

鉄筋コンクリート構造物の部分解体のための制御放電衝撃破砕技術の開発

藤掛一典*

*防衛大学校システム工学群建設環境工学科
(〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

1. はじめに

既存の鉄筋コンクリート(RC)構造物に対して、(1) 大空間を造るために壁を撤去したい、(2) 機械や電気・電子設備等を設置するために壁や床の一部を撤去したい、あるいは(3) 補修・補強のために部材の一部を撤去したい等といった、その構造物自体の付加価値を高めるための部分解体¹⁾のニーズが増えている。このような部分解体では、(1) 決められた部分のみを速やかに撤去すること、(2) 仕上げ面を滑らかにすること、(3) 部分解体による周辺部材への影響を最小限に抑えること、あるいは(4) 騒音・振動および粉塵を抑制すること、等が求められることになる^{2),3)}。

このような RC 構造物の部分解体工事への発破工法の適用は、搬入資材が少なく作業時間が短くて済む等の利点を有しているものの、火薬類取締法による規制を受けることや近隣住民の理解を得ることが困難である等欠点も多い。しかしながら、新たに開発された放電衝撃破砕工法では、発破工法の欠点を改善して、安全かつ短時間で RC 構造物の部分解体を可能にすることが期待されている。放電衝撃破砕工法では、図-1 に示すように放電衝撃破砕装置内のコンデンサに一時的に充電した高電圧エネルギーを極めて短時間に放電することによって放電カートリッジ内の特殊な液体を急激に気化させることにより、爆薬の爆発に似た大きな破砕力を発生させるものである。

鉄筋コンクリート構造物の部分解体への放電衝撃破砕工法の適用を考えた場合、このような要求事項に応えるためには、放電衝撃破砕により鉄筋コンクリート部材中に入る亀裂の進展方向を任意に制御できる放電破砕技術（亀裂制御破砕技術）を確立する必要があると考える。例えば、トンネル工事においては、余掘りを少なくして滑らかなトンネル仕上げ面を得るための発破掘削用のスムーズブラスティング工法が開発されている⁴⁾。また、少量の爆薬を利用した亀裂制御による部分解体技術の開発も行われている⁵⁾。しかしながら、放電衝撃破砕工法は、これまでの解体工法に比較して新しい工法であり、亀裂制御の技術がほとんど確立されていないのが現状である。

そこで本研究では、主に放電衝撃破砕工法によりコンクリート版部材に入る亀裂の進展方向を任意に制御できる亀裂制御破砕技術を確立することを目的として検討することにした。

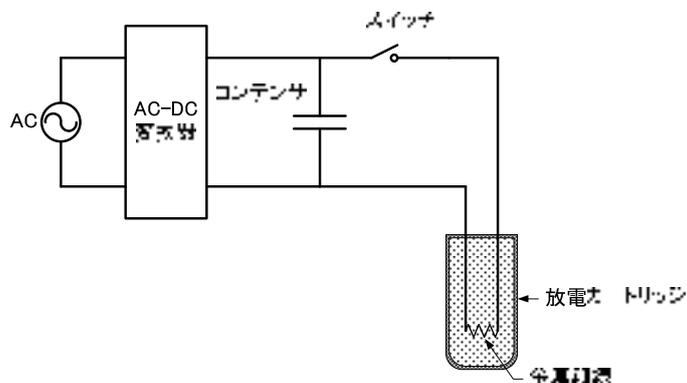


図-1 放電衝撃破砕装置の原理

2. 放電衝撃圧力および爆薬圧力の測定

放電衝撃破砕工法を用いて鉄筋コンクリート構造物を効率的に解体するためには、放電衝撃の威力とその破砕効果を知ることが重要であると考えられる。そのためには、まず、放電衝撃破砕により放電カートリッジ部分で発生する圧力を調べる必要がある。

ここでは、内部にコンクリートを充填した円筒鋼管（鋼管コンクリート試験体）に、放電カートリッジを設置して、放電衝撃破砕させ、起爆により生じる円筒鋼管の変形から、放電衝撃により発生する圧力を推定することを試みることにした。また、その際、タンピング材料の種類やカートリッジ容量の大きさが発生する圧力に及ぼす影響を調べることにした。

2.1 鋼管コンクリート試験体

本試験で使用する鋼管コンクリート試験体は、図-2 に示すように外径 216.3mm、肉厚 4.5mm および高さ 400mm の寸法を有する鋼管に、コンクリートを充填して作製した。コンクリートの一軸圧縮強度は、 32.0N/mm^2 であった。なお、鋼管には一般構造用炭素鋼鋼管（STK400）を用いた。鋼管の降伏強度および引張強度は、それぞれ 436N/mm^2 と 456N/mm^2 であった。

放電衝撃破砕試験では、試験体の中央部の削孔内に放電カートリッジを設置する（カートリッジ長の中央が鋼管の中央に位置する深さ）とともに各種タンピング材料により閉塞した。また、鋼管側面に大電流下の測定においてもノイズ防止効果をもつシールド箔ひずみゲージ（KFS）および汎用ひずみゲージ（KFG）（ともに共和電業製）を計 5 枚配置して、円周方向ひずみを計測して間接的に放電衝撃によって発生する圧力を計測することを試みた。

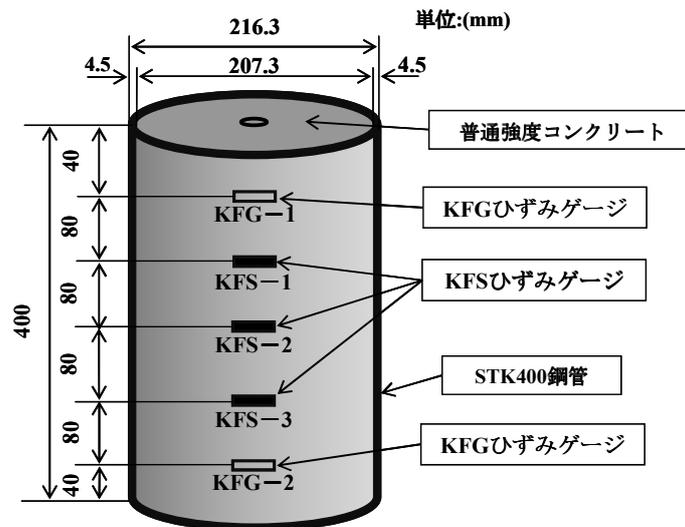


図-2 鋼管コンクリート試験体

2.2 放電衝撃破砕による発生圧力の推定方法

図-3 に示すように、放電衝撃破砕時に削孔径 d_c を有する放電カートリッジ設置部分の孔壁に作用する圧力を p_c とする。この作用圧力が 45° の応力伝達分布により鋼管内壁に作用すると仮定すると、鋼管内壁に作用する圧力 p_s は次式で与えることができる。

$$p_s = \frac{d_c L_c p_c}{D_s (D_s - d_c + L_c)} \quad (1)$$

ここで、 D_s : 鋼管の内径、 d_c : カートリッジを挿入する削孔直径、 L_c : カートリッジ長さである。

また、鋼管内壁に作用すると圧力 p_s と鋼管の円周方向に発生する応力 σ_s の間には、力の釣り合いより次式が成り立つ。

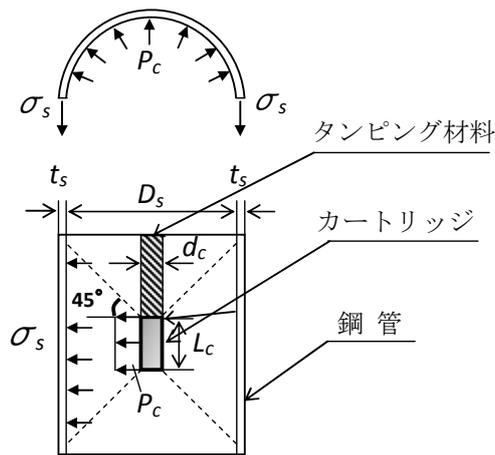


図-3 衝撃圧力の推定方法

$$p_s = \frac{2\sigma_s t_s}{D_s} \quad (2)$$

ここで、 σ_s ：鋼管の円周方向に作用する応力、 t_s ：鋼管の肉厚である。

したがって、式(1)および式(2)から、鋼管の円周方向の応力 σ_s が既知であれば、放電カートリッジ設置部分の孔壁に作用する圧力 p_c は、次式で計算できる。

$$p_c = \frac{2\sigma_s t_s (D_s - d_c + L_c)}{d_c L_c} \quad (3)$$

ここで、鋼管の円周方向に作用する応力は、鋼管側壁に貼付したひずみの計測値から得られる最大ひずみ(ε_{max})およびひずみ速度($\dot{\varepsilon}$)を用いて、図-4に示す計算フローに従い計算できる。

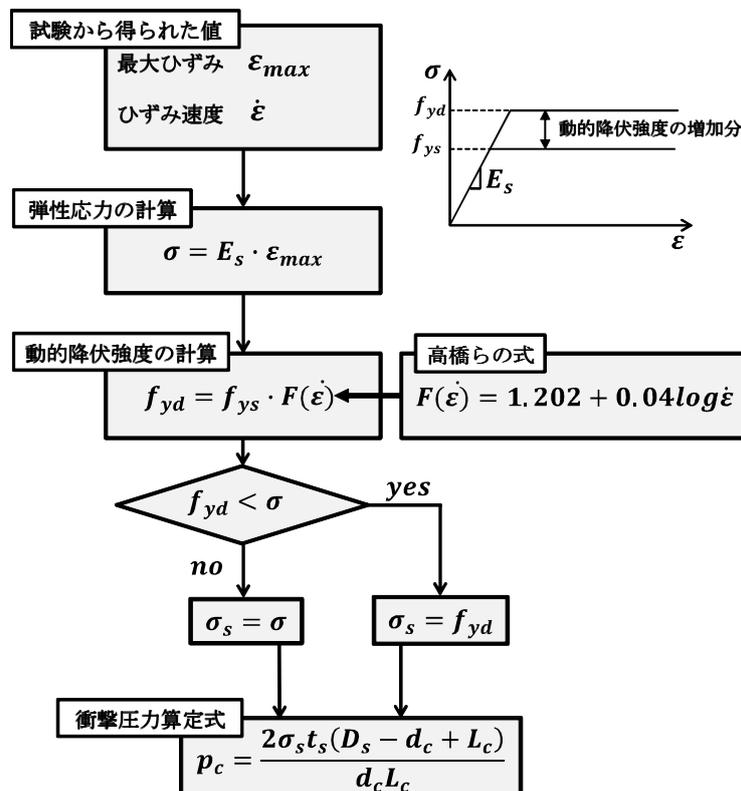


図-4 放電衝撃破砕によって発生する圧力の算定フロー

2.3 放電衝撃破砕および爆薬破砕試験ケース

表-1 に、放電衝撃発生圧力を測定するための試験ケースの一覧を示す。この試験では、まず、タンピング材料の違いによる放電衝撃圧力の違いを見るために、カートリッジ容量を 2cc とし、それぞれタンピング材料である砂、樹脂および急結モルタルで閉塞している。また、比較のためにタンピングなしの場合も発生圧力の測定を行っている。次に、放電カートリッジ容量の違いが放電衝撃発生圧力に及ぼす影響を調べるためにカートリッジ容量を 2cc, 6.5cc, 12cc および 25cc の 4 種類に変化させた試験も行っている。

表-1 放電衝撃圧測定試験ケース

試験体名	鋼管サイズ		カートリッジ容量(cc)	タンピング材料
	高さ(mm)	外径(mm)		
CFT-C2-Tno	400	216.3	2	なし
CFT-C2-TS	400	216.3	2	砂
CFT-C2-TR	400	216.3	2	樹脂
CFT-C2-TM	400	216.3	2	急結モルタル
CFT-C6.5-TM	400	216.3	6.5	急結モルタル
CFT-C12-TM	400	216.3	12	急結モルタル
CFT-C25-TM	400	216.3	25	急結モルタル

2.4 放電衝撃破砕試験結果と考察

(1) タンピング材料の影響

図-5 に各タンピング材料と計測された最大鋼管ひずみの関係を示す。計測された最大ひずみ値は、タンピングなしの場合で 1,333 μ 、樹脂の場合に 2,216 μ 、砂の場合に 3,579 μ 、急結モルタルの場合で 5,611 μ ひずみであった。このことから、放電カートリッジから発生する衝撃圧力を長時間内部に留め、コンクリートを効率よく破砕するためには、放電衝撃破砕工法で使用するタンピング材料として、急結モルタルが最も良いと考える。

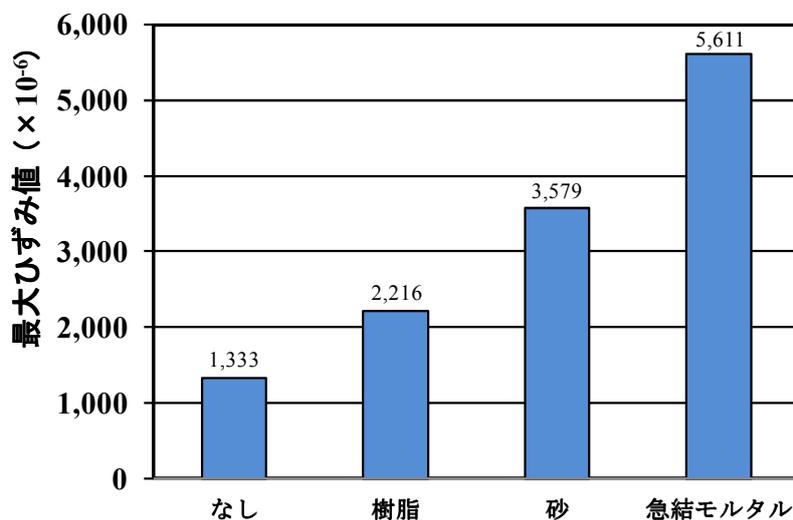


図-5 タンピング材料の種類と最大ひずみの関係

また、放電破砕後の試験体を半分に切断して試験体内部の破壊状況を調べた。その代表的な破壊状況を図-6 に示す。タンピングをしなかった試験体やタンピングに樹脂を用いた試験体では、内部の損傷は確認できなかった。一方、タンピング材料として急結モルタルおよび砂を用いた試験体では、カートリッジ付近から約 30~60° の角度でコンクリート中に亀裂が分散していることがわかつ

た. このひび割れの発生角度は, 概ね図-6 で仮定した伝達応力分布の角度にも等しい. このことから, 急結モルタルと砂は, 放電衝撃によって発生する圧力を効率的にコンクリート部分に作用させることができるタンピング材料といえる.

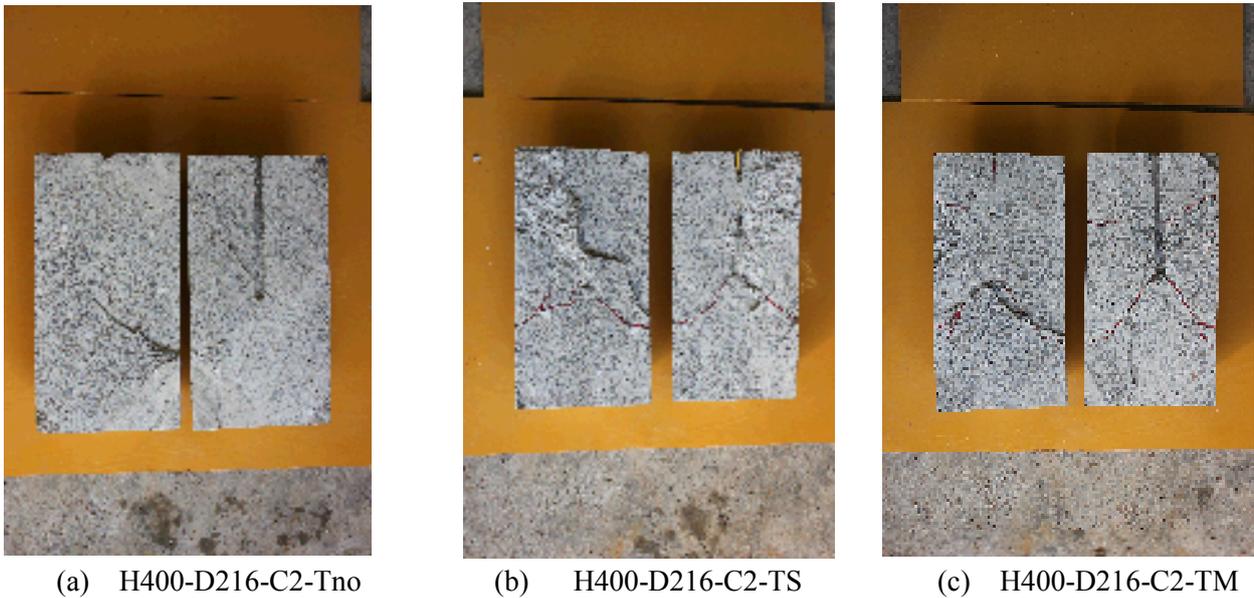


図-6 タンピング材料の違いによる鋼管の切断面の状況

(2) カートリッジ容量の違いによる影響

図-7 にカートリッジ容量と計測された最大ひずみ値の関係を示す. カートリッジ容量の増加とともに, 線形的にひずみの値が増加することがわかる. これは, カートリッジ容量の増大とともに, 発生した高圧ガスの量が増加したためである. また, 表-2 に, 最大ひずみ値と図-4 に示した計算フローに従い計算した放電カートリッジ部で発生した圧力を示す. この表をみると, カートリッジ容量が増えるに従い, 最大発生圧力は若干減少する傾向にあるが, 概ね 1~2GPa の値を示していることがわかる.

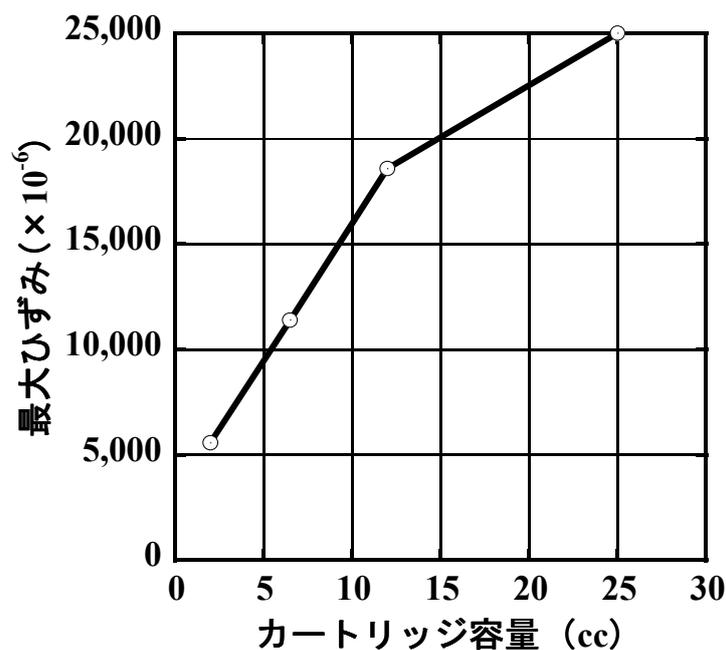


図-7 カートリッジ容量と最大ひずみの関係

表-2 計測されたひずみの最大値と鋼管応力

試験ケース	最大ひずみ (μ)	最大ひずみ までの時間 (μ s)	ひずみ速度 (1/s)	円周方向の 最大応力 σ_s (N/mm^2)	発生最大圧力 P_c (GPa)
H400-D216-C2-TM	5,611	160	35.0	551	1.820
H400-D216-C6.5-TM	11,463	345	33.2	551	1.268
H400-D216-C12-TM	19,124	410	46.6	553	1.063
H400-D216-C25-TM	26,599	594	44.8	553	0.735

3. 放電衝撃破砕工法による亀裂制御破砕

3.1 小型コンクリート版の亀裂制御破砕試験

(1) 小型コンクリート版試験体

図-8 に小型コンクリート版試験体の概要を示す。本試験体は、無筋であり、縦 500mm、横 500mm および 200mm の厚さを有している。この試験体の中央部には、直径 12mm のカートリッジ装填孔を削孔し、2cc の放電カートリッジを設置した。また、亀裂の進展方向を制御することを目的として、装填孔から左右に 25mm、50mm および 75mm 離隔した位置に、直径 12mm および直径 28mm の径を有する空孔を、厚さ方向に試験体を貫通するまで穿孔した。

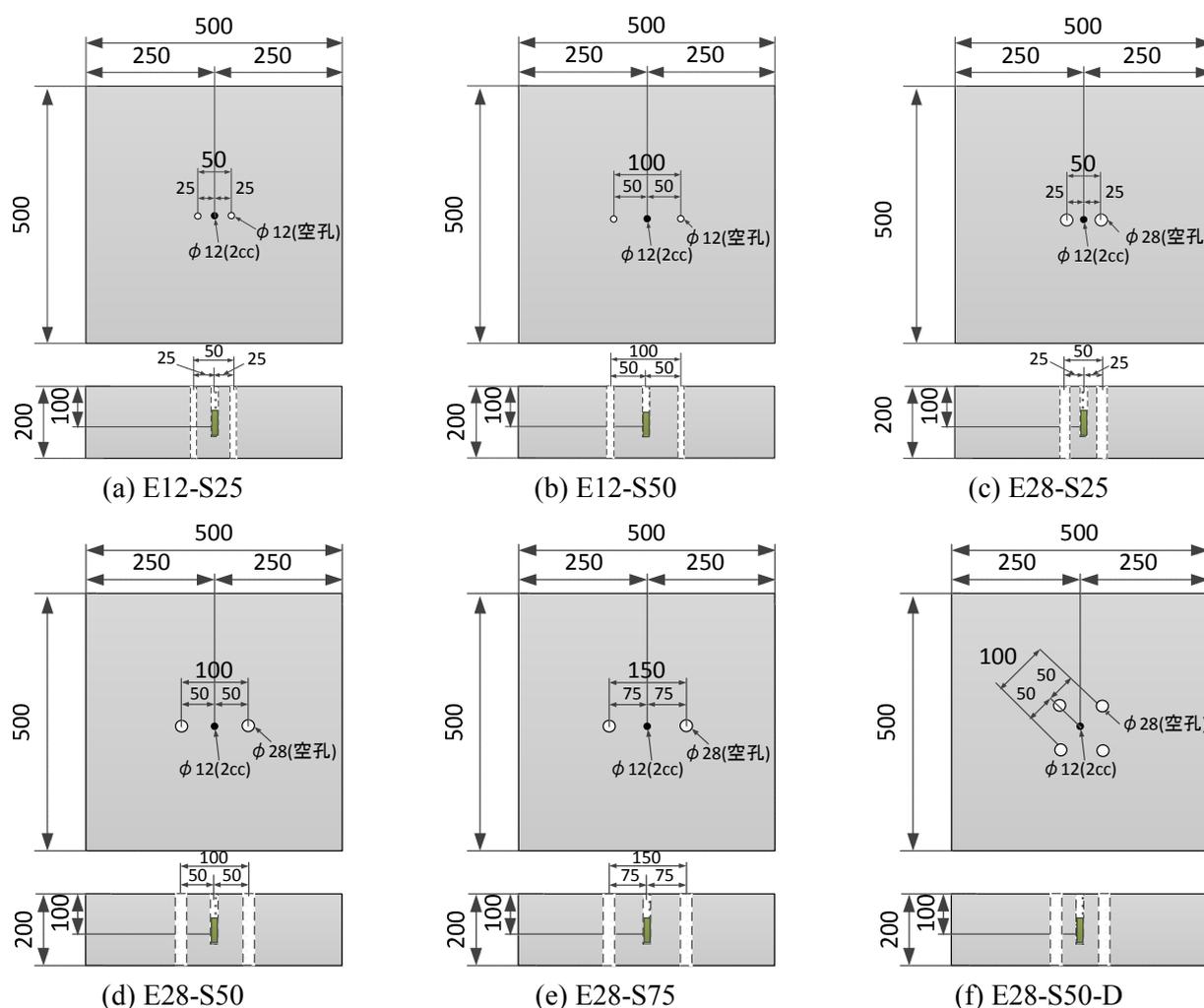


図-8 小型コンクリート版試験体

(2) 亀裂制御破砕試験ケース

表-3 に亀裂制御破砕試験ケースの一覧を示す。ここでは、空孔を設けた試験ケースとの比較のために、空孔を設けない試験体(2cc-base)に対する試験も行っている。空孔は、直径 12mm と 28mm の 2 種類で比較した。また、カートリッジを装填した孔からの間隔を 25mm, 50mm および 75mm の 3 種類とした。破砕による亀裂の方向を確認するために、コンクリート版試験体の対角線上に斜めに配置するように、50mm 間隔で空孔を設けたものを E28-S50-D とした。

表-3 亀裂制御破砕試験ケース一覧

試験体名	空孔径 (mm)	装填孔と空孔の距離[孔間隔] (mm)
2cc-base	—	—
E12-S25	12	25
E12-S50	12	50
E28-S25	28	25
E28-S50	28	50
E28-S75	28	75
E28-S50-D	28	50



(a)2cc-base



(b)E28-S25



(c)E28-S50



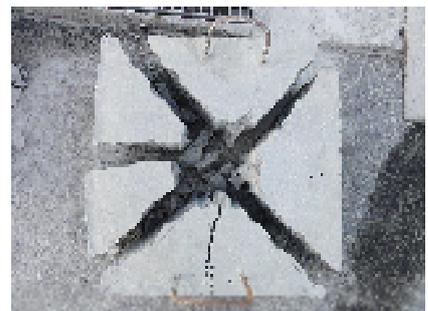
(d)E12-S25



(e)E12-S50



(f)E28-S75



(g)E28-S50-D

図-9 小型コンクリート版の破砕状況

(3) 空孔による亀裂制御破砕試験の結果

図-9 に、小型コンクリート版試験体の亀裂制御破砕試験後の状況を示す。2cc-base 試験体では、中央の装填孔から試験体の外側に向かって、7本の亀裂が放射状に伸び、不規則な形状の7体のブロックに分離された。一方、空孔径が12mm、孔間隔25mmのE12-S25試験体の場合には、上下左右方向に直線的に亀裂が伸びて、4つの直方体ブロックに分離されていることから、亀裂制御は成功したといえる。ただし、空孔径が12mmで孔間隔50mmにしたE12-S25試験体の場合には、上下方向に放射状に伸びた複数の亀裂が形成されたため、亀裂制御には失敗したといえる。また、空孔径が28mmで孔間隔が25mm、50mmおよび75mmであるそれぞれE28-S25、E28-S50およびE28-S75試験体の破壊状況を比較してみると、E28-S50の場合には亀裂進展制御に成功しているものの、E28-S25およびE28-S75では亀裂進展制御ができていないことがわかる。このことから、亀裂の進展方向を制御するための空孔には、近すぎず遠すぎずといった適切な設置位置があることが分かる。

次に、図-10 に放電衝撃破砕により亀裂進展制御に成功したケースと失敗したケースを空孔径と孔間隔の関係で示す。また、この図中には爆薬による発破で亀裂破壊を生じるための空孔径(ϕ)と孔間隔(a)の関係を表す次式をあわせて示す。

$$a = 1.5 \times \phi \quad (4)$$

この図-10 から、放電衝撃により亀裂進展制御に成功したデータは、概ね式(4)の関係と良好な対応をしていることがわかる。すなわち、放電衝撃破砕により亀裂制御を行う場合には、式(4)の関係をを用いて空孔径ならびに孔間隔を設定すれば良いといえる。

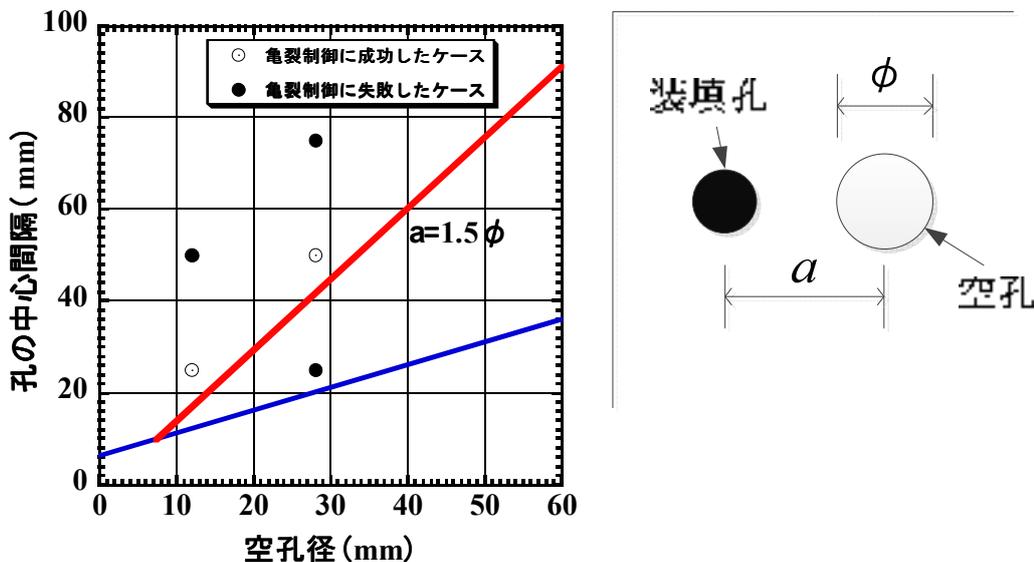


図-10 亀裂制御破砕における空孔径と孔の中心間隔の関係

3.2 放電衝撃破砕工法による大型コンクリート版の亀裂制御破砕試験

ここでは、小型のコンクリート版試験体の(500×500×200mm)の、空孔による亀裂の進展方向制御に関して得られた結果を、図-11 に示す大型のコンクリート版に適用してみることにした。試験に用いる大型コンクリート版は、縦1,000mm、横1,000mm、厚さ150mmを有している。この大型コンクリート版試験体を、図-11 に示す計画破断線に沿って放電衝撃破砕の3斉発により二分することとした。そのために、計画破断線に沿って、2ccの放電カートリッジを300mm間隔で3個設置するとともに、各カートリッジに対して直径28mmの空孔を孔間隔50mmで対称な位置に配置した。

図-12 に放電衝撃破砕後の大型コンクリート版試験体の状況を示す。この図から、試験体は想定破断線に沿って二分されており、亀裂制御破砕に成功していることがわかる。したがって、小型コンクリート試験体で得られた空孔径と孔間隔の関係（式(4)）を適用すれば、大型のコンクリート版においても亀裂の進展制御が可能と考える。

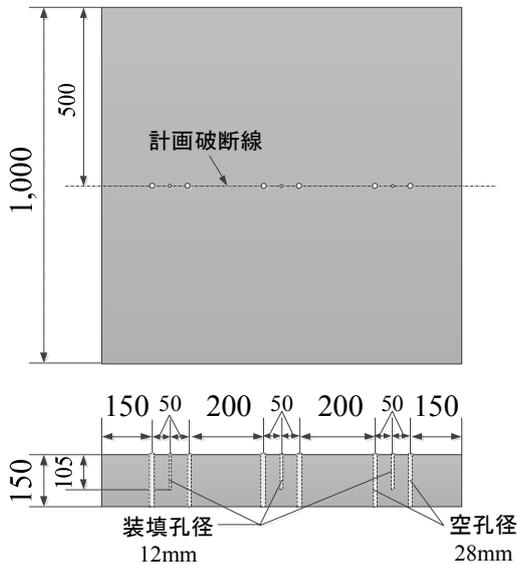


図-11 大型コンクリート版試験体



図-12 大型試験体の切断後の状況

3.3 放電衝撃破砕による小型コンクリート版の亀裂進展制御解析

ここでは、汎用解析ソフト LS-DYNA を用いて、空孔配置による放電衝撃破砕の亀裂進展制御に対する基礎的なシミュレーションを行った。表-4 に計算に用いた小型コンクリート版の要素分割を示す。空孔を配置した試験体 (E28-S50, 空孔径 28mm で孔間隔 50mm) では、節点数 80,038, 要素数 74,695 となった。また、空孔を配置しない試験体(2cc-base)では、節点数 54,302, 要素数 50,770 となった。

表-4 小型コンクリート版試験体の要素分割

試験体名	全体図	上面図
2cc-base		
E28-S50		

前章の結果から、2cc の放電カートリッジにより発生する圧力は、図-13 のように想定される。LS-DYNA による計算では、この圧力の時刻歴をカートリッジ設置孔の壁面に作用させることにした。

表-5 に LS-DYNA の計算によって得られた時間ごとのひずみ分布を示す. この計算結果をみると, 空孔を配置していない 2cc-base では, 試験体に発生するひずみに指向性はみられない. 一方, 空孔を配置した E28-S50 試験体では, 2つの空孔を結ぶ方向に直交する方向に引張ひずみが卓越していることがわかる. これらの結果は, 試験結果とよく一致しており, LS-DYNA によるシミュレーション解析によって亀裂進展の傾向をほぼ再現できたといえる.

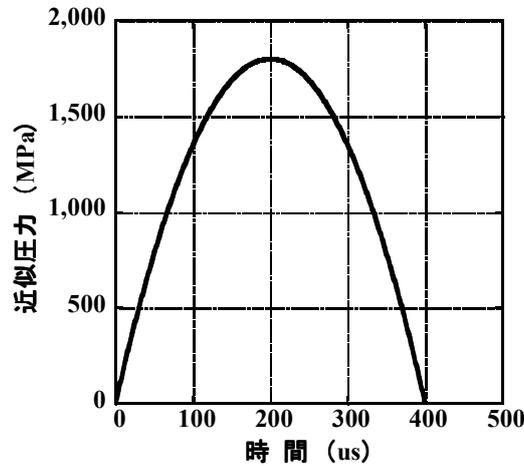
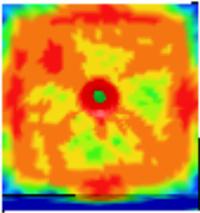
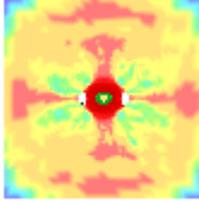


図-13 時間-圧力関係

表-5 空孔の有無による亀裂制御の比較

2cc-base	E28-S50
	
200 μ 秒後	200 μ 秒後
	

4. まとめ

本研究で得られた結果をまとめると, 次のようになる.

- (1) 放電衝撃破砕により生じる鋼管の応力は, タンピング材料の種類によって異なる. 放電カートリッジから発生する放電衝撃圧力に対して, 閉塞効果が大きい材料ほど長い時間, 発生した圧力をコンクリートの内部に留めることができ, 大きな破砕作用をもたらすと考えられる. 本試験結果からは, 急結モルタルは最も良好なタンピング材料といえる.
- (2) 放電衝撃で発生する最大圧力は, いずれのカートリッジ容量とも約 1~2GPa 程度である. 一方

で、カートリッジ容量が大きくなると、試験体の変形量も増大し、コンクリートも激しく壊れるのは、発生する高圧膨張ガス量が増大するためと考えられる。

- (3) 2cc カートリッジを装填した中央の装填孔から左右 25mm の間隔に直径 12mm, および左右 50mm の間隔に直径 28mm の貫通空孔を設置すると、亀裂が連結して、直方体ブロックに分割できる。すなわち、直径 ϕ の空孔を配置すべき位置は装填孔中心から 1.5 ϕ 程度となる。
- (4) 縦 1m, 横 1m, 厚さ 150mm のコンクリート版を半分に切断するには、装填孔から左右間隔 50mm の位置に貫通空孔を削孔して、装填間隔 300mm で 2cc カートリッジを 3 本同時に放電破砕することで、端部を平滑にして直線状に亀裂を制御できるといえる。
- (5) 空孔の有無によるコンクリート版試験体の亀裂制御の基礎的なシミュレーション解析を行った結果、試験結果と同様な亀裂進展の方向性を再現できた。

参考文献

- 1) Erik K Lauritzen and Martin Peterson, Partial Demolition By Mini-Blasting, Concrete International, American Concrete Institute , pp.43-46, Vol.13, No.6, June, 1991.
- 2) 新・解体工法と積算, 解体工法研究会編, pp.321-347.
- 3) 金玉慧ら: 躯体を再利用する RC 建築物の再生工事に関する調査・研究, pp.717-718, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海), 2003.9
- 4) スティグオロフソン, 最新発破技術ハンドブック編集委員会: 最新発破技術ハンドブックー岩を砕くー, 山海堂, p.119-131, 1992.
- 5) 中村裕一: 爆破に伴う諸現象と動的破壊制御に関する新技術, 土木学会構造物の耐衝撃性能評価研究小委員会・資料, pp.1-8, 2008.1.