

論文 横孔方式による動的破碎を適用した杭頭処理工法の実用化

竹内 博幸^{*1}・中村 裕一^{*2}・高橋 祐一^{*3}

要旨：場所打ち杭の杭頭処理や鉄筋コンクリート構造物の解体など、建設現場で騒音・振動を伴う工事においては、高精度で効率的な破碎制御技術の確立が望まれて久しい。筆者らは、非火薬の破碎剤を用いて場所打ち杭の余盛り部分を予定破断面で分離させる動的破碎による杭頭処理工法の開発を数年来進めているが、一昨年度より、他工事の影響を受けることのない後施工方式を採用し、横孔を予定破断面に放射状に削りし装薬孔とする最適かつ合理的な装薬方法に到達することができた。本報では、その装薬方法を抽出するまでの経緯とその適合性および合理性を検証した結果について論述する。

キーワード：非火薬、動的破碎、杭頭処理、横孔方式、後施工、込め物長率

1. はじめに

筆者らは、非火薬の破碎剤を用いて場所打ち杭の余盛り部分を予定破断面で分離させる動的破碎による杭頭処理工法の開発を数年来進めているが、当初は、杭鉄筋組立て時に破碎剤の装薬準備を施す前施工による装薬方法を採用していた^{1), 2)}。前施工による装薬の場合、土工事や杭工事の影響を多分に受けるため、後施工の横孔方式による動的破碎・杭頭処理を採用し、その最適化を目指して種々の検討を試みた。その結果、動的破碎の有効性を安定的に保証できる手法に到達することができた。本報では、その経緯と効果の検証結果について論述する。

2. 前施工・豎管方式による杭頭処理工法

初期の頃は、豎管底部に平板2枚重ねの水平フィンが設けられている装薬ホルダー（図-1）を杭鉄筋組立て時に取り付け、杭工事終了後、杭頭部が表出した時点で、同ホルダーに非火薬の破碎剤を装薬し、遠隔操作にて杭頭余盛り部を水平破断する方式を採用していた。本方式

は、破碎剤によるガス圧が水平フィンを通じて水平方向に噴出し、予定破断面にて余盛り部を水平破断する工法である。実験段階では、写真-1に示すように、ほぼ水平に破断面が形成され、余盛り部の杭主筋を付着切りすることにより、切断された余盛り部をそのまま揚重することが可能であった（写真-2）。

しかしながら、実際の工事においては、杭頭付近の掘削作業時に、杭主筋やあらかじめ取り付けられた装薬ホルダーが重機により損傷することが多いため、余盛り部を水平破断できたとしても、杭主筋と競るなどし、揚重できない場合が少なからずあった³⁾。



写真-1 破断面の状態

写真-2 余盛り部の揚重

3. 後施工・横孔方式による杭頭処理工法

3.1 工法の概要

本工法においては、杭施工や掘削工事による影響を避けるため、杭頭が表出した以降に関連作業を行う後施工方式とし、破碎剤の装薬は、トンネルの発破でよく適用される横孔方式とした。横孔の数や配置については、破碎効率均等となるよう、放射状の均等配置を基本としたところ、6本で安定した破碎効果が得られたが、4本では破断面が一方に食い込むなど、やや不安定な破碎結果であった⁴⁾。また、破碎剤の装薬量は、これまでの杭頭破碎実験の実績から杭断面積あたり 256g / m² を標準とし、各孔のピニル管に等分配した。装薬したピニル管を

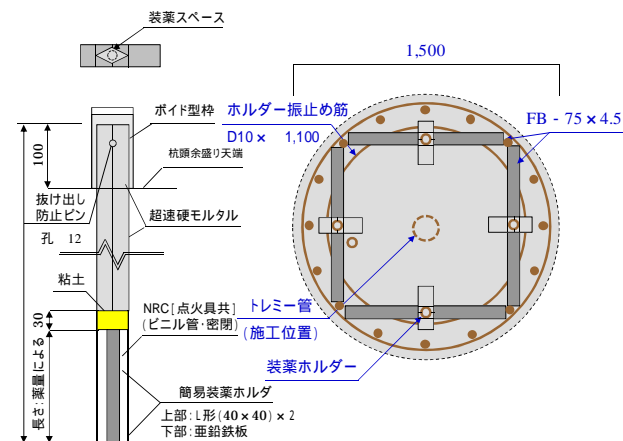


図-1 装薬ホルダー：水平フィン付

*1 五洋建設 技術研究所 建築技術開発部長 (正会員)

*2 熊本高等専門学校 名誉教授 工博

*3 五洋建設 技術研究所 建築技術開発部 課長 博士(工学)(正会員)

挿入した空隙には、砂材を詰めて所要数タンピングを行うが、これまでの破碎結果から、装薬孔長に対する込め物長の比率（以下、「込め物長率」とする。）により、破碎効果が大きく影響を受けていることが分かった^{4),5)}。点火用の配線は、前施工方式と同様で、脚線を直列に配線し、発破母線を介して発破器に接続する。杭頭を模擬した試験体の平面と断面の1例を図-2に示す。

実際の現場では、杭頭破碎後に破砕片を揚重する際に、杭主筋が傾いたり、曲がったりしていることもあり、実験時のように、円滑に抜けないことが大半であったため、杭主筋の養生も鉄筋カバーのみでなく、もう1巻き紙製ポイド材を取り付けた。また、水平方向にどのように分割しても破砕片を揚重できるよう吊り元アンカーを各装薬孔間の外周中央付近に4箇所取り付けた。

3.2 工法の比較

前施工・豎管方式（以降、前豎方式）は、装薬に関する機器材の取付けを杭鉄筋施工時に行うが、後施工・横孔方式（以降、後横方式）は、鉄筋養生と吊り筋以外は、杭頭が表出してから行う。また、前者は、破碎剤の装薬に破碎力を制御するためにホルダーを用いるが、後者は、横孔にビニル管に破碎剤と点火具を密閉したものを直接挿入する。加えて、前者は、装薬孔の外部側をモルタルなどの硬化体で拘束する必要があるが、後者は、砂など込め物を詰めてタンピングを施すだけで足りる。

4. 後施工・横孔方式による杭頭処理工法の動的破碎実験

4.1 実験方法

各試験体における実験因子を表-1に示す。なお、表中の「込め物長率」は、上側が計画値、下側が実測値を示す。

各試験体は、破碎後、余盛り部と杭本体部の各体から同じ平面位置3箇所よりコアを採取し、同材齢のコンクリート強度を比較し、破碎による影響の有無を確認する。

4.2 試験体

各試験体の形状・寸法、装薬孔の形状・配置および破碎剤の装薬状態を図-2～図-4に示す。

いずれも試験体1と同様に、杭頭レベルと平行な22の横孔を装薬孔とする。装薬量は、試験体2のみを90%、その他の試験体は標準量100%とし、ビニル管径の違いやビニル管へ破碎剤の詰め具合（充填密度）により、装薬長および込め物長を変化させ、両者の最適値について検証する。

各試験体の吊り元は、余盛り部分の高さ中央4箇所に埋込みアンカーを取り付ける。

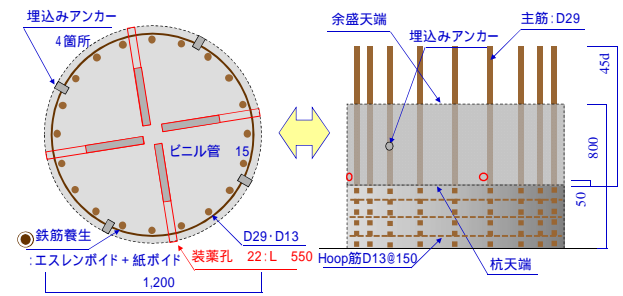


図-2 杭頭部模擬試験体：試験体1

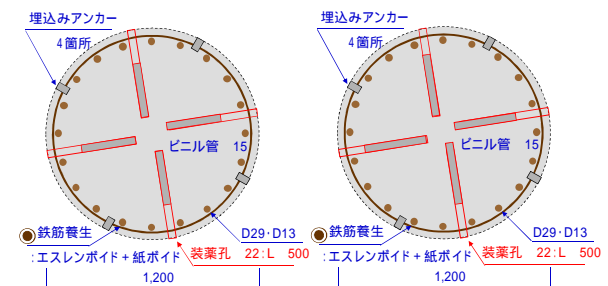


図-3 杭頭部模擬試験体：試験体2，試験体3

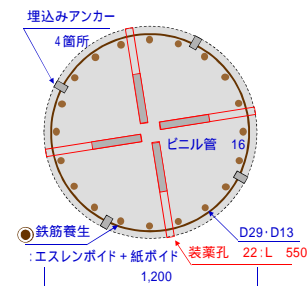


図-4 杭頭部模擬試験体：試験体4

表-1 各試験体における実験因子

試験体 No.	直径(mm)	装薬孔(横孔)				装薬量(1孔分)		込め物長率
		断面形状	数量	長さ(mm)	摘要	薬量	算定	
1	1,200	22	4	550 [554]	放射状・ビニル管 15	73g	256×1.13 / 4	41.8% [41.7%]
2	1,200	22	4	500 [504]	放射状・ビニル管 15	66g	256×1.13 / 4×0.9	42.0% [42.5%]
3	1,200	22	4	500 [502]	放射状・ビニル管 15	73g	256×1.13 / 4	30.0% [29.5%]
4	1,200	22	4	550 [556]	放射状・ビニル管 16	73g	256×1.13 / 4	50.0% [50.5%]

注][]内の数値は実測値を示す。

4.3 破碎方法

先にビニル管（15）の底部に点火具を固定し、ビニルテープで端部を密閉する。もう一方の端部から所定量破碎剤を詰め、上端もビニルテープで密閉する。

ビニル管に密閉した破碎剤、点火具を削孔した横孔の最奥部に挿入し、脚線を外部に出した後、破碎剤の外側に砂（込め物）を充填し、外側から突き固める。これを繰り返し、外周面まで砂を充填する（写真-5、写真-6）。破碎時の飛散・飛来防止のため、防爆シート2枚を当該杭頭に巻き付け養生した（写真-7）。

各装薬孔から延伸した脚線を直列に結線し、発破母線を介して発破器に接続する。

破碎時の騒音測定は、騒音計を当該杭頭から5m程度離れた位置に設置し、dB(A)特性、Fast指示にて行った。同じ位置にビデオカメラを設置し、破碎状況を撮影した。

4.4 試験体1の破碎実験経過および結果

1回目の破碎対象は、最も安定した破断面が期待できる試験体1とし、その破碎形状により、以降の破碎順序を検討することとした。したがって、最初の装薬量は、標準量： $290\text{g} (256\text{g} \times 0.6 \times 0.6 \times \pi) \quad 73\text{g} \times 4$ とした。装薬したビニル管の長さは、実測平均で323mmであり、装薬孔長554mm（実測平均）から実測込め物長率は41.7%となる（写真-3）。

破碎は、余盛り部の浮き上がりがほぼ余盛り高さ以内であったことから、この時点では標準装薬量（ $256\text{g}/\text{m}^2$ ）が適切と判断された。破碎後は、防爆材の外側に飛散・飛来がないことを確認し、防爆シートを取り外した。

試験体1は、写真-8～写真-10に示されているように、ほぼ想定した水平位置（ $H=550\text{mm}$ ）で破断面が形成されていた。破断面の形成を確認後に、あらかじめ仕込まれた吊りアンカーにて余盛り部分の揚重を試みた（写真-9）。余盛り部分はスムーズに杭主筋を抜けて容易に持ち上がり、移動できた。

試験体1の余盛り部を揚重し、切り離した状態の杭本体側の破断面を写真-10に示す。

なお、破碎時の最大騒音レベルは126.1dB(A)であった。



写真-3 動的破碎剤
+ 点火具（試験体1）



写真-4 試験体1
（破碎前の状態）



写真-5 タンピング
（試験体1）



写真-6 装薬・充填
完了（試験体1）



写真-7 防爆養生
（試験体1）



写真-8 破碎直後の
状態（試験体1）



写真-9 杭余盛り部の
揚重（試験体1）



写真-10 破断面の状態
（試験体1）

4.5 試験体2の破碎実験経過および結果

2回目の破碎対象の試験体2は、装薬孔長による影響を確認するため、装薬孔長を500mmとし、破碎剤量を標準の90%として、込め物長率を試験体1とほぼ同一とした場合の破碎状況について検証した。2回目の装薬量は、標準量の90%： $261\text{g} (256\text{g} \times 0.6 \times 0.6 \times \pi \times 90\%) \quad 66\text{g} \times 4$ とした。

装薬したビニル管15の長さは、実測平均で290mmであり、装薬孔長504mm（実測平均）から実測込め物長率は42.5%となる。

試験体2の破碎は、試験体1に比較して、破碎音や飛散規模がやや小さく感じられたが、装薬孔が短く、破碎剤も試験体1よりやや外周側に位置していたこともあり、上方よりも外側に向けて破碎力が作用したように見えた。余盛り部の浮き上がりは鉛直方向であったが、試験体1よりもはるかに小さく、装薬量はやや不足気味と判断された。また、破碎力が試験体全体に有効に作用するには、装薬孔長が不足していた可能性も考えられる。

試験体2は、試験体1に比較して、破断面に凹凸が目立ち、杭本体側に食い込んでいる箇所も一部見られた。

破断面の形成状態を確認した後に、あらかじめ仕込まれた吊りアンカーにて余盛り部分の揚重を試みたところ、余盛り部分はスムーズに杭主筋を抜けて持ち上がり、容易に移動できた（写真 - 15 および写真 - 16）。

試験体 2 の余盛り部を揚重し、切り離した状態の杭本体側の破断面を写真 - 16 に示す。

なお、破砕時の最大騒音レベルは 124.0dB(A)であった。



写真 - 11 動的破砕剤
+ 点火具 (試験体 2)

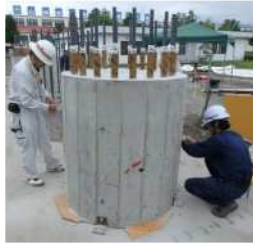


写真 - 12 試験体 2
(破砕前の状態)



写真 - 13 タンピング
(試験体 2)



写真 - 14 破砕直後の
状態 (試験体 2)



写真 - 15 杭余盛り部の
揚重 (試験体 2)



写真 - 16 破断面の状態
(試験体 2)

4.6 試験体 3 の破砕実験経過および結果

試験体 3 は、装薬孔を短い 500mm とし、詰め物長率を試験体 1、試験体 2 より小さい 30.0%とした場合の破砕状況について検証した。

試験体 3 の装薬量は、試験体 1 と同様に標準量：290g ($256\text{g} \times 0.6 \times 0.6 \times \pi$) $73\text{g} \times 4$ とした。

装薬したビニル管 15 の長さは実測平均で 354 mm であり、装薬孔長が 502mm (実測平均)であったことから、実測詰め物長率は 29.5%となった (写真 - 17)。

破砕は、試験体 1 に比較して、破砕音や飛散規模がやや大きく、装薬孔が短く、破砕剤も試験体 1 よりやや外周側に位置していたこともあり、試験体 1 に比較して、

外側に向けて破砕力が作用したように見えた。余盛り部の浮き上がりは鉛直方向であったが、1 回目よりもやや大きく、装薬量としてはやや過剰気味と判断された。また、破砕力が試験体全体に有効に作用するには、装薬孔長が不足し、その結果、破砕剤の装薬位置がやや外側に偏っていた可能性も考えられる。

試験体 3 は、試験体 1 に比較して、破断面に凹凸が目立ち、杭本体部、余盛り部の側面が剥落している箇所も一部見られた。破断面の形成状態を確認した後に、あらかじめ仕込まれた吊りアンカーにて余盛り部分の揚重を試みたところ、余盛り部分はスムーズに杭主筋を抜けて持ち上がり、容易に移動できた (写真 - 21)。

試験体 3 の余盛り部を揚重し、切り離した状態の杭本体側の破断面を写真 - 22 に示す。

なお、破砕時の最大騒音レベルは 128.1dB(A)であった。



写真 - 17 動的破砕剤
+ 点火具 (試験体 3)



写真 - 18 試験体 3
(破砕前の状態)



写真 - 19 タンピング
(試験体 3)



写真 - 20 破砕直後の
状態 (試験体 3)



写真 - 21 杭余盛り部の
揚重 (試験体 3)



写真 - 22 破断面の状態
(試験体 3)

4.7 試験体 4 の破砕実験経過および結果

試験体 4 は、破砕剤と点火具を挿入するビニル管の径を若干大きくし、詰め物長率を 1 回目よりも大きい 50%とした場合の破砕状況について検証した。

試験体 4 の装薬量も 標準量：290g ($256\text{g} \times 0.6 \times 0.6 \times \pi$) $73\text{g} \times 4$ とした。

装薬は、標準量の破砕剤と点火具を 16 のビニル管に密閉した。装薬したビニル管の長さは実測平均で 275mm であり、装薬孔長を 552mm (実測平均) としたことから実測込め物長率は 50.5% となった (写真 - 23)。

破砕は、試験体 1 に比較して破砕規模、破砕音は同程度であったが、込め物長が長く、破砕剤も試験体 1 よりやや内側に位置していたこともあり、試験体 2、試験体 3 に比較して、内側に向けて破砕力が作用したように見えた。余盛り部の浮き上がりは、鉛直方向であり、試験体 1 とほぼ同程度であった。また、破砕力が試験体全体に有効に作用するには、破砕剤の装薬位置が試験体の内側にやや偏っていた可能性も考えられる。

試験体 4 は、試験体 1 に比較して、破断面にやや凹凸が目立ち、杭本体部の側面が欠損している箇所も一部見られた。破断面の形成状態を確認した後に、あらかじめ仕込まれた吊りアンカーにて余盛り部分の揚重を試みたところ、余盛断面の形成状態を確認後に、あらかじめ仕込まれた吊り部分はスムーズに杭主筋を抜けて持ち上がり、容易に移動できた (写真 - 27)。

試験体 4 の余盛り部を揚重し、切り離した状態の杭本体側の破断面を写真 - 27 に、また余盛り部分の破断面を写真 - 28 に示す。

なお、破砕時の最大騒音レベルは 125.3dB(A) であった。



写真 - 23 動的破砕剤 + 点火具 (試験体 4)



写真 - 24 試験体 4 (破砕前の状態)



写真 - 25 タンピング (試験体 4)



写真 - 26 破砕直後の状態 (試験体 4)



写真 - 27 破断面の状態 (試験体 4)



写真 - 28 杭余盛り部の揚重 (試験体 4)

4.8 破砕前後のコア圧縮強度試験結果

破砕前後、即ち破断された余盛り部と杭本体のコア供試体圧縮強度 (材齢 30 日) の試験結果を表 - 2 に示す。なお、試験体には、呼び強度 30N/mm^2 、スランプ 21 cm、空気量 4.5% のコンクリートを用いた。余盛り部と杭本体のコア平面位置は同一とし (図 - 5 参照)、同材齢でのコア圧縮強度とし、破砕による影響以外の要因を抽出しないようにした。また、その判定を分散分析により行い、統計学的に有意差の有無により判定することとした。各試験体における有意差検定結果を表 - 3 に示す。

その結果、いずれの試験体においても、余盛り部と杭本体間における同一平面位置、同一材齢のコア圧縮強度に有意差は見られないことから、破砕による杭本体コンクリートへの有意な影響はないことが明らかになった。

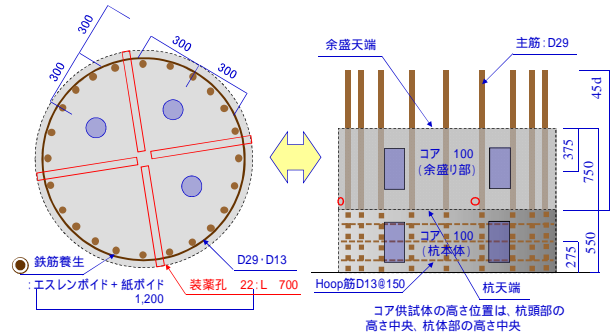


図 - 5 コア供試体採取位置 (例)

表 - 2 破砕前後の圧縮強度

試験体	部位	コア圧縮強度 (N/mm ²)		
1	余盛り	36.78	38.75	38.45
	杭本体	38.08	37.81	38.11
2	余盛り	34.09	37.37	34.38
	杭本体	38.37	38.10	36.55
3	余盛り	38.51	38.35	38.45
	杭本体	39.22	37.81	38.75
4	余盛り	36.81	37.21	32.98
	杭本体	38.56	39.30	37.04

各試験体の余盛り部と杭本体のコア平面位置は同一

5. まとめ

後施工の横孔方式による動的破砕工法を杭頭処理に適用した場合、これまでの実験結果から「込め物長率」 (= 込め物長 / 装薬孔長) と破砕効果に何らかの関係性があることが示唆されていた。今回は、「込め物長率」と「装薬孔長」を変化させて破砕実験を行い、最適な装薬条件を見出すべく、検討を進めたところ、以下の実験結果が得られた。

表 - 3 分散分析による有意差検定

試験体	項目	自由度	不偏分散	分散比 Dp	F 分布	検定	結果
1	級間	1	0.00007	0.00012	0.05: 7.7086	Dp < F ₀₅	有意差なし
	級内	4	0.577		0.01:21.198	-	-
2	級間	1	8.592	4.0322	0.05: 7.7086	Dp < F ₀₅	有意差なし
	級内	4	2.131		0.01:21.198	-	-
3	級間	1	0.322	2.0366	0.05: 7.7086	Dp < F ₀₅	有意差なし
	級内	4	0.158		0.01:21.198	-	-
4	級間	1	10.402	3.0678	0.05: 7.7086	Dp < F ₀₅	有意差なし
	級内	4	3.391		0.01:21.198	-	-

- (1) 実測込め物長率が 41.7%の試験体 1 における破砕は、余盛り部の浮き上がりはほぼ余盛り高さ以内であったことから、標準装薬量 (256g / m²) が適切と判断された。また、破断面もほぼ想定通りに形成され、同率がほぼ最適値の範囲内であることが確認された。
- (2) 実測込め物長率が 42.5%の試験体 2 における破砕は、試験体 1 に比較してやや破砕規模が小さいが、装薬孔長が短く、破砕剤も試験体 1 よりやや外周側に位置していたことなどが影響していると考えられ、装薬量はやや不足気味と判断された。また、破断面に凹凸が目立ち、杭本体側に食い込んでいる箇所も一部見られた。
- (3) 実測込め物長率が 29.5%の試験体 3 の破砕は、試験体 1 に比較して破砕規模、破砕音がやや大きく、装薬孔長が短く、破砕剤も試験体 1 よりやや外周側に位置していたことなどが影響していると考えられ、装薬量はやや過剰気味と判断された。また、破断面に凹凸が目立ち、側面が剥落している箇所も一部見られた。
- (4) 実測込め物長率が 50.5%の試験体 4 の破砕は、試験体 1 に比較して破砕規模、破砕音は同程度であったが、破砕力がやや内側向きに作用したように見えた。これは、込め物長がやや長いこと、破砕剤も試験体 1 よりやや内側に位置していたことなどが影響していると考えられる。また、破断面にやや凹凸が目立ち、杭本体部の側面が欠損している箇所も一部見られた。

6. 結論

後施工・横孔方式による杭頭処理工法について、込め物率を変化させた 4 試験体を対象として破砕実験を行ったところ、以下の事項が明らかになった。

- (1) 同一平面位置から採取された余盛り部と、杭本体のコア圧縮強度を比較するために、同材齢での圧縮強度試験を行い、破砕による影響以外の要因を除外するとともに、その判定を分散分析により行い、統計的に

有意差の有無により判定した。その結果、いずれの試験体においても、余盛り部と杭本体間における同一平面位置、同一材齢のコア圧縮強度に有意差は見られないことから、破砕による杭本体コンクリートへの有意な影響はないことが明らかになった。

- (2) 今回の破砕実験の結果、込め物長率は、火薬の場合と同様に、40%近傍の場合、破砕効果が効率的に発現することが明らかになった。また、杭適用の場合、装薬孔長も杭半径の 90%程度以上とした方が、破砕効果が杭平断面全体に効率的に発現することが明らかになった。

謝辞

本実験を実施するにあたり、材工ともに多大なる御協力をいただいたカヤク・ジャパンの中村聡磯氏、相模工業の長野正幸氏に深い謝意を表します。

参考文献

- 1) 竹内博幸, 中村裕一, 高橋祐一: 動的破砕による杭頭処理工法の開発, 日本コンクリート工学年次論文集, Vol.35, pp.1339-1344, 2013,7
- 2) 竹内博幸, 高橋祐一: 動的破砕による杭頭処理工法の開発, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道), pp.235-236, 2013.8
- 3) 竹内博幸, 中村裕一, 高橋祐一: 動的破砕による杭頭処理工法の実用化, 日本コンクリート工学年次論文集 Vol.37, No.1, pp.1255-1260, 2015.7
- 4) 竹内博幸, 中村裕一, 高橋祐一: 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, 日本コンクリート工学年次論文集 Vol.38, No.1, pp.1647-1652, 2016.7
- 5) 日本火薬工業会資料編集部: 火薬学 [第 2 版], pp.222-228, 2014.9