

報告 動的破砕による杭頭処理工法の開発

竹内 博幸^{*1}・中村 裕一^{*2}・高橋 祐一^{*3}

要旨：筆者らは、簡易装薬ホルダを場所打ち杭の杭頭余盛り部に先付け装着し、非火薬の破砕剤を使用して、杭頭を予定破断面で分離破砕する動的破砕による杭頭処理工法の開発をここ数年来進めている。今回の報告では、水平破断方式による動的破砕工法を実大規模の杭頭試験体に適用し、その破砕性状を実用化に近いレベルで検証した。今回適用した装薬ホルダは、水平方向への破砕力を有効に引き出すことを目的とした水平フィン付の形状で、豎管の上端が杭頭の余盛り部分より上に位置し、そこから破砕剤を装薬し、遠隔操作にて有線破砕する機構としている。

キーワード：動的破砕剤、非火薬、装薬ホルダ、水平破断方式、水平フィン、超速硬無収縮モルタル

1. はじめに

最近の建設技術に要求される特性としては、これまでの「迅速性」「経済性」「安全性」に加えて、「環境配慮性」「社会貢献性」などが挙げられる。特に、杭頭処理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。筆者らが開発した簡易装薬ホルダを場所打ち杭の杭頭余盛り部に先付け装着し、非火薬の破砕剤を使用して、杭頭を予定破断面で分離破砕する動的破砕による杭頭処理工法の開発をここ数年来進めている¹⁾。

今回の報告では、水平破断方式による動的破砕工法を実大規模の杭頭試験体に適用し、その破砕性状を実用化に近いレベルで検証した。なお、今回適用した装薬ホルダは、水平方向への破砕力を有効に引き出すことを目的とした水平フィン付の形状(図-1)で、豎管の上端が杭頭の余盛り部分より上に位置し、そこから破砕剤を装薬し、遠隔操作にて有線破砕する機構としている。

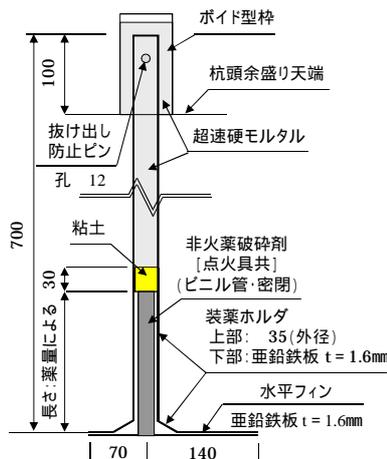


図-1 装薬ホルダ(水平破断方式)

装薬ホルダは、実際の杭頭を模擬した試験体に、鉄筋や形鋼などを架台とした簡易な方法により設置し、杭鉄筋組立から移動、建込み、トレミー管によるコンクリート打設と実際の施工を想定し、各段階にて施工検証を行った。また、破砕剤の装薬量やホルダ設置方法の違いによる破砕効果への影響についても検討した。

2. モデル実験

2.1 実験方法

実規模試験体による実験に先立ち、水平破断方式の装薬ホルダの有効性を確認するために、小型試験体によるモデル実験を行った。

試験体は、20×27cmの円柱体で、高さ1/2の位置に小型化した装薬ホルダを断面中央に配置し、試験体天端より突出させたホルダ上方から破砕剤を装薬し、固化充填材にて閉封した。配筋は、鋼棒9を4本、試験体底部に敷設した鋼製の円形板上に据えた。なお、この段階では、破砕剤は火薬種のもを適用した。また、ホルダ下部の水平フィンの幅を5cmと8cmの2種類とした。

2.2 実験結果

破砕試験の結果、各試験体とも水平フィンと同面で破砕面が形成され、破砕された試験体上部は、同下部に設置された鋼棒の上方に抜けて分離した(写真-1)。



写真-1 モデル試験体

*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 教授 工学博士

*3 五洋建設 技術研究所 建築技術開発部 博士(工学)(正会員)

なお、フィン幅 5 cm と 8 cm では、破砕状態や破断面状態に大きな差異は見られなかった。また、試験体のコンクリートは呼び強度 21N/mm^2 で、材齢 91 日の封緘養生供試体の圧縮強度は 28.0N/mm^2 、同引張強度は 2.01N/mm^2 であった。

3. 実規模実験

3.1 実験概要

水平破断方式による動的破砕工法を実大規模の杭頭試験体に適用し、その破砕性状を実用レベルで検証した。

装薬ホルダは、実際の杭頭を模擬した試験体に、鉄筋や形鋼などを架台とした簡易な方法により取付け、杭鉄筋組立から移動、建込み、トレミー管によるコンクリート打設と実際の施工を想定し、各段階において位置ずれ、変形、脱落がないことを確認した。また、破砕剤の装薬量やホルダ設置方法の違いによる破砕効果への影響についても検討した。

なお、この段階では、破砕剤は、非火薬種のもの（テルミット反応による破砕機構）を適用し、装薬ホルダ内には、破砕剤、粘土材（ $t = 30\text{mm}$ ）、超速硬無収縮モルタル（加水後約 1 時間で硬化する）の順で充填した。

実験因子を表 - 1 に示す。装薬量は、実験当初の予定と実験の進捗に伴い、先行結果に基づき調整し、実際に装薬した量と併せて表記している。

3.2 試験体

試験体は、1,200 mm の杭頭部分を模擬し、破砕面を下端より 600 mm の位置とした（全高：1,200 mm）。試験体の杭鉄筋は、主筋 12 - D32、せん断補強筋 D13@150 とし、試験体天端より主筋を 100 mm 上方に突出させた。かぶりは 100 mm とした。なお、杭頭部の主筋は、埋設部分につきスチレン製ポイド材で養生した。

各試験体の装薬ホルダの設置方法を図 - 2 ~ 図 - 4 に示す。試験体 1 は、装薬ホルダ 4 本を、平鋼（FB）を架台として、各 FB の中央に配置し、番線や結束線にて簡易に固定した。試験体 2 は、装薬ホルダ 4 本を、捨て鉄筋の上に山形鋼（L）と平鋼（FB）で架台を組み、各

FB の端部に配置し、固定した。試験体 3 は、装薬ホルダ 6 本を、FB 中央に 2 本、同端部に 4 本を配置し、同様に固定した。各装薬ホルダとも水平フィンの位置が破砕面（ $H = 600\text{mm}$ ）となるように設置した。

なお、試験体コンクリートは呼び強度 30N/mm^2 とした。実験時の圧縮強度（材齢 42 日、封緘養生）は 43.9N/mm^2 （試験体 2）、 39.7N/mm^2 （試験体 1、同 3）であった。

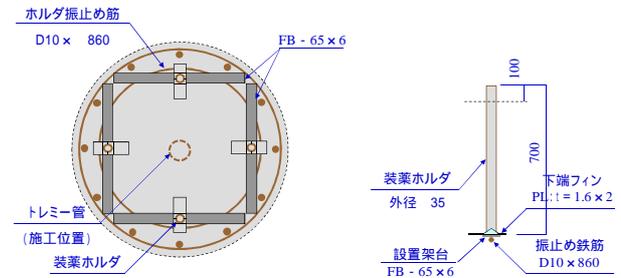


図 - 2 装薬ホルダ配置: 試験体 1

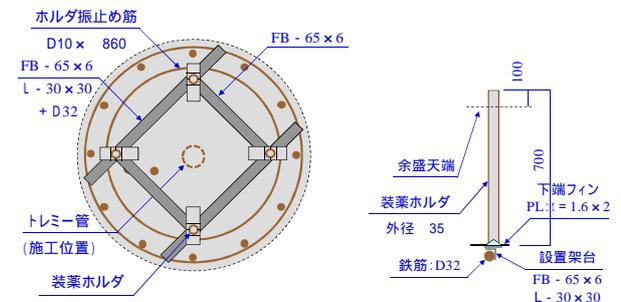


図 - 3 装薬ホルダ配置: 試験体 2

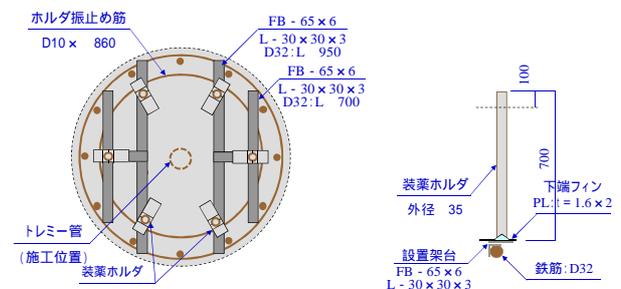


図 - 4 装薬ホルダ配置: 試験体 3

表 - 1 実験因子

試験体 No.	破砕順序	装薬ホルダ		装薬量 (予定 / 1本)			装薬量 (実施 / 1本)	
		数量	設置方法 ¹⁾	薬量	算定	摘要	薬量	摘要
1	4	4	FB x 4	72g	$256 \times 1.13 / 4$	標準 ²⁾	30g	5/12
2 - 1	1	4	捨て筋 + L + FB	72g	$256 \times 1.13 / 4$	標準 ²⁾	72g	標準: 1
2 - 2	2	4	捨て筋 + L + FB	48g	標準 x 2/3	少	54g	3/4
2 - 3	3	4	捨て筋 + L + FB	96g	標準 x 4/3	多	40g	9/16 ³⁾
3	5	6	捨て筋 + L + FB	48g	$256 \times 1.13 / 6$	標準 ²⁾	27g	9/16 ⁴⁾

注] 1) 捨て筋: 杭主筋と同径 (D32), L: 山形鋼, FB: 平鋼

2) 破砕面 1m^2 あたり 256g が既往実験により算出された破砕剤の標準量。杭の平断面積: 1.13m^2 。

3) $3/4 \times 3/4 = 9/16$ 4) 全装薬量は試験体 2 - 3 と同じ。(40g x 4本 27g x 6本)

3.3 装薬方法

装薬ホルダの縦管（外径 35）への非火薬種破砕剤の装填は以下の通りである（図 - 1 参照）。

同破砕剤は、装薬量に合わせて切り出したビニル管に詰め、上部になる方に点火具を装着し、両端をプラスチック栓とシール材で密閉した（写真 - 2 参照）。

同破砕剤を詰めたビニル管を杭頭天端に突出している装薬ホルダの縦管から挿入し（写真 - 3 参照）、その上に約 30 mm の厚さになるように粘土材を詰めた。リード線を外部に取り出した後、超速硬無収縮モルタルを装薬ホルダの縦管周辺に設置したボイド型枠内に充填した（写真 - 4 参照）。

4. 実験結果

4.1 試験体 2 - 1

最初の 1 体目は、装薬ホルダの固定を（捨て筋 + L 形鋼 + 平鋼）とする試験体 2 シリーズ 3 体の中の 1 体とし、これまでの実績から非火薬種破砕剤の装薬量を標準量の 72g (256 × 1.13 / 4 本) とし、これを基準試験体とした。その破砕状態から判断して以降の同シリーズの試験体への装薬量を調整することとした。ホルダへの装薬は、3.3 に記載した方法により装填し、超速硬モルタル充填後、破砕までの養生時間を約 1 時間とした。

破砕時の試験体上部（余盛り部）の浮き上がり状態から、破砕力がやや過剰と推察されたが、破砕面は一部が想定面より上部に現れたほかはほぼ水平状態であった。また、破砕直後の試験体上部の超速硬無収縮モルタルは、割裂や変形などはなく、破砕による影響は見られなかった。なお、試験体から約 5 m 離れた位置で、騒音計により測定された破砕音のピークは図 - 5 に示すように、113.0dB(F)であったが、瞬間的な音響であり、衝撃感を伴うものではなかった。

破砕実験終了後に、破砕面上部の試験体片をフォークリフトで揚重したところ、ホルダを設置した架台とほぼ同一面に破砕面が形成されていた（写真 - 8 参照）。



写真 - 2 非火薬種破砕剤 (点火具とも)



写真 - 3 NRC 装薬 (No.2-1)



写真 - 4 超速硬モルタル充填 (No.2-1)



写真 - 5 装薬完了:破砕前 (No.2-1)



写真 - 6 破砕直後 (No.2-1)



写真 - 7 杭頭余盛り部切り離し(No.2-1)



写真 - 8 杭頭天端状態(切り離し後:No.2-1)

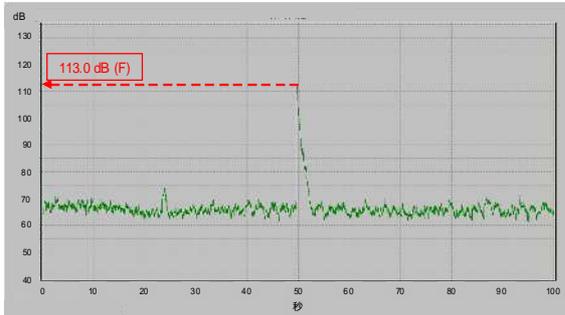


図 - 5 破砕音測定結果

4.2 試験体 2 - 2

当初は、基準試験体（試験体 2 - 1）より破砕剤の装薬量を増量する予定であったが、基準試験体の装薬量がやや過大であったと判断し、この試験体では破砕剤の装薬量を 54g（72g × 3/4）とした。

ホルダへの装薬方法は、試験体 2 - 1 と同様とした。ホルダ上部は、塩ビ管（65）を型枠とし、超速硬無収縮モルタルを充填し、密閉・拘束状態とした（写真 - 9 参照）。破砕までの養生時間は同モルタル充填後約 1 時間とした。

破砕時の衝撃感は、試験体 2 - 1 より低下したものの、破砕に必要な装薬量としてはまだ少し過剰と考えられた。破砕面は一部が想定面より上部に現れた他はほぼ水平状態であった。また、破砕直後の試験体上部の速硬モルタ

ルは、4 箇所とも破砕による変形・ひび割れなどの影響はまったく見られなかった（写真 - 10 参照）。

なお、破砕音のピークは 111.2dB(F)であったが、瞬間的な音響であり、衝撃感を伴うものではなかった。

破砕試験終了後、破砕面は試験体 2 - 1 と同様の状態であることを確認した。



写真 - 9 超速硬無収縮モルタル充填状況(No.2-2)



写真 - 10 破砕直後(No.2-2)

4.3 試験体 2 - 3

当初は、基準試験体（試験体 2 - 1）より装薬量を増量する予定であったが、試験体 2 - 2 の装薬量（54g）もまだやや過大であると推察し、この試験体では破砕剤の装薬量を 40g（72g × 9/16 [3/4 × 3/4]）とした。

ホルダへの装薬方法は、試験体 2 - 1 ・ 2 - 2 と同様とした。ホルダ上部は、ポイド（75）を型枠とし、超速硬無収縮モルタルを充填し、密閉・拘束状態とした（写真 - 11 参照）。破砕までの養生時間は約 1 時間とした。

破砕は、試験体 2 - 2 より衝撃感は低下し、装薬量としては概ね妥当な範囲と推察された。破砕面は想定面近傍で、ほぼ水平状態であった。また、破砕直後の試験体上部の超速硬無収縮モルタルは、4 箇所とも破砕による変形・ひび割れなどの影響はまったく見られなかった（写真 - 12 参照）。なお、破砕音のピークは 114.3dB(F)であったが、瞬間的な音響であり、衝撃感を伴うものではなかった。

破碎試験終了後、破碎面は試験体 2 - 1・2 - 2 と同様の状態であることを確認した。



写真 - 11 超速硬無収縮モルタル充填状況 (No.2-3)



写真 - 12 破碎直後 (No.2-3)

4.4 試験体 1

試験体 1 は、当初、基準試験体（試験体 2 - 1）と同一の装薬量とする予定であったが、試験体 2 - 3 の装薬量（40g）をどの程度まで低減しても破碎が可能かを確認するため、破碎剤の装薬量を 30g（72g×5/12）とした。なお、装薬ホルダの固定は、平鋼を杭断面内 4 辺に渡し、その各中央にホルダを配置する方式とし、試験体 2 シリーズとの比較を試みた。

ホルダへの装薬方法は、試験体 2 シリーズと同様とした。ホルダ上部には、試験体 2 - 3 と同様に、ボイド（75）を型枠とし、超速硬無収縮モルタルを充填し、密閉・拘束状態とした。破碎までの養生時間は約 1 時間とした。

前記条件で点火したが、目視、聴音の範囲では、破碎現象は一切表出しなかった。そこで、事後にビデオ、騒音計の記録を確認したところ、点火時に軽微な破裂音が発生していたことが明らかになった。破碎音のピークは、他の作業音と変わらない程度の 85.8 dB(F)であった。また、破碎から 20 日後に、破碎想定面付近をリバウンドハンマーで打撃したところ、表面硬度が相対的に低下するような変状箇所は見当たらなかった。

以上より、今回の試験条件の範囲で、破碎面を形成できる装薬量は、試験体断面 1.13 m²あたり総量で 160g と 120g の間であることが推察されたが、明確な特定にまでは到らなかった。

4.3 試験体 3

試験体 3 は、装薬ホルダを 6 本とし、当初は、基準試験体（試験体 2 - 1）と総量で同一の装薬量とする予定であったが、試験体 2 - 3 の装薬量（40g）がほぼ適正値であるとみられたため、この試験体では非火薬種破碎剤の装薬量を 27g（40g×4/6）とした。なお、装薬ホルダの固定は、平鋼と山形鋼 4 片を杭断面内に渡し、その各端部にホルダを配置する方式とし、試験体 1 および 2 シリーズとの比較を試みた。

ホルダへの装薬方法は、試験体 1 および 2 シリーズと同様とした。ホルダ上部は、4 箇所はボイド（75）を型枠とし、超速硬無収縮モルタルを充填し、密閉・拘束状態とした（写真 - 13 参照）。他 2 箇所はホルダ管露出とし、ホルダ上部に超速硬無収縮モルタルを詰めるだけとし、1 箇所については抜け出し防止のピン（鉄筋 D10、図 - 1 参照）も省略し、比較を試みた。超速硬無収縮モルタル充填後、破碎までの養生時間は約 1 時間とした。

破碎時の衝撃は、試験体 2 - 3 より低下した感があるが、装薬量としては概ね適切な範囲と推察された。なお、破碎音のピークは 104.9 dB(F)であったが、瞬間的な音響であり、衝撃感を伴うものではなかった。破碎面は想定面近傍で形成され、ほぼ水平状態であった（写真 - 14 参照）。また、破碎直後の試験体上部の超速硬無収縮モルタルは、ホルダを露出させた 2 箇所を含めて、6 箇所とも破碎による変形・ひび割れなどの影響はまったく見られなかった。



写真 - 13 超速硬無収縮モルタル充填状況 (No.3)

破碎試験終了後、破碎面上部の試験体片に吊り治具を取り付け、フォークリフトで揚重し切り離れたところ、ホルダを設置した鋼材とほぼ同一面に破碎面が形成されていた。



写真 - 14 破碎直後(No.3)

5. まとめ

5.1 水平破断式装薬ホルダによる破碎効果

- ・実大規模の杭頭に2種類の方法で取り付けられたフィン付き水平破断式ホルダの効果は、縮小モデル実験で確認された性状と同様であり、実大規模においても期待された結果が得られた。
- ・装薬量は、これまでの実験で得られた単位面積あたりの標準量を大きく下回り、その38~55%の間が適量と推察された。
- ・破碎後の破断面は、想定面とほぼ同一で、一部想定面より上方に現れた試験体もあったが、ほぼ水平方向に発生し、今回のホルダが配置、数量も含めて、適切であったものと判断される。
- ・破碎後、杭頭部を揚重したところ、今回の配筋条件・状態の範囲では、容易に切り離すことができ、鉄筋のせりやロックなどの現象はまったく見られなかった。

5.2 ホルダ設置方法

- ・ホルダの設置は、山形鋼（鉄筋下地）2片+平鋼片の方法で行ったが、破碎に関しては施工性による影響は見られず、簡易な方法であることから、実際の施工に対し有効かつ適切であると判断される。
- ・山形鋼+平鋼の方法については、杭鉄筋を横倒した状態から立ち上げるまでを模擬した施工検証を行ったが、特に大きな問題はなく、施工による不具合も見られなかった。
- ・装薬ホルダ数は、今回の試験体の規模・形状（1,200, 12-D32）では、4箇所ですべて十分な破碎効果が得られた。6箇所配置では、装薬総量を同一にすることで、やはり十分な破碎効果が得られたが、装薬ホルダ数の違いによる効果は、今回の実験の範囲では見られなかった。

5.3 装薬方法・装薬量

- ・破碎剤の装薬方法（ビニル管密閉：点火具とも）、粘土材の充填は、これまでの実績を含め、最も有効な方法と考えられるが、その上部の充填材については、既製の

の接着系アンカー材など従来の充填材を付加することなく、超速硬無収縮モルタルをホルダ上部に充填するだけで、破碎に対する拘束性は必要十分であることが明らかになった。

- ・今回、装薬ホルダ上部に超速硬無収縮モルタルを充填し、余剰分を付加しない方法でも、特に破碎の影響は見られなかった。また、抜け出し防止のピンがなくても破碎の影響は見られなかった。
- ・今回の装薬方法で有効な破碎面を形成できる破碎剤の装薬量の下限値は、試験体断面積の1.13㎡に対し160gと120gの間であると推察された。これは、1㎡あたり140g~105gの装薬量となる。
- ・破碎に伴う衝撃音のピークは、104.9~114.3dB(F)であったが、いずれも瞬間的な音響であり、衝撃感を伴うものではなかった。

5.4 その他

- ・杭主筋の養生・縁切りは、既製のスチレン製ボイド材で十分あることが明らかになった。これにより、破碎後、杭頭余盛り部を破碎することなく、そのまま切り離し、揚重・撤去できることが明らかになった。
- ・杭頭余盛り部の揚重・撤去を円滑に行うためには、あらかじめ余盛り部に吊り元のアンカーを設ける必要がある。

5.5 今後の課題

今回の検証実験の結果、本工法における課題として以下の事項が抽出された。

- ・装薬ホルダ口の密閉処理方法の簡易化・効率化
- ・装薬方法の合理化・省力化（水や空隙によるクッション効果の適用など）
- ・破碎音の低減・減衰
- ・試験体の規模・形状や鉄筋量をより実状に近似させた条件での検証実験
- ・杭頭への装薬ホルダの組込みと杭鉄筋の揚重・建込み、コンクリート打設など実施工による施工性の検証

謝辞

今回の一連の実験にあたり、主要な材料を御提供いただき、かつ実施対応で多大な御協力をいただいたカヤク・ジャパンの中村聡磯氏、田口琢也氏、および宇部興産の樋口毅氏には深い謝意を表します。

参考文献

- 1) 中村裕一，中村聡磯，竹内博幸，田口琢也：簡易装薬ホルダを使用したコンクリート杭頭の動的処理工法に関するモデル実験，火薬学会，2012年度秋季研究発表講演会，pp.15-16，2012.11