

## 鉄筋コンクリート建造物の発破解体に関する基礎的研究

Fundamental study on blasting demolition of reinforced concrete buildings

イアムラオー・ピーラサック\*, 藤掛一典\*\*, 大野友則\*\*  
Peerasak Aemlaor, Kazunori Fujikake, Tomonori Ohno

\*防衛大学校研究科学生, 地球環境科学専攻 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

\*\*工博, 防衛大学校教授, 建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

Blasting demolition techniques of reinforced concrete (RC) buildings are quite popular in Europe and the United States. However, if the blasting demolition techniques are applied to RC buildings in Japan, there is serious concern that excessively arranged reinforcement, which is required in earthquake resistant design, may disturb the blasting demolitions. In this study, therefore, the experimental demolition of RC column specimens with C4 explosives was performed, in which the amount of explosive used, the longitudinal reinforcement ratio and shear reinforcement ratio were chosen as experimental parameters. Finally the damage of RC column specimens after blasting was investigated qualitatively and quantitatively.

*Key Words: blasting demolition, RC column, blasting factor, reinforcement ratio, residual resistance ratio*  
キーワード: 発破解体, RC柱, 発破係数, 鉄筋比, 残存耐力比

## 1. はじめに

我が国では、1960年代の高度経済成長期に建設された多数の高層の鉄筋コンクリート(RC)建物が耐用年数を迎えることから、これらの高層RC建物の解体需要が、今後、益々増加すると考えられる。これまで、RC建物の解体には大型油圧式圧砕機を用いた圧砕工法が一般的に適用されてきている。しかしながら、圧砕解体工法は比較的施工期間が長く、振動・騒音・粉塵が問題になるとともに解体中の瓦礫が落下して重大事故を招く恐れも懸念される<sup>1)</sup>。

一方、欧米では高層RC建物の解体に発破解体工法が適用されるようになってきている。発破解体工法は、少量の爆薬を利用してRC建物の一部の柱や梁を部分的に破壊することによって建物に蓄えられている巨大なポテンシャルエネルギーを利用して進行性破壊を誘発させて建物を一気に崩壊させる工法である<sup>2)3)</sup>。発破解体工法では、一度、発破によってRC建物を倒壊させることができれば、足場の良い地上から瓦礫を撤去することができるようになることから高い安全性を有しているといえる。また発破解体工法は、従来の圧砕解体工法に比べて解体施工期間と費用を約40~60%程度節約することが可能であり、長期にわたる振動・騒音・粉塵等の問題も少ない<sup>4)5)</sup>等の多くの利点を有している。

このように前途有望な発破解体工法であるが、我が国のRC建物に適用するに当たっては解決すべき問題も多

い。その一つとして、欧米のRC建物と比較して我が国のRC建物には耐震性の観点から多くの鉄筋が配置されていることが挙げられる<sup>6)7)</sup>。これまでに、RC建物中に配置される鉄筋量が発破解体における部材の損傷程度に及ぼす影響を調べた研究は少ないのが現状である。

そこで本研究では、RC柱部材を対象として、爆薬量、主鉄筋比、せん断補強筋比をパラメータとする発破試験を行い、発破試験後のRC柱部材の損傷程度を定性的・定量的に評価することを目的とした。

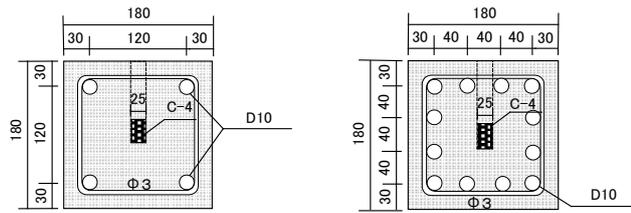
## 2. 発破解体試験の概要

## 2.1 RC柱試験体の諸元

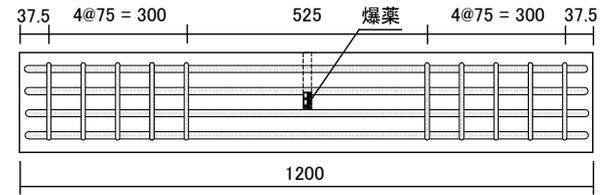
本研究では、RC柱部材中の鉄筋が発破解体に及ぼす影響を調べるために、低層および高層RC建物の下層階の柱を対象として、幾何学的に約1/4程度に縮小したRC柱試験体を作成した。RC柱試験体の主鉄筋比およびせん断補強筋比を表-1に示す。また、図-1~3に本研究で用いたRC柱試験体の概要を示す。RC柱試験体は180mm×180mmの断面寸法を有し、長さは1,200mmである。主鉄筋ならびにせん断補強筋には、降伏強度345MPaを有する異形鉄筋D10および降伏強度400MPaを有する直径3mmの丸鋼線をそれぞれ使用した。コンクリートには、RC柱試験体の最小鉄筋間隔30mmと小さいことからコンクリートを密実に打設するためにモルタルを使用した。モルタルの圧縮強度は51.6MPaであった。

表-1 試験体の一覧

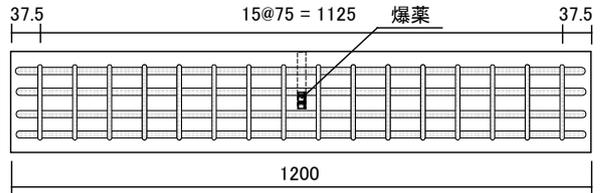
試験体名	主鉄筋比 $p$	せん断補強筋比 $p_w$
P09H0	0.9%	0%
P09H10		0.1%
P09H10		0.1%
P09H10		0.1%
P09H26		0.26%
P25H0	2.5%	0%
P25H10		0.1%
P25H26		0.26%



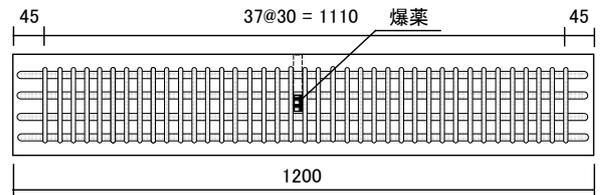
(a)  $p=0.9\%$ 試験体 (b)  $p=2.5\%$ 試験体  
図-1 RC 試験体の断面



(a) P25H0 試験体

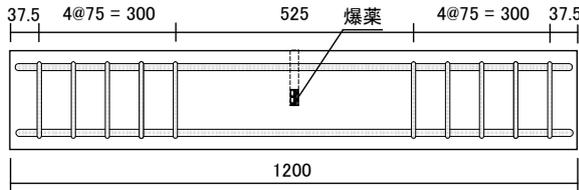


(b) P25H10 試験体

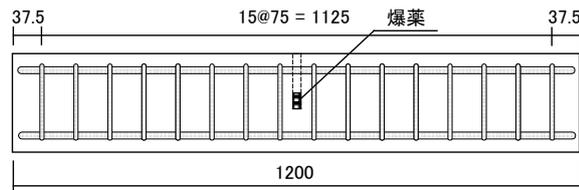


(c) P25H26 試験体

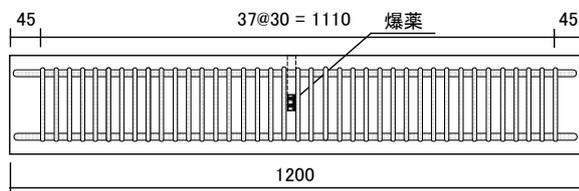
図-3 主鉄筋比  $p=2.5\%$  試験体の側面図



(a) P09H0 試験体



(b) P09H10 試験体



(c) P09H26 試験体

図-2 主鉄筋比  $p=0.9\%$  試験体の側面図

## 2.2 使用爆薬

これまで発破解体工法には産業用爆薬としてダイナマイトが一般的に用いられてきているが、本研究では、化学的安定性に優れ安全性が高いこと、および任意の形に容易に成形することができる点を踏まえて C4 爆薬を使用することにした。C4 爆薬は RDX(シクロトリメチレントリニトロアミン)を主成分(約 91%)とし、可塑剤(セバシン酸ジオクチル等)を約 9%程度混入して作られている。C4 爆薬の爆速は 6,400~8,200m/s でダイナマイトのそれの約 1.5 倍である。

発破解体における RC 建物の柱および梁部材を破壊するために必要な装薬量は、一般的に次式により算定されている<sup>8)</sup>。

$$L = CA \quad (1)$$

ここで、 $L$ : 爆薬量 (kg),  $C$ : 発破係数 ( $\text{kg}/\text{m}^2$ ),  $A$ : 柱あるいは梁の断面積 ( $\text{m}^2$ ) である。発破係数  $C$  は被発破体の性質、爆薬効力、充填状況により決まる。実験結果に基づいてダイナマイトの場合は  $0.25 \sim 0.5 \text{ kg}/\text{m}^2$  が推奨されている。しかしながら、C4 爆薬を用いた場合の発破係数について調べた研究は見当たらない。C4 爆薬はダイナマイトより爆速が約 1.5 倍大きいことから、ダイナマイトの場合の発破係数より小さくすることも可能と考えられる。

## 2.3 発破試験

表-2 に本研究で行う発破試験の一覧を示す。ここではまず、C4 爆薬に対する発破係数の影響を調べるために、P09H10 試験体を用いて発破係数を 0.15, 0.4, 0.6 (kg/m<sup>2</sup>) の 3 つに変化させた発破試験を行う。それぞれの発破係数に対する C4 爆薬量は 5, 13, 19.5 (g) である。次に、主鉄筋比およびせん断補強筋比が RC 柱試験体の発破による損傷程度に及ぼす影響を調べるために、主鉄筋比およびせん断補強筋比が異なる RC 柱試験体に対して C4 爆薬 5g (発破係数 C=0.15kg/m<sup>2</sup> を用いて算出) を用いて発破試験を行う。

発破試験は、写真-1 に示すように RC 柱試験体を立てた状態で行った。所定の装薬量の C4 爆薬に 6 号電気雷管を合わせたものを RC 柱試験体の中央部に設けた直径 25mm の円孔に装薬深さ 90mm で装てんし、その孔口に充填材料として油粘土を用いて詰め物をした。その後、6 号電気雷管により C4 爆薬を起爆させた。なお、表-2 に示す試験ケースごとに 2 回発破試験を行った。

表-2 発破試験ケース一覧

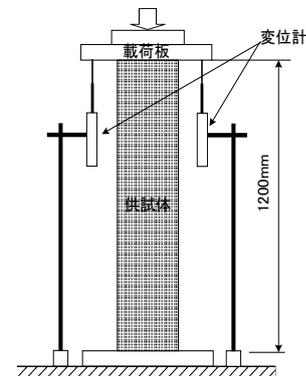
試験ケース名	発破係数 (kg/m <sup>2</sup> )	C4 爆薬量 (g)	使用試験体名
C15P09H10	0.15	5.0	P09H10
C40P09H10	0.40	13.0	P09H10
C60P09H10	0.60	19.5	P09H10
C15P09H0	0.15	5.0	P09H0
C15P09H26	0.15	5.0	P09H26
C15P25H0	0.15	5.0	P25H0
C15P25H10	0.15	5.0	P25H10
C15P25H26	0.15	5.0	P25H26



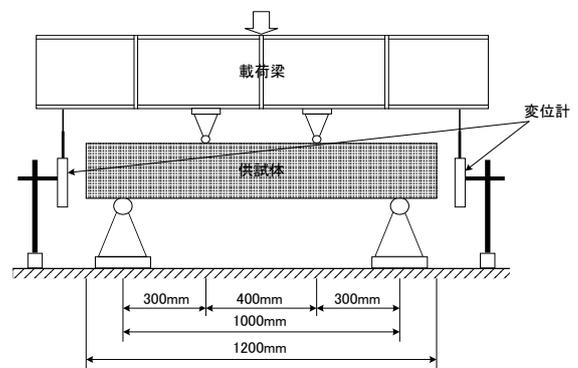
(a) C4 爆薬 (b) C4 爆薬を装てんした試験体  
写真-1 発破試験状況

本研究では、発破解体により RC 建物の倒壊計画を行う上で特に重要となる発破試験後の RC 柱試験体の損傷の程度を定量的に評価するために、試験ケースごとに 2 体の発破損傷試験体を用いて図 4 に示すように残存圧縮耐力および残存曲げ耐力を、それぞれ調べた。また、そ

これらの残存耐力と発破していない健全な RC 柱試験体の圧縮耐力あるいは曲げ耐力との比を残存圧縮耐力比および残存曲げ耐力比として評価する。



(a) 圧縮試験



(b) 曲げ試験

図 4 耐力試験概要図

## 3. 発破試験結果及び考察

### 3.1 発破係数が RC 柱試験体の破壊性状に及ぼす影響

発破試験ケースごとの RC 柱試験体の破壊状況には概ね再現性が認められた。写真-2 に、主鉄筋比およびせん断補強筋比をそれぞれ 0.9% と 0.1% とした P09H10 試験体 (主鉄筋比=0.9%, せん断補強筋比=0.1%) を用いた発破係数を試験パラメータとした C15P09H10, C40P09H10, C60P09H10 の各発破試験ケースにおける RC 柱試験体の損傷状況を示す。発破係数 C=0.15kg/m<sup>2</sup> の場合においても、概ね発破部分のコアコンクリートが破碎されるとともに掃われているのが確認できる。C4 爆薬量を増やしても、爆薬設置近傍のせん断補強筋は吹き飛ばされるものの主鉄筋が切断されることはない。発破によって破碎されたコンクリートの体積は、図 5 に示すように発破係数の増加に伴いわずかであるが増加する傾向を示した。なお、コンクリートの破碎体積は、破碎されたコンクリートの質量を計測し、その値をコンクリートの密度で割って求めた。

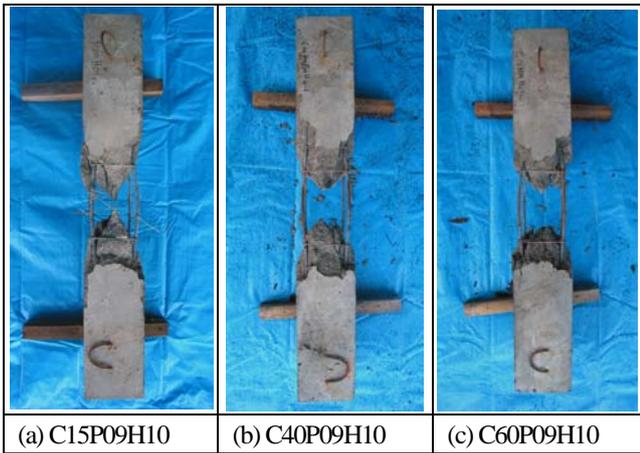


写真-2 発破係数が破壊状況に及ぼす影響

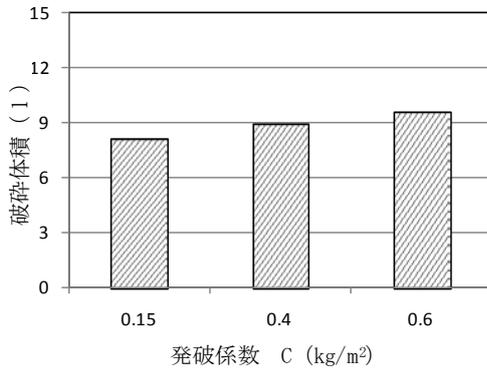


図-5 破砕体積

また、図-6 に残存圧縮および曲げ耐力比と発破係数の関係を示す。発破係数の違いによらず、RC 柱試験体の発破後の残存圧縮耐力比および残存曲げ耐力比はそれぞれ、約 2% 程度および 12% 程度となっている。したがって、C4 爆薬の場合は発破係数  $C=0.15\text{kg/m}^2$  でも十分 RC 柱部材の耐力を低下させることが可能であるといえる。

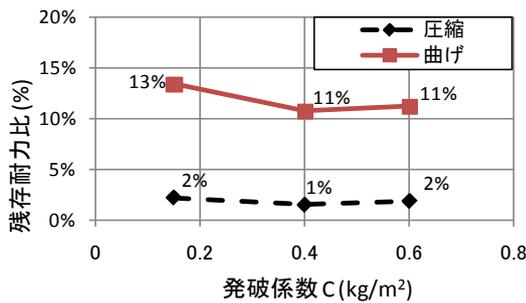


図-6 発破係数が残存耐力に及ぼす影響

### 3.2 鉄筋量が RC 柱試験体の破壊性状に及ぼす影響

一定爆薬量 5 g を用いた発破試験で得られた主鉄筋比ならびにせん断補強筋比が異なる RC 柱試験体の破壊状況を写真-3 に示す。この図から、主鉄筋比が増えるほど、またせん断補強筋比が増加するほど、鉄筋の拘束効果により破砕されたコアコンクリートが掃いきれずに残る傾向にあることがわかる。

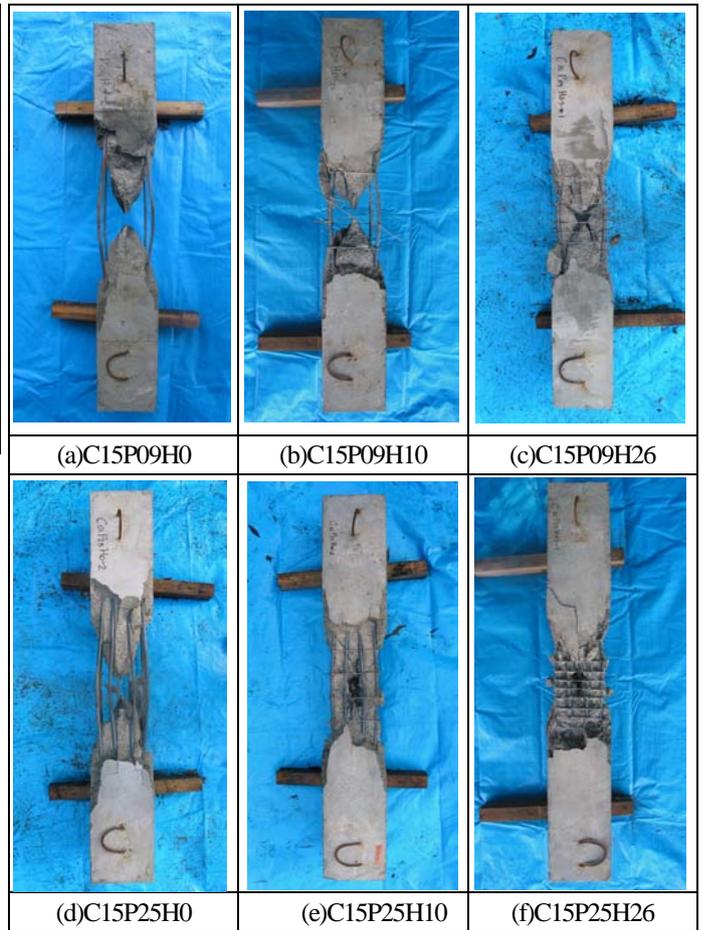


写真-3 各種供試体の破壊状況

次に、主鉄筋の露出長とせん断補強筋比の関係を調べた結果を図-7 に示す。ここで、主鉄筋の露出長は、試験体中のすべての主鉄筋の露出した部分の長さを計測し、それらの平均値として評価したものである。主鉄筋の露出長はせん断補強筋比が増えるに従い小さくなり、その傾向は主鉄筋比が大きくなるほど顕著にみられる。すなわち、主鉄筋およびせん断補強筋で構成されるコアコンクリートを拘束している鉄筋ケージの剛性が大きくなるほど、主鉄筋の露出長は小さくなるといえる。主鉄筋の露出長は発破による破壊領域を表すものであり、発破により RC 柱を破壊する場合、主鉄筋比ならびにせん断補強筋比が重要な役割を果たしているといえる。そこで、発破試験で得られた主鉄筋の露出長と主鉄筋比ならびにせん断補強筋比の関係を回帰したところ次式を得た。

$$L_{\text{exp}} = (24.4p + 437) \cdot e^{(-1.1p - 0.7)p_w} \quad (2)$$

ここで、 $L_{\text{exp}}$  : 主鉄筋の露出長(mm)、 $p$  : 主鉄筋比(%),  $p_w$  : せん断補強筋比(% )である。相関係数は 0.997 であった。なお、図-7 中でせん断補強筋を配置していない試験体の主鉄筋の露出長が主鉄筋比の小さい 0.9% の方が 2.5% のものより小さくなっている。これは、主鉄筋比が

小さくなるほど、コンクリートの破壊が局所化するためと考えられる。

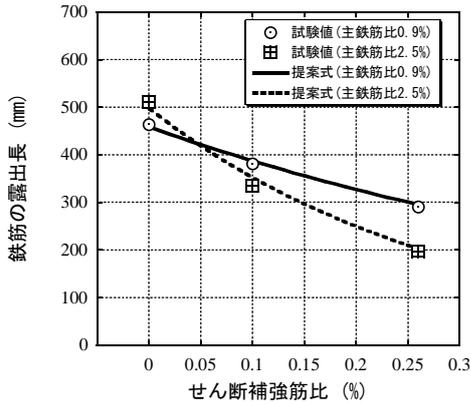
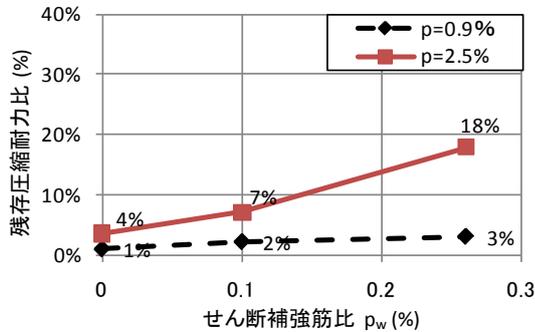
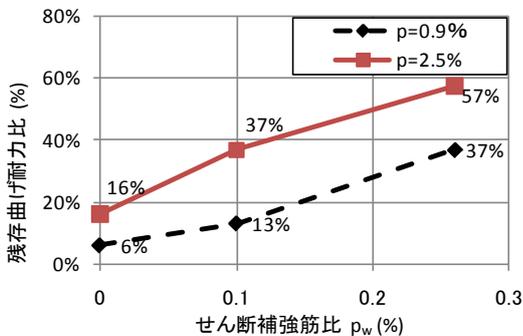


図-7 主鉄筋の露出長に鉄筋比が及ぼす影響

図-8 に RC 柱試験体の主鉄筋比ならびにせん断補強筋比が発破試験後の残存耐力比に及ぼす影響を示す。全ての実験ケースにおいて、残存耐力比はせん断補強筋比及び主鉄筋比の増加に伴い増加していることがわかる。残存圧縮耐力比は最大でも約 20%程度にしか至っていない。これに対して、残存曲げ耐力比は最大約 60%まで及んでいる。したがって、せん断補強筋量が比較的多い RC 構造物の発破解体を実施する際には、事前にせん断補強筋を切断する等の事前処理または爆薬の増量が必要であると考えられる。



(a)残存圧縮耐力比



(b)残存曲げ耐力比

図-8 鉄筋比が残存耐力比に及ぼす影響

#### 4. RC 柱試験体の残存耐力の推定方法

##### 4.1 解析方法

発破解体により RC 建物の倒壊計画を行う上で、特に発破試験後の RC 柱試験体の残存耐力を解析的に評価することは非常に重要であると考えられる。そこでここでは、曲げモーメントおよび軸方向力を受ける RC 柱試験体の発破試験の前後における終局耐力を、断面分割法を用いて解析的に評価することを試みる。ただし、発破後の RC 柱試験体は図-9 に示すように中央部のコンクリートは完全に掃かれて主鉄筋が露出するものとして扱うことにする。

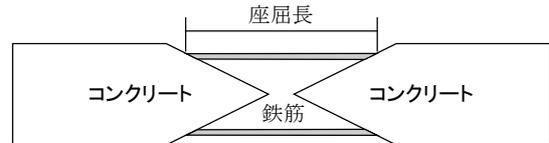


図-9 発破後試験体モデル

##### 4.2 構成材料の応力-ひずみモデル

###### (1) コンクリート

発破前の RC 柱試験体に対するコンクリートの応力-ひずみ関係は図-10(a)に示すように次式で与える。

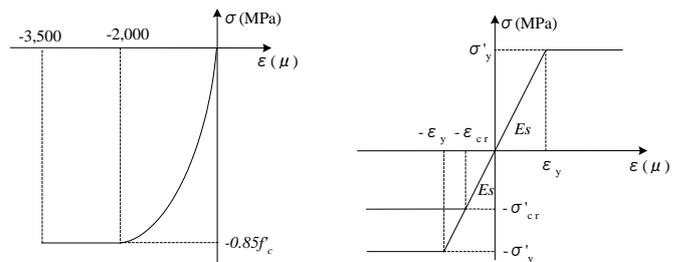
$0 \geq \varepsilon'_c \geq -0.002$  の場合

$$\sigma'_c = 0.85 f'_c \times \frac{\varepsilon'_c}{0.002} \times \left( 2 + \frac{\varepsilon'_c}{0.002} \right) \quad (3-a)$$

$-0.002 > \varepsilon'_c \geq -0.0035$  の場合

$$\sigma'_c = -0.85 f'_c \quad (3-b)$$

ここで、 $f'_c$  : コンクリートの圧縮強度、 $\varepsilon'_c$  : コンクリートの圧縮ひずみである。なお、発破後の RC 柱試験体の残存耐力を評価する際には、コンクリートは無視するものとする。



(a) コンクリート

(b) 鉄筋

図-10 コンクリートおよび鉄筋の応力-ひずみ関係

## (2) 鉄筋

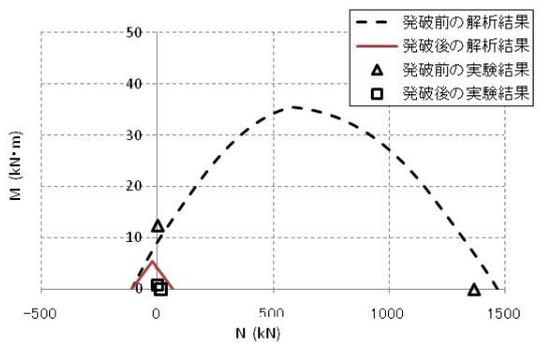
鉄筋の応力-ひずみ関係には図-10(b)に示すように弾性完全塑性モデルを基本的に用いるものとする。ただし、発破後の鉄筋の圧縮強度は座屈強度により決まると考え、本研究では、式(2)で評価される主鉄筋の露出長を座屈長として次式で与えられる両端固定条件の下における座屈応力を圧縮強度とした。

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E_s \phi_L^2}{4L_{cr}^2} \quad (4)$$

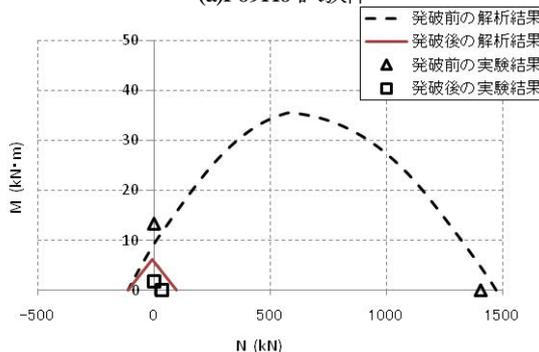
ここで、 $\sigma_{cr}$  : 座屈応力(MPa),  $E_s$  : 鉄筋のヤング率(=2.0 × 10<sup>5</sup> MPa),  $\phi_L$  : 主鉄筋の直径(mm),  $L_{cr}$  : 座屈長(mm)である。

## 4.3 試験結果と解析結果の比較

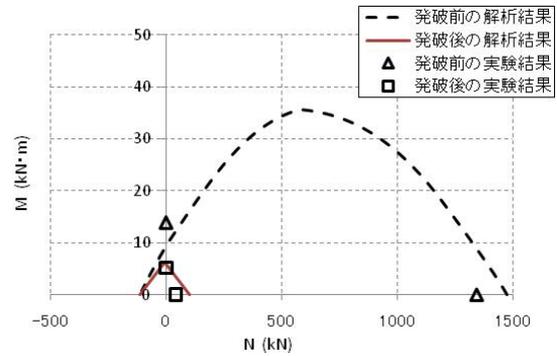
発破試験後の RC 柱試験体の実験と解析で得られた残存耐力を曲げモーメント(M)-軸力(N)関係上に表示したものを図-11 に示す。なお図中には、参考として発破前の RC 柱試験体の実験と解析で得られた耐力も示している。この図から、発破試験後の残存耐力に関しては、解析結果の方が実験結果よりやや大きく評価される傾向にあることがわかる。これは、発破試験の際に主鉄筋には外側に若干のはらみ変形が与えられているために実際には式(4)で与えられる座屈応力よりも小さな応力で座屈が発生しているためと思われる。解析結果と実験結果をよりよく一致させるには鉄筋の座屈強度を式(4)で与えられるものの約 1/3~1/4 に設定する必要がある。



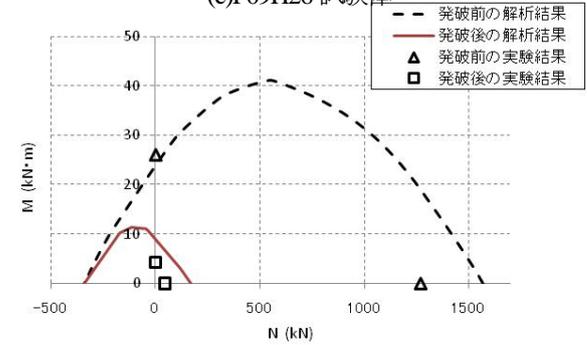
(a)P09H0 試験体



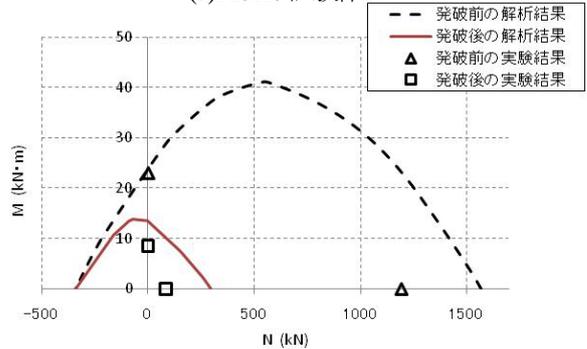
(b)P09H10 試験体



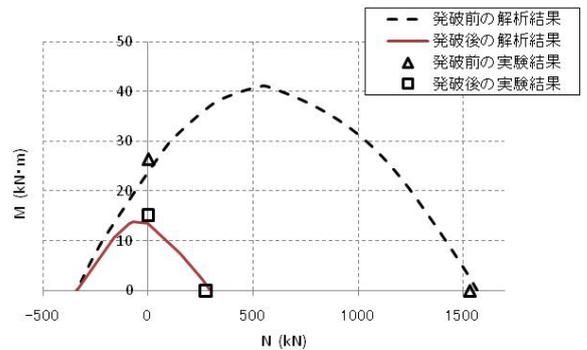
(c)P09H26 試験体



(d)P25H0 試験体



(e)P25H10 試験体



(f)P25H26 試験体

図-11 解析結果と実験結果との比較

## 5. まとめ

本研究では、爆薬量、主鉄筋比、せん断補強筋比をパラメータとする RC 柱試験体の発破試験を行い、発破試験後の RC 柱試験体の損傷程度を定性的・定量的に評価した。本研究の範囲内において得られた結果を、まとめて以下に示す。

- (1) C4爆薬の発破係数Cは0.15kg/m<sup>2</sup>でも十分RC柱試験体(主鉄筋比=0.9%, せん断補強筋比=0.1%)の残存

耐力を低下させることが可能である。

- (2) RC 柱試験体の主鉄筋比やせん断補強筋比は、発破解体における試験体の破壊状況や残存耐力に影響を及ぼす。
- (3) RC 柱試験体の主鉄筋比ならびにせん断補強筋比を考慮した発破後の主鉄筋の露出長を求める回帰式を提案した。
- (4) RC 柱試験体の発破試験後の残存耐力を評価する解析方法を提案した。

我が国で発破解体工法を普及させるためには、今後も継続的な研究が望まれ、コンクリートの圧縮強度や骨材、試験体の寸法等が発破解体に及ぼす影響を調べる必要があると考えている。

#### 参考文献

- 1) 小林茂雄・坂田英一・橋爪清・中川浩二：鉄筋コンクリート構造物の発破解体設計と実施，土木学会論文集，498/VI-24，pp.67-76，1994.
- 2) Loizeaux J. M. and Loizeaux D. K.: Demolition by Implosion, Scientific American, Oct., pp. 146-153, 1995.
- 3) Loizeaux M. and Osborn A. E. N.: Progressive Collapse-An Implosion Contractor's Stock in Trade, Journal of Performance of Constructed Facilities, ASCE, Vol.20, No.4, pp. 391-402, 2006.
- 4) 木村真：海外における建物の解体の現状，工業火薬，Vol.48, No.3, pp.139-150, 1987.
- 5) 解体工法研究会：新・解体工法と積算，(財)経済調査会，pp.50-56，2006.
- 6) 馬貴臣・三宅淳巳・小川輝繁・緒方雄二・瀬戸政弘・勝山邦久：鉄筋コンクリートの発破解体における鉄筋の影響について，火薬学会誌，Vol.59, No.2, pp.93-103, 1998.
- 7) 木下雅敬・長谷川昭美・松岡栄・中川浩二：発破による鉄筋コンクリート構造物の解体に関する基礎的研究，土木学会論文集，第 403 号／VI-10, pp.173-182, 1989.
- 8) 全国火薬類保安協会：都市建築物解体用発破対策要素実験報告書，1988.

(2009年9月24日受付)