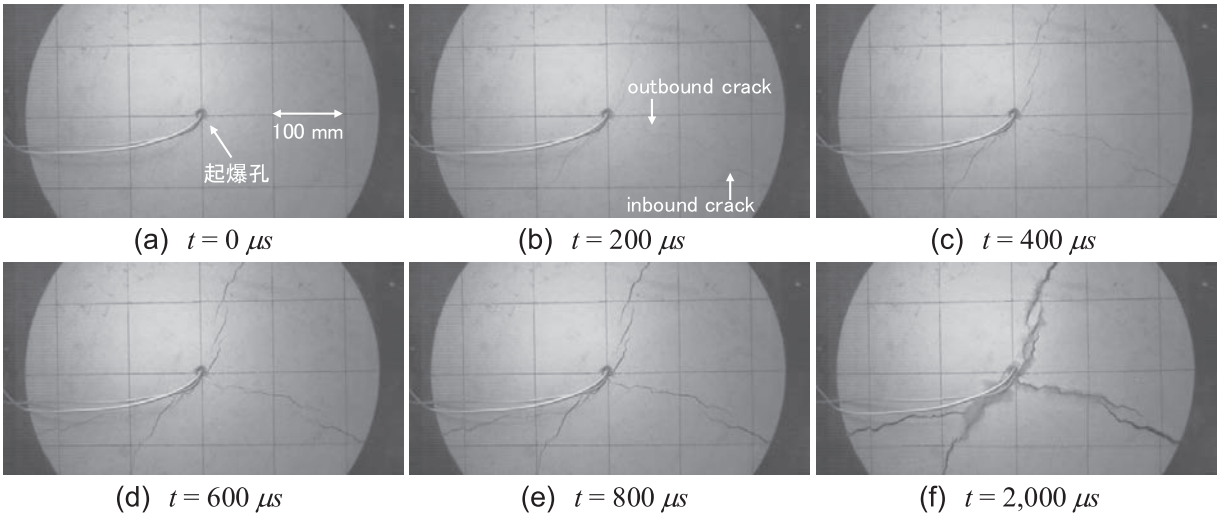
(a) 起爆前　　(b) 起爆後

写真―3　円柱供試体の放電破砕状況[4]

3. 合成桁橋 RC 床版解体・撤去のための装薬配置

(1) SMartD による合成桁橋 RC 床版解体シナリオ

「合成桁」は，床版と鋼桁が一体となって上載荷重を負担する構造であるため，上フランジと床版はジベルで強固に接合され，容易に分離することができない。逆に言えば，床版と鋼桁の一体化を無効にすれば，



(a) $t = 0\ \mu s$　(b) $t = 200\ \mu s$　(c) $t = 400\ \mu s$

(d) $t = 600\ \mu s$　(e) $t = 800\ \mu s$　(f) $t = 2{,}000\ \mu s$

写真―4　放電破砕時の円柱供試体上面におけるひび割れの発生とその発達[4]

床版を主桁から分離・撤去することが可能となる。

鋼桁と床版の一体化は，**図**―３に模式的に示すジベル周辺 α 部のコンクリート硬化過程において発現される。したがって，SMartD により α 部のコンクリートを効果的に破砕することができれば，人力によるハツリ作業を大幅に低減して，主桁から床版を分離することが可能となる。

一方，高速道路床版の取替工は，高速活線交通近傍での作業となることが多いため，その施工は円滑な走行と安全を，絶対的に担保して実施されなければならない。したがって，床版破砕に要するエネルギーは，可能な限り抑制することが望まれる。上述のように α 部周辺に限定した局所破砕は，作用させる衝撃も相対的に小さなものに抑制することが可能であり，近隣活線交通への影響を低減し得るとともに，飛散・騒音養生も軽微・簡便とすることが可能で，作業の安全化，効率化を図ることもできる。

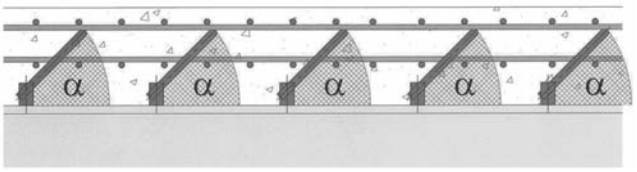
(2) 合成桁床版分離解体のための装薬配置

図―４に，馬蹄形ジベルによる鋼桁と床版の一体化を無効化するための装薬配置例を模式的に示す。当該装薬配置は，以下の３つの条件を満たすよう設計したものである。

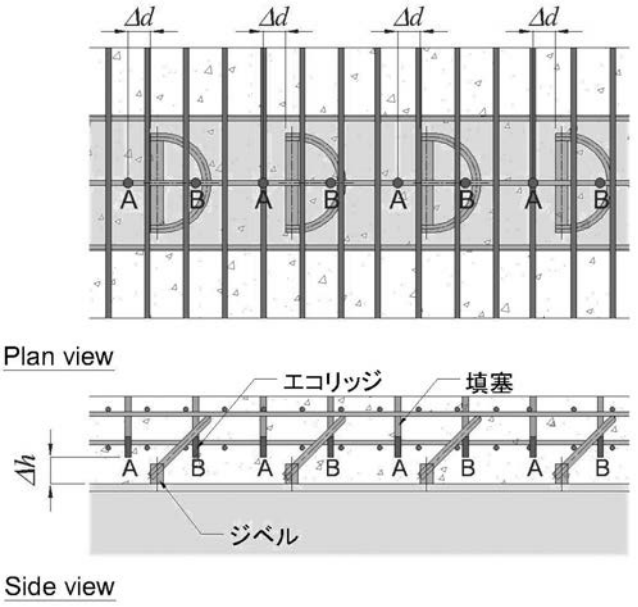
①ウェブの直上に等間隔で装薬孔を設ける。
②２本のエコリッジ A，B で，ジベルを挟むよう装薬し，A はジベル端部からの距離 Δd が一定の範囲の位置に，また B はジベルリング内に配置する。
③エコリッジ底面と主桁フランジ面の距離 Δh が一定の範囲内に位置するよう深部装薬する。

図―４に示した装薬配置で，A，B のカートリッジを斉発で起爆すると，**図**―５に模式的に示す応力波の伝播経路が形成され，以下の３つの破砕形態が，逐次，発現される。最初に形成される破砕面は，馬蹄形ジベルのリング面に沿った破砕面である。**図**―５の波動伝播図に示すように，フランジ面反射で生じる引張波は，ジベル内部を，コンクリート内部よりも速く，かつ低減衰で伝播する。その波頭は新しい波源となり，周囲のコンクリートに次々と球面状に波を伝播させるため，ジベルリング内では引張波が重なり合い，**写真**―５のように，リング面に沿った破砕面が形成され，リングを介したジベル - コンクリート間の結合は解消される。

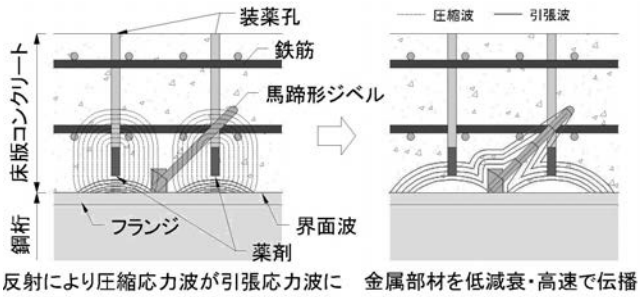
第二の破砕形態は，スポール破壊（spall fracture）として知られる破砕である。すなわち，ある部材の片側表面に衝撃を加えたとき，部材の厚さ方向に伝播した圧縮応力波が，背面の自由面で反射し，引張応力波



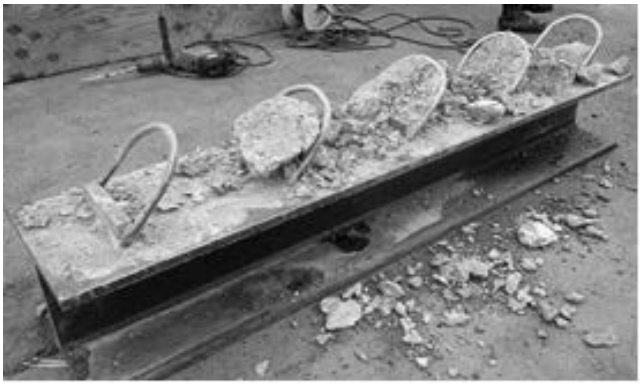
図―３　鋼桁 - 床版間の一体化無効化のための破砕個所



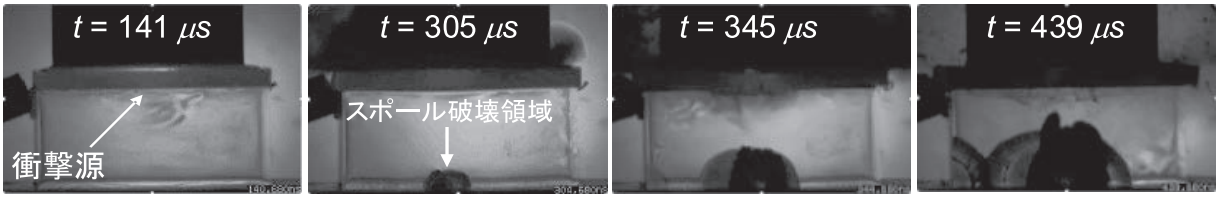
図―４　鋼桁と床版の一体化を無効とする装薬配置模式図



図―５　馬蹄形ジベル周辺の波動伝播模式図



写真―５　馬蹄形ジベルのリング面に沿った破砕面



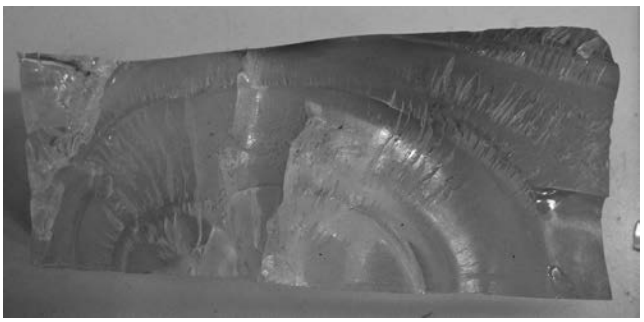
写真―6　アクリル板 100 mm（L）× 100 mm（W）× 50 mm（H）におけるスポール破壊領域の成長過程[5)]

となり広がっていくことにより生じる引張破壊である。

写真―6 は，アクリル材（100 mm × 100 mm × 50 mm）上部に放電衝撃を与え，スポール破壊の発生と進展過程をハイスピードカメラで撮影した写真である。**写真**―6 では，半球面状のスポール破壊領域が，衝撃源の反対面に形成され，成長していく様子が確認できる。この半球面状の破壊領域は，連続的に成長するのではなく，最初に形成された半球面を覆う新しい半球面が，逐次，段階的に形成され，**写真**―7 のように層状の半球破砕面が形成される。このとき，円周方向の破砕面だけでなく，半径方向の破砕面も形成されるため，アクリル材は細かく分割破砕されていく。このような破砕形態は，実際の床版解体工においても確認され，ジベル周辺のコンクリートは，**写真**―8 に示すように，手で取り除ける寸法に破砕され，ジベルと床版コンクリートの一体化はほぼ解消される。

3 つ目の破砕効果は，フランジ面上を伝播する反射波成分が，界面波としてフランジ - 床版コンクリート間の付着を解消する効果である。この破砕効果を，定量的に説明することは難しいが，床版撤去後，主桁上に残されたコンクリートは，箒などでノロも残さず容易に清掃される。

以上の，3 つの効果が同時に発現されることで，馬蹄形ジベル周辺のコンクリートは分断・細破し，床版コンクリートと主桁との一体化は完全に解消され，床版を主桁から撤去することが容易となる。



写真―7　層状破砕面が形成されたアクリル材断面

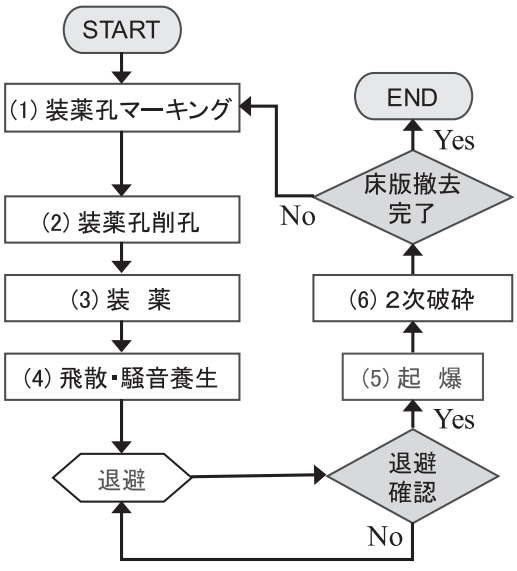


写真―8　床版撤去後のジベル周辺コンクリート破砕状況

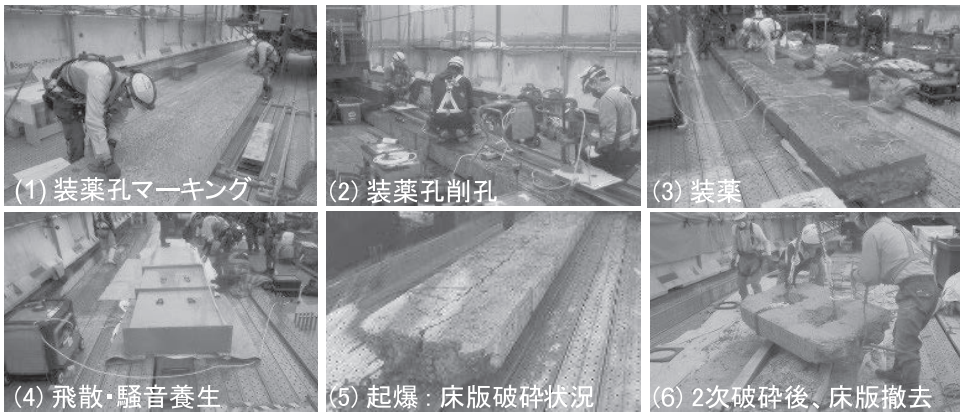
4. SMartD による合成桁床版解体・撤去の実際

図―6 に，SMartD による合成桁床版解体・撤去工の作業手順を示し，**写真**―9 に各作業段階の施工状況を示す。SMartD は，EDICS の特殊工法であるため，**図**―6 中の（4）と（6）以外は，ほぼ EDICS の作業と同一である。

（4）の飛散・騒音養生については，破砕個所の数 m 近傍を一般車両が高速走行していることから，通常の養生に加えて，**写真**―9 中の（4）に示される厚さ t = 3 mm の鋼製箱で破砕範囲を覆い，飛散対策に万全を期すと同時に，質量則による騒音低減も図った。



図―6　SMartD 作業手順



写真―9　SMartD 各作業段階の施工状況

(6) の二次破砕は，二つの作業に分類できる。一つは，揚重機等で吊り上げ・運搬可能な寸法に，床版を橋軸直角方向に分断する作業である。当然のことながら，揚重機能力が大きいほど，切断寸法を大きくでき，分断個所を減らすことができるため，設備計画の段階で可能な限り能力の高い揚重機を選定することが望まれる。

もう一つの作業は，床版吊り上げの邪魔となるジベルリング内部を通る橋軸方向の配力筋を，ハツリ出し，切断する作業である。このためにハツリ出すコンクリート体積は**写真**―9 中の (6) から分かるように，至って小さく，局所的であるが，その必要最小限のハツリ出し体積を作業員が会得するには，現地での学習・習熟による外ない。

EDICS，ならびに SMartD による馬蹄形ジベル式合成桁橋の RC 床版解体工は，既に切断幅 W = 800 mm で切断された床版を，L = 3,000 m 以上にわたって解体・撤去した。この間，初期習熟を除いても，プレストレス補強区間等における補助装薬配置設計など，現地でなければ検証・解決できない課題が生じたが，現在のところ当初計画以上に円滑な解体・撤去作業を実施し得ている。

謝　辞

図―2，および**写真**―6 は，（国研）産業技術総合研究所との共同研究の成果の一部です。同研究所緒方雄二様，久保田士郎様，佐分利禎様，高橋良尭様には，共同研究を指導・実施いただきました。また，中日本高速道路㈱名古屋支社名古屋工事事務所のみなさまには，同工法の現場実装に際し，実務的なご助言とご指導を賜りました。ここに深甚の感謝を表し，本文の結びとさせていただきます。

JCMA

《参 考 文 献》

1）『高速道路五十年史』編集委員会：高速道路五十年史，第 2 章，東日本高速道路㈱，中日本高速道路㈱，西日本高速道路㈱，pp.36，2016.
2）高速道路資産の長期保全及び更新のあり方に関する技術検討委員会：中間とりまとめ，東日本高速道路㈱，中日本高速道路㈱，西日本高速道路㈱，No.349，pp.106-110，2010.
3）佐々木加津也，北島秀昭，阪本良 et. al.：衝撃破砕工法の特性と施工例，Hitz 技報，Vol.7，No.1，pp.32-37，2010.
4）Uenishi K., H. Yamachi, K. Yamagami and R. Sakamoto：Dynamic fragmentation of concrete using electric discharge impulses, Construction and Building Materials,Vol. 67, Part B, pp.170-179, 2014.
5）（国研）産業総合研究所，三井住友建設㈱：令和 4 年度共同研究「コンクリートの放電破砕メカニズムに関する研究（II）」報告書，2023.
6）（一社）沖縄県磁気探査協会：火薬学の基礎知識（講義用），https://www.jikitansakyoukai-o.com/img/pdf/0715_5.pdf，2025.7 閲覧

［筆者紹介］



阪本　良（さかもと　りょう）
㈱カナデビアエンジニアリング
機械建設事業部
チームリーダー



上西　幸司（うえにし　こうじ）
東京大学
大学院新領域創成科学研究科
教授



中森　純一郎（なかもり　じゅんいちろう）
三井住友建設㈱
技術研究所



山地　宏志（やまち　ひろし）
三井住友建設㈱
技術研究所