

動的破碎による杭頭処理工法における装薬条件の最適化 : 敷地端部の杭の場合

竹内 博幸* 高橋 祐一*
靄見 淳也*

要 旨

ここ数年来、杭頭処理における装薬方法を豎孔方式から横孔方式に変更し、最適な装薬方法を模索してきたが、杭半径の90%程度の装薬孔を放射状に配置し、動的破碎することにより、装薬孔を連結する状態で破断面を形成できることが明らかになった。一方で、実際の工事現場では、削孔にハンディタイプの電動ドリルを用いるが、敷地端部あるいは隅角部では、ドリルのストロークを確保できないことから、水平方向に放射状の装薬孔を一律に設置できないことが以前から問題視されていた。

そこで、今回は、最も条件が厳しい敷地隅角部における杭頭余盛部を、一定方向からの削孔により設けられた装薬孔配置とすることにより、支障なく水平破断できる方法を考案し、その有効性を検証した。なお、破碎時の衝撃が、杭鉄筋に及ぼす影響についても検討を行い、強度的に問題ないことが明らかになった。

1. はじめに

筆者らは、ここ数年来、非火薬の破碎剤を用いて、コンクリート塊などを瞬時に破碎する動的破碎をコンクリート杭の杭頭処理に適用している。当初は、豎管底に平鋼2枚を水平に取り付け、その間隙からガス圧が抜けるようにした装薬管を複数配置し、遠隔操作で破碎する方法としていたが、装薬用の関連機器材の取付けが前施工になるなど、支障が多いため、装薬準備が杭頭露出後の後施工となる横孔方式に変更し¹⁾、最適な装薬方法を模索してきた。一昨年度の破碎実験²⁾により、込め物長率(込め物長/装薬孔長×100%)が40%前後の場合に、安定した破碎状態となることが明らかになった。

横孔方式とした装薬孔は、放射状に配置することにより、各装薬孔の破碎力が水平方向にスムーズに連動するため、余盛部を水平破断すると考えられる。

しかしながら、装薬孔を放射状に設ける場合、削孔する電動ドリルは杭体に対し、法線上に設置する必要があるが、杭体自身が敷地の隅角部や端部にある場合、必要なすべての装薬孔を杭断面に対し、放射状に配置することは不可能であることが分かる。

したがって、敷地隅角部においても、杭頭余盛部の水平破断が可能であり、かつ削孔可能な装薬孔の配置方法について検討する必要がある。

2. 装薬方法の検討

2.1 貫通装薬孔放射状配置方式

敷地隅角部における杭頭余盛部を動的破碎により処理する方法として、最も簡易に想定されるのは、図-1に示すように貫通横孔を斜め45°半面側から背面側に向けて削孔する

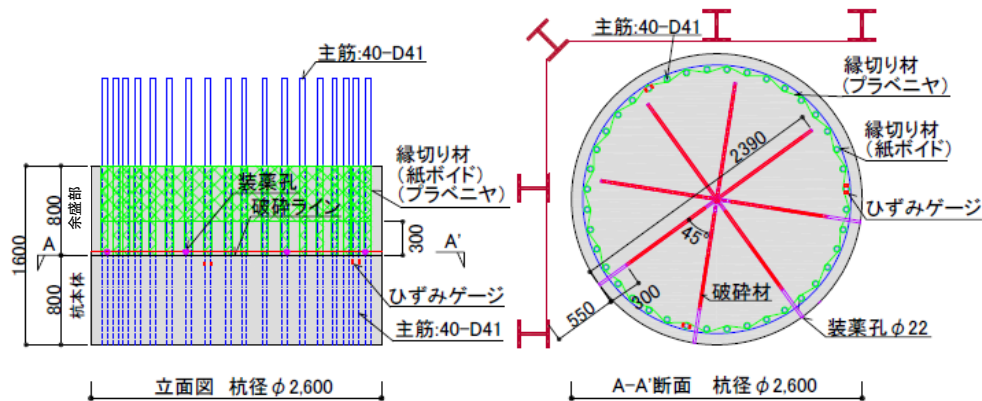


図-1 貫通装薬孔放射状配置方式・例:敷地隅角部

* 技術研究所 建築技術開発部

方法となるが、実際に試験体を作製し、試行してみると、それぞれ片側半面から削孔するため、交差部で相互に干渉し、全数につき最奥部まで削孔できないことが分かる。

2. 2 斜め 45° 装薬孔並列配置方式

横孔放射状方式における動的破碎を原理的に考えると、各装薬孔はそれぞれ離隔しているが、点火後、破碎力であるガス圧が発生し、各々最も接近している装薬孔へ相互に向かうため、破碎できると推察される。そのような破碎力の伝達状態を、片方向からの削孔による装薬孔配置で、杭断面全体に巡らせる方法として、**図-2**に示す方法が考えられる。

なお、試験体立面図において、奥側に向けて装薬孔の位置に勾配がつけられているのは、破碎力が杭断面端部に達した際に、同力が杭本体側に向かわないように配慮したためである。これは、事前に実施した予備実験において、**図-2**に示す装薬孔の配置とほぼ同形で、各孔を同一レベルで破碎させた際に、破碎力が均等に作用せず、余盛部が垂直に上がらないで、斜め方向に落下し、杭本体部分を破損させたため(**写真-1**)、そのような事象を回避することを目的としている。

また、並列端部の横孔は、ガイドホール(破線:空孔)として配置している。動的破碎におけるガイドホールの有効性は、既に一般的に知られているが、筆者らも、過年度において、スラブを対象としてその有効性を検証する実験を行い、ガイドホールが破碎によるひび割れを延伸する効果をもたらすことを確認している。³⁾

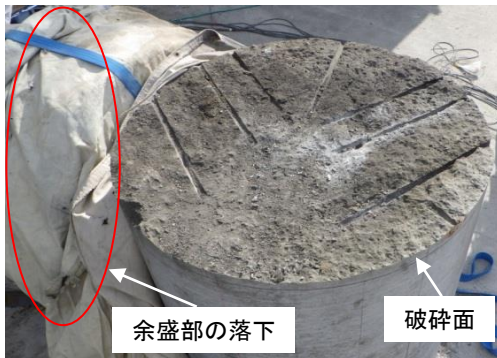


写真-1 破断予定ラインを水平に設定した場合の破碎状況

3. 装薬方法の有効性検証

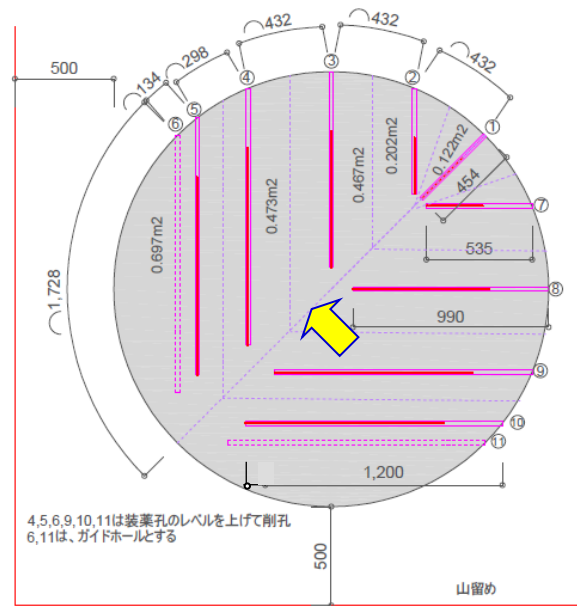
3. 1 使用材料

本検証の動的破碎で使用した材料を**表-1**に示す。

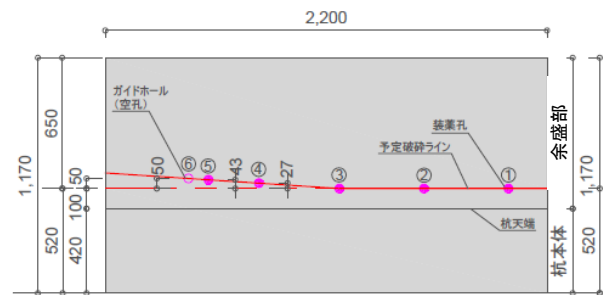
本検証では、杭試験体に、早強ポルトランドセメントを用いた呼び強度 40 のコンクリートを使用した。なお、破碎時における封緘養生強度は 57.3 N/mm²であった。使用した破碎剤は国産品であり、金属の還元反応を利用したものである。また、点火具も同じ製造社による瞬発性製品を用いた。

表-1 使用材料

名称	摘要	製造	備考
破碎剤	非火薬 (金属還元反応)	国内製	反応速度: 100~300m/s
点火具	発破器点火	国内製	静電気特性: 2,000 pF×8kV



平面図(矢印:矢視方向)



立面図(矢印方向)

図-2 斜め 45° 装薬孔並列配置方式:敷地隅角部

3. 2 装薬条件

杭径φ2,200mmの試験体は**図-2**(前掲)に、装薬条件を**表-2**に各々示す。装薬量は事前調査による破碎状態から 125g/m²(**表-2**参照)とし、装薬本数は 9 本とした。なお、各孔の装薬量は各装薬孔破碎対象面積に応じて分配し、込め物長率は次次要因とした。また、本実験では破碎圧が杭本体に影響を与えないように、破碎圧を誘導するようにガイドホール(空孔)を 2 孔設置し、さらに装薬孔のレベルを装薬孔③~⑥および⑧~⑩にかけて 80mm 上げることで、破碎圧による杭本体部への影響緩和、ないし回避を試みた。

表-2 斜め 45° 装薬孔並列方式による装薬条件の確認実験

試験体		装薬方法	装薬孔					装薬量(1孔分)		込物長さ(mm)	込物長さ率(%)
試験体名	直径(mm)		No.	断面(mm)	数量(本)	長さ(mm)	摘要	薬量	算定		
敷地隅角部用	2,200	水平	①	φ 22	1	454	ビニル管 φ 10-13 (mm)	15g	125g/m ² ×0.122 m ²	184	40.5
			②・⑦		2	535		25g	125g/m ² ×0.202 m ²	275	51.4
			③・⑧		2	990		58g	125g/m ² ×0.467 m ²	290	29.2
			④・⑨		2	1,200		59g	125g/m ² ×0.473 m ²	400	33.3
			⑤・⑩		2	1,200		87g	125g/m ² ×0.697 m ²	250	20.8
			⑥・⑪		2	1,200		—	空孔	—	—

3.3 試験体および各種養生方法

破砕前の試験体の状態を写真-2および写真-3に示す。ワイヤーとチェーンブロックで飛散養生を行い、さらに、破砕の際に、余盛部が上方に跳ね上がり、水平方向にずれて、杭本体側を損傷しないように、試験体上方まで単管を組み上げて、余盛部のずれ防止とした。防爆シートは、その外側に巻き付けて、破砕に備えた。

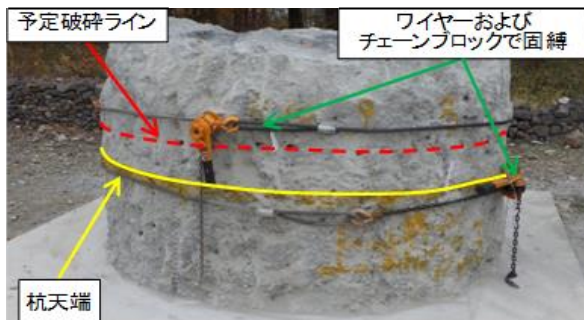


写真-2 水平破断前の試験体 (飛散防止)



写真-3 水平破断前の試験体 (防爆養生・ずれ防止)

3.4 破砕状態の検証

破砕時における余盛部の上方への浮き上がりは想定以上で、その約 1/2 が破砕片として余盛天端より 1mほど立ち上げた単管枠組みを超えて、外部に飛来した(写真-4)。

しかしながら、杭本体側は損傷もなく(写真-5)、破断面もほぼ想定通りに水平に破断されていた(写真-6)。また、破断面には、装薬孔の痕跡が明確に判別でき、想定通り、近接した装薬孔間で破砕圧が連動して水平破断に至ったものと推察される。



写真-4 破砕直後(ずれ防止倒壊)



写真-5 水平破断面(天端)



写真-6 水平破断面(側面から)

3.5 装薬条件と破砕結果との関係

破砕剤の装薬量は、事前の確認実験の結果から 125g/m^2 としたが、水平破砕した余盛部が、その天端より 1m 余り高い単管枠組みを超えて外側に飛来したことから、今回の装薬孔配置を適用した場合は、やや過装薬であったと考えられる。これは、放射状に配置された横孔よりも、半円形ごと並列に配置された横孔の方が、平均して相互間隔が近く、破砕圧が効率的に分散されたためと推察される。また、今回の試験体は、機械式継ぎ手適用のため、基礎躯体側に定着される杭主筋が立ち上がっておらず、破砕時に余盛部が上方に跳ね上がる際の抵抗が小さかったこともその一因と考えられる。

また、半円形ごとに並列に配置された横孔の最端部に空孔を設けたが、これについては特に因子を設けなかったため、その効果については、今回の実験の範囲では、明確なことは言えない。ただし、スラブの破砕実験などでは、装薬孔列の端部に空孔を設けることにより、ひび割れを装薬孔列から部材端部まで導くことが可能なことから³⁾、何らかの効果は働いているものと推察される。

何れにしても、今回の装薬条件により、処理対象の杭が敷地の隅角部あるいは端部に位置していたとしても、杭頭余盛部を確実に水平破砕できることが明らかになった。

4. 破砕による鉄筋への影響

4.1 破砕時の鉄筋ひずみ測定

水平破砕時における杭鉄筋に及ぼす影響を調査するため、杭試験体の本体側の杭主筋にひずみ計を取り付け、破砕時の鉄筋ひずみを測定した。使用鉄筋は SD490、D41 である。

なお、ひずみ計を杭本体側に取り付けるのは、余盛り側に取り付けた場合、破砕に伴い、計測コードが断線するなど、確実な測定が難しいことに加えて、余盛り側の杭主筋が破砕に伴い、引張力を受けるなどした場合、その影響は杭本体側の鉄筋部分にも及ぶため、破砕後に本体側の鉄筋を切断し、所要の試験を行うことにより、その影響を確認することが可能と考えられるためである。

ひずみ計の取付け位置を図-3に示す。当初は平面3箇所、各鉄筋2面としたが、計測中の不具合により、1箇所2面のみの計測となった。なお、今回は適用現場の仕様に合わせて杭天端から 50mm の位置に機械式継ぎ手が設けられるため、その位置より下方にひずみ計を内外2面に貼付した。

なお、本節において検討対象となる試験体は、前節までの試験体とは異なり、写真-1で示した $\phi 1,200\text{mm}$ の杭頭模擬試験体を用いている。

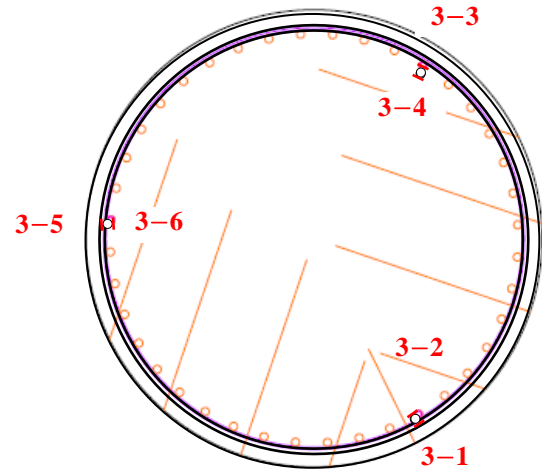


図-3 鉄筋ひずみ計設置位置
(内外2面ずつ)

4.2 鉄筋ひずみ測定結果

水平破砕時における鉄筋ひずみ測定結果を図-4に示す。先述のように、計測中の不具合により3-5、3-6の2箇所のみ測定値が得られた。測定開始約 0.2 秒後の第1波のひずみ値以外は、破砕に伴う破片が計測コードを直撃するなどの影響によるものと考えられるため、それらの測定値をキャンセルした測定結果を表-3に示す。

これより、測定されたひずみ値から求められる応力は、当該鉄筋(SD490)の降伏荷重(規格値 $490\sim 625\text{N/mm}^2$)を大きく下回り、残留ひずみもほとんど見られないため、破砕による有意な影響はないものと判断される。

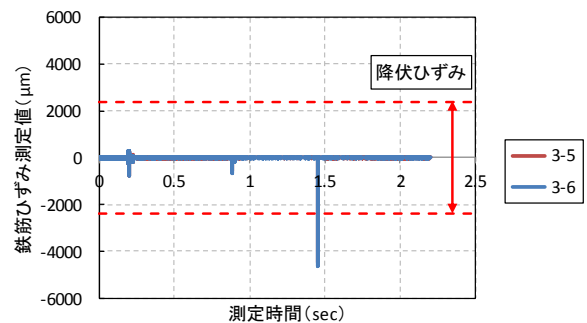


図-4 ひずみ測定結果
(測点3-5、3-6)

表－3 水平破砕時の試験体ひずみ測定値

計測箇所	水平破砕			
	最大値	応力 (N/mm ²)	最小値	応力 (N/mm ²)
3-5	296	61	-748	-153
3-6	303	62	-785	-161

4. 3 鉄筋ひずみ計測結果による検討

破砕実験時に計測された鉄筋ひずみは降伏ひずみまでは達せず、また残留ひずみがないことから、塑性変形に至らない、弾性域内での変形であると考えられる。

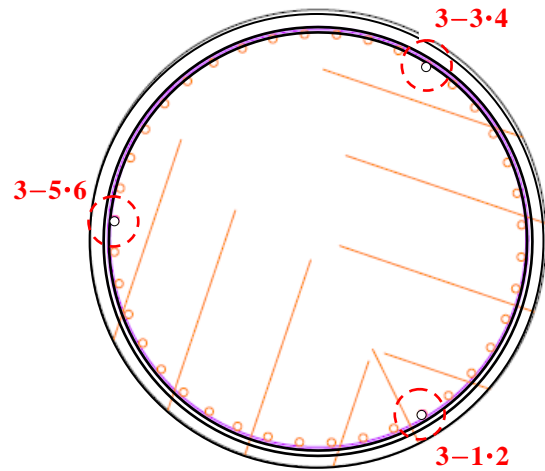
そこで、実際に強度上問題がないことを確認するため、破砕実験でひずみを計測した鉄筋を抜き取り、引張試験および伸び率試験を実施した。ただし、前述のように、鉄筋は、杭天端より 50mm 下の位置に鉄筋天端があり、通常であれば破砕による影響が直接及ぶ部分ではないと考えられるが、水平破砕時には実際にひずみが検出されたため、所要の試験により強度の確認を行うこととした。

4. 4 鉄筋引張試験および伸び率試験

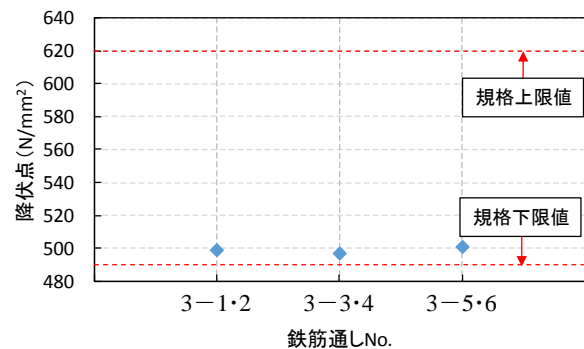
試験体より取り出した鉄筋位置を図－5に、鉄筋の引張試験結果および伸び率試験結果を表－4に示す。また、試験結果の中、降伏点の試験結果を図－6に、引張強さの試験結果を図－7に、鉄筋伸び率試験結果を図－8に示す。実験で使用した鉄筋：D41 (SD490) の各規格値を表－5に示す。

すべての鉄筋において、規格上の降伏点範囲、引張強さ範囲および伸び率範囲に収まっていた。また、破砕後の鉄筋については、未使用の鉄筋との比較までは行ってはいないが、規格値を満足していることを確認し、破砕による鉄筋への影響は軽微であることを確認した。

また、破砕実験時における同様の試験結果が他の文献にも報告されていた。⁴⁾



図－5 鉄筋抜き取り位置
(SD490・D41：深さ≥50mm)



図－6 降伏点試験結果(水平破砕後)
(SD490・D41：深さ≥50mm)

表－4 鉄筋引張試験結果および伸び率試験結果(水平破砕後)

通し No.*	材質	呼び径	降伏点荷重 (kN)	降伏点 (N/mm ²)	引張荷重 (kN)	引張強さ (N/mm ²)	伸び率 (%)
1	SD490	D41	668.4	499	901.2	673	22.5
2			665.6	497	892.8	666	21.4
3			672.0	501	900.8	672	21.8

* 図－5に示す鉄筋

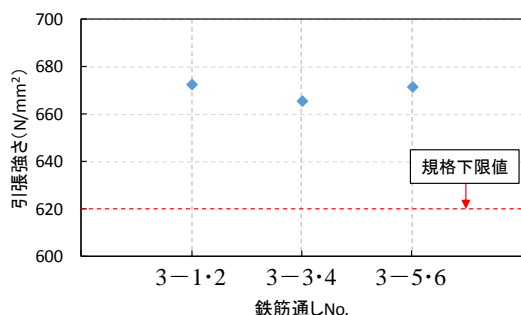


図-7 引張強さ試験結果(水平破砕後)
(SD490・D41:深さ \geq 50mm)

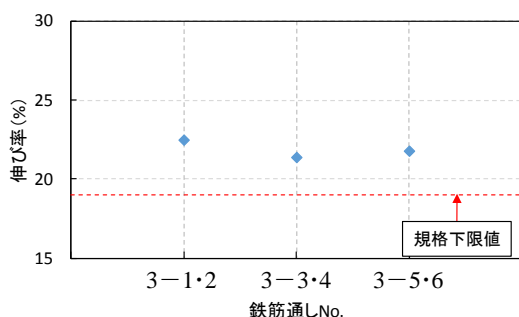


図-8 伸び率試験結果(水平破砕後)
(SD490・D41:深さ \geq 50mm)

表-5 鉄筋規格表

規格値 (N/mm ²)	材質名	降伏点	引張強さ	伸び率
	SD490	490~625	620 以上	19% 以上

5. まとめ

敷地端部ないし隅角部における杭頭処理工法について検討した結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 敷地端部ないし隅角部の条件下では、斜め 45° 装薬孔並列配置方式の装薬孔配置とすることにより、横孔放射状配置と同程度の装薬量にて、確実に水平破断できることが明らかになった。
- (2) 今回の検証実験の範囲では、斜め 45° 装薬孔並列配置方式における装薬量の適正值と横孔並列端部に設けた空孔の有効性については、何れも明確な評価には至らなかった。
- (3) 水平破砕時に、杭本体側の鉄筋にひずみが測定されたが、残留ひずみには至らず、破砕実験後の抜き取り鉄筋による引張試験では、いずれも規格内の試験値を得ることができた。

なお、図-2と図-3ないし図-5では、装薬孔長の設定がやや異なるが、水平破断されることによる鉄筋への影響については、有意差を及ぼすものではないと推察される。

今後の検討課題としては、敷地端部ないし隅角部における杭頭処理工法に斜め 45° 装薬孔並列配置方式を適用するにあたり、適正な装薬量を把握することと、横孔並列端部に設けた空孔の効果を確認することが挙げられる。

今回の装薬孔配置方式では、横孔の配置が杭径や山留との離隔距離等により、設定が異なるため、杭径と山留との離隔距離の組合せにより、横孔配置を標準化するなど、簡易化を図る必要がある。

最近の研究⁵⁾では、破砕現象に消費する装薬量は、杭水平断面積よりも杭余盛部の体積ないし質量に比例するとの見解もあることから、装薬量の適正化については、厳密に検討する必要があると考えられる。

【謝辞】

本稿に関連する破砕実験を実施するにあたり、熊本高等専門学校の松家武樹准教授には、同実験の計画段階と実施段階において的確な御助言をいただき、関係者一同、深謝いたします。

カヤク・ジャパン(株)の中村聡磯氏と(株)相模工業の長野正幸氏には、計画段階からひとかたならず、また実施段階では材工ともに多大なる御協力、御尽力をいただき、関係者一同、深謝いたします。

また、熊本高等専門学校の中村裕一名誉教授には、今回を含め、長年にわたり、懇切に、的確な御指導をいただき、関係者一同、深く謝意を表します。

【参考文献】

- 1) 竹内博幸ほか: 横孔方式による動的破砕を適用した杭頭処理工法に関する実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.1647-1652, 2016.7.
- 2) 竹内博幸ほか: 横孔方式による動的破砕を適用した杭頭処理工法の実用化, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.1375-1380, 2017.7.
- 3) 竹内博幸ほか: 動的破砕を適用した迅速スラブ解体工法に関する実験, (一社)火薬学会 2016 年度秋季研究発表講演会 講演要旨集, pp.119-112, 2016.11.
- 4) 柳田ほか: 騒音・振動の発生を軽減する瞬間破砕型杭頭処理工法の開発と適用, コンクリート工学会テクニカルレポート, vol.53, No.11, 2015.11.
- 5) 長野正幸ほか: 動的破砕による杭頭処理工法一施工例一, (一社)火薬学会 2019 年度春季研究発表講演会 講演要旨集, pp.68-71, 2019.5.