論文 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

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砕制御技術の確立が望まれて久しい。筆者らは,非火薬の破砕剤を用いて場所 打ち杭の余盛り部分を予定破断面で分離させる動的破砕による杭頭処理工法の開発を数年来進めているが, いずれも杭鉄筋組立て時に破砕剤の装薬準備を施す前施工による竪管方式(水平フィン付)を採用していた。 今回は,杭工事や土工事に影響されない後施工の横孔方式による動的破砕・杭頭処理を実大規模の模擬試験 体に適用したところ,装薬孔6本が適切と捉えられたが,装薬孔数を低減できる可能性も示された。 キーワード:非火薬,動的破砕,杭頭処理,横孔方式,後施工,破砕制御

1. はじめに

筆者らは、非火薬の破砕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砕による杭頭処 理工法の開発を数年来進めているが、いずれも杭鉄筋組 立て時に破砕剤の装薬準備を施す前施工による堅管方式 (水平フィン付)を採用していた(図-1)^{1),2)}。今回 は、杭工事や土工事に影響されない後施工の横孔方式に よる動的破砕・杭頭処理を実大の模擬試験体に適用し、 最適な装薬孔の数や形状、配置について検討した。

2. 前施工・竪管方式による杭頭処理工法

装薬スペース

これまでは、堅管底部に平板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砕剤を装薬し、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、破砕剤によるガス圧が水平フィンを通じて水平方向 に発散し、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



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 (正会員) *2 熊本高等専門学校 建築社会デザイン工学科 特任教授 工博 *3 五洋建設 技術研究所 建築技術開発部 博士(工学) (正会員)

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,杭主筋とせるなどし,揚重 できない場合が少なからずあった(**写真-3**)³⁾。



写真-1 破断面の状態 写真-2 余盛り部の揚重



写真-3 実際の杭の状態

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、破砕剤の装薬は、トンネルの発破でよく適用 される横孔方式とする。横孔の数や配置については、適 当な参考例が見当たらないため、破砕効率が均等となる よう、放射状の均等配置を基本とした。また、破砕剤の 装薬量は、これまでの杭頭破砕実験の実績から杭断面積 あたり 256g/m²を標準とし、各孔のビニル管に等分配 する。装薬したビニル管を挿入した空隙には、砂材を詰 めて所要数タンピングを行う。点火用の脚線は、装薬孔 より取り出して直列に結線し、発破母線を介して発破器 まで接続し、遠隔操作にて有線破砕する。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、杭頭破砕後の破砕片揚重の際に、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 ボイド材を取り付ける。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両端をU字形とした吊 り筋を、鉄筋組立て時に水平に2箇所配置し、外周面の かぶり部分に吊り筋端部のU字形が表出するように発泡 スチロール材で箱抜きする。

3.2 工法の比較

前施工・竪管方式(以降,前・竪方式)は,装薬に関 係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 砕剤の装薬に破砕力を制御するためにホルダーを用いる が,後者は,横孔を削工後,ビニル管に破砕剤と点火具 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 り,硬化までに時間を要するが,後者は,砂を詰めてタ 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砕実験 4.1実験方法

後施工・横孔方式による杭頭処理工法の動的破砕実験 における実験因子を**表-1**に示す。

各試験体は,破砕前後でコアを採取し,コンクリート 強度を比較する。なお,採取位置は,破砕に及ぼす影響 が小さくなるように,余盛り部と杭本体部のそれぞれ立 断面中央としている(図-2,図-4参照)。また,破砕 後には,センターホールジャッキを用いて杭頭部の杭主 筋の引抜き試験を行う。

4.2 試験体

各試験体の形状・寸法と装薬孔の形状・配置を図-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φ25 の横孔を装薬孔とする。なお,杭試験体2は,装薬孔を 4本とした場合の最適な配置として,同3は,装薬孔を 3本とした場合の最適な配置と想定してそれぞれ設定し ている。また,試験体4は,横孔方式の装薬孔配置と杭



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				装薬孔(横孔)	装	借 老		
No.	直径(mm)	断面形状	数量	長さ(mm)	方向·角度	薬量	算定	油石
1	1,200	φ 25	6	≒550	放射状·均等	48g	256×1.13/6	図-2
2	1,200	φ 25	4	≒550	放射状:各直交	72g	256×1.13/4	図-3
3	1,200	φ 25	3	≒550	放射状:各 120°	97g	256×1.13/3	図-3
4	1,500	φ 25	4	≒700	放射状:各直交	113g	256×1.77/4	図-4

径の関係を明確にするため、 ϕ 1,500 の杭頭に水平方向の 装薬孔4本を配置した形状とする。

4.3 試験体1の破砕実験結果

今回の装薬量は、標準量:290g(256g×0.6×0.6× π) \approx 48g×6(試験体1の場合)とした。

先にビニルテープで端部を密閉したビニル管の底部に, 点火具を固定し,もう一方の端部から所定量の破砕剤を 詰め,上端もビニルテープで密閉した(**写真-4**)。

ビニル管に密閉した破砕剤,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,その外側に砂 を充填し,外側から突き固める(タンピング:**写真-6**)。

これを繰り返し、外周面まで砂を充填した(写真-7)。 破砕時の飛散・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-8)。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 接続した。

破砕時の騒音測定は,騒音計を当該試験体から約 5m 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,破砕状況を撮影した。

破砕は、余盛り部の浮き上がり量がやや大きかったことから、標準装薬量(256g/m²)ではやや過剰と推察された。破砕後は、防爆材の外側に飛散・飛来がないことを確認し、防爆材を取り外した。

試験体1は、**写真-9**にあるように、装薬孔の高さ位 置に破断面が形成された。

破断面の形成を確認後に、あらかじめ仕込まれた吊り 筋にて揚重を試みた(写真-10)。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。

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-11**に示す。



写真-4 動的破砕剤+点火具(試験体1)





写真-6 タンピング (試験体 1)



写真-7 装薬・充填 完了(試験体1)

なお,試験体1の破砕時における最大騒音レベルは 109.5dB(A)であった(図-5)。



写真-8 防爆養生 (試験体1)







写真-10 杭余盛り部の 場重(試験体1)

写真-11 破断面の状態 (試験体1)



図-5 破断時騒音測定結果(試験体1)

4.4 試験体2の破砕実験結果

標準装薬量とした試験体1は、やや過剰装薬の傾向が あったが、装薬孔数による破砕への影響を厳密に確認す るため、装薬孔を横孔×4本とした試験体2の装薬量も 標準量:290g(256g×0.6× π) \Rightarrow 72g×4とした。

試験体1と同様に,破砕剤と点火具をビニル管へ密閉 したもの(写真-12)を装薬孔の最奥部に挿入し,その 外側に砂を充填し,タンピングを繰り返して最外部まで 砂を充填した(写真-14)。



写真-12 動的破砕剤 +点火具(試験体2)



写真-13 試験体 2 (破砕前の状態)

破砕は、試験体1と同様に、余盛り部の浮き上がり量 がやや大きかった。

防爆養生後に、各点火具の脚線を、発破母線を介して 発破器まで結線し、試験体2の破砕を行った。騒音計測 とビデオ撮影は、試験体1と同様の設定で行った。

試験体2についても,**写真-15~写真-17**にあるよう に,ほぼ装薬孔の高さ位置に破断面が形成されたが,破 砕面の一部は杭本体側に若干食い込んでいた(**写真-17**)。

破断面の確認後に,あらかじめ仕込まれた吊り筋にて 余盛り部の揚重を試みたが,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-16**)。

試験体2の余盛り部を揚重・移動し、切り離した状態の杭本体側の破断面を**写真-17**に示す。

なお,破砕時の最大騒音レベルは115.5dB(A)であった。



写真-14 タンピング (試験体 2)



写真-15 破砕直後の 状態(試験体2)



写真-16 杭余盛り部の 揚重(試験体2)



写真-17 破断面の状態 (試験体2)

4.5 試験体3の破砕実験経過および結果

標準装薬量とした試験体1と試験体2は、いずれもや や過剰装薬の傾向があったが、装薬孔数による破砕への 影響を厳密に確認するため、装薬孔を横孔×3本とした 試験体3の装薬量も標準量:290g(256g×0.6×0.6× π) =97g×3とした。

試験体1,試験体2と同様に,破砕剤と点火具をビニ ル管へ密閉したもの(写真-18)を装薬孔の最奥部に挿 入し,その外側に砂を充填し,タンピングを繰り返して 最外部まで砂を充填した(写真-20)。

防爆養生後に,発破器まで結線し,試験体3の破砕を 行った。騒音計測とビデオ撮影は,試験体1,試験体2 と同様の状態で行った。

破砕は、試験体1、試験体2と同様に、破砕時の余盛

り部の浮き上がり量がやや大きかった。

試験体3は,写真-21~写真 23 にあるように,破砕 面の一部が杭本体側に大きく食い込み,余盛り部の外周 側の一部が分断されて残った。

破断面の形成を確認後に,吊り筋にて揚重を試みた(**写 真-22**)。一部を除き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。

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-23**に示す。

なお,破砕時の最大騒音レベルは117.2dB(A)であった。





写真-18 動的破砕剤 +点火具(試験体3)

写真-19 試験体3 (破砕前の状態)





写真-20 タンピング (試験体3)

写真-21 破砕直後の 状態(試験体3)



写真-22 杭余盛り部の 揚重(試験体3)

写真-23 破断面の状態 (試験体3)

4.6 試験体4の破砕実験経過および結果

試験体2と同じ装薬孔×4の試験体4は、杭径による 破砕への影響を厳密に確認するため、杭径を ϕ 1,500とし た試験体4の装薬量も標準量:452g(256g×0.75×0.75 × π) =113g×4とした。

破砕剤と点火具をビニル管へ密閉したもの(写真-24) を装薬孔の最奥部に挿入し、その外側に砂を充填し、タ ンピングを繰り返して最外部まで充填した(写真-26)。

防爆養生後に,発破器まで結線し試験体4の破砕を行った。騒音計測とビデオ撮影は,試験体1~試験体3と

同様の設定で行った。

破砕は、余盛り部の浮き上がり量が大きく、杭主筋の 上端に載せかかった状態で止まっていた(**写真-27**)。

試験体4は,写真-27~写真 29 にあるように,破砕 面が杭頭レベルとほぼ同一面に形成されていた。

破断面の形成を確認後に,吊り筋にて揚重を試みた(**写 真-28**)。余盛り部分は,破砕時に,既に杭主筋を抜けて 持ち上がっていたため,容易に移動できた。

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-29**に示す。





写真-25 試験体4

(破砕前の状態)

写真-24 動的破砕剤 +点火具(試験体4)



写真-26 タンピング (試験体 4)



、 27 歳件直後の 状態(試験体4)



写真-28 杭余盛り部の 揚重(試験体4)



写真-29 破断面の状態 (試験体 4)

が形成されたのは,装薬孔長(約700mm)と込め物(砂) 長(約300mm)の比率が適値(30~40%)⁴⁾に近かった ためと考えられる。

4.7 破砕前後のコア圧縮強度試験結果

破砕前後の標準供試体圧縮強度(材齢 18 日と材齢 28 日),コア供試体圧縮強度(材齢 18 日と材齢 28 日)の試 験結果を**表-2**に示す。

破砕前後のコア圧縮強度の発現状況より,いずれも標 準養生強度の材齢に伴う増加分(平均3.4N/mm²)よりは 小さいものの強度増加(平均2.2N/mm²)が見られること から,破砕が杭本体の耐力自体に有害な影響を及ぼすこ とはないと推察される。

4.8 破砕後の杭鉄筋引抜き試験結果

表-3に、各試験体における鉄筋の引抜き試験結果の 一覧を示す。なお、表中の鉄筋上下端の変位データは、 上段が終了時の指示値を、下段が試験時の最大値をそれ ぞれ示している。

いずれの試験体・鉄筋においても鉄筋が降伏した後は 引張試験時の鉄筋の伸び量に対し,各変位計の設置状態 における稼動域(天端:約50mm、下部:約10mm)の 範囲内で加力を停止したため,破断には遠く至らず,破 壊モードが確定するような現象は見られなかった。これ は、コアによるコンクリート強度が、実測で37.4N/mm² (平均)と設計基準強度30N/mm²を大きく超えていたこ とも寄与しているものと考えられる。

いずれにしろ, 杭頭部に破砕に伴う衝撃を受けた以降 でも, 杭鉄筋は, 埋込み長さやコンクリート強度に合わ せて計算で示される以上の抵抗値を示し, その現象は埋 込み長さ 20d 以下(L≒550mm の場合, 約 19d)でも安 定して見られた。

杭鉄筋の2点(杭天端との界面,鉄筋天端)における 変位と荷重の関係においては、いずれの鉄筋も引張荷重 が降伏強度付近まで順調に推移したが、その後はあまり 増大しなかった。

5. まとめ

後施工の横孔方式による動的破砕工法を実大規模(φ 1,200, φ1,500)の模擬杭頭試験体に適用し,その破砕形

表-2 破砕前後の圧縮強度

	試験体		破砕前	•圧縮強度()	N/mm²)	破砕後・圧縮強度(N/mm²)		
No	直径(mm) 孔数		材齢(日)	標準	コア	材齢(日)	標準	コア
1	1,200	6	18	24.1	33.9	28	37.3	36.1
2	1,200	4	18	34.1	34.4	28		35.5
3	1,200	3	18	24.0	36.4	28	29.5	39.3
4	1,500	4	18	54.9	36.0	28	56.5	38.7

表一3 弓	抜き	試験結	課
-------	----	-----	---

引張鉄筋		測定値			引張定着筋(kN)				コンクリート (kN)		
No.	埋込み 長さ(mm)	Ш	荷重 (kN)	変位下 (mm) ¹⁾	変位上 (mm) ²⁾	降伏 Try	引張 Tru	短期許容 付着 Tbs ³⁾	付着 Tbu ³⁾	短期許容 圧縮 Cs ³⁾	破壊 モード
1	550	1	241	0.48 0.48	11.43 11.44	248	365	189.3	378.7	203.1	(鉄筋降伏) >Tbs
		2	242	0.57 0.58	18.9 18.9	240	505	(207.8)	(415.5)	(245.1)	(鉄筋降伏) >Tbs
2	550	1	247	2.90 2.90	30.18 30.18	248	365	189.3	378.7	203.1	(鉄筋降伏) >Tbs
		2	244	1.95 2.39	25.34 25.34	246	505	(205.7)	(411.3)	(240.4)	(鉄筋降伏) >Tbs
3	550	1	245	0.82 0.84	23.58 23.58	249	265	189.3	378.7	203.1	(鉄筋降伏) >Tbs
		2	243	2.41 2.42	29.48 29.58	248	303	(217.0)	(433.9)	(266.1)	(鉄筋降伏) >Tbs
4	550	1	242	1.87 1.87	22.26 22.26	248	365	189.3	378.7	203.1	(鉄筋降伏) >Tbs
		2	245	1.68 1.90	23.7 23.7	240	303	(215.2)	(430.4)	(262.0)	(鉄筋降伏) >Tbs

注]1)鉄筋下端(杭天端との界面)の変位:2点の平均,(上段)最終読み値,(下段)最大値

2) 鉄筋天端(杭筋天端)の変位: (上段) 最終値, (下段) 最大値

3) ()内は、余盛り部のコア圧縮強度による計算値

状を実用に近い水準で検証した。その結果,以下のこ とが明らかになった。

- (1) 破砕ライン上に6本の装薬孔を放射状に配した試験 体1は、やや過装薬と推察されたが、良好な破砕面 が形成された。
- (2) 装薬孔4本と同3本では、いずれも破砕面の一部が 杭本体部分に喰い込み、また後者は余盛り部分の外周 部が一部残存した。
- (3) 装薬孔4本で、杭直径をφ1,500とした試験体4では、かなり過装薬ながら破断面が形成されたのは、装薬孔長と込め物(砂)長の比率が適値(30~40%)に近かったためと考えられる。
- (4) 今回の実験の範囲では、装薬孔6本が適切と捉えられるが、破砕状態と実装薬量から推察した場合、装薬孔4本ないし3本でも、ある程度の水平破砕面が形成されていることから、装薬孔の規模、形状、配置を工夫することにより、適切とされる装薬孔数をさらに低減できる可能性が考えられる。
- (5) 破砕前後の杭頭試験体から採取したコア供試体によ る圧縮強度試験結果および破砕後の杭鉄筋引抜き試

験結果から、杭本体コンクリートおよび鉄筋には、破砕 による有害な影響は見られなかった。

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 職氏,相模工 業の長野正幸氏に深い謝意を表します。

参考文献

- 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
- 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
- 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) 日本火薬工業会資料編集部:火薬学[第2版], pp.222-228, 2014.9