

(23) コンクリート破砕薬と装薬ホルダーによる杭頭の制御破砕モデル実験

Small scale experiment on controlled demolition of a pile head with a concrete cracker and a charge holder.

山本雅昭*, 安達孝弘**, 中村裕一***, 緒方雄二****, 加藤政利*****, 山浦一郎*****
Masaaki Yamamoto, Takahiro Adachi, Yuichi Nakamura, Yuji Ogata, Masatoshi Kato, Ichiro Yamaura

*工博, 旭化成ケミカルズ株式会社, 化薬研究所 (〒870-0392 大分県大分市大字里 2620 番地)

**カヤク・ジャパン株式会社, 雷管工場 (〒882-0854 宮崎県延岡市長浜町 4-5003-1)

***工博, 熊本高等専門学校教授, 建築社会デザイン工学科 (〒866-8501 熊本県八代市平山新町 2627)

****工博, (独) 産業技術総合研究所, 爆発安全研究コア (〒305-8569 茨城県つくば市小野川 16-1)

*****工博, 株式会社構造安全研究所部長, 研究開発部 (〒181-0013 東京都三鷹市下連雀 8-2-24)

*****五洋建設株式会社部長, 建築エンジニアリング部 (〒112-8576 東京都文京区後楽 2-2-8)

Key Words: Pile head removal, Concrete cracker, Charge holder

キーワード: 杭頭処理, コンクリート破砕薬, 装薬ホルダー

1. まえがき

近年、地上構造物の基礎工事では、市街地での騒音規制等により現場打ち杭が主流となっている。これに併せて杭頭処理のための種々の工法が開発されている¹⁾。杭頭処理は、ブレーカーによる解体が一般的であるが、騒音・振動などの周辺環境への影響や、作業員に過酷な作業負荷を与えるなどの問題がある。静的破砕剤を用いて杭頭を破砕することにより、上記問題点を回避する工法も考案されているが、静的破砕剤を充填するさく孔が必要、クラックの制御が不十分、二次処理に比較的時間を要するなどの課題が残っている。

これに対し筆者らは、少量の火薬類を制御して用いることにより、周辺環境への影響や作業員への負荷が小さく、より短時間に処理できる工法の開発を目指している。具体的には、杭頭処理部に予め設置された装薬ホルダー及び水平仕切り板と火薬類を組合せて、クラックの進展を必要最小限に制御するものである。装薬ホルダーは、杭頭鉛直方向に進展するクラックの数と方向を制御し、水平仕切り板は杭頭水平方向に進展するクラックの位置と方向を制御する。火薬類は、クラックを進展させる原動力となる圧力を発生する。これまでに、小型供試体と電気雷管を組み合わせたモデル実験でクラック進展メカニズムの解明や最適化が行われ、本工法の有効性が明らかにされてきている²⁾。

今回は、市街地でのより安全な施工を目指し、電気雷管に用いられているいわゆる「爆薬」よりも安全性が高

いコンクリート破砕薬の適用可能性と最適装薬量を検討するため、モデル実験を行った。その結果について報告する。

2. コンクリート破砕薬 (CCR) について³⁾

コンクリート破砕薬 (以後 CCR と略す) は、コンクリート破砕器に用いられる火薬で、臭素酸カリウム、黒鉛、珪素鉄粉、ジニトロトルエン等を主成分とする。主に都市部でのコンクリート構造物解体や造成工事などで用いることを目的として、爆薬に比べて騒音、振動、飛石が軽減されるように設計されている。具体的には、爆薬に比べて燃焼速度が遅く 60m/s しかない。このため衝撃波は発生しない。生成するガス量も少なく、単位重量当りでは ANFO の約 1/6 である。反応熱も小さい。代表的な爆薬である ANFO との性能比較を表-1 に示す。

表-1 ANFO と CCR の性能比較

性能	CCR	ANFO
燃焼(爆轟)速度 (m/s)	60	3,000
反応熱 (J/g)	2,300	4,200
生成ガス量 (l/kg)	170	970

CCR の着火には、専用の点火具を用いる。爆薬を起爆する際に用いる雷管は使用しない。CCR の点火具の主成分はアルミニウムと過酸化バリウムであり、いわゆる爆

薬は用いられていない。

3. モデル実験方法

3.1 モデル供試体

モデル実験に用いた供試体の形状を図-1に示す。直径200mm、高さ400mmのコンクリート柱で、標準的な場所打ち杭の約1/5の大きさである。圧縮強度は21N/mm²以上である。

菱形あるいは星形の装薬ホルダーが170mm深さで柱中心に埋め込まれている。図-2に断面形状を示す。菱形は、くの字型の亜鉛メッキ鋼板（辺の長さ21mm、挟角120度）2枚を向かい合わせにしたもので、供試体が二分割されることを期待している。星形はくの字型の鋼板を菱形とは逆向きにして4枚合わせたもので供試体が四分割されることを期待している。

また、杭の主筋を想定した鉄筋かごの上側に水平仕切り板を配置し、埋め込んでいる。水平仕切り板はドーナツ状で、外径160mm、中心穴径が100mmである。この穴は、トレミー管を通す穴を想定したものである。材質は亜鉛メッキ鋼板である。水平仕切り板の位置で破断させることを想定している。

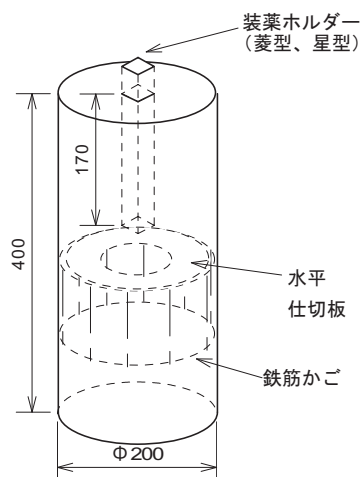


図-1 モデル供試体の形状

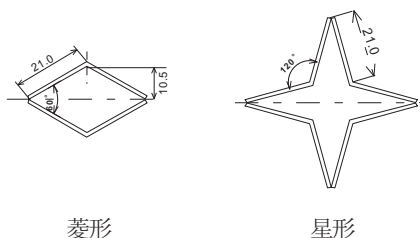


図-2 装薬ホルダーの断面形状

3.2 装薬方法

装薬ホルダーへのコンクリート破砕薬の装薬方法を図-3に示す。装薬は、ホルダーの孔底から下記の手順で実施した。CCRは衝撃波を発生せず、生成ガスの膨

張力で対象物を破砕するため、ガスが漏洩しないように入念な填塞を行った。

- (1) 予定破断面より下部への損傷軽減を目的として、粘土を約20mm配置する。
- (2) CCRと点火具をプラスチック袋につめた装薬を配置する（装薬例を図-4に示す）。CCRは、旭化成ケミカルズ株式会社製のCCRを使用。装薬量は、3g、5g、11gの3種類で、装薬長は、45mm～50mm。装薬とホルダーの間に若干の空隙が出来るため、乾燥砂で充填した。
- (3) 装薬の生成ガス密閉度を高めるため、粘土を約20mm配置する。
- (4) 乾燥砂を棒で軽く突き固めながら約30mm充填する。
- (5) 二液混合型の有機系接着剤を約80mm充填し硬化させる。有機接着剤は、旭化成ケミカルズ株式会社製のARケミカルセッターEA-500を使用。

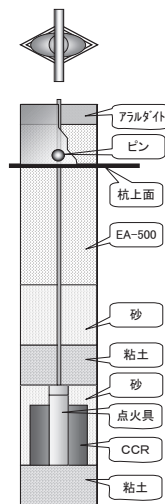


図-3 装薬方法説明図



図-4 装薬例

3.3 最適装薬量の試算

クラックの発生数と方向を装薬ホルダーで制御し、破断面を形成する破砕では、その装薬量は形成される破断面の大きさに関係すると考えられる。一般式を(1)に示す。

$$L \propto C \times S \quad (1)$$

ここで、Lは装薬量、Sは破断面積、Cは比例係数。同様の関係式は、鋼材、コンクリートの切断破壊に必要な装薬量を求める場合にも用いられている⁴⁾。

旭化成ケミカルズ株式会社で実施された同程度の形状と材質を用いた破砕実験結果⁵⁾からCを算出したところ、(2)式が得られた。

$$L = 0.056 \sim 0.083 \times S \quad (2)$$

ここで、Lはkg、Sはm²、Cはkg/m²。

(2)式に従い、菱形及び星形の装薬ホルダーに必要な装

薬量を試算した。試算には、 $C=0.083$ を用いた。

(1) 菱形

円柱軸に沿って発生する破断面積
 $0.2 \times 0.2 = 0.04 \text{ (m}^2\text{)}$
 水平仕切り板に沿って発生する破断面積
 (水平仕切り板の面積を除く)
 $(0.1 \times 0.1 \times 3.14) - (0.08^2 - 0.05^2) \times 3.14 = 0.019 \text{ (m}^2\text{)}$

$$L(\text{kg}) = 0.083 \times (0.04 + 0.019) = 4.90 \times 10^{-3} \text{ (kg)}$$

(2) 星形

菱形と同様に算出した。

$$L(\text{kg}) = 0.083 \times (0.08 + 0.019) = 8.22 \times 10^{-3} \text{ (kg)}$$

菱形は電気雷管での破砕実績があるので、電気雷管及び CCR で想定される装薬ホルダー内の初期圧力を推定し、CCR 装薬量試算結果の妥当性を検証した。

電気雷管及び CCR の生成ガスは何れも理想気体の状態方程式に従い、生成ガスは断熱膨張すると仮定すると、(3)、(4)式が適用できる。

$$P \times V = n \times R \times T \quad (3)$$

ここで、 P は圧力、 V は体積、 n は気体のモル数、 R は気体定数、 T は絶対温度である。

$$P \times V^\gamma = \text{const.} \quad (4)$$

ここで、 γ は比熱比である。
 これより、体積 V_1 の時の圧力 P_1 及び温度 T_1 と体積 V_2 の時の圧力 P_2 及び温度 T_2 には(5)、(6)式が成り立つ。

$$P_2 = P_1 \times \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^\gamma \quad (5)$$

$$T_2 = T_1 \times \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1} \quad (6)$$

試算結果を表-2に示す。なお、標準状態(298K、1atm)における生成ガス量は、電気雷管については爆轟特性計算プログラム KHT コード⁶⁾、CCR については燃焼特性計算プログラム NASA コード⁷⁾を使用した。結果は、電気雷管、CCR それぞれ、578 及び 850cm³であった。表-2の体積とは、菱形ホルダーの装薬室容積である。

表-2 電気雷管と CCR の生成ガス状態比較

生成ガスの状態	電気雷管	CCR
体積(cm ³)	15.5	15.5
圧力(atm)	125	150
絶対温度(K)	1002	864
比熱比	1.34	1.27

表-2によれば、ほぼ等しい圧力と温度が得られており、経験的手法により求められた CCR の装薬量は妥当なものであると考えられる。

3.4 破砕条件

破砕条件の一覧を表-3に示す。破砕条件は、装薬ホルダー毎の最適装薬量を検討すること、モデル供試体を砂中に埋設拘束することによる飛石の抑制効果と破砕への影響について検討することの2つを目的として決定した。実験は、平坦な砂場で実施した。

埋設拘束は、除去する杭頭部分の周辺地盤を掘削する前に破砕することを想定したものである。砂中埋設は、モデル供試体の上面が砂場と同一平面になるように行った。

装薬ホルダー毎の最適装薬量を検討する実験は、菱形については装薬量を3gと5g、星形については5gと11gとした。砂中埋設拘束実験は、装薬ホルダー毎の最適装薬量で実施した(後述の通り、菱形は5g、星形は11gが最適装薬量と決定された)。

表-3 破砕条件

実験番号	埋設条件	ホルダー形状	装薬量(g)
1	埋設なし	菱形	5
2			3
3		星形	11
4			5
5	砂中埋設	菱形	5
6		星形	11

3.5 計測方法

計測は、モデル供試体の破砕状況と破砕片の飛散状況に大別される。以下に計測項目とその方法について示す。

(1) モデル供試体の破砕状況

破砕することが出来たか、出来た場合、破砕片の形状を記録した。また、仕切り板より下部の損傷の有無を観察した。

高速度ビデオ(撮影速度 10,000 f/s)で破砕進展の時間変化を観測した。

(2) 破砕片の飛散状況

飛散した破砕片の方向と距離、重量を記録した。埋設拘束時にも記録し、その効果を検証した。

4. 実験結果及び考察

実験結果の一覧を表-4に示す。

菱形は5gで確実に破砕され、3gでは破砕出来ずに装薬ホルダー口元から生成ガスのみが漏れ出た。最適装薬量は、3から5gの範囲にあると考えられる。水平仕切

表-4 実験結果

実験 番号	埋設条件	ホルダー 形状	装薬量 (g)	実験 回数	結果	
					破砕数	破砕状況
1	埋設なし	菱形	5	5	5	・ 2個の破砕片が平均5m飛散。 ・ 水平仕切板より下部に亀裂認められず。
2			3	2	0	・ 破砕せず。
3		星形	11	3	3	・ 4個の破砕片が平均7m飛散。 ・ 水平仕切板より下部に亀裂認められず。
4			5	1	0	・ 破砕せず。
5	砂中埋設	菱形	5	1	1	・ 2個の破砕片が発生、飛散認められず。 ・ 水平仕切板より下部に亀裂認められず。
6		星形	11	1	1	・ 4個の破砕片が発生、飛散認められず。 ・ 水平仕切板より下部に亀裂認められず。

り板より上部が2片に分かれ、その破砕片は約5m飛散した。水平仕切板から下部に損傷は認められなかった。破砕片を再び組合せて上部から撮影した写真を図-6に示す。

星形は11gで確実に破砕され、5gでは破砕出来なかった。最適装薬量は、5から11gの範囲にあると考えられる。水平仕切板より上部が4片に分かれ、その破砕片は約7m飛散した。水平仕切板から下部に損傷は認められなかった。破砕片を再び組合せて上部から撮影した写真を図-7に示す。

砂中埋設をしたものは、菱形も星形も破砕状況は良好で、埋設拘束による影響は認められなかった。一方で、破砕片の飛散は全くなり、埋設拘束の効果が認められた。星形の破砕実験直後の状況写真を図-8に示す。

モデル供試体は、装薬量を調整することによりCCRでも破砕できることがわかった。その装薬量は(2)式で推算されるかそれよりも多くなる傾向が認められる。その原因は、CCR生成ガスの漏れと考えられ、高速度ビデオ撮影でも確認されている。填塞方法の改良により、装薬量及び飛散距離の削減が可能になると考えられる。

装薬ホルダー及び水平仕切板の有効性は、CCRでも検証された。埋設拘束の効果も期待通りだった。実施工においても埋設拘束を行うことにより、飛散物がない安全な施工が期待できる。



図-6 菱形の破砕片

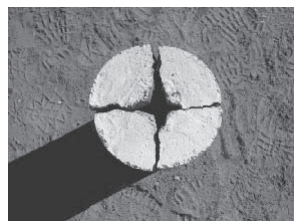


図-7 星形の破砕片

より、杭頭のクラック進展制御破砕が可能であることがモデル実験により確かめられた。筆者らは既に実大サイズでの実験にも着手しており、順調に進んでいる。早期の実用化を目指して今後も鋭意研究を進めていきたい。

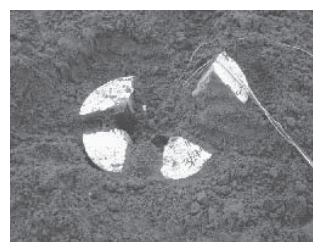


図-8 星形の破砕実験直後の状況

謝辞

本実験を実施するにあたり、椿五男氏[当時旭化成ジオテック株式会社]、カヤク・ジャパン株式会社の石崎洋一氏[当時旭化成ケミカルズ株式会社]には、多大なご協力を賜りました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1)例えば、川崎浩司：施工，彰国社，No.281，1989，pp.38-41
- 2)中村裕一，加藤政利，山浦一郎，斉藤義待，小川直基：土木学会第8回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集，2006，pp209-212
- 3)例えば、火薬学会発破専門部会編：現場技術者のための発破工学ハンドブック，共立出版，2001，pp332-336
- 4)中原正二：火薬学概論，産業図書，1983，pp234-235
- 5)旭化成工業株式会社 雷管工場 社内資料
- 6)例えば、火薬学会編：エネルギー物質ハンドブック第2版，共立出版，2010，pp147-151
- 7)S.Gordon, B.J. McBride: Computer Program for Calculations of Complex Equilibrium Compositions, Rocket Performances, Incident and Reflected Shocks, and Chapman-Jouguet Detonations, NASA, Tech Rep. 1971,SP-273

5. まとめ

コンクリート破砕薬と装薬ホルダーを用いることに