

報告 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と余盛り部分の小割方法に関する実験

竹内 博幸^{*1}・松家 武樹^{*2}・高橋 祐一^{*1}

要旨：動的破碎による杭頭処理において、筆者らはこれまでに、口径 1,200mm の杭頭に対し、水平方向の装薬孔を放射状に 4 本として、単位断面積あたりの標準装薬量 256g/m²とした場合、込め物長率（込め物長 / 装薬孔長 × 100%）が 40%前後で安定的に破碎できることを明らかにしている。そこで本報告では、さらなる装薬条件の最適化と水平破断された余盛り部分を小割する方法について検討した。その結果、装薬孔長率、込め物長率、装薬孔数および装薬量を指標とすることにより、杭径 1,200mm から 1,500mm のコンクリート杭頭の水平破断が可能であること、および余盛り部分の小割は、十分可能であることが明らかになった。

キーワード：動的破碎、杭頭処理、込め物長率、装薬条件の最適化、余盛り部分の小割

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、縦管底に平鋼 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、上部から破碎剤を挿入して、遠隔操作で破碎する方法としていたが、装薬用の関連機器の取付けが前施工になるなど、支障が多いため、一昨年来、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。前回の破碎実験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、安定した破碎状態が得られることが分かった。

そこで、今回は、装薬条件の最適化を目的として、まず、杭径が 1,200mm から 1,500mm に増大した場合の装薬条件を確認し、さらに、標準装薬量 256g/m²を低減した場合の破碎状態を確認した。なお、標準装薬量とは、破碎剤の破碎効果は、破碎剤量によるが、これは、破碎断面積に比例することが、過去の破碎実験^{例えば 3)}で把握されている。今回使用している非火薬の破碎剤は、杭頭

水平断面積あたり 256g/m²が標準量とされている。

2. 実験方法

2.1 装薬条件の最適化

(1) 使用材料

本実験で使用した材料を表 - 1 に示す。

本実験では、杭試験体に、普通ポルトランドセメントを用いた呼び強度の強度値 30N/mm² のコンクリートを使用した。なお、破碎実験時における封緘養生強度（試験体と同一環境に置かれた供試体強度）は、34.8N/mm²であった。また、使用した破碎剤は、国内製品であり、やはり金属の還元反応を利用したものである。また、点火具も同メーカー製の発破器点火による製品を用いた。

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

表 - 2 各試験体における装薬条件

試験体		装薬孔(横孔)				装薬量(1孔分)		込め物長率 ¹⁾ (%)	装薬孔長率 ²⁾ (%)	
No.	直径 (mm)	断面 (mm)	数量	深さ (mm)	摘要	薬量 (g)	算定			
1	1,500	22	4	675	放射状・ビニル管	18	113	256 × 1.77 / 4	40	90
2	1,200	22	4	540	放射状・ビニル管	15	65	256 × 0.9 × 1.13 / 4	40	90

注] 1) 込め物長率 (%) = 込め物長 / 装薬孔長 × 100%

2) 装薬孔長率 (%) = 装薬孔長 / 杭半径 × 100%

*1 五洋建設(株)技術研究所(正会員)

*2 熊本高専 建築社会デザイン工学科 准教授 博士(工学)(正会員)

*3 五洋建設(株)技術研究所 博士(工学)(正会員)

(2) 装薬条件

各試験体における装薬条件を表 - 2 に示す。

試験体 1 については、杭径を 1,500mm、装薬孔長率（装薬孔長 / 杭半径 × 100%）を 90%、込め物長率を 40%、装薬量を 256g/m² とし、装薬孔数を 4 本とした。

試験体 2 については、当初の計画段階では、装薬孔を 3 本としていたが、試験体 1 の実験後、再度検討し、装薬孔を 4 本、装薬孔長率を 90%、込め物長率は 40% とし、装薬量は標準的な使用量に対して 90% とした。これは、前回および今回における試験体 1 の破砕形状を確認し、杭径 1,200mm に対しては、装薬孔数は 4 本が下限であると判断したためである。

(3) 試験体

各試験体の形状・寸法と装薬孔の形状・配置を図 - 1、に示す。いずれの試験体も杭頭レベルと平行で放射状に配置された横孔を装薬孔とした。

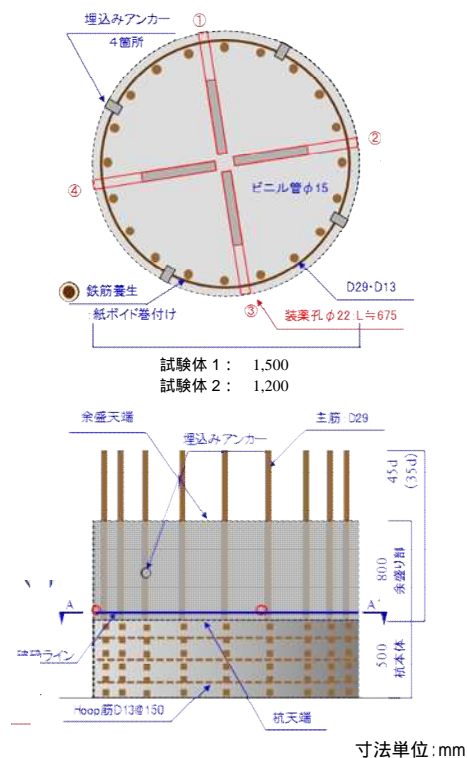


図 - 1 試験体 1, 試験体 2

(4) 破砕方法

破砕方法を 1) ~ 5) に示す。また、装薬の状況を写真 - 1 ~ 写真 - 10 に示す。

1) 装薬容器（ピニル管）作製

- ・所定の薬量を計測する。（写真 - 1）
- ・ピニル管の底部に点火具を固定し、ピニルテープで端部を密閉する。（写真 - 2）
- ・もう一方の端部から所定量の破砕剤を詰め、他端もピニルテープで密閉する。（写真 - 3）

2) 装薬

- ・試験体をドリルで削孔する。（写真 - 5, 写真 - 6）
- ・削孔した横孔の最奥部に 1) で作製した装薬容器を挿入する。（写真 - 7）
- ・脚線を外部に出した後、装薬容器の外側に砂（込め物）を充填し、外部から突き固める。これを繰り返し、外周面まで砂を充填させる。（写真 - 8, 写真 - 9）

3) 防爆養生

- ・破砕時における飛散・飛来防止のため、防爆シートを 2 重にして試験体に巻き付ける。（写真 - 10）

4) 結線

- ・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。

5) 破砕

- ・作業員を安全な場所に避難誘導し、安全を確認した後、破砕を行う。
- ・破砕後は、防爆シートの外側に飛散・飛来がないことを確認し、防爆シートを取り外す。

(5) 騒音および振動測定

破砕時の騒音および振動測定は、騒音計および振動計を試験体から 5m 程度離れた位置に設置し、騒音計は dB(A) 特性, Fast (速い動特性: 125ms) 指示にて測定を行った。同様にビデオカメラを設置し、破砕状況を撮影した。



写真 - 1 破砕剤：計量

写真 - 2 ピニル管に
点火具挿入



写真 - 3 破砕剤 + 点火具

写真 - 4 装薬容器長：測定



写真 - 5 装薬孔削孔

写真 - 6 装薬孔長：測定



写真 - 7 装薬容器挿入



写真 - 8 込め物(砂)タンピング



写真 - 9 込め物(砂)完了



写真 - 10 防爆養生

2.2 余盛り部の小割

(1) 装薬条件

各試験体における装薬条件を表 - 3 に示す。実験は、

表 - 3 余盛り部破碎条件

試験体		装薬孔(縦孔)			装薬量(1孔分)		備考	
No.	直径(mm)	断面(mm)	数量	長さ(mm)	摘要	薬量		算定
1'	1,500	22	5	600	ビニル管 16 (点火具 + 破碎剤)	75g	$190 \times 1.2 / 3$	1 回目
2'	1,200	22	5	600	ビニル管 15 (点火具 + 破碎剤)	54g	$170 \times 0.96 / 3$	2 回目

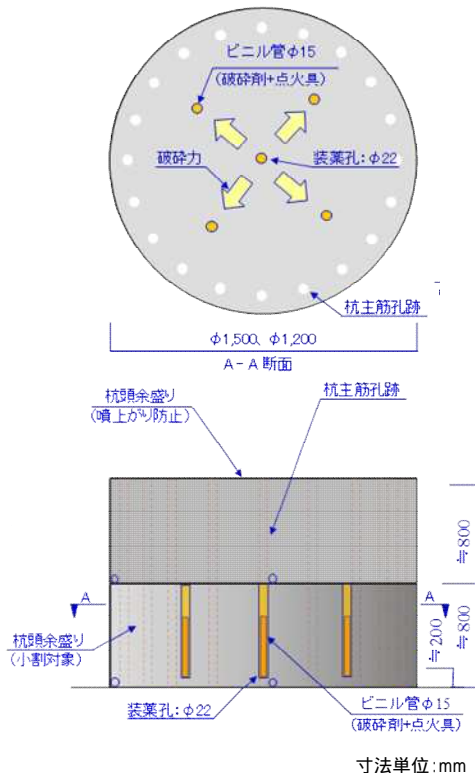


図 - 2 試験体 1', 試験体 2'

試験体 1 の余盛り部 (以下、試験体 1') および試験体 2 の余盛り部 (以下、試験体 2') について行った。

装薬量は、他の文献⁴⁾に記載されている同じ破碎剤の使用量を参考とし、事前の確認実験により、試験体 1' は $190\text{g}/\text{m}^2$ 、試験体 2' は $170\text{g}/\text{m}^2$ とした。なお、この場合の破碎面は、鉛直方向が対象となる。装薬孔 1 本の装薬量は、鉛直断面積を基準とし余盛り部分を十字に切断すると仮定して、1 鉛直断面に対し装薬孔を 3 孔削孔するため (中央の装薬孔は 2 断面に重複する)、杭径 $1,500\text{mm}$ の場合、 $190\text{g} \times 0.8\text{m} \times 1.5\text{m} / 3 = 75\text{g}/\text{孔}$ (装薬量 \times 余盛り高さ \times 直径 / 孔数)、同様に、杭径 $1,200\text{mm}$ の場合、 $170\text{g} \times 0.8\text{m} \times 1.2\text{m} / 3 = 54\text{g}/\text{孔}$ として設定した。

(2) 試験体への装薬

図 - 2 に試験体の概要を示す。杭頭余盛り部に 22mm のコア縦孔を 5 本削孔し、そこに、あらかじめビニル管に動的破碎剤と点火具を密閉したものを挿入した。ビニル管を挿入後、その上に粘土を詰めた後、込め物 (砂) をタンピングしながら上方を塞いだ。

(3) 破碎方法

破碎方法は、2.1(4)とほぼ同様である。ただし、3) 防爆養生については、破碎時の飛散・飛来・吹き上がり防止のため、水平破断後の他の試験体を上に載せて、その上から防爆シートを被せて実験を行った。破碎手順を写真 - 11 ~ 写真 - 18 に示す。



写真 - 11 破碎剤+点火具



写真 - 12 破碎器材長



写真 - 13 装薬孔削孔



写真 - 14 装薬孔長: 測定



写真 - 15 装薬孔削孔完了



写真 - 16 詰め物（砂）
タンピング



写真 - 17 吹き上がり防止



写真 - 18 防爆養生

3. 実験結果

3.1 装薬条件の最適化

(1) 試験体 1

試験体 1 の破砕状況を写真 - 19 および写真 - 20 に示す。装薬したビニル管 18mm の長さは平均 405mm、装薬孔長は平均 682mm であり、したがって、装薬孔長率は 90.9%、詰め物長率は 40.6% となり、概ね計画通りに装薬することができた。

破砕後の破断面の出来形は、概ね平滑であった。やや杭本体側に破損が見られたが、1,500mm の杭においても、装薬孔長率約 90%、詰め物長率約 40% の条件で、十分に破砕できることを確認した。



写真 - 19 破砕後揚重



写真 - 20 杭頭破断面

(2) 試験体 2

試験体 2 の破砕状況を写真 - 21 および写真 - 22 に示す。装薬したビニル管 15 の長さは平均 325mm、装薬孔長は平均 538mm であり、したがって、装薬孔長率は 89.7%、詰め物長率は 39.6% となり、概ね計画通りに装薬することができた。

破砕後の破断面の出来形は、概ね平滑であったが、杭本体側に一部き裂が発生した。き裂は、床版と杭頭を固定しているアンカー部分より集中的に発生していたが、実際の杭体では、破砕時における鉛直方向への発生応力は、ほぼ均等分布と考えられ、今回のアンカー部分のように応力が集中することはなく、このようなき裂は発生

しないものと推察される。



写真 - 21 破砕後揚重



写真 - 22 杭頭破断面

(3) 試験体 1、試験体 2 の試験結果の比較

過年度の実験¹⁾において、杭径 1,500mm の試験体で、装薬孔長率を 93%、詰め物長率を 42.9%、装薬量を 256g/m² として、今回の実験と概ね同一の条件で実験を実施しており、今回の実験と同様に、破砕時の衝撃で余盛り部の一部が欠損する程度で、ほぼ平滑に破断した。したがって、これまでの実験結果を踏まえると、杭径 1,500mm における装薬条件は、杭径 1,200mm と同一の条件でよいと考えられる。

杭径 1,200mm に対しては、装薬孔を 3 本に減らした実験（図 - 3：試験体 3）を行ったが、杭本体が大きく破損し、水平に破断することができなかった（写真 - 23、写真 - 24）。したがって、杭径 1,200mm における、装薬孔数の下限は 4 本と考えられる。

一方、杭径 1,200mm に対しては、前回の実験²⁾と装薬孔長率および詰め物長率を同一の条件とし、装薬量を 256g/m² の 90% とした実験を行った。その結果、一部杭本体に損傷がみられたものの、杭径 1,200mm に対しては、前回の実験で確認した装薬孔数を 4 本、装薬孔長率を 90% 前後、詰め物長率を 40% 前後、装薬量を標準 256g/m² とした装薬条件が適していると考えられる。

ただし、過年度に実施した装薬孔数 6 本の実験結果¹⁾などを含めて考慮すると、今回の装薬孔数 4 本が安定的な破砕の下限値なのか、また、同 4 本による破砕の安定性は十分なのか、などについては、もう少し検討の余地があると考えられる。

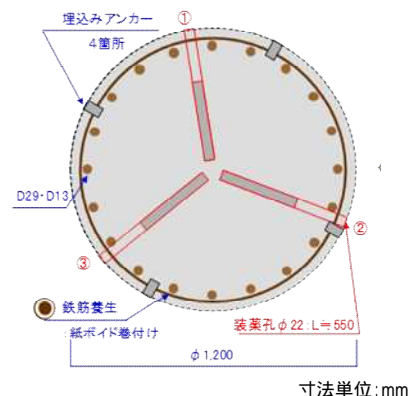


図 - 3 試験体 3： 1,200，装薬孔：3



写真 - 23 破砕後揚重
(1,200,装薬孔:3本)



写真 - 24 杭頭破断面
(1,200,装薬孔:3本)

3.2 余盛り部の小割

(1) 試験体 1'

試験体 1' の破砕後の状況を写真 - 25 および写真 - 26 に示す。破砕形状は、計画通り 4 分割されたことから、本試験体の装薬条件で十分に破砕可能であると考えられる。しかし、上部に飛散防止用として、別試験体の余盛りを載せ、外周は防爆シートによる養生を行ったが、装薬量が多く、破砕時に細かな破片等が飛散したと推察されるため、やや装薬量を減らす必要があると考えられる。また、破砕時の養生方法についても外周をワイヤーなどで拘束するなど再検討する必要がある。



写真 - 25 破砕後の状況



写真 - 26 破砕後の状況

(2) 試験体 2'

試験体 2' の破砕後の状況を写真 - 27 および写真 - 28 に示す。

破砕形状は 試験体 1' と比較して細かく破砕されたことから、本試験体の装薬条件で十分に対応可能であると考えられる。また、上部に飛散防止用として、別試験体の余盛りを載せ、外周は防爆シートによる養生を行ったが、装薬量が多いため、破砕時に細かな破片等が飛散したと推察されることから、装薬量を減らす必要があると考えられる。また、破砕時の養生方法についても、破砕片の飛散・飛来がないよう外周を何らかの形で拘束するなど、さらに検討する必要がある。



写真 - 27 破砕後の状況



写真 - 28 破砕後の状況

(3) 余盛り部小割破砕試験結果の検討

両試験体による余盛り部の小割破砕試験結果から、いずれも飛散の状態が激しいことから、装薬量の再検討が必要なことと、試験体円周方向への飛散防止対策が必要であることが明らかになった。

また、本工法を実現場で実施する際には、小割破砕するための施工ヤードが必要になるため、敷地に余裕のない現場を想定して、水平破砕後の余盛り部の状態のまま、即ち原位置の杭頭での小割破砕を行なうなどの工法検討も必要である。

いずれにしても、実現場の実際の状況に合わせて工法検討する必要がある。

3.3 騒音・振動測定結果

騒音測定結果を図 - 4 および振動測定結果を図 - 5 に示す。なお、騒音測定結果の図 - 4 には、文献 (4) に記載されている騒音レベルの実測値から導出される回帰曲線を参考として記載している。

騒音の最大値は、試験体 2 における 119.8dB(A)、振動の最高値は、試験体 1' における 90.6dB であった。また、騒音規制法による規制値である 85dB(A)は、図 - 4 に示される回帰曲線によると、音源より約 35m の位置で実測されるものと推察される。音源 (今回の場合、破砕対象の杭の位置) から敷地境界まで 35m の距離を確保できない場合は、防音シートを施すなど、有効な防音対策を行う必要がある。

なお、振動規制法による規制値は、図 - 5 に示すように、敷地境界で 75dB となっている。

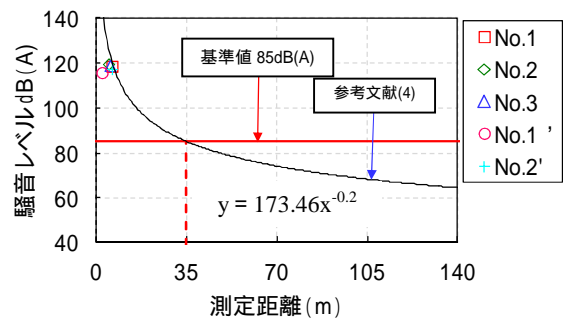


図 - 4 騒音測定結果

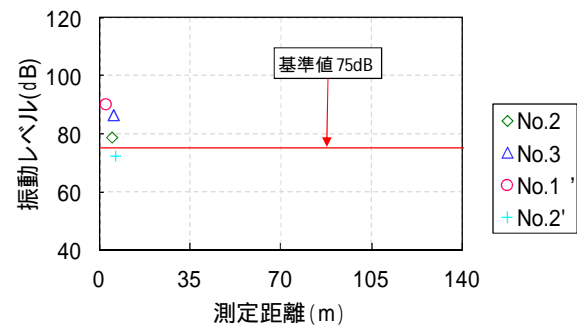


図 - 5 振動測定結果

4. まとめ

今回の一連の実験において、以下の事項について確認することができた。

- (1) 杭半径に対する装薬孔長率と込め物長率を破砕性状の指標としたところ、装薬孔長率 90%前後、込め物長率 40%の設定が、杭径 1,500mm ないし 1,200mm に対しては適値と考えられ、安定した破砕性状を得ることができる。
- (2) 杭径 1,200mm に対しては、装薬孔数の下限は 4 本であり、標準装薬量 $256\text{g}/\text{m}^2$ とすることにより、破砕性状が安定することが確認された。
- (3) 余盛りの小割、小片化は、装薬量を他の文献を参考にして決定したが、破片が大きく飛散するなど、装薬量がやや多いと推察される。また、飛散・飛来に対する養生方法についても再検討する必要がある。
- (4) 非火薬剤を用いてコンクリート杭頭の水平破断および小割破砕をする場合、音源より敷地境界まで 35m の距離を確保できない場合は、有効な防音対策を行う必要がある。

今後の検討課題としては、現場適用に向けて、杭本体に破損がなく平滑に破砕できるよう、杭径の大きな実大の試験体により装薬孔本数など装薬に関する指標を明確に示すよう引き続き検討を行う。

また、余盛りの小割、小片化については、外周方向への激しい飛散・飛来の可能性が大きいため、締付け可能なベルトを巻くなど、各種の飛散・飛来養生を試行し、有効な対処方法を提示する。

最終的には、現場内における余盛り部分の揚重・移動を省略するために、水平破断後に、原位置の杭頭で余盛

り部分を連続して小割・小片化する方法を確立する。

謝辞

本稿に関連する破砕実験を実施するに当たり、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、計画段階から一方ならず、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、深謝致します。

また、熊本高専の中村裕一名誉教授には、今回を含め、長年にわたり懇切的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:動的破砕による杭頭処理工法の開発,コンクリート工学年次論文集, Vol.35, pp.1339-1344, 2013.7
- 4) 中村隆寛ほか:場所打ちコンクリート杭の杭頭余盛コンクリートを瞬時破砕する杭頭処理工法の装薬方法の検討,日本建築学会大会学術梗概集(九州), pp.1337-1338, 2016.8
- 5) 杉下紗恵子ほか:場所打ちコンクリート杭の杭頭余盛コンクリートを瞬時破砕する杭頭処理工法の現場適用,日本建築学会大会学術梗概集(九州), pp.1339-1340, 2016.8