



## 都市構築物発破解体における飛散物防護方法の実験（第2報）

（飛石の飛翔特性）

緒方雄二\*，山口梅太郎\*\*，勝山邦久\*，橋爪 清\*\*\*

佐藤孝幸\*\*\*\*，大坪信武\*\*\*\*\*，和田有司\*

ビル等構築物の主要倒壊要素である実規模の鉄筋コンクリート柱の発破実験から防護をしない状態で発生する飛石を高速度カメラ及びビデオで観測し、その飛翔特性と飛散状況を検討した。

高速度カメラ及びビデオによる観測結果から放爆面から放出される噴出ガスと飛石は数百m/sの高速度で飛翔するが、急速に減衰し数ミリ秒後に数十m/sの飛翔速度になる。また、放爆面の前方数mから観測した主な飛石はほぼ等速度で飛翔し、飛石の飛翔軌道の解析から放物線状に飛翔する。

実験終了後に回収した飛石の飛散状況から偏心装薬では、削孔面方向に飛石が飛散する傾向があり、中心装薬ではほぼ左右対象の飛散状況となる。飛石の到達距離は装薬量の増加に伴い大きくなり、発生する飛石の数も増加する。また、遠方へ飛散した飛石の大部分は装薬位置を中心に放爆面を着色した破砕片であった。

### 1. まえがき

爆薬のエネルギーを利用して岩盤を破砕する発破作業は、鉱山・土木分野では重要な作業である。近年、高度経済成長期に建てられて建造物の老朽化に伴い、その解体処理が問題になっており、爆薬を用いる発破解体が注目されている<sup>1)</sup>。しかし、我が国の建造物は

耐震構造の重視から欧米の建造物に比べて堅固であり、周辺環境等の問題から欧米で実用化されている発破解体法をそのまま適応することはできない。このため、我が国の建造物の構造条件及び周辺環境等の立地条件を考慮した発破基準が不可欠である。通商産業省では1987年から財団法人火薬類保安協会に委託して発破解体の保安基準の作成を開始した。また、1988年には鉄筋コンクリート建造物の倒壊実験から多くの資料を得たが<sup>2) 3)</sup>、技術的問題の検討段階で、過密した都市中心部で発破作業を実施するには、爆薬の爆轟で発生する振動・騒音・飛石等を十分に制御した解体発破が不可欠であり、特に発破で発生する飛石は、周辺建造物及び住民に直接的な被害を与えるため、その制御と防護が重要であることが判明し、飛石等飛散物防護に関する実規模実験を実施した。

これらの倒壊実験の結果を解析し、ビル等構築物の主要倒壊要素である実規模の鉄筋コンクリート柱の発破実験から各種防護材料及び防護方法の相違による飛散物と飛び出し、飛散の状態を解明し、破砕と防護材料の選定と防護方法に関して検討し、結果を「第1報」<sup>4)</sup>で報告した。

本研究では、「第2報」として防護しない鉄筋コンクリート柱での発破実験で発生する飛石を高速度カメ

1993年9月16日受理

\*資源環境技術総合研究所安全工学部  
〒305 つくば市小野川16-3

TEL 0298-58-8564

FAX 0298-59-8558

\*\*東京大学名誉教授

〒113 東京都文京区本郷7-3-1

TEL 03-381-2111

\*\*\*日本化薬株式会社化学品事業本部

〒100 東京都千代田区丸の内1-2-9

TEL 03-3212-4365

FAX 03-3285-0374

\*\*\*\*日本工機株式会社火薬部

〒105 東京都港区西新橋2-36-1

TEL 03-3436-3711

FAX 03-3433-5505

\*\*\*\*\*中国化薬株式会社火薬営業部

〒103 東京都中央区日本橋本町4-5-14

TEL 03-3241-8333

FAX 03-3241-8331

Table 1 Blasting condition of experiments

No.	Numbers of drilling	Centred or biased	Charge (g)	Minimum resisting length	Coefficient of blasting
1	1	biased	167	0.32m	0.4
2	1	biased	250	0.32m	0.6
4	1	biased	333	0.32m	0.8
4	2	centred	250*2	0.40m	0.4

ラ及びビデオで観測し、飛石の飛翔特性を検討した。また、発破終了後に飛散した飛石の飛翔距離および重量、大きさ等を計測し、飛石の飛散状況を検討したので報告する。

## 2. 実験方法

ビル等構築物の主要倒壊要素である鉄筋コンクリート柱を模した供試体を用いての発破実験を実施した。実験では、偏心装薬及び中心装薬による4回の発破で発生する飛石の噴出状況及び飛翔状況を高速カメラ及びビデオで観測し、飛石の初速度、飛翔速度を計測した。また、実験後に飛散した飛石の到達距離及び重量、大きさ等を計測し飛石の飛散性を検討した。

### 2.1 コンクリート供試体

実験で使用した供試体は、ビル構築物の主要部材である鉄筋コンクリート柱を模したもので、80×80cm、高さ240cmの大きさである。鉄筋はSR-24を用い、主筋はφ25mmを12本配筋し、鉄筋比Pg=0.92である。帯筋及びダイアゴナルフープはφ9mmで、帯筋比Pw=0.08である。また、実験では鉄筋コンクリート供試体の下部40cmを地中に埋設して固定した。鉄筋コンクリート供試体の概略図は“第1報”を参照。飛石の飛翔特性と飛散性を解明する本研究では、供試体の放爆面を無防護として使用した。

使用したコンクリートの強度は、設計値Fc=210kg/cm<sup>2</sup>に対して、テストピースによる28日強度で、平均351kg/cm<sup>2</sup>の強度を示した。

### 2.2 発破方法

放爆面方向に防護装置のない供試体を用いて装薬方法及び薬量等により4回の発破実験を実施した。実験での発破条件をTable1に示す。起爆する装薬量の決定は、偏心装薬の場合は発破係数を最小抵抗線の2倍の長さを1辺とする正方形(断面A)を家産し、次式

を用いて求めた。

$$L=C \cdot A$$

(L:装薬量(kg), C:発破係数(kg/m<sup>2</sup>))

A:装薬面の断面積(m<sup>2</sup>))

また、中心装薬の場合は、同じ式のAを装薬面の供試体断面積とした。実験で使用した爆薬は、従来の実験で使用した3号桐ダイナマイト(φ35mm×200g)で、起爆はすべて6号瞬発電気雷管で行った。装薬孔の削孔径はφ37mmである。供試体での装薬状態の概略図をFig.1に示す。

### 2.3 飛石の計測方法

飛石の初速度及び飛翔状態を計測するために、発破で発生する飛石を高速カメラ及びビデオで撮影した。実験では2台の高速カメラ(撮影速度2,000駒/秒、500駒/秒、ナック社製E-10及び1PL)と1台の高速ビデオ(撮影速度400駒/秒、ナック社製HSV-400)を用いて放爆面からの噴出ガスと飛石及び飛翔する飛石を撮影し、飛石の初速度及び飛翔状態を計測した。実験で使用した高速カメラ及びビデオの撮影条件をTable2に示す。

また、高速カメラ及びビデオの撮影場所は、供試体の放爆面から突出する飛石を観測し、飛石の初速度及び飛翔状態を計測するために突出方向に垂直な方向から撮影した。鉄筋コンクリート供試体及び高速カメラ及びビデオの配置場所をFig.2に示す。

### 2.4 飛石の飛散状況の観測

実験終了後に供試体放爆面の中心線から左右56m、前方300mまでの範囲の飛石を調査し、飛石の飛翔距離を計測した。また、飛翔距離を計測した飛石は回収し、重量及び大きさを計測した。更に、左右56mと放爆面の前方300mを50mの区間に分割した範囲の飛石を回収した。回収した飛石は飛散範囲を縮小したビ

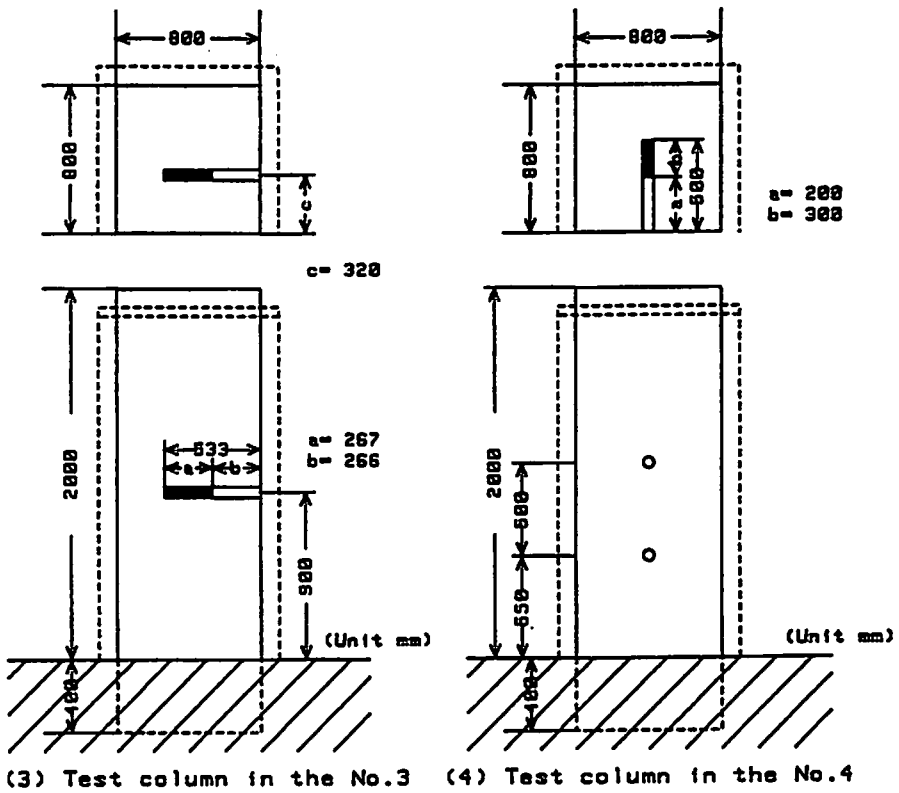
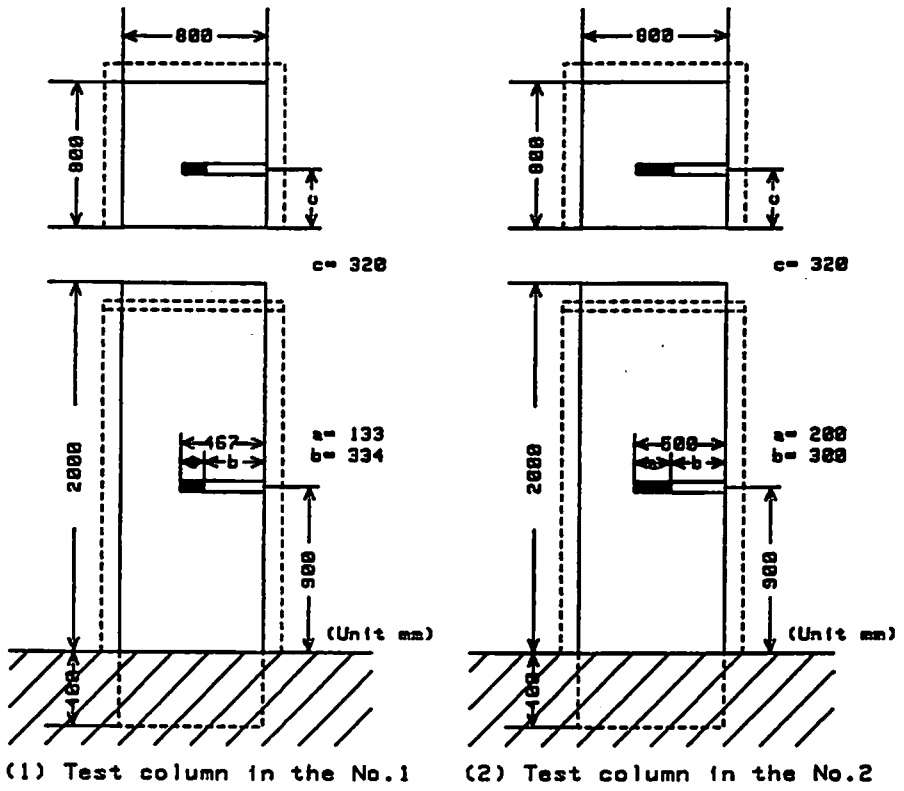


Fig. 1 Figure of test columns and blasting condition

Table 2 Specifications of the high-speed camera and video

<p>Experiment No.1 ~ Experiment No.3</p>	<p>High-speed camera① E-10 lens:15X10(10mm~150mm) frame speed:2,000fps exposure time:1/10,000 second iris:F·2.8(1/2 under)</p> <p>High-speed camera② 1PL lens:15X10(10mm~150mm) frame speed:500fps exposure time:1/2,000 second iris:F·4</p> <p>High-speed video HSV-400 lens:10X12(12mm~120mm) frame speed:400fps iris:F·3.5</p>
<p>Experiment No.4</p>	<p>High-speed camera① E-10 iris:F·2.8(3/2 under)</p> <p>High-speed camera② 1PL iris:F·2.8</p> <p>High-speed video HSV-400 iris:F·2.8</p>

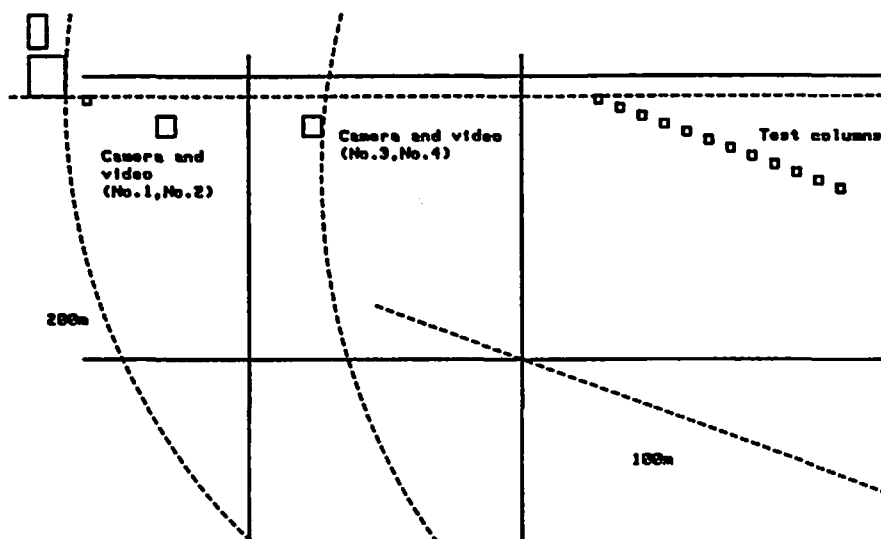


Fig. 2 Arrangement of high-speed camera and video in the experiment

ニールシートの上の縮小模型図に集めて写真撮影により飛石の飛散状況を記録した。飛石の詳細記録は25m以上に飛散したもののみとした。

実験で使用した供試体の装薬位置を中心に放爆面の表面に、飛石の発生箇所と飛散性を検討するために発破前に目印として赤、黄、青、茶の4色に着色しておいた。Fig. 3に放爆面を着色した供試体の概略図を

示す。

### 3. 実験結果及び考察

#### 3.1 飛石の初速度の計測

飛石の初速度は高速度カメラ及びビデオによる観測結果から計測した。放爆面の装薬中心付近から放爆面の膨張が始まり、ガスと飛石の噴出が観測される。この噴出ガスと飛石の突出速度は数百m/sに達し、噴

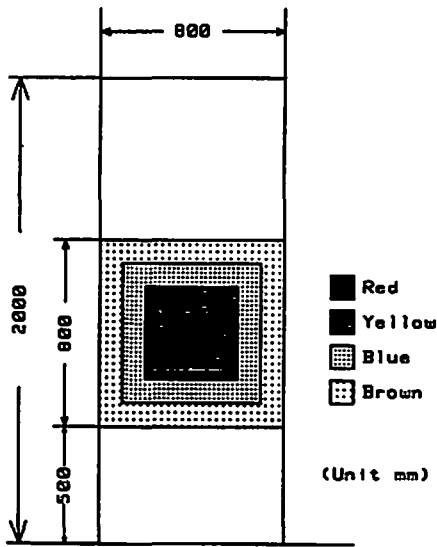


Fig. 3 Color painting of surface on the test column

出ガスと飛石が極めて高速度で放出されることが判明した。噴出ガスが黒色のガス状であることから爆薬の爆轟生成ガスの噴出であり、爆薬の爆轟生成ガスが飛石を急激に加速する。噴出ガス及び飛石の噴出速度 ( $V_g$ ) は、供試体1で  $V_g=180\text{ m/s}$  以上、供試体2は不明、供試体3は  $V_g=140\text{ m/s}$  以上、供試体4は  $V_g=220\text{ m/s}$  に達する。しかし、数ミリ秒後に噴出ガスの速度が急速に減衰し、噴出ガスの先端部の粉じんと飛石が等速度運動に移行することが判明した。これは時間の経過に伴い、飛石及び粉じんに対する爆轟生成ガスによる加速がなくなり、空気抵抗による急速に減衰したものと推定できる。また、時間の経過に伴い粉じんが急速に拡散し、飛石と粉じんが分離し、飛石の飛翔状態が明瞭になる。先端部の主な飛石の飛翔速度 ( $V_s$ ) は供試体1は  $V_s=30\text{ m/s}$ 、供試体2は  $V_s=40\text{ m/s}$ 、供試体3は  $V_s=40\text{ m/s}$ 、供試体4は  $V_s=50\text{ m/s}$  に低下する。また、飛石の飛翔速度が数十  $\text{m/s}$  と比較的低速で飛翔することから空気による抵抗が少ないため、等速度運動に移行するものと推定できる。高速度カメラによる飛散片の速度変化の解析結果を Fig. 4 に示す。

### 3.2 飛石の飛翔軌道について

放爆面から放出される主な飛石がどのような軌道で飛翔するかを高速度カメラによる観測結果の画像解析から検討した。放爆面近傍では、爆薬の爆轟生成ガスと粉じんのために特定の飛石を確定することが困難であるが、時間の経過に伴い粉じんの拡散により、飛石の軌道が明瞭となる。このため、放爆面の前方から数

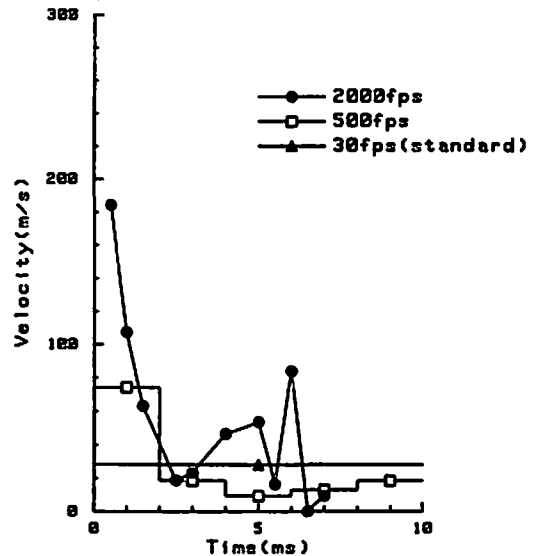


Fig. 4 Velocity of fragmentations in the No. 1

m離れた地点からの飛石の飛翔状態を計測し、飛翔する飛石の軌道を解析した。

供試体4で発生した主な4個の飛石の飛翔軌道を解析し、飛石の飛翔特性を検討する。発生した飛石をそれぞれ飛石①～④とする。解析結果から発生した飛石は放爆面の前方数mの地点からはほぼ等速度運動をしており、飛石①は  $V_s=21\text{ m/s}$ 、飛石②は  $V_s=23\text{ m/s}$ 、飛石③は  $V_s=6\text{ m/s}$ 、飛石④は  $V_s=10\text{ m/s}$  の飛翔速度を計測した。飛石の飛翔速度は、ガスの噴出速度および飛石の初速度と比較するとかなり遅くなり、空気による抵抗が少なくなりほぼ等速度運動となることが判明した。高速度ビデオによる飛石の飛翔状況を Fig. 5 に示す。また、高速度カメラによる飛石の飛翔軌道解析結果を Fig. 6 に示す。Fig. 6 での飛石の飛翔速度の細かい変化は、飛石の回転と解析装置による読みとり誤差によるものと思われる。

飛石がほぼ等速度で飛翔していることから、飛石の飛翔軌道を推定するために最小二乗法を用いて、放物線の運動方程式に置換して推定した。最小二乗法による解析結果から飛石が放物線状の軌道で飛翔していることが判明した。また、推定した放物線の運動方程式から計算した飛石の最大飛翔距離 ( $l_{MAX}$ ) を推定すると、飛石①は  $l_{MAX}=28.5\text{ m}$ 、飛石②  $l_{MAX}=20.2\text{ m}$ 、飛石③は  $l_{MAX}=4.0\text{ m}$ 、飛石④は  $l_{MAX}=10.8\text{ m}$  となる。飛石の飛翔速度及び飛翔距離の推定結果から飛石①の飛翔速度は飛石②より遅いが、放出角度の影響で飛翔距離が大きく、遠方まで飛翔することが推定できる。



(1) 100ms later  
after blasting



(2) 200ms later



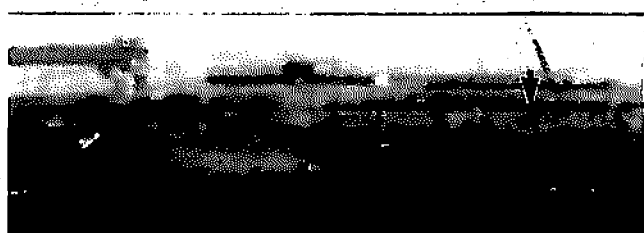
(3) 300ms later



(4) 400ms later



(5) 500ms later



(6) 600ms later

Fig. 5 Observations of high-speed video

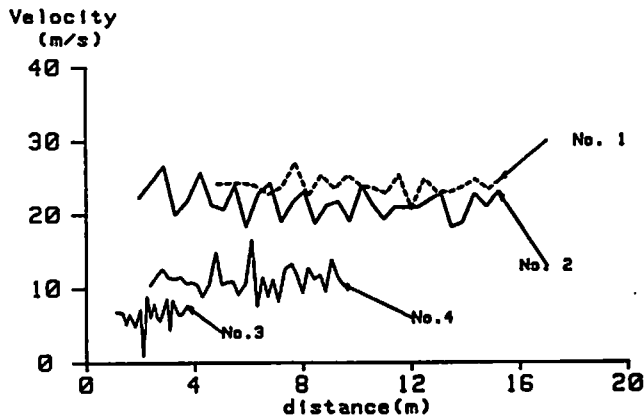
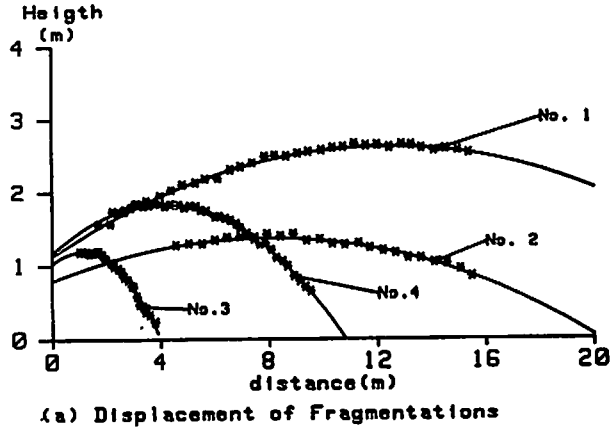


Fig. 6 Analysis of fragmentations in the No. 4 Column

これらの解析結果から飛石は放爆面の前方の数 m 付近からはほぼ等速度で放物線状に飛翔し、飛翔距離には飛石の飛翔速度と放出角度が大きな影響を与えることが判明した。

### 3.3 飛石の飛散性について

発生した飛石の分布をFig. 7に示す。これらの解析結果から偏心装薬発破（供試体1～3）の実験では、飛石は削孔方向に相当する供試体左側方向（-）に飛散する傾向がある。これに対して、中心装薬（供試体4）による発破実験では、飛石はほぼ左右対象に飛散し、放爆方向への飛石放出角度は約 $60^\circ$ となった。また、装薬量の増加に伴い発生する飛石の最大到達距離が大きくなり、発生する飛石の数が増加する。最大到達距離は供試体1で $l_{MAX}=34\text{ m}$ 、供試体2で $l_{MAX}=55\text{ m}$ 、供試体3で $l_{MAX}=91\text{ m}$ 、供試体4で $l_{MAX}=65\text{ m}$ になった。また、遠方へ飛翔した飛石の大部分は、装薬位置を中心部に着色したコンクリート破砕片であった。これは、着色した放爆面周辺から発生する飛石が爆薬の爆轟生成ガスによる加速を受け易くため

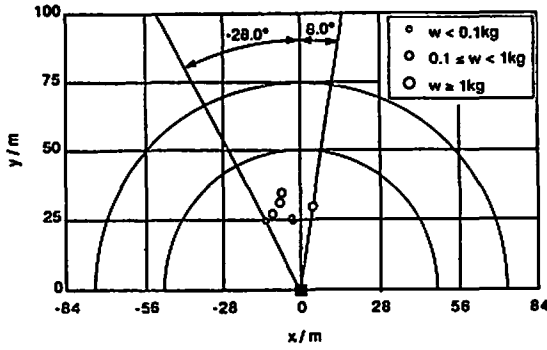
えられる。

これらの解析結果から偏心装薬では、削孔方向に飛石が飛散する傾向があり、中心装薬ではほぼ左右対象に飛散することが判明した。また、装薬量の増加に伴い最大到達距離が大きくなり、発生する飛石の数も多くなることが判明した。飛石の発生箇所と飛翔距離との関係から爆薬の爆轟生成ガスによる加速を受け易い装薬位置を中心とする放爆面付近から発生する飛石の飛翔距離が大きくなることが判明した。

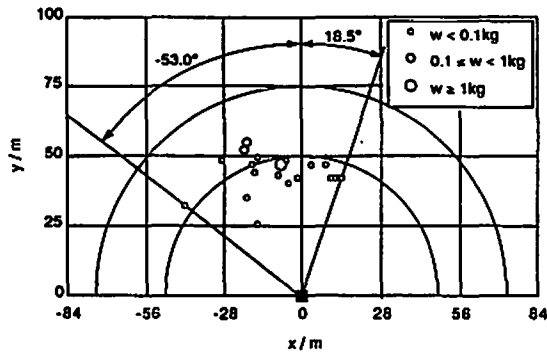
### 4. まとめ

ビル等建築物の主要倒壊要素である実規模の鉄筋コンクリート柱の発破実験から発生する飛石の飛翔特性と飛散性から以下のことが判明した。

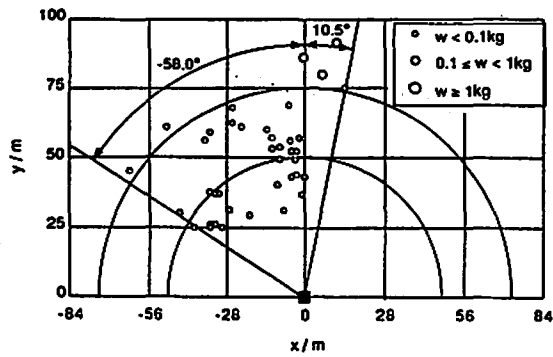
1. 放爆面から放出される噴出ガス及び飛石は、数百 m/s の高速度で噴出するが、数ミリ秒後に急速に減衰し、数十 m/s になる。
2. 放爆面の前方から数 m の地点から観測されて飛石はほぼ等速度で、放物線状に飛翔し、爆薬の爆轟生成ガスの膨張による加速と空気抵抗による減衰



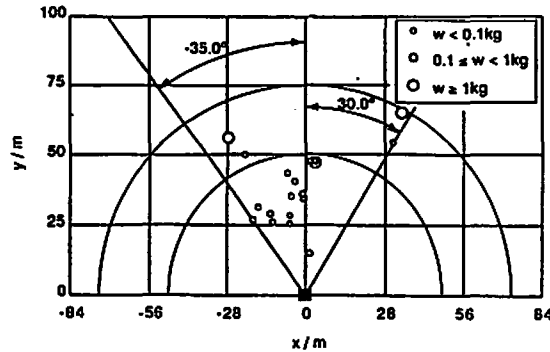
(1) Spread fragmentations in No. 1 column



(2) Spread fragmentations in No. 2 column



(3) Spread fragmentations in No. 3 column



(4) Spread fragmentations in No. 4 column

Fig. 7 Distribution of spread fragmentations



の影響をほとんど受けないことが判明した。また、飛石の到達距離には放爆面から放出される角度と飛翔速度が大きな影響を与える。

3. 偏装薬では飛石が主に削孔方向に飛散し、中心装薬では左右対象に飛散する傾向がある。装薬量の増加に伴い最大飛翔距離が大きくなり、発生する飛石の数も多くなることが判明した。また、飛石の飛散状況の観測結果から、装薬位置を中心とする放爆面付近の飛石が遠方へ飛翔することが判明した。

#### 謝 辞

発破実験に際して社団法人全国火薬類保安協会都市

構築物解体用発破対策委員会をはじめ実験に関係した各位と高速度カメラ及びビデオの撮影に際しては多大な御協力を受けたナック梯の安藤、丸茂両氏に感謝の意を表します。

#### 文 献

- 1) 富田幸助, 加藤保一, 工業火薬, 48, No. 6 (1987)
- 2) 山口梅太郎, 工業火薬, 49, No. 6 (1988)
- 3) 財団法人火薬類保安協会編, 「RC集合住宅発破破壊実験報告書」, (1989)
- 4) 末吉康一, 笠井芳夫, 斎藤照光, 富田幸助, 小林茂雄, 工業火薬, 54, No. 6 (1993)

Protection methods from fragmentations in the blasting demolitions ( II )  
(Dynamic Movement of Fragmentions)

by Yuji OGATA\*, Umetaro YAMAGUCHI\*\*, Kunihisa KATSUYAMA\*  
Kiyoshi HASHIZUME\*\*\*, Takayuki SATO\*\*\*\*, Nobutake OHTSUBO\*\*\*\*\*,  
Yuji WADA\*

Experimental blasting of model concrete columns were carried out in order to obtain technical informations on fragmentations caused by the blasting demolitions of concrete columns. The reinforced concrete model columns for typical apartment house were applied to the experiment. These columns were exploded by the blasting with internal loading of dynamite.

Fragmentations were observed by two kinds of high-speed cameras with 500 and 2,000 fps and high-speed video with 400 fps. Conclusions are briefly summarized as follow:

- 1) The velocity of burst gas and fragmentations spread on the surface of test columns were some hundreds of meter per second, but some milli-seconds later the blast gas and fragmentations loss its velocity and became tens of meter per second.
- 2) It is clear that the fragmentations were flying in the constant velocity and on the parabolic orbit in the area of a few meter far from blasting surface of test columns. The angle of elevation of fragmentations was one of the most important factor to decide the flying distance of fragmentations.
- 3) The fragmentations in the biased charge blasting spread mainly in the directions of the bore hole. The quantity of charge have the important effect for the flying distance of fragmentations. As the results of the observations the fragmentations in the nearest of the blasting point showed the maximum distance.

(\*National Institute for Resources and Environment, AIST, 16-3 Onogawa,  
Tukuba, Ibaraki 305

\*\*Emeritus Professor of Tokyo University, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku,  
Tokyo 113

\*\*\*Nippon Kayaku Co. Ltd, 1-2-1 Marunouchi, Chiyoda-ku, Tokyo 100

\*\*\*\*Nippon Kouki Co. Ltd, 2-36-1, Nishi-shinbashi, Minato-ku, Tokyo  
105

\*\*\*\*\*Chugoku Kyayaku Co. Ltd, 4-5-14 Nihonbashi-honmachi, Chuo-ku,  
Tokyo 103)