

ワイヤソー切断工法と制御爆破工法による厚壁RC構造物の解体試験

Dismantling Test of Reinforced Concrete Thick Wall with Wire Sawing Method and Controlled Blasting Method

原 田 実 親 本 俊 憲 末 吉 隆 信
佐 藤 俊 文¹⁾ 松 本 敏 雄²⁾ 石 澤 昭 浩³⁾

要 約

本研究は、大規模の厚壁の鉄筋コンクリート構造物を所定の大きさにブロック状の解体あるいは破砕状の解体ができるような各種解体工法を選定し、その適用性及び有効性を明らかにすることを目的にしている。本試験では、太径鉄筋が最も複雑かつ多量で高密度に配筋された鉄筋コンクリート構造物を対象に、ブロック状に解体するワイヤソー切断工法と、破砕状に解体する御爆破工法の適用可否を検討するために、基本的な解体特性を求めた。この結果、ワイヤソー切断工法は、高鉄筋比の鉄筋コンクリート構造物でもブロック状解体に十分適用可能であることが確認された。また、制御爆破工法は、適切な装薬方法、装薬量にすることにより、残存部に損傷を与えずに計画通り解体範囲を安全・迅速・確実に解体撤去することができることが実証された。

目 次

- I. はじめに
- II. 解体試験の概要
- III. ワイヤソー切断工法の特徴
- IV. 制御爆破工法の特徴
- V. 両工法の施工時の留意点
- VI. むすび

I. はじめに

近年、土木構造物、地下構造物及び原子力発電施設のような大規模の鉄筋コンクリート構造物の耐震補強、改修・リニューアル工事等に伴って、全面解体あるいは部分解体が安全でかつ速やかに施工ができる工法の開発と適用性の提示が要請されている。これらの鉄筋コンクリート構造物は、一般的に太径鉄筋が大量に用いられており、堅固であるため解体が困難な構造物でもある。

本試験は全面解体あるいは部分解体に有効と思われるワイヤソー切断工法と制御爆破工法を用いて、厚壁鉄筋コンクリート構造物の鉄筋が最も複雑かつ多量に配筋されている部位を合理的に解体ができるかを明らかにするため、実物大試験体による解体試験を行ったものである。この結果、両工法とも厚壁鉄筋コンクリート構造物でも所定の形状寸法で、厚壁の残存部を健全に解体ができることが実証された。

II. 解体試験の概要

1. 解体試験体の形状寸法及び解体試験範囲

本試験で使用した解体試験体は Photo 1, Fig.1 に示すように高さ 5m×幅 8.8m×厚さ 2m の鉄筋コンクリート構造物（以下、厚壁 RC 構造物）である。鉄筋は D 5 1 太径鉄筋が 300mm 間隔で、縦・横筋共に内側 3 段・外側 3 段に配筋されている。更に配管（約 0.5m φ, 約 1.2m φ 等）の周辺には D 5 1 の斜め補強筋が配置されている。この試験体の鉄筋比は、コンクリート断面積に対する鉄筋の断面積比で表示すると 4 % 以上となり、一般の RC 構造物と比較して高鉄筋比となっている。

なお、解体試験時のコンクリート強度は、圧縮強度が 49 N/mm² であった。

ワイヤソー切断工法と制御爆破工法の解体試験範囲は、Fig. 1 に示すように厚壁 RC 構造物の壁の内側から 1 m を対象とし、8 ブロックに分けて試験を実施した。

ワイヤソー切断工法では、試験体の上部エリアの鋼管を含む領域の 3 エリアを対象に、制御爆破工法（ブレーカ破砕と併用）では鋼管がない中央部の 3 エリアを対象にした。なお、汎用解体工法との比較のために、大型ブレーカによる単独破砕工法を採用し、この工法では下部の 2 エリアで実施した。

2. 適用工法の特徴

既往の各種解体工法の特徴を Table 1 に示す。このうち本試験でブロック状の解体用としてワイヤソー切断工法を、破砕状の解体用として制御爆破工法を適用した。この両工法の機能は次のとおりである。

(1) ワイヤソー切断工法

ワイヤソーは、鋼製管基台にダイヤモンド砥石状粒子を包含する

- 1) [建] エンジニアリング本部
- 2) [建] 機械部
- 3) [A/E] 原子力設計部

キーワード：鉄筋コンクリート構造物、解体工法
ワイヤソー、切断、爆破、制御、破砕

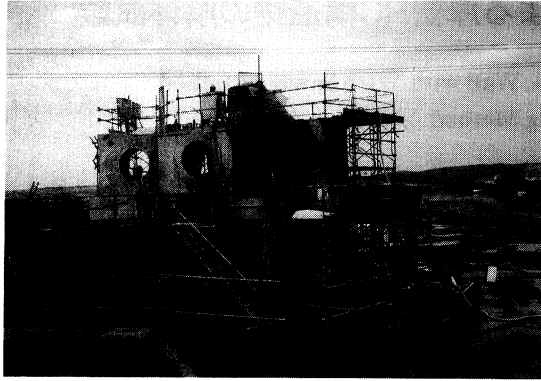


Photo 1 解体試験体の外景

(External View of Experimental Structure)

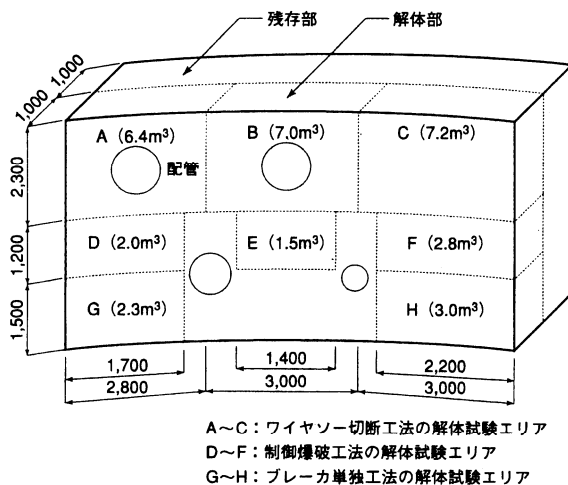


Fig. 1 各解体工法の解体試験エリア

(Area of Demolition of each Dismantling Method)

結合材の環を焼結させたダイヤモンドビーズ（直径約 10mmφ）を鋼製ワイヤに固着（1m当り約 40 個）させたワイヤ鋸である。

R/C 構造物の切削は、ダイヤモンドビーズの突き出たダイヤモンド粒子で摩擦・研削・切削によって行われる。この切削作用では、切削が進むに連れてビーズのボンドに埋め込まれたダイヤモンド粒子が歯こぼれる。続いてボンドが消耗することにより、ボンド内の新たなダイヤモンド粒子が現れて、このダイヤモンド粒子によって切削は継続することができる。

ワイヤソー切断工法は、切断対象物にダイヤモンド・ワイヤソー（ワイヤ鋸）を巻き付け、その両端をスリーブで接続して、駆動でエンドレスに回転させて鉄筋コンクリートを切断するものである。これは自動車道路のアスファルトコンクリート路盤の切断に用いられているダイヤモンド・ディスクカッタ切断工法に比べて、解体対象物の大きさに制約されないのが大きな特徴である。

また、ガイドブリーの使用により、任意の角度及び離れた場所から切断作業も可能であり、狭い場所、危険な場所、水中等の作業に適しており、橋脚部等のマッシブなコンクリートの切断に用いられている。

(2) 制御爆破工法

制御爆破工法は、低爆速（2,500m/s 以下）のアーバナイト爆薬

Table 1 各種解体工事に用機器の主要装置・器具と特徴
(Instruments for Demolition and Characteristics)

解体工事に用機器	主要装置・器具等、関連設備機器類	長 所	短 所	適 用
ハンドブレイカ	ロッド（チゼル、ノミ）ハンマ、コンプレッサ、発電機	①比較的確切いが容易 ②破砕範囲を自由に移動	①作業員への騒音振動が大きい ②破砕能力が小さい	①転石 ②鉄筋コンクリート
大型ブレイカ	ロッド、ハンマ、油圧ショベル（アタッチメント装着）	①比較的確切いが容易 ②破砕力が大	①騒音、振動、粉じん防止対策が必要	①大断面部材 ②基礎、地中はり ③転石、岩盤
圧 碎 機	大型万力状フレーム、油圧ショベル（アタッチメント装着）、散水設備	①振動・騒音が少ない ②作業効率良い	①粉じんの発生がある ②金属の切断ができない機種もある	①低騒音を要求される場所 ②市街地ビルの柱・梁・壁・床等
火 薬 類（制御爆破）	爆薬、雷管、発破器、穿孔機	①破砕対象物の強度に左右されない ②最適装薬設計により破壊大	①騒音、振動、粉じん、飛散石があり、防塵対策が必要	①岩盤 ②大規模の鉄筋コンクリート
油圧式孔拡張破砕器	拡大ヘッド（ウエッジ、クサビ）、液圧チューブ等）、油圧供給装置、液圧供給装置、穿孔機	①機械装置類は大型ショベルに装着し機動性がある ②ハンドタイプがある	①穿孔時の騒音はある ②鉄筋コンクリートでは能力低下 ③ウレタンゴム、液圧チューブは消耗品	①マスコンクリート ②岩盤
ダイヤモンド・コアビット（穿孔機）	コアビット機、冷却水供給装置	①無振動・無粉じん ②機器がコンパクト	①ビット冷却水が必要 ②コストが高い	①厚さ 3～4 m の鉄筋コンクリートでも適用可能
ダイヤモンド・ディスクカッタ	カッタ機、ブレード	①振動・粉じんがない ②作業性がよく、操作切断が容易 ③部材の運搬が容易 ④ガラの発生がない	①切断時に水、低温度の液体・気体が必要 ②切断時の連続音が大きい	①切断深さ：一般的 40～50cm 程度、最大 80cm
ダイヤモンド・ワイヤソー	ワイヤソー駆動機、移動速度調整装置、ワイヤ速度調整装置、緊張緩和調節等	①複雑な形状、狭い場所、マッシブな躯体等の切断に適している	①ワイヤの配置方法に検討を要する	①部分切断 ②鉄筋コンクリート ③水中構造物の切断
ウォータージェット	超高压発生装置、研磨材供給装置、超高压噴流水ジェット・ノズル、ノズル移動装置、超高压ホース、	①自由な切断線が得られる ②切断速度が大 ③研磨材により鉄筋も切断可能 ④切断長さ大、周辺応力・熱応力なし	①ジェット騒音の防音対策が必要 ②粉じん・ミストの飛散対策が必要 ③切断スラリの回収が必要の場合は要対策	①コンクリート ②鉄筋コンクリート ③鋼材 ④岩石など多方面に適用が可

□：本解体試験で適用した解体工事に用機器

を装薬孔内に空隙をもたせて装填し、この空隙を緩衝材として爆破時の衝撃力を弱めたものであり、爆破初期に発生する衝撃圧力によってコンクリートをひび割れさせ、10μs 後にガス圧力によってひび割れ破壊を拡大させる発破工法である。

この制御爆破による解体工法はマッシブな R/C 構造物で被解体部を残す場合、残存部を損傷させずに R/C 構造物を所定の範囲で解体撤去することができる工法である。

Ⅲ. ワイヤソー切断工法の特徴

1. 切断用装置

ワイヤソー切断工法で使用する主な装置は、ダイヤモンド・ワイヤソー（ワイヤ鋸）を通すためのコアボーリング用ドリル、ワイヤソー駆動装置・油圧ユニット、冷却水供給装置などである。

コアボーリングには油圧式コアドリル 255mmφと電動式コアドリル 110mmφを使用した。また、ワイヤソーは鉄筋コンクリート切断用のダイヤモンド・ワイヤソーを使用した。

2. 試験項目

本試験におけるコアボーリングとワイヤソーの切断方法、厚壁 R/C 構造物の切断面条件などを Table 2 に示す。

本試験では、鉄筋比の大きい鋼管周辺の試験体各部をワイヤソーを用いてブロック状に切断解体する試験を行い、切断速度や解体

Table 2 ワイヤソー切断の試験条件
(Experimental Condition of Wire Sawing)

解体 ブロック	ワイヤソー切断						コアボーリング (コア外径mmφ)		
	側面		底面		背面		正面	背面	背面
	張力 掛方	鉄筋比 (%)	張力 掛方	鉄筋比 (%)	張力 掛方	鉄筋比 (%)	・ 水平	・ 垂直	・ 水平
A	引切	4.2	引切	5.8	引切	2.3	255	255	110
B	—	—	押し切	6.4	押し切	2.5	—	—	—
C	引切	5.8	引切	2.8	引切	0.1	255	255	—

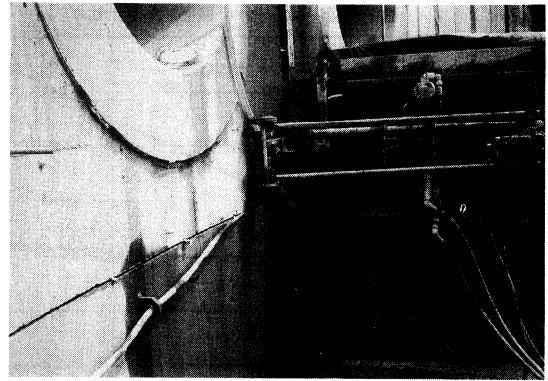


Photo 2 ワイヤソーによる切断状況
(Cutting Situation by Wire Sawing)

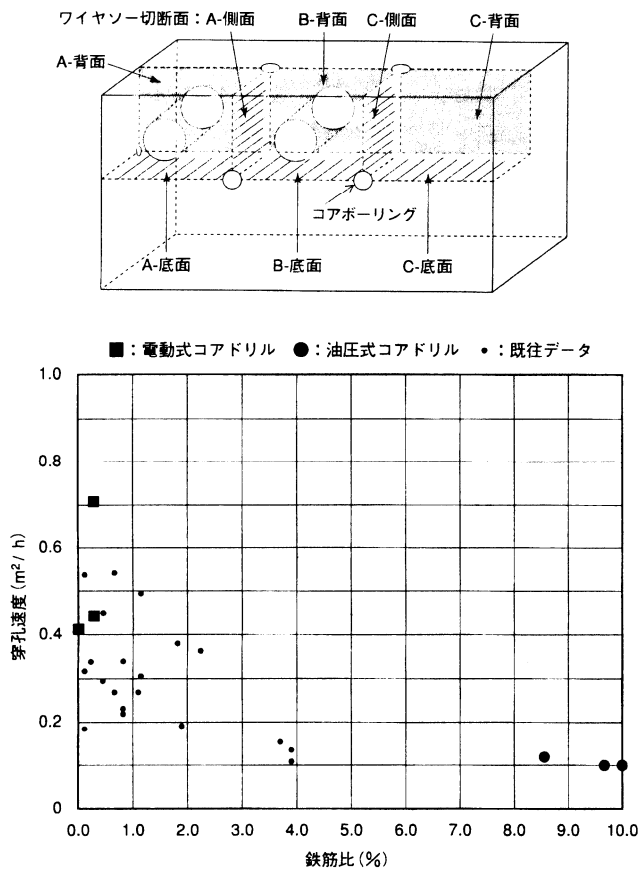


Fig. 2 コアボーリングにおける鉄筋比と穿孔速度の関係
(Relationship between Steel Ratio and
Boring Speed in Core Boring)

工数等のデータを取得した。ここでは、鉄筋比及び切断方法（引き切り5面、押し切り2面、背面から底面への引き切り連続切断1面）の違いによる切断速度への影響等を把握した。

試験で取得したデータは、解体効率、穿孔・切断工具の損耗量、及び二次廃棄物発生量等である。

解体効率としては、コアボーリング穿孔速度、ワイヤソー切断速度、装置据付・撤去・メンテナンス・解体廃棄物取扱い時間及び工数である。穿孔・切断工具の損耗量としては、コアドリルのチップ摩耗量とワイヤソーのダイヤモンドピース摩耗量である。また、

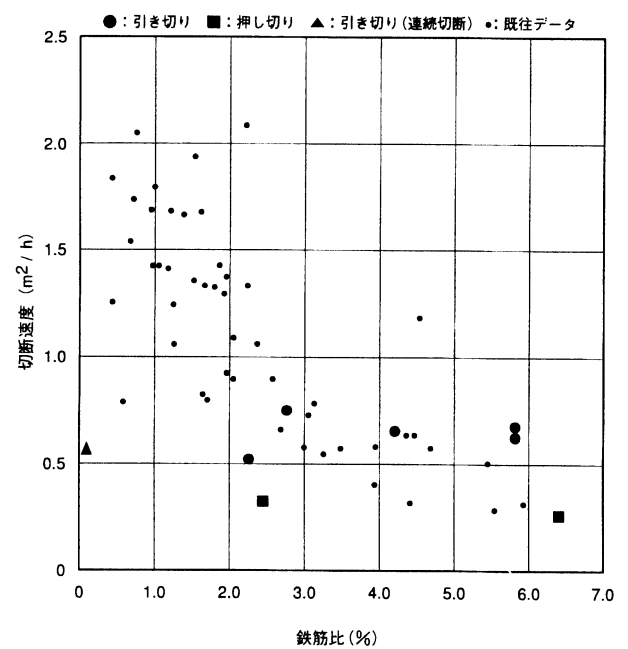


Fig. 3 ワイヤソー切断における鉄筋比と切断速度の関係
(Relationship between Steel Ratio and
Cutting Speed in Wire Sawing)

二次廃棄物発生量としては、コアボーリングの穿孔溝幅及びワイヤソーの切断溝幅、冷却水廃液中の切削スラッジの発生量と性状についてである。

3. 試験結果

(1) 切断方法と切断速度の関係

コアボーリングにおける鉄筋比と穿孔速度の関係を Fig. 2 に示す。3段筋のある部分での穿孔速度は油圧式コアドリルが約 $0.1 \text{ m}^2/\text{h}$ 、無筋部分では電動式コアドリルが約 $0.4 \text{ m}^2/\text{h}$ となった。ワイヤソーによる切断状況の例を Photo 2 に示す。ワイヤソー切断における鉄筋比と切断速度の関係を Fig. 3 に示す。この結果、鉄筋比が2～6%の範囲では実切断速度が $0.51 \sim 0.76 \text{ m}^2/\text{h}$ であり、引き切りと押し切りによる切断速度の比は、2 : 1 となった。

このうちワイヤソーを引き切りとし、ワイヤソーの循環速度を 17 m/s 、張力を 50 kgf における鉄筋コンクリートの切断速度は鉄筋

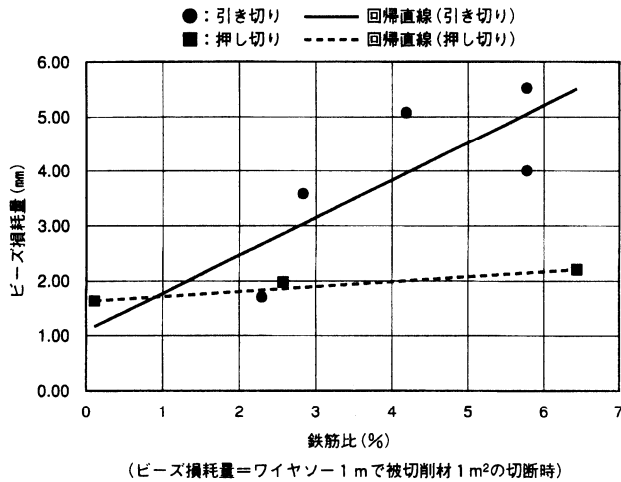


Fig. 4 鉄筋比とダイヤモンドビーズ損耗量の関係
(Relationship between Steel Ratio and Diamond bead Consumption size)

比 2.3～5.8%で約 0.6m²/h であった。また、ワイヤソー速度 17m/s 一定で張力をパラメータ (30～70kgf) とした場合、張力が大きいほど切断速度が約 0.7m²/h と増加した。一方、張力 50kgf 一定でワイヤソーの循環速度を 17～26m/s に変化させた場合、20m/s 付近で切断速度が最大 0.9m²/h となった。

(2) コアドリルチップ、ダイヤモンドビーズの損耗量

コアボーリングにおけるコアドリルチップの損耗量は、鉄筋比 8.6～10.0%の鉄筋部をコアドリル 255mmφ で穿孔した場合は 3.9～7.3mm/m であり、コンクリート部材をコアドリル 110mmφ、255mmφ で穿孔した場合は 0.3～0.7mm/m であった。この結果、コアドリルチップの損耗量は鉄筋比に大きく関係していることが分かった。

一方、ダイヤモンド・ワイヤソーにおけるダイヤモンドビーズの損耗量は、Fig.4 に示すようにワイヤソー単位長さで単位面積を切断した時、7～5.5mm/m/m²となった。このダイヤモンドビーズの損耗量は、RC構造物の鉄筋比が大きい場合や切断速度を大きくした場合に著しく損耗する傾向にある。

(3) 二次廃棄物発生量

コアボーリングにおける二次廃棄物発生量は、穿孔径 255mmφ ではコア穿孔長さ当り 7.5kg/m、穿孔径 110mmφ では 3.9kg/m になった。

ワイヤソー切断における二次廃棄物発生量は、切断面当たり 24.1kg/m²であった。これより、例えば高さ 2m×幅 3m×厚さ 1m、重量 14.4t の切断ブロックの場合は、ブロックの 3面を切り出す時の二次廃棄物発生量は 288.5kg となり、1ブロック切断時に 2.0%程度が二次廃棄物となって発生することになる。

冷却水使用量はコアドリルが 3.6～5.2 l/min、ワイヤソー切断時が 17～35 l/min となった。

IV. 制御爆破工法の特徴

1. 試験手順

所定の解体撤去する範囲の試験体エリアを制御爆破によりひび割れ破砕 (一次破砕) させ、その後に大型ブレーカでコンクリートを破砕 (二次破砕) し、ガス切断機で鉄筋を切断して、厚壁 RC 構造

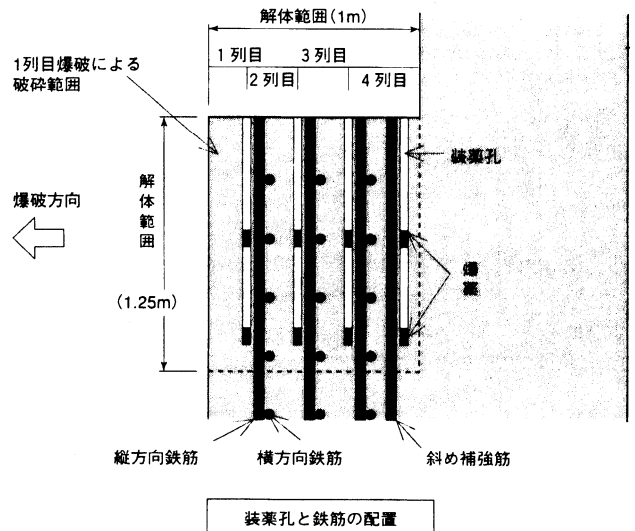


Fig. 5 制御爆破工法による解体設計
(Demolition Plan by Controlled Blasting)

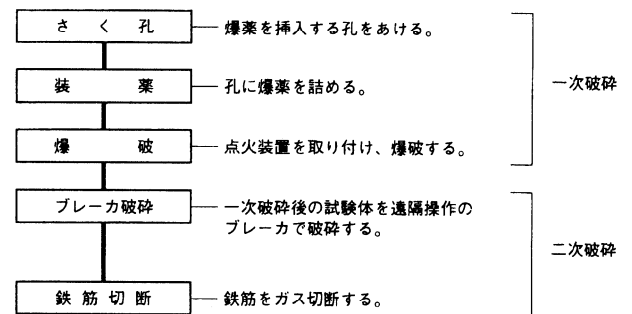


Fig. 6 制御爆破工法による解体手順
(Demolition Procedure by Controlled Blasting)

物を解体する工法を適用した。つまり、制御爆破工法とブレーカ破砕を組み合わせて解体する試験では、さく孔した孔に爆薬を装薬して爆破した後、大型の遠隔操作式ブレーカによる破砕と鉄筋のガス切断を交互に行い、試験体の所定のエリアを解体したものである。

試験体の配筋が複雑で多量であることから、解体設計を Fig. 5 に示すように 250mm ずつ 4 列に分割して解体する方法とした。また、具体的な手順は Fig. 6 に示すように、すべてのさく孔作業が終了した後、各ブロック毎に 1 列目の装薬、爆破、ブレーカ破砕を行い、続いて 2 列目、3 列目、4 列目を同様な手順を繰り返しながら解体した。

2. 試験項目及び測定方法

(1) 大量鉄筋コンクリートにおける制御爆破の爆破係数 C と破砕効果の関係

本試験の装薬設計は、次の式 (I) を用いて諸条件を設定し、これより破砕状況の関係を求めた。

$$L = C \cdot W \cdot D \cdot H \cdot \alpha \quad \dots \dots \dots (I)$$

装薬設計値は、

L : 1 孔当たりの装薬量 (0.13～0.47kg)

C : 爆破係数 (kg/m³)

W : 最小抵抗線 (0.18～0.30m)

D : 装薬孔の間隔 (0.29～0.43m)

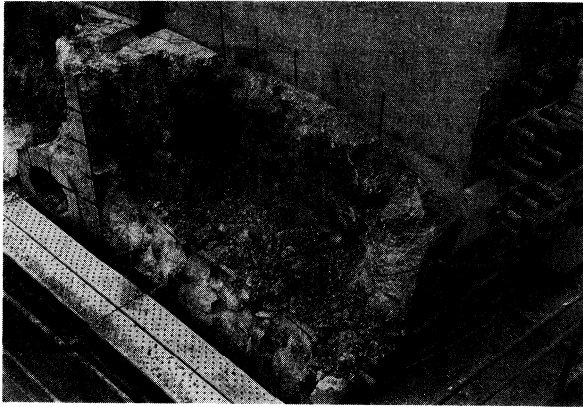


Photo 3 制御爆破による破砕状況
(Crashing Situation by Controlled Blasting)

H：ベンチ爆破の高さ(1.07～1.11m)

α ：補正係数（背面を破砕させず、ベンチ発破の高さの2倍を破砕する場合=1.3)

などの範囲とした。

本試験における破砕効果の評価は、各解体試験エリアにおいて1～4列のベンチ爆破（1列当りには5孔の装填孔、垂直装填）としたため、各列毎の破砕効果を詳細に記録した。

(2) 破壊状況と残存構造物への影響（破砕領域の制御）の関係
制御爆破による破壊挙動及び破壊状況の計測・記録は、コンクリート面に30cmのメッシュを線引きし、この変形を高感度画像カメラで制御爆破による破壊状況、飛石状況、（破砕片の大きさ、飛散距離・分布など）等を撮影した。

制御爆破によるバックブレイク（残存部へのひび割れ）の発生の判定は、残存部の破砕面を目視観測するとともに、残存部に取り付けた衝撃加速度計で衝撃力を計測した。また、残存部の壁面（解体境界面）の凹凸形状については、超音波水距離計（発信周波数5MHz、水ジェット直径約1mm、給水圧2～5kg/cm²）を用いて計測した。

(3) 制御爆破の一次破砕とブレイカ（遠隔操作運転）による二次破砕の作業データの取得・分析

制御爆破による解体効率並びにその算定の前提条件を分析・整理するため、制御爆破の破砕作業における作業データ（時間及び工数）を計測した。

(4) 環境特性等の計測・分析

制御爆破における環境特性については、衝撃加速度計、普通騒音計、低周波音圧計及び公害振動計などを用いて、地盤振動、環境騒音・低周波音及び環境振動等を計測した。

3. 試験結果

(1) 爆破条件と破砕効果の関係

制御爆破による破砕状況の例をPhoto 3に示す。Fig. 7に装薬孔間隔Dと最小抵抗線Wの関係と、Fig. 8に鉄筋量と爆破係数Cの関係を示す。この結果、破砕コンクリートの押し出しは、鉄筋の配筋間隔に大きく関係し、間隔が大きいほど押し出しが多くあった。装薬孔の間隔Dと最小抵抗線Wの関係は、 $D = (1.0 \sim 2.5)W$ の範囲であり、平均値 $D = 1.5W$ であった。また、制御爆破の目的に合った

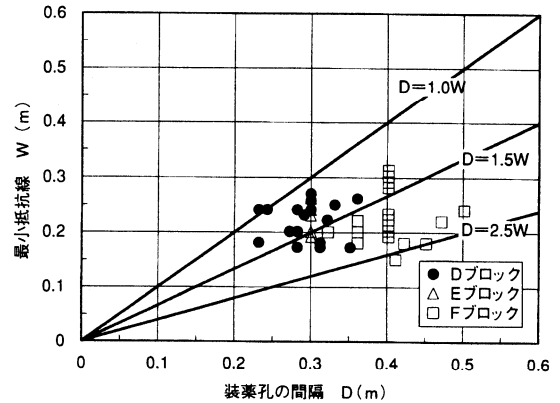


Fig. 7 制御爆破節系の装薬孔間隔と最小抵抗線の関係
(Relationship between Borehole Spacing and Least Resistance)

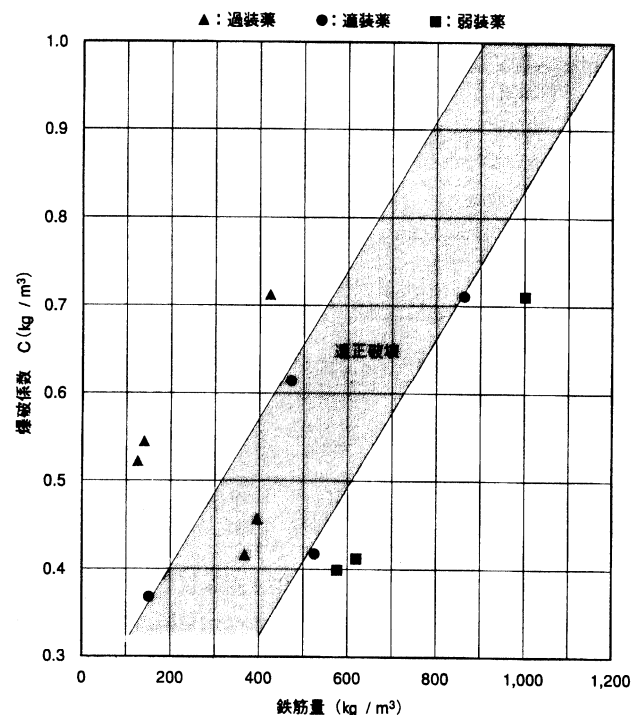


Fig. 8 制御爆破における鉄筋量と爆破係数の関係
(Relationship between Steel Weight and Blasting Coefficient)

適正破砕となる爆破係数Cは、0.4～0.6（鉄筋量400～500kg/m³）であった。

(2) 残存構造物への影響評価

制御爆破による残存部への影響は、残存構造物（コンクリート圧縮試験結果の引張破壊ひずみ $\epsilon_t = 1.40 \times 10^{-4}$ ）に生じる衝撃加速度がFig. 9に示すように最大4,500G（周波数8,000Hz）、変位が 1.78×10^{-6} cm、ひずみ ϵ が 1.42×10^{-7} となり、コンクリートの引張破壊ひずみに対して約1/1,000程度であり、背面残存部にはバックブレイク（残存部へのひび割れ）が生じないことが判断された。これは目視観測結果と一致した。

また、制御爆破及びブレイカによる残存部の壁面整形状態は、概ね5～6cmの凹凸が計測された。

Table 3 2工法の施工時の留意点
(Demolition in Attention of Two Methods)

	解体部材形状・取扱い	作業性	解体効率 (工数・工期)	環境特性	安全・養生等対策
ワイヤソー切断工法	成形切断ブロック撤去撤出時に重量の検討が必要。	ワイヤソーの据付方法、駆動調整が必要。	鉄筋比大でも切断可。撤去ブロック形状に左右。	低騒音低振動型。切断スラリ廃液有。	ワイヤソーの破断対策が必要。
制御爆破工法	コンクリート破砕片と切断鉄筋の分離回収が必要。	爆薬装填孔の穿孔用機械の性能向上が必要。	太径多量配筋でも段階発破で工期短縮・大量解体が可能。	騒音振動規制値と対比させて伝播対策が必要。	火薬取り扱い・破砕片飛散防止マット等の設置。

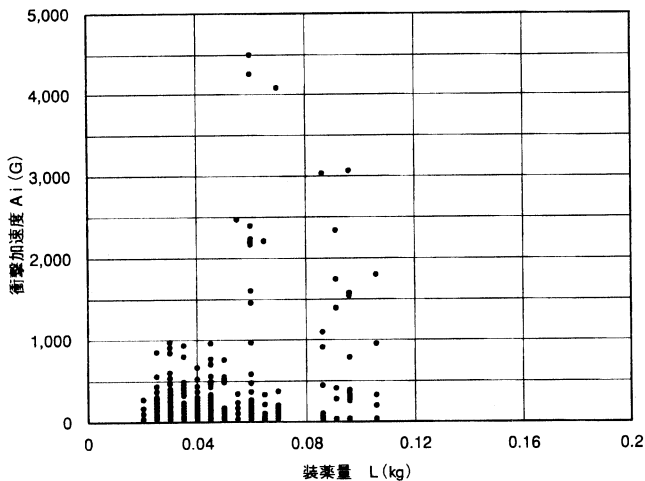


Fig. 9 装薬量と衝撃加速度の関係

(Relationship between Charging Weight and Shock Acceleration)

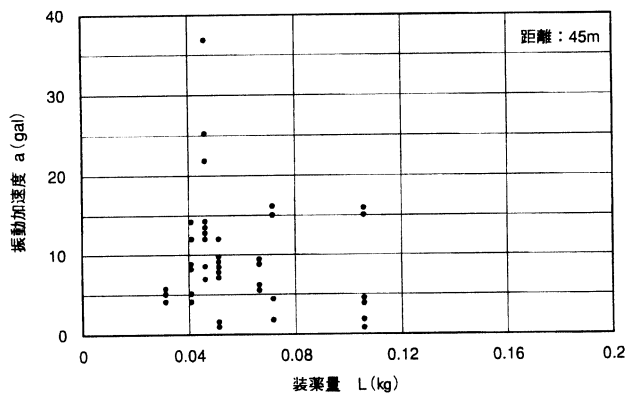


Fig. 10 装薬量と地盤振動の関係

(Relationship between Charging Weight and Ground Vibration)

(3) 破砕能力

本試験における制御爆破工法の破砕能力は、一次破砕＝さく孔(20孔)・装薬・爆破等及び二次破砕＝ブレーカ破砕・鉄筋切断等の一連の作業を含めた場合、単位時間当たりの破砕能力が概ね $0.56\text{m}^3/\text{h}$ となった。この値は、解体対象の厚壁RC構造物が太径鉄筋で複雑・大量に配筋されていることから、慎重に爆破を行う計画として解体試験エリアにおいて1列目～4列目のベンチ爆破を行い、各列目毎に同様な作業を繰り返したためによるもので、爆破工法による時間短縮の特徴が生かされなかった。

したがって、今後の爆破計画では段階発破により瞬時に所定のコンクリート部分を一次破砕し、ブレーカ等で破砕片を撤去するとともにガス溶断機で鉄筋を切断する解体工法にする必要がある。

(4) 環境特性

爆破による地盤振動は、Fig.10 に距離 45m 付近の振動加速度と装薬量の関係で示した。これより遠方約 150m 地点にある既設施設周辺では $0.1\sim 3.0\text{gal}$ となり、機器類の振動管理値 $15\sim 40\text{gal}$ 以下であった。

一方、住居環境については、距離 50m 地点の騒音レベルが $75\sim 89\text{dB}$ 、振動レベルが $44\sim 79\text{dB}$ であり、特定建設作業の騒音規制値 85dB と振動規制値 75dB にほぼ許容できる値であった。

V. 両工法の施工時の留意点

ワイヤソー切断工法と制御爆破工法を実工事に適用する場合の施工時における留意点はTable 3 に示すとおりである。両工法の特徴を十分に生かすためには、解体部材の形状・取り扱い方、作業性・解体効率(工数、工期)の向上、環境特性・安全・養生対策等を検討する必要がある。

例えば、工期短縮を対象にした場合では、両工法とも所要解体範囲の設定、並行作業の統合化を行うことにより作業時間を大幅に短縮することができるものである。

VI. むすび

厚壁鉄筋コンクリート構造物試験体のワイヤソー切断工法と制御爆破工法による解体試験を実施した結果、太径鉄筋が高密度に配筋された鉄筋コンクリート構造物に対して解体計画の範囲内でブロック状ないし破砕状に区分解体することができた。

今後は、今回適用した両工法をマッシュアップな鉄筋コンクリート構造物の合理的な解体撤去工法として適用化を図っていく予定である。

最後に、本試験は東京電力(株)のご指導のもとに社内の協力体制で実施されたことを記し、関係各位に対して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 片岡寛人、内山則之、長谷川英規、原田 実、松本敏雄、門馬隆弘、石澤昭浩；ワイヤソー工法によるRC CV実物大試験体の解体試験、日本原子力学会1997年秋の年会、1997年10月。
- 2) 片岡寛人、長谷川英規、原田 実、佐藤俊文、親本俊憲、門馬隆弘、石澤昭浩；制御爆破工法によるRC CV実物大試験体の解体試験、日本原子力学会1998年春の年会、1998年3月。
- 3) 原田 実、田中益弘、石田雅利、広野 進；制御爆破による鉄筋コンクリート構造物解体の研究(その3)、鹿島技術研究所年報、第44号、1996年12月。