コンクリートと金属部材の波動伝播特性の違いを利用した複合構造物解体

Demolition of Composite Structures Utilizing the Difference in Shock-Wave Propagation Characteristics between Concrete and Metal Members

山地　宏志*1，中森　純一郎*2
HIROSHI YAMACHI, JUN-ICHIRO NAKAMORI

精密衝撃破砕工法「SMartD」は，躯体内部に設けた装薬孔の孔壁に爆燃域の衝撃を与えて発生させた引張波の伝播経路を誘導することで，発生するひび割れの方向や損傷域を制御して躯体を効率的に解体する設計・施工技術である。ただし，爆燃反応は発生エネルギー量が限定されるため，合成桁床版のようにコンクリートと金属部材が強固に一体化した複合構造等の解体に SMartD を適用する場合，コンクリートと金属部材の衝撃波動伝播特性の違いを利用する必要がある。本稿では，複合構造解体のための爆燃薬剤の装薬配置設計の基本的な考え方を示し，その妥当性を模擬解体実験並びに数値解析結果を用いて検証する。

キーワード：精密衝撃破砕工法，床版分離・解体，装薬配置設計

SMartD is a design and construction technology for the efficient demolition of structural members. It controls the direction of crack growth and the extent of the damaged zone by guiding the propagation of tensile stress waves generated by applying deflagration-range shock pressure to the charging holes. However, since the amount of energy generated by a deflagration reaction is limited, applying SMartD to the demolition of composite structures, such as composite girder deck slabs in which concrete and metallic components are rigidly integrated, requires leveraging the differences in shock wave propagation characteristics between the concrete and the metallic components. This paper presents the fundamental concepts for designing the charge layout of deflagrating agents used in the demolition of composite structures and verifies the validity of the proposed approach through fragmentation experiments and numerical analyses.

Keywords: Precise shock-wave fragmentation technique, Composite girder slab separation and dismantling, Charging layout design

1. はじめに

解体対象の構造物に装薬孔を設け，その孔壁に爆燃域の衝撃圧を作用させて構造物を破砕する放電破砕工法 [1)] は，少子高齢化による作業員の激減で途絶しつつある人力はつり作業を代替する工法の一つとして期待されている。しかしながら，作用させることのできる衝撃圧が爆燃域に限定されることもあり，放電破砕工法により合成桁床版のような複合構造物を解体することは困難とされていた。

筆者らは，放電破砕工法を衝撃発生源として採用し，衝撃により発生した引張波の伝播経路を誘導することで，ひび割れの方向や損傷域を制御する装薬設計法と，これを実施するための付帯技術群を，精密衝撃破砕工法「SMartD」として，各種構造物解体に実装・展開してきた。その装薬設計の中には，金属部材とコンクリートの波動伝播特性の違いを利用することで，コンクリート－金属部材境界を分離・破砕することを可能とする設計も整備されている。

以下では，今日，需要が急増しつつある床版更新工事における，スタッドジベル式合成桁床版分離・解体のため

*1 技術研究所技術開発推進部
*2 技術研究所知的財産部

の SMartD の装薬配置設計を示し，その妥当性，ならびに波動伝播特性の違いを利用することの意味を模擬解体実験，ならびに数値シミュレーションにより検証する。

2. 合成桁床版分離・解体のための装薬設計とその実験検証

以下の装薬設計が対象とする解体工は，**図-1** に模式的に示すように，スタッドジベル式合成桁床版の両側を，あらかじめワイヤーソー等で図の赤線部で切断し，残された RC 床版を合成桁から分離・解体する作業である。一般に，床版を衝撃破砕する場合，**図-2**(a)のように床版厚さ中央に薬剤を配置する装薬法が一般的であるが，合成桁から床版コンクリートを分離することを目的とした場合，**図-2**(b)，(c)のように起爆深度を深くする装薬が有効であると考えた。これは，起爆深度を深くすることで，底盤反射により圧縮波から変換された引張波を可能な限り低減衰でスタッドジベルに伝播させるためである。

ここでは，最も効率的に引張波を伝播することが期待される**図-2**(c)を基本配置として採用し，その効果を検証するため，合成桁床版を模擬した**図-3** に示す試験体を用いた解体実験を実施する。なお，試験体は，昭和 30 年代後半頃建設された高速道路の床版を想定し，呼び強度 $F = 24\ N/mm^2$，スランプ値 $Sl = 12\ cm$，最大骨材寸法 $G_{max} = 20\ mm$ のコンクリートを打設した。**表-1** にその配合を示し，**表-2** にその圧縮強度試験結果を示す。**表-2** に示さ

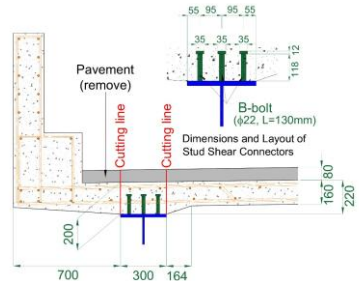
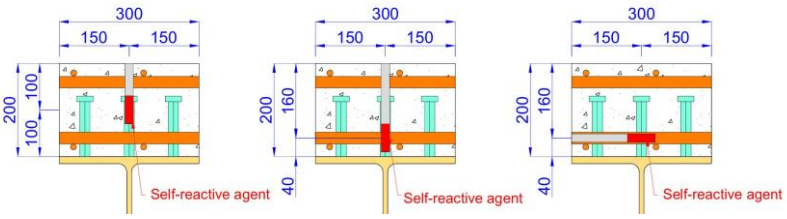
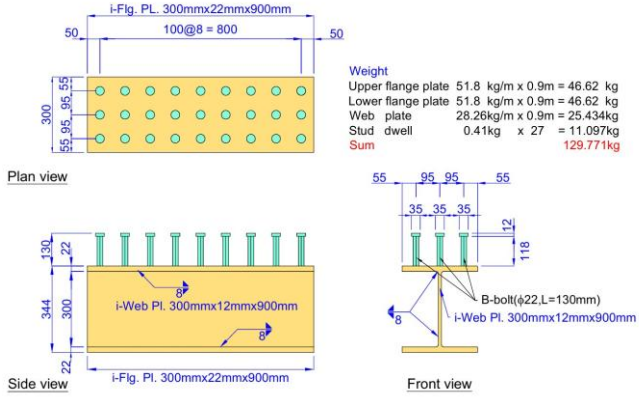


図-1 合成桁床版切断模式図

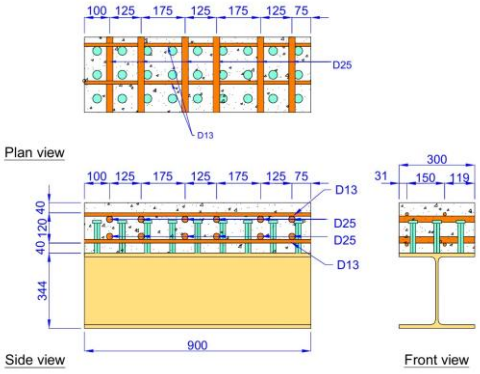


(a) 標準装薬配置 (b) 深部鉛直装薬配置 (c) 深部水平装薬配置

図-2 合成桁床版分離・解体のための装薬配置分類



(a) 模擬合成桁構造図



(b) 模擬床版構造・配筋図

図-3 模擬合成桁床版構造・配筋図

表-1 模擬試験体に供したコンクリート配合

配合 kg/m^3								水-セメント比	細骨材率
セメント	水	細骨材 I	細骨材 II	細骨材 III	粗骨材 I	粗骨材 II	混和剤		
305	178	431	254	165	485	485	3.81	58.5 %	47.3 %

表-2 模擬試験体のコンクリートの強度試験結果

コア名称	材齢	直径 d_1 mm	直径 d_2 mm	直径 d_a mm	高さ h_1 mm	高さ h_2 mm	高さ h_a mm	重量 g	破壊荷重 kN	圧縮強度 N/mm^2	h_a/d_a	密度 t/m^3
No.1	28 日	100.28	100.40	100.34	192.37	192.45	192.41	3500.6	267.0	33.8	1.92	2.30
No.2	28 日	100.21	100.34	100.27	193.37	193.33	193.35	3532.8	275.5	34.9	1.93	2.31
No.3	28 日	100.19	100.45	100.32	192.84	192.67	192.75	3472.4	264.0	33.4	1.92	2.28

れるように，呼び強度の 1.38～1.45 倍のコンクリート強度が材齢 28 日で発現しているが，既設 RC 構造物の実強度は設計基準強度の 1.2～1.5 倍程度とされる [2]から，実用的な模擬試験体を作成できたと考える。

図-3 に示した試験体を，**図-4** の装薬配置により衝撃破砕する模擬解体実験を実施した。**図-4** に示すように，実験では底盤から h = 27.5 mm の高さに，自己反応性薬液カートリッジ（q = 5 mL の）の中心がウェブ上に位置するよう水平装薬した。橋軸方向の装薬配置は，底盤反射により引張に変換された反射波を均等にスタッドジベルへ伝播させることを目的にして，隣接するスタッドジベルの中央に，スタッドジベルと同じΔL = 100 mm の間隔でカートリッジを配置した。

模擬解体実験における試験体の破砕状況および 2 次破砕過程を**写真-1** に示す。**写真-1 (b)** に示すように，放電破砕後，試験体にはスタッドジベル頭部付近を水平に結ぶ破砕面と，下部鉄筋間を水平に結んで形成される破砕面との二つの水平破砕面が形成されている。このうち，スタッドジベル附近を結ぶ水平破砕面より上部のコンクリートは，**写真-1 (c)** に示すように容易にブロックとして上部鉄筋ごと撤去できる。

次に，**写真-1 (b)**，**(f)** では外側のスタッドジベルが露出している。このことから，外側スタッドジベルを結ぶ破砕面が，衝撃破砕によって形成されたことが分かる。また，写真では分かりにくいが，スタッドジベル間を相互に結ぶ鉛直な破砕面も形成されている。したがって，下部鉄筋を水平に結ぶ破砕面より上部のコンクリートは，この鉛直破砕面で仕切られ，相互に分離独立したコンクリート塊として存在する。

その個々のコンクリート塊は，**写真-1 (d)** のように，一部を除き，バールなどで容易に撤去することができる。バールなどでは撤去が難しい箇所は，鉄筋やジベルなどの金属部材が密集する箇所であるが，そのような箇所の

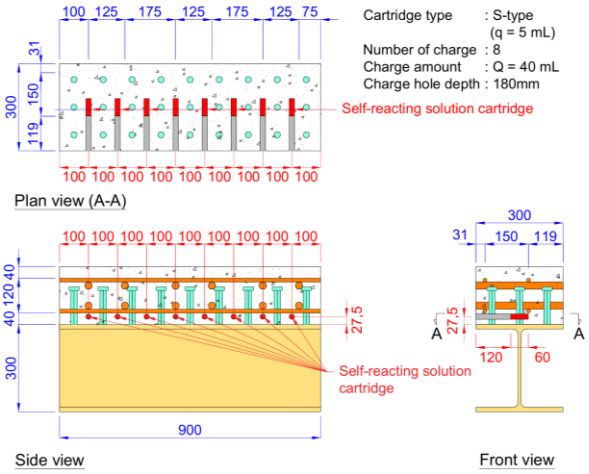
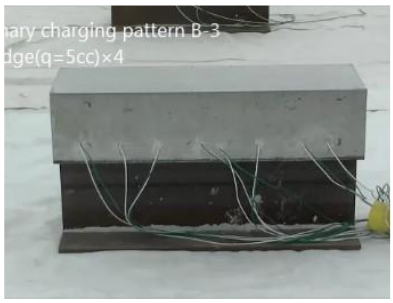


図-4 実験に供した装薬配置図



(a) 装薬状況



(b) 試験体破砕状況



(c) 上部破砕ブロック撤去



(d) ジベル内コンクリート撤去



(e) 仕上げはつり



(f) 試験体妻部破砕状況

写真-1 模擬解体実験における試験体破砕状況および 2 次破砕過程

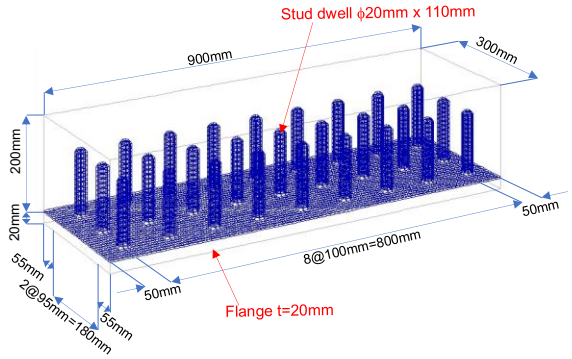
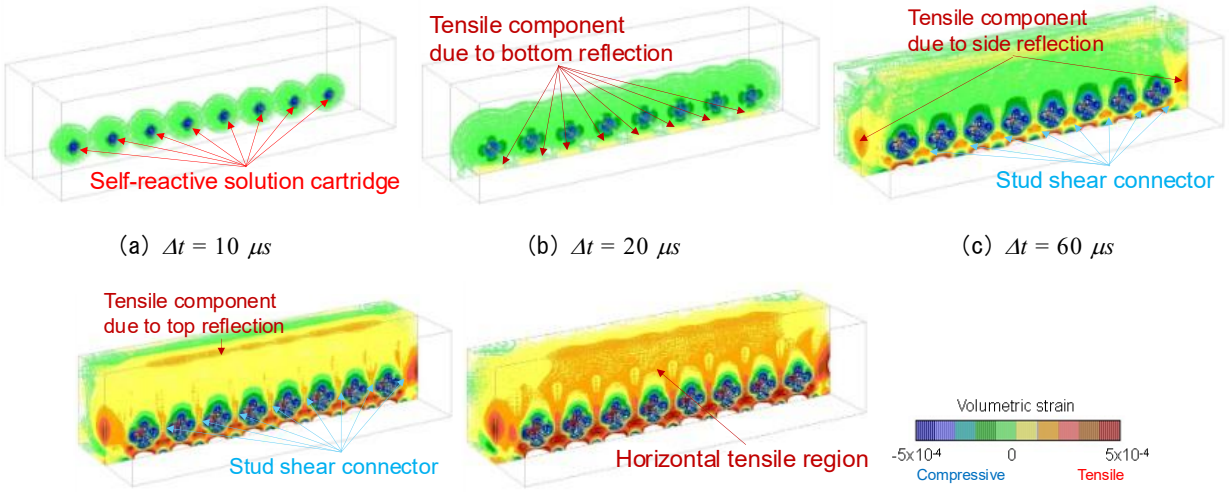


図-5　模擬合成桁床版の数値モデル [5)]

表-3　数値シミュレーションに供した材料物性値

Material	Concrete	Stud dowel	Flange
Mass density ρ (kg/m^3)	2,320	7,800	7,800
Young's modulus $E(MPa)$	34,200	200,000	200,000
Poisson ratio μ	0.25	0.3	0.3
P-wave velocity $V_p(m/s)$	4,205	5,875	5,875
S-wave velocity $V_s(m/s)$	2,428	3,140	3,140



(a) Δt = 10 μs　(b) Δt = 20 μs　(c) Δt = 60 μs

(d) Δt = 80 μs　(e) Δt = 100 μs

図-6　起爆後の体積ひずみ分布の変化（フランジ中央断面）[5)]

コンクリートにも装薬設計で想定した所定のひび割れは形成されており，そのコンクリート体積も小さいことから，**写真-1**(e)のように，電動ハンマー程度の軽微な打撃で容易に撤去できる。このように，SMartD による衝撃破砕を援用することで，合成桁床版の解体を大幅に効率化，省力化することが可能となる。

3. 数値シミュレーションによる合成桁床版破砕機構の考察

前章において実施した模擬解体実験で確認された破砕面等が形成される機構を考察するため，波動伝播解析コード'BLAST-3D' [3),4)]を用いた数値シミュレーションを実施した。**図-5** に解析に供した数値モデル [5)]を，また計算に供したコンクリート，スタッドジベル，並びに合成桁上部フランジの物性値を**表-3** に示す。

爆燃作用を数値解析上で表現するため，**図-4** に示した装薬位置に自己反応性薬剤の領域（径ϕ = 20 mm,装薬長 L = 60 mm）を設定し，この範囲にあるすべての節点に，式(1)に示す圧力 P を衝撃的に作用させるものとした。具体的には，式(1)中の最大圧力 A を A = 1 GPa，圧力継続時間 T を T = 260 μs とした。なお、t は起爆後の反応経過時間を示し、$0 \leq t \leq T$の範囲の値をとる。

$$P = Asin^2\left(\frac{\pi t}{T}\right) \tag{1}$$

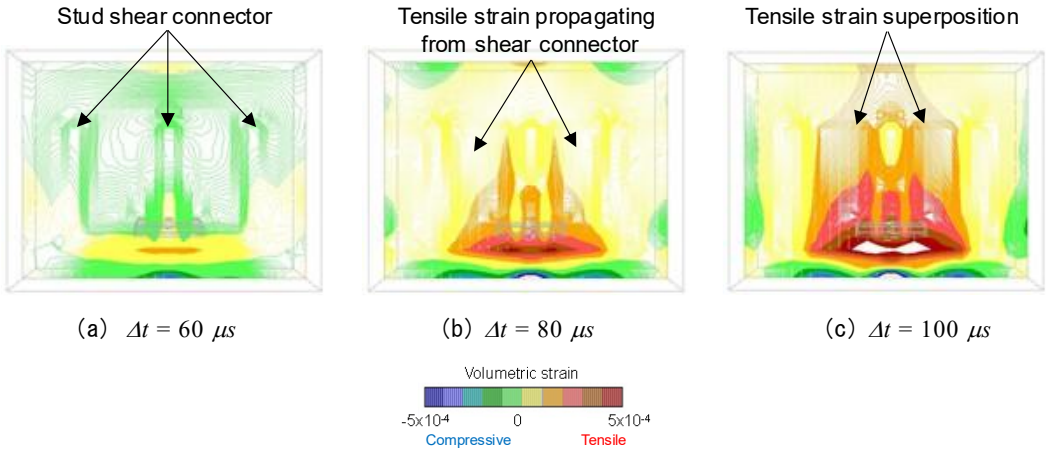


図-7　スタッドジベル周りのひずみ伝播（スタッドジベルが橋軸直角方向に並ぶ断面）

放電破砕起爆後のフランジ中央断面の体積ひずみ分布の経時変化[5]を**図-6** に示す。図中のΔt は起爆後の経過時間を示し，その初期時刻$\Delta t = 0$ と前記反応経過時間の初期時刻 $t = 0$ は一致する。**図-6** に示すように，起爆直後は，自己反応性薬剤のカプセル形状と相似，かつ等方に圧縮ひずみだけが床版内を伝播して行くが，**図-6 (b)** の$\Delta t = 20\ \mu s$ 頃に底盤で反射し，引張波が形成される。$\Delta t = 60\ \mu s$ 頃には，底盤反射による引張体積ひずみレベルが$\varepsilon_v > 4\times10^{-4}\ \mu$程度にまで増大し，ほぼ同レベルの引張ひずみがスタッドジベル基部に伝播していることが，**図-6 (c)** より確認できる。これは，より早く，かつ低減衰で反射引張波をスタッドジベルに伝えるという当該装薬設計の目的にかなう伝播形態である。

また，$\Delta t = 60\ \mu s$ 頃には，側方自由面に強い反射引張ひずみ域が発生していることが，**図-6 (c)** より確認できる。この引張ひずみ域が成長すると，橋軸直角方向の外側スタッドジベルに沿う破砕面が形成され，外側スタッドジベルは**写真-1 (b)** のように露出する。なお，**図-6** からその伝播経路を確認することは難しいが，橋軸方向に並ぶ外側スタッドジベルも，橋軸に平行な側方自由面の反射引張ひずみ域の成長により，**写真-1 (b)** のように露出する。

$\Delta t = 80\ \mu s$ 頃になると，ジベル内を引張成分が上方に伝播するとともに，床版上部表面に圧縮波が到達し，これが反射により引張ひずみとして，床版内部へと伝播・成長していくことが，**図-6 (d)** より確認できる。これら二つの引張成分は，$\Delta t = 100\ \mu s$（**図-6 (e)**）頃にジベル頭部付近で重なり合い，水平な引張ひずみ領域を形成する。この引張ひずみ領域が水平な破砕面を形成し，その上部はブロックとして**写真-1 (c)** のように撤去されることになる。

ここで，スタッドジベル周りのひずみ伝播に着目する。**図-7** は，スタッドジベルを含む橋軸直角断面上の体積ひずみ分布の経時変化を示すものである。**図-7 (a)** に示すように，$\Delta t = 60\ \mu s$ の時点では，中央のスタッドジベル下部に底盤反射による引張ひずみが伝播しているものの，スタッドジベルの大部分は圧縮のひずみ状態にある。

ところが，**図-7 (b)** の$\Delta t = 80\ \mu s$ になると，スタッドジベル周辺コンクリートのほとんどの領域が引張状態となる。この引張伝播は，二つの異なる伝播経路を持ち，一つは底盤の反射引張波が球状に伝播する経路であり，もう一つはスタッドジベル内をコンクリートよりも速くかつ低減衰で伝播する引張波が，その到達点を新しい波源としてコンクリート部へと球状に伝播する経路である。これら二つの経路から伝播した引張波はスタッドジベルを結ぶ領域で重なり合うため，スタッドジベルを結ぶ領域のひずみレベルは，**図-7 (c)** に示すように，他の領域に比べ著しく高くなる。したがって，当該領域を結ぶ破砕面が形成される。

なお，**図-7 (c)** では，上部表面の反射引張波とスタッドジベルから伝播する引張波が，スタッドジベル頭部付近で水平に重なり合う領域を形成し始めていることも確認される。以上のように，**写真-1** の模擬解体実験で確認された破砕面は，**図-4** に示した装薬配置設計で意図された経路を引張波が伝播することにより，そのすべてが形成されることが，数値シミュレーションにより確認された。

4. おわりに

SMartD は，放電破砕工法による爆燃域の低衝撃を利用して，構造物を効率的に解体するための装薬配置設計技術と，これを実現するための付帯技術群である。その設計には，解体過程の中で，放電破砕工法をどのように活用すれば全体の解体効率を最適化することができるかという解体シナリオ設計も含まれる。また，設計された装薬配置を解体実務に実装するためには，構造物の配筋状況にかかわらず設計された位置に装薬孔を削孔するための削孔システム[6]など，開発すべき付帯技術が数多く存在する。このように，SMartD は放電破砕工法をベースとした特殊解体工のためのシステム工法であるといえるが，やはりその最大の特徴は，解体工に設計の概念を導入した点にある。これは，衝撃波動伝播解析コード'BLAST-3D'のような技術基盤が整備されたことにより可能となった。

本稿では，SMartD の実務展開の可能性を示すため，従来，放電破砕工の適用が困難と考えられていた合成桁床版分離・解体工に放電破砕工法を導入し，かつ全体施工能率を省力化・効率化させることのできる装薬配置設計を示し，その設計の妥当性を模擬解体実験と数値シミュレーションにより検証した。その装薬設計において，波動論の知見，すなわち「コンクリートとスタッドジベルの波動伝播特性の違い」を利用することで，実用的な装薬配置設計を実施し得ることを示したが，その知見の理解には高度な思考や計算を要しない。したがって，基本的な数学・物理知識と常識的な判断能力を備える技術者が，対象とする構造物をよく観察・理解すれば，適切な SMartD の装薬設計を実施し得るものと考える。

当該分野の研究は，まだ端緒についたばかりであるが，解体工の需要が増大する反面，解体工の担い手が激減する今日にあって，解体工合理化の一助となるよう，今後も多様な構造物への SMartD の適用を検討していきたい。

謝辞：精密衝撃破砕工法「SMartD」の開発は，東京大学 上西幸司教授の緻密で実用的な指導の賜物です。長年にわたる先生からのご指導に，あらためて感謝いたします。産業総合研究所 緒方雄二様，久保田士郎様，高橋良尭明様，ならびに株式会社カナデビアエンジニアリング 阪本良様には，放電破砕技術に関する理論・実務の両面にわたる多大なるご指導とご助言を賜りました。皆さまに，深甚の感謝の意を表します。最後に，SMartD 開発のすべての過程において，その実験と実装の実務を支えてくれたアルソシアテック株式会社須藤俊典様の貢献に長年の感謝と友情の意を表し，本稿の結びといたします。

参考文献

1) 佐々木加津也，北島秀昭，阪本良，飯塚信二，田中幹雄，田中淳史，大西孝明，阿部知宏，前畑英彦：衝撃破砕工法の特性と施工例，Hitz 技報，Vol.7，No.1，pp.32-37，2010
2) 日本コンクリート学会：既存コンクリート構造物の性能評価指針 2014，日本コンクリート工学会図書販売，2014
3) Uenishi, K., H. Takahashi, H. Yamachi, S. Sakurai: PC-based simulations of blasting demolition of RC structures, Construction and Building Materials, Vol. 24, pp.2401-2410, 2010
4) Uenishi, K., H. Yamachi, K. Yamagami, R. Sakamoto: Dynamic fragmentation of concrete using electric discharge impulses，Construction and Building Materials, Vol.67, pp.170-179, 2014
5) Uenishi, K., K. Wada, H. Yamachi, J. Nakamori: Precisely controlled dynamic disintegration of steel-concrete composite structures, Procedia Structural Integrity, Vol.46, pp.136-142, 2023
6) 山地宏志，中森純一郎：振動作業を回避してドリル削孔を行うための装置，特許番号 第 7504279 号，2024