

# 鉄筋コンクリート構造物の発破解体設計と実施

小林茂雄\*・坂田英一\*\*・橋爪清\*\*\*・  
中川浩二\*\*\*\*

構造物を発破を用いて解体する技術が、経済性、効率、安全性の面で有利な工法として注目されている。今回失敗の許されない実施工の立場から製鉄所内に残存する鉄筋コンクリート構造物を、発破を用いて一挙倒壊させることに成功した。本報告では耐震性にすぐれた国内の構造物に本工法を適用する際の課題を整理した上で、特に全体計画と倒壊設計の考え方および手順を述べ、実際の構造物への適用を通じてその妥当性を検証した。さらに実適用によって得られた新たな知見についても言及した。

*Key Words: reinforced concrete building, blasting demolition, blasting techniques*

## 1. 緒言

都市の再開発、産業構造・生活システムの再構築を背景に、主に戦後建造された鉄筋コンクリート構造物（以下RC構造物と呼ぶ）を解体する必要性が全国的に高まっている。このため騒音や振動の少ない高性能な油圧圧碎機をはじめ種々の機器や工法の開発が行われてきているが安全性や効率の面で必ずしも抜本的解決には至っていないのが実状である。

これらの課題に対し、欧米でよく用いられる発破工法が工期が短く安全でかつ経済的な工法として注目され、「コンクリート構造物発破解体工事保安技術指針」<sup>1)</sup>に基づいて火薬類取締法施行規則<sup>2)</sup>が改訂されるなど、国内においてもその適用が一般的に認められつつある。

筆者らは発破工法を国内構造物解体に適用するための技術開発を進めてきた<sup>3)~5)</sup>。そして今回失敗の許されない実施工の立場から製鉄所内に残存するRC構造物を一挙倒壊させる機会を得、計画通りの解体に成功した。

本文ではわが国におけるRC構造物の発破解体における課題に対する考え方を今回の成功例をもとに述べ、今後の本工法の適用範囲の拡大への一助とするものである。

## 2. 発破によるRC構造物解体の意義と課題

### (1) 発破によるRC構造物解体の意義

構造物の解体に発破を用いる意義は、効率がよく周辺への影響が短時間で済むこと、完全遠隔操作により安全性が向上すること、および安価な割に強大なエネルギー

を有する爆薬の使用によって経済性が向上する可能性を有することであると言える。

前者2つについては説明するまでもないが、圧碎工法等の他工法と較べた場合の経済的有意性については、発破工法が比較的頻繁に実施される欧米においても、少なくとも6階建て以上の高さの構造物を対象とした場合に初めて現れるとされている<sup>6)</sup>。これは5階建て以下の場合、事前処理や飛散対策など、発破工以外に関わる工事が相対的に多くなるためである。わが国の構造物は主に耐震性の理由から欧米諸国の構造物と比較して頑強であり、一挙倒壊工法を適用するには多大な事前処理作業が必要になると考えられ、この経済高さは更に高くなると予想される。また現実にはこれ以上の高さの構造物は鉄骨鉄筋コンクリート造か鉄骨造の場合が多く、これらの場合には工法的な工夫がさらに要求されるであろう。

一方、6階建て程度、すなわち高さが20m程度程度のいわゆる中層構造物は、RC構造物としては最も一般的であり、戦後建造された集合住宅の多くはこのタイプに含まれる。これらを解体する場合には、地上作業用の圧碎工法用機器の通常のスパン長さの限界到達点に近い場合、①超ロングスパン圧碎機の使用、②階上での作業が可能な小型圧碎機の利用、③他工法との併用など工法選択の必要がある。筆者らはこの規模の構造物に対して、構造物を落下転倒させる1次的な解体に発破を用い、普通スパンの届く高さにしてから圧碎工法を用いて2次解体を行う方法が国内で発破工法を用いる場合最も現実的であると考えている。この場合発破適用箇所は構造物の比較的下層部のみに限られるため、安全管理および環境保全管理上の対策が講じ易く、経済的であると考えられる。

しかし、多少コスト増となっても限定された空間内で一瞬のうちに構造物を倒壊させる必要性の生じることが予想される他、この技術は将来必要となる超高層ビル解体に適用できる可能性も秘めている。したがって、耐震

\* 正会員 博(工) 新日本製鉄(株)設備技術センター  
(〒299-12 千葉県富津市新富20-1)

\*\* 正会員 ハザマ技術研究所

\*\*\* 日本化薬(株)化工品事業部

\*\*\*\* 正会員 工博 山口大学工学部社会建設工学科

表一 1 RC 構造物の発破解体における課題と解決方法

課題	解決方法
倒壊計画手順	要素技術を総合的に組み合わせた最適設計とするための検討フローの構築
倒壊形式の決定	周辺条件、作業の安全性、確実性、コストの総合的評価
発破が事前処理かの決定	作業の安全性、コストの評価
倒壊計画の妥当性の確認	動的数値シミュレーション
破砕位置の設定 (発破、事前処理)	3次元CAD図を用いた幾何学的な検討
破砕量の妥当性の確認	座屈を用いた確実性の検証
起爆順序の決定	動的数値シミュレーション
目標破砕に対する確実性向上	部材ごとの発破係数、孔間隔、孔配置、孔あたり薬量
耐震壁の扱い	事前処理、補助工法の検討
地盤振動 (予測→影響評価→対策) (発破振動、倒壊振動)	予測式、低減技術の考案
騒音 (予測→影響評価→対策)	予測式、低減技術の考案
衝撃波 (予測→影響評価→対策)	予測式、低減技術の考案
飛石 (発生させない) 確実な防護	防護方法の考案 防護材の選定
部材変形を妨げない防護	装着方法の考案
粉塵 (発生させない)	はつり屑の処理、水の利用

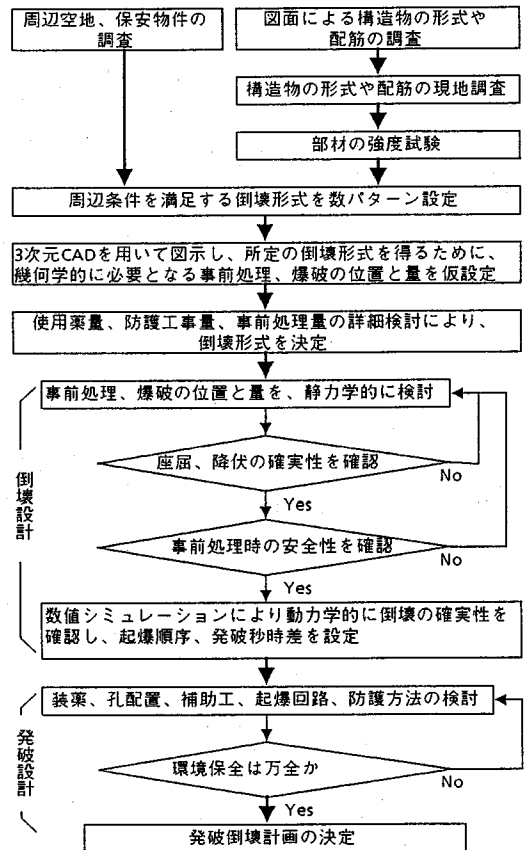
性に優れたわが国の構造物に発破を用いるための基礎資料を蓄積しておくことは有意義であると考えられる。

(2) 国内構造物発破解体における課題

日本の構造物の耐震設計に用いるベースシャ係数は、1923年の関東大震災以来0.2が基本となっているのに対し、米国・カリフォルニア州におけるそれは、1960年代まで0.1以下の値を用いており、1971年のサンフェルナンド地震以降、構造や用途によっては大きな値を用いる場合もあるが、1979年作成のUniform Building Cord<sup>7)</sup>でも0.12である。比較的地震の多いカリフォルニアでもこの程度であるから他の地震のない地域の構造物と比較して日本の構造物がいかに頑丈に設計されているかがわかる。

これらの差は部材断面の大きさと鉄筋量の違いとなって現れる。また壁を耐震要素として扱う場合も多く、さらに計算外の2次的な部材も多い。構造物は部材が大きく、鉄筋が多く使用され、構造要素が多いほど当然壊しにくい。したがって欧米諸国で用いられる発破工法と比較して使用薬量を増加する必要があると考えられるが、その結果周辺環境保全の困難さと事前準備作業の増加を招くことになる。以上より国内RC構造物を発破解体するには独自の考え方を組み立てる必要がある。そのような観点から課題を整理すると表一1のようにまとめられる。

筆者らのグループは以前、発破解体基礎実験としてRC 3層2スパンラーメン構造の挙倒壊を試みた<sup>3)</sup>。このとき、不発はなかったにも拘らず一挙倒壊実験としては失敗に終わっている。その大きな原因として壁の事



図一 1 倒壊計画のフロー

前処理が不十分であったために隣接部の柱が自由面不足となり十分な発破効果が得られなかったこと、倒壊過程において壁残存部が噛み合い、結果的に倒壊方向荷重を負担して倒壊運動の妨げとなったことが挙げられる。これらのことは表に挙げた課題の重要性と解決の方向性を示唆する実験結果として貴重な経験であった。

表に示すように発破解体技術の構成要素は、構造物を確実に思い通りの形式で倒壊させることを構造工学的に検討する倒壊設計技術、部材を確実に破砕するための部材破砕技術、発破時および転倒時に周辺環境を保全するための周辺環境保全技術の三つである<sup>4)</sup>。倒壊計画ではこれら3つの要素技術を連関させて、構造物の特性や周辺条件を加味しながら、事前処理の量と使用爆薬量が最も少なく、かつ周辺への影響を最小限に抑えて思い通りの形で倒壊するように計画することになる。

本文ではこれらの課題の内、総合的な倒壊計画について述べた後、構造的検討要素である倒壊設計と部材破砕について述べ、実際の発破結果との対比を行う。

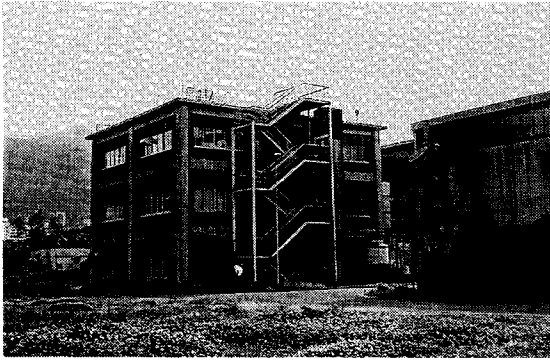


写真-1 東北側から見た解体対象構造物

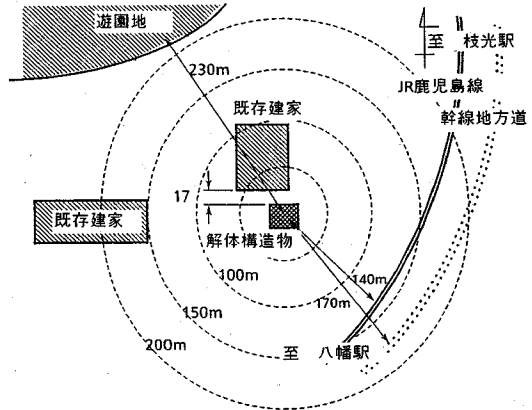
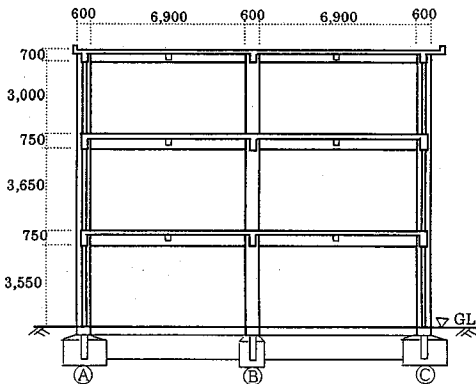
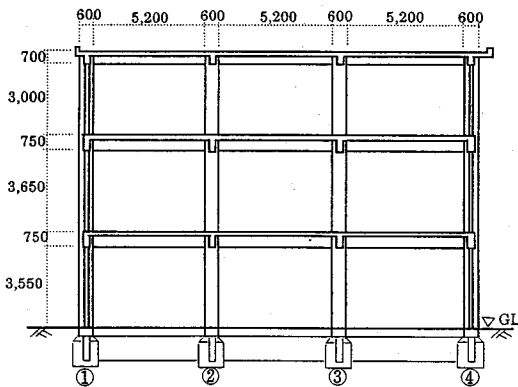


図-3 解体建家の周辺状況



南北方向断面



東西方向断面

図-2 各断面図と柱壁呼称

### 3. 構造物の概要と倒壊形式の決定

#### (1) 倒壊計画のフロー

倒壊計画のフローを図-1に示す。まず、周辺空地の有無、広さ、保安物件の性格、位置を調査する。構造物の構造形式や配筋は既往の図面や計算書をもとに調査することになるが、既往の図面が残っていない場合や例え残っていても図面通りでない部分があることが多いこと、倒壊設計の際に鉄筋の降伏、破断強度を正確に知る必要があることから、実際の構造物の調査や部材を切り

出しての試験を実施することが望ましい。

次にこれらの資料を元に倒壊形式を設定する。その際、防護工事量や事前処理量が最小で、しかも確実性の高い倒壊形式を直接的に選定することは困難なので、倒壊方向や倒壊後高さなどの要件を満たしていくつかの形式を設定する。これら各々について発破後の構造物の変形を図示し、幾何学的に必要となる事前処理や発破の位置、量を仮設定する。そして、これに基づいた費用、工期の比較検討により最適な倒壊形式を選出する。

さらに選定した倒壊形式に基づき、部材を破砕する位置と量を決定するための倒壊設計を行う。

最後に決定した発破箇所と量に基づく発破設計を行うことになる。発破設計では発破孔の配置、薬量、起爆回路、補助工、防護方法などを具体的に決定する。起爆順序の設定については倒壊形式を制御する要因となるため、本文では倒壊設計に位置付けている。

#### (2) 解体対象構造物の概要

今回発破工法を適用した構造物（以下解体構造物と呼ぶ）の外観を写真-1に、構造断面図を図-2に示す。解体構造物はRC造壁付きラーメン構造3階建てのごく単純で小規模な構造物であるが、柱、梁の鉄筋量は0.8%~1.7%と比較的多く、壁にも十分な鉄筋が入っている。これらのことをはつり調査で確認するとともに、鉄筋の引張り試験、コンクリートコアの圧縮試験を実施し、鉄筋の降伏強度390MPa、破断強度570MPa、コンクリートの圧縮強度50MPaを得た。これらはそれぞれ3供試体での最大値であるが、構造物の規模が大きければさらに多くの試料を用いた調査が必要になるであろう。

環境保全にかかわる周辺状況としては、壁の端から17m離れて最も近い工場建家、建物中心から140m離れてJR鹿兒島本線、170m離れて幹線地方道、230m離れて遊園地が存在している。その状況を図-3に示す。これらに対して飛石が一切生じないこと、JR線路

	概念図	倒壊後でき型	事前処理量	事前処理時安全性	防護量	確実性	2次解体量
CASE 1			壁床撤去面積 210m <sup>2</sup> 北側壁分離 1式	AB通間が片持 梁状態となり、不安定で 危険	間接防護 面積 600m <sup>2</sup>	重心が北 よりとなり、北側 へ傾く可 能性大	A通柱がほ んど残っ ており、解 体量大
CASE 2			壁床撤去面積 350m <sup>2</sup>	問題なし	間接防護 面積 600m <sup>2</sup>	AB通間 梁の運動 が複雑	A通柱がほ んど残っ ており、解 体量大
CASE 3			壁撤去面積 280m <sup>2</sup>	問題なし	間接防護 面積 600m <sup>2</sup>	重心を南 側へ移動 させるに は落下高 さ低い	A通柱がほ んど残っ ており、解 体量大
CASE 4			壁床撤去面積 370m <sup>2</sup>	問題なし	間接防護 面積 920m <sup>2</sup>	重心移動 の必要な く確実性 高い	柱はほとん ど破砕され ている
CASE 5			壁床撤去面積 330m <sup>2</sup>	問題なし	間接防護 面積 920m <sup>2</sup>	重心移動 の必要な く確実性 高い	柱はほとん ど破砕され ている

凡例 ◀ 倒壊方向、// 発破範囲、▶ クサビ状発破

図-4 考慮対象とした倒壊形式一覧

上で振動加速度 20gal 以内という条件が課せられた。

### (3) 倒壊形式の決定

倒壊計画策定においては前述の環境保全に関する制限の他以下の2項目の前提条件が与えられた。

- 1) 発破工法適用の目的は、発破後の2次解体の効率と安全性の飛躍的向上による解体工事トータルとしての効率・安全性の向上であり、そのため発破後の高さが出来る限り低くなるものとする。
- 2) 周辺工事との関連上、できる限り狭い範囲で倒壊するような形式とする。

以上を満足する形式として図-4に示すCASE1からCASE5の倒壊形式を設定し比較検討を行った。

CASE1：北側に保安物件があるため、北側面については発破しないか発破しても小規模とすることが望ましい。そのため予め北側のA通壁を分離し、南側構造体を倒壊させる際の防護壁とする。南側構造体は2通、3通の柱を発破することにより、各階床を真下に落下させるとともに、1通壁と4通壁をそれぞれ内側へ折り畳むことを目標形式とする。分離したA通壁は南側構造体の倒壊運動がある程度進行した後3箇所程度柱断面の圧縮側のみを発破(クサビ状発破)し、その上へ倒壊させる。しかしこの場合A通壁分離に関する事前工事が多大となる。

CASE2：CASE1との類似型であるが、事前処理時の安全性を確保するため、A通り壁を分離せず、南側構

造体より少し遅らせて連鎖的に倒壊させる形式である。A B通り間の梁および床を回転ヒンジにする必要があり、倒壊過程でかなり複雑な変形が要求される。

CASE3：C通柱とB通柱をC→Bの順で発破することにより、構造物全体を若干南側へ傾けながら倒壊させる。この時上部構造の落下に伴って重心をA→C方向に移動させる必要があるが、構造物の高さが低く、充分な落下距離がとれないため困難であると思われる。

CASE4：CASE1,2との類似型であるが、倒壊確実性をより向上させるため、A通り壁を分離せず、柱全てをほとんど発破し、1通壁と4通壁をそれぞれ内側へ折り畳むことで全体的に下方へ倒壊させる形式。北側には別途防護壁が必要となる。

CASE5：CASEとは90°回転したパターン。

以上について図-4に示すように事前処理量、防護工事量などの観点から比較検討した結果、各ケースそれぞれ長短があるが、経験も浅いことから特に確実性にも優れたCASE5を選定し、計画を進めることとした。

## 4. 倒壊設計

### (1) 倒壊設計の考え方

倒壊設計の基本的な考え方は以下である(図-5参照)。

まず倒壊運動を起こさせるべく、倒壊方向の最も効果

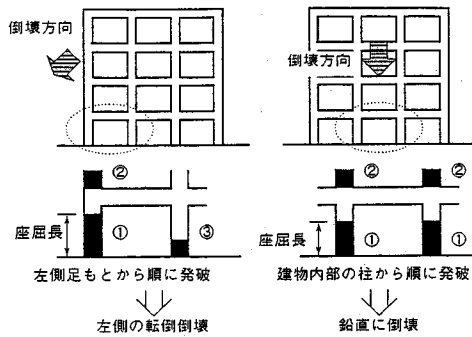


図-5 構造物発破解体の基本的考え方

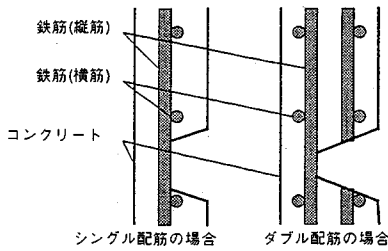


図-6 壁の線はつり概念図

的と考えられる鉛直部材（主に柱）を発破して鉛直抵抗力を失わせる。その際柱の破砕長さは少なくとも発破後残った主鉄筋が座屈する程度とし、座屈後所定の高さまで落下するように設定する。発破位置は構造物を転倒させたい場合は転倒方向の最端の柱が効果的であるし、内側に倒れこませながら鉛直に落下させたい場合は、建物の中央付近の柱をまず発破することになる。

一度倒壊運動が始まると、これを止めることなく、また周辺環境に損傷を与えることなく、所定の形状になるまで落下させることが主たる検討項目となる。このためには発破しない柱や壁などの構造要素を、構造物の変形に対して抵抗力を発揮しないように面外に変形させるか、事前に撤去しておく必要がある。この様な考え方で倒壊過程を3次元CAD等を用いて図示し、破砕箇所および部材が落下や回転運動の途中で互いに干渉することがないように破砕量を仮設定する。

倒壊過程に基づいてこれらの部材に倒壊時にかかる力を予測し、確実に変形するように事前処理箇所、量、発破箇所、量を決める。さらに事前処理時の安全性の検討を含め、ここではこれらの検討を倒壊設計と呼んでいる。

(2) 事前処理

事前処理部分は発破で行うことも可能であるが、特に壁や床などの薄い部材は発破効率が悪く薬量が増えること、それにともない防護量も増えることなどを総合的に加味して範囲を決定する。

壁については、構造体の鉛直落下の妨げにならないよ

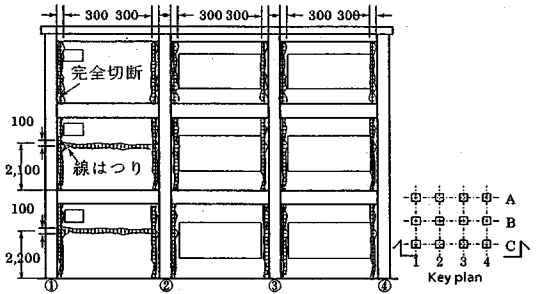


図-7 壁の事前処理計画

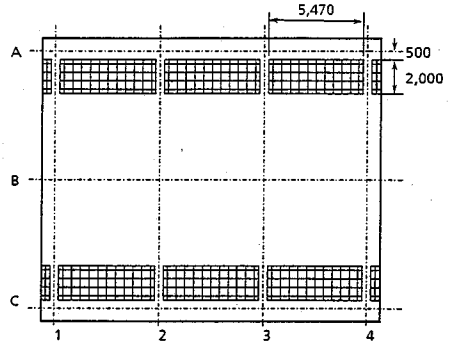


図-8 屋上スラブの事前処理計画図

うに直交する一方向を完全に事前撤去し、残した壁についてはその通りの柱の発破に伴い面外変形するように鉄筋（縦筋）が露出するまで線状にはつりしておくこととした。

すなわち今回は1および4通り壁を撤去し（図-2）、AおよびC通り壁は図-6に示すような事前処理にとどめた。また柱に取り付ける防護材の巻き付けの妨げになる箇所については柱との境界を約10cm幅でコンクリートをはつりとり、はつりとった方向と直行する方向の鉄筋（横筋）を切断することとした（図-7）。

屋上のスラブについては3階壁の内側への倒壊を補助する目的で壁に沿ってある幅にわたってコンクリートをはつりとることとした。その際鉄筋は切断していない（図-8）。建物内部の階段はすべて完全に撤去し、ドアや窓は枠と共にあらかじめ取り外しておいた。

(3) 破砕量の妥当性の確認

a) 評価式

発破後、鉄筋のみになった柱の座屈の確実性の確認方法として、両端固定の場合のオイラーの座屈条件式の適用を試みた。発破後の鉄筋は提灯状に塑性変形しており、座屈荷重は健全な状態と比較して相当小さくなっていると考えられる。このことを実大モデル実験で確認した結果、その程度は1/8~1/6であった。ここでは安全率3以上見込んでその程度を1/2とし、あくまでも破砕量の目安を得る式として、式(1)で座屈荷重を与える

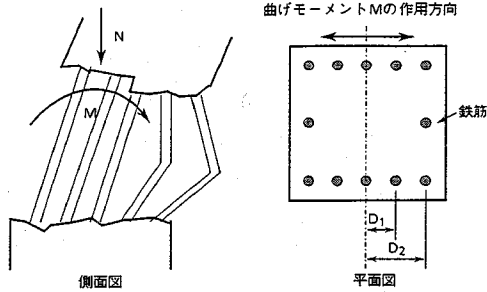


図-9 柱、梁の鉄筋配置と部材曲げ降伏概念

こととした。

$$Pcr = 0.5 \times 4\pi^2 EI / L^2 = 2\pi^2 EI / L^2 \dots (1)$$

ここで、 $Pcr$ ：鉄筋1本あたりの座屈荷重、 $E$ ：鋼材の弾性係数 ( $N/cm^2$ )、 $I$ ：鉄筋の断面2次モーメント ( $cm^4$ )、 $L$ ：鉄筋長さすなわち破砕長 ( $cm$ ) である。

実際の計算では構造解析により求めた軸力  $N$  を鉄筋の本数  $n$  で除した値と  $Pcr$  を比較することになる。

一方鉄筋のみになった柱や梁を曲げ圧縮力により回転ヒンジと見なせる状態とするには、圧縮側鉄筋が座屈するように以下のように考えた。

鉄筋の配置が図-9の場合、鉄筋1本あたりに作用する軸力は式(2)で表せる。

$$Ri = \frac{N}{\sum ni} \pm \frac{M}{Zi} = \frac{N}{\sum ni} \pm \frac{2MDi}{\sum ni Di^2} \dots (2)$$

ここで、 $Di$ ：曲げ中心から  $i$  番目の鉄筋中心までの距離 ( $m$ )、 $Ri$ ：曲げ中心から  $Di$  に位置する鉄筋に作用する軸力 ( $N$ )、 $ni$ ：曲げ中心から  $Di$  に位置する鉄筋の本数、 $N$ ：部材に作用する軸力 ( $N$ )、 $M$ ：部材に作用する曲げモーメント ( $Nm$ )、 $Zi$ ：断面係数 ( $= \sum ni Di^2 / 2Di$ ) (本  $m$ ) である。

$Ri$  により圧縮側鉄筋が座屈するためには  $Rcr$  が  $Ri$  の絶対値より小さいことが条件となる。

**b) 計算結果**

確実に予定通りの倒壊形式を得るために、発破後の部材に作用する荷重を考慮して、鉄筋のみになった柱の座屈と、梁および柱が発破部で曲げ降伏するかどうかを確認した。式(1)(2)を用いた計算結果を表-2に示す。

表には内外柱材、梁材についてそれぞれ代表的、あるいは最もクリティカルになると思われる3階の部材についての計算結果を示している。また、解析には妥当と思われる構造モデルを想定している。解析の結果、表中の破砕長を発破、破砕すれば部材は座屈あるいはピン構造化すると考えられた。

表-2 部材変形の確実性検討結果一覧

検討項目	部位	発破時断面力		破砕長 (m)	Ri (kN)	Pcr (kN)
		軸力 (kN)	曲げモーメント (kNm)			
内側柱材の座屈	3階B1,4通	-145	0	(全長)	-12.1	2.9
	3階B2,3通	-222	0	(全長)	-22.2	2.9
梁部材の曲げ降伏	3層1,4通端部	75	-145	2.0	-198	23.5
	3層2,3通端部	98	-189	2.0	-258	23.5
外側柱材の曲げ降伏	3階A1,4通、C1,4通	-106	11	0.6	-67.7	41.2
	3階A2,3通、C2,3通	-106	11	0.6	-61.8	41.2

軸力は引張りを正、曲げモーメントは下端(外側)引張りを正とした。

表-3 保有水平耐力検討結果一覧

階	層重量 (t)	総重量 (t)	層せん断力係数	必要保有水平耐力 (t)	保有水平耐力 (t)
3	270	270	0.21	57	118
2	385	655	0.166	109	227
1	400	1055	0.140	148	308

**(4) 事前処理された構造物の安全性の検討**

事前処理時の安全性の検討については事前処理した状態での常時および地震時の各部の応力チェックと保有耐力が十分であることを確認する。

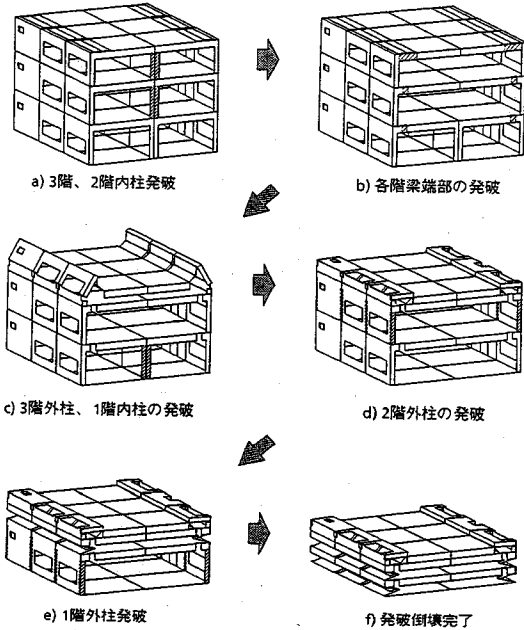
保有水平耐力の検討結果を表-3に示す。荷重条件としては発破解体前という特殊な状況の為、鉛直荷重として固定荷重のみを考慮し積載荷重は考慮していない。またベースシャー係数は0.2とし、地震地域係数は0.7、振動特性係数は1とした。値は仮想仕事法によって求めた全体崩壊時のものである。

いずれの階の保有水平耐力も必要保有水平耐力を上回っており、地震時にも事前処理状態の構造物がメカニズムに到ることはないと判断された。

**(5) 起爆順序と起爆間隔の検討**

倒壊方向を制御したり発破に伴う振動、騒音を所定管理基準以内に収めるには段階発破とすることが必要となるため、段分けと起爆順序を仮設定する。今回は以下のように考えた(図-10参照)。

まず屋上スラブを無支持状態にして鉛直落下運動を起こさせ、3階北面および南面を壁ごと内側へ倒壊させる。この時3階床スラブの落下を利用して、ワイヤリング等の補助工法を用いて3階のA、C通梁を引張り、柱および壁を引き倒すことができれば確実性はさらに向上すると考えられる。したがって発破順序としては、まず3階、2階B通の柱を発破し [a]、次に3層目梁の端部を発破することとした。この時設計外ではあるが、3階、2階のスラブの落下を助長することを狙い、2層目、1層目の梁も同時に発破(後述する切断発破)することとした [b]。その後3階のA、C通柱の下部を発破することにより発破部はピン構造となり、壁は内側へ



図一10 倒壊計画

倒壊してくるはずである [c].

2階A通, C通については柱と壁を転倒させることは容易ではないと判断し, 柱は全長にわたって発破してその鉛直抵抗力を奪い, それにともなって生じる圧縮力により, A通およびC通の壁が蛇腹状(「く」の字)に面外変形するように計画した. 壁を予定通り「く」の字型に折り畳むには, 3階以上の自重を壁にもたせるとともに, 2階スラブの落下を利用して壁の中央部をワイヤで引張り, 強制的に壁を面外に変形させることが有効と考えた. したがってまず1階のB通柱を発破し [c], 続いて2階A, C通柱を発破することとした [d]. そして最後に1階A通, C通を発破することとした [e].

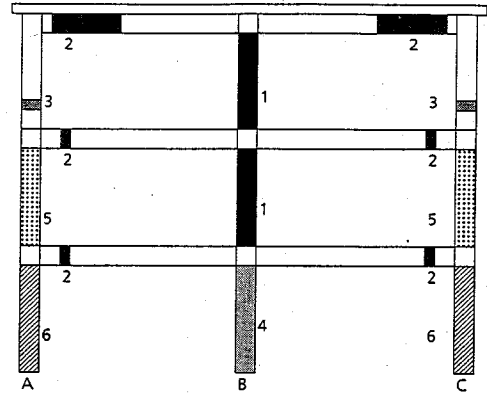
発破倒壊完了後には, 構造物はf)に示すように真下に落下した形となり, 高さ約4.6mと発破前の約3分の1となる予定である.

最終的にこれを決定するためには, 構造物の動的な挙動を追跡できる数値シミュレーションによって, 動力学的に倒壊計画の確実性を確認しておくことが望ましい. これにより, 事前処理および発破の量と位置を微調整するとともに, 起爆順序, 発破秒時差を決定する. 今回はその手法としてDDA(不連続変形法, Discontinuous Deformation Analysis)<sup>8)</sup>を用いて検討した<sup>9)</sup>. 起爆順序と起爆間隔の一覧を図一11および表一4に示す.

### 5. 発破設計および補助工法

#### (1) 使用火薬類

鉄筋コンクリート部材の破碎に用いる爆薬は, 鉄筋の



図一11 起爆順序一覧

表一4 起爆間隔と各段の斉発爆薬量

起爆順序	段発#	秒時差 (s)	雷管個数(個)	斉発爆薬量 (kg)
1	DS#2	初段	84	9.68
2	DS#3	0.25	112	4.88
3	DS#4	0.50	8	1.12
4	DS#7	1.25	44	5.28
5	DS#8	1.50	88	10.56
6	DS#10	2.05	88	10.56
	合計	-	440	42.08

切断を期待していないために一般的な岩石破碎用の爆薬が使用可能である. 今回は実際の工事における作業性, 残留した時の安全性等各種の条件を考慮して含水爆薬を用いることとした. 起爆にはDS段発電気雷管を用いた.

#### (2) 装薬量の算定および結核

これまでのいくつかの報告<sup>1), 3)</sup>から, 今回程度の鉄筋比の柱, 梁に対して主爆薬として3号桐ダイナマイトを用いた場合の, 破碎対象体積を元にした発破係数は, 柱について1.0kg/m<sup>3</sup>程度, 梁について0.8kg/m<sup>3</sup>程度である. また部材がある面で切断する発破の場合の対象断面積を元にした発破係数は, 0.4kg/m<sup>3</sup>程度で充分と考えられる. 今回は含水爆薬を用いるが, ダイナマイトと性能的にほとんど差はないとみなせることからこれらの発破係数をそのまま用いることとした.

計算の結果, 装薬数量の合計は42.08kg, 倒壊設計に基づく段あたりの最大薬量は10.56kgであり, この時発破振動, 騒音とも管理値以内であることを確認している<sup>10)</sup>.

孔配置は筆者らの検討<sup>3)</sup>を参考に, ある長さにわたって破碎する箇所については分散装薬, 切断破碎箇所については集中装薬とした.

直並列回路結線図を図一12に示す. サークットは8本の直列部に分け, 各直列結線部の雷管数は多くとも100個程度とした.

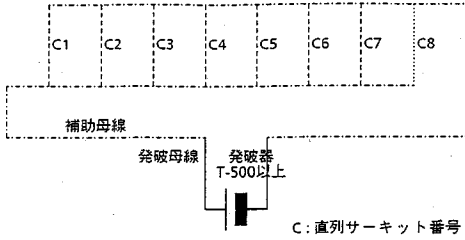


図-12 直並列回路結線図

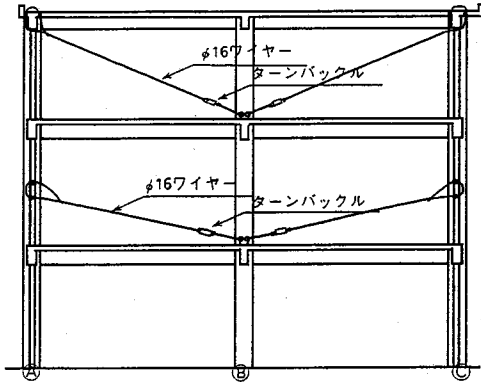


図-13 ワイヤリング計画図

### (3) 補助工法

前述のように柱の発破にともなう床の落下を利用して残存させた壁を確実に面外に変形させるための補助工法として図-13に示すようにワイヤリングした。

ワイヤはφ16、ターンバックル付きを用いた。端部は引き倒される方は梁に直接巻き付けクリップ止めし、引く方は床面にアンカーを打ち込んだ。2階の壁は中央部2箇所に穴を明け、直接巻き付けてクリップ止めた。

### (4) 飛石防護

3.(2)に述べたように本構造物の近くにはJR 鹿児島本線をはじめ重要な施設がある。また、今後発破工法を市街地中の解体工事に適用することも考えられ、周辺保安物件の防護は確実を期する必要がある。そこで、発破部分に金網と防爆シートを巻き付けた他、構造物の周囲に足場を組み、それに金網を張ることによりこの枠外へ破砕片を出さないということを前提にした。

## 6. 発破結果および考察

### (1) 発破結果

写真-2～5に倒壊過程の連続写真を示す。これらは秒間3コマで撮影したものの一部であり、1枚目がほぼ初段の発破 (DS#2) と一致している。

柱の発破直後からスラブの落下は始まり、梁の発破によって落下は早まる。3階柱の発破 (DS#4、写真-



写真-2 倒壊状況 (初段発破直後, ≒DS#2)

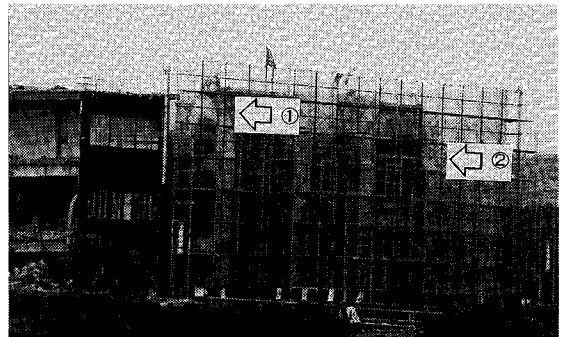


写真-3 倒壊状況 (約0.50秒後, ≒DS#4)

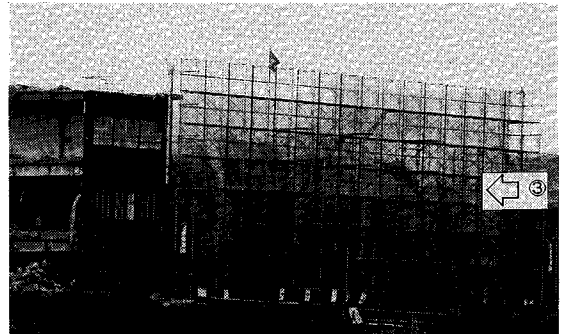


写真-4 倒壊状況 (約1.25秒後, ≒DS#7)

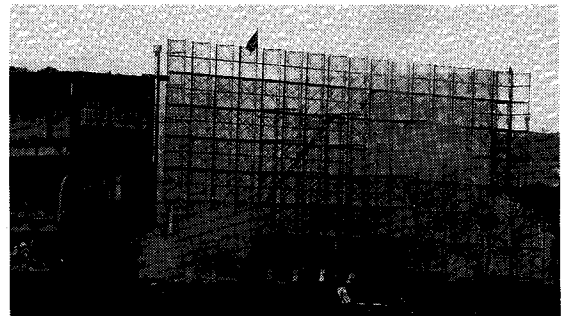
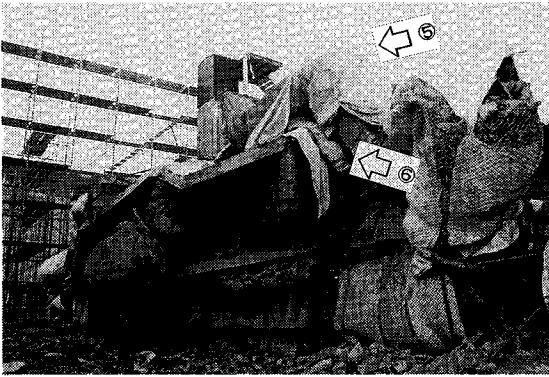


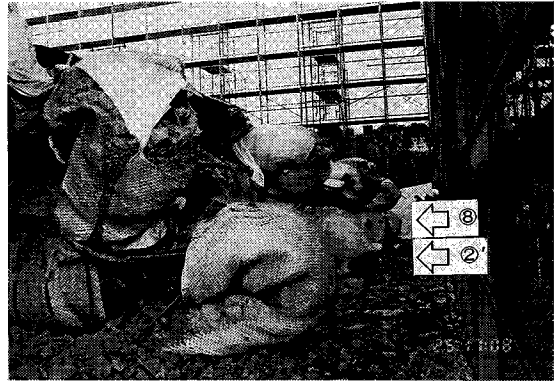
写真-5 倒壊状況 (約3.00秒後, 発破完了後)

3) 時点では屋上のスラブはかなり落下している (①)。しかしこれにより3階柱および壁は屋上スラブと干渉する事無く折りたたまっている (②)。このとき3階のス

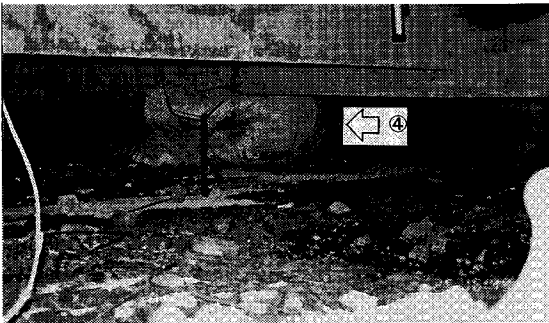




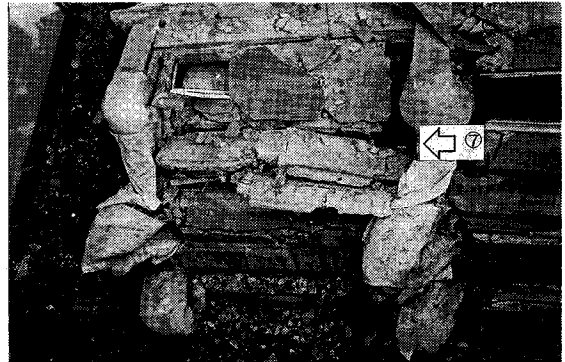
写真一六 倒壊後の状況



写真一八 C通柱の状況 (1, 2階)



写真一七 B通柱の状況 (1階)



写真一九 C1, 2通間壁の状況

ラブも落下を始めており、1階内側柱の発破 (DS#7, 写真一四) の時点では3階柱、壁の転倒の影響も受けて、発破 (DS#8) 前にも拘らず2階外側柱が内側に倒れ込んできている様子が伺える (③)。

写真一六に示すように倒壊後の姿を観察すると、総じてほぼ予定通りの形状に折畳まれ、倒壊後の高さも5m以下だったことから成功であったといえる。

各部の倒壊後の状況の内、特に各部の変形について予定通りだった点、予定外であった点を以下に列挙し写真中に示す。まず予定通りであった点は、

- ④各階とも建家内側の柱 (B通り柱) は完全に鉛直耐力を失い、所定の高さまで変形した (写真一七)。
- ⑤3階の外側の柱 (A, C通り柱) は発破部で内側に折れ曲がり倒壊した (写真一六)。
- ⑥3層目の南北方向梁 (1~4通り梁) は発破部で回転ヒンジとなった (写真一六)。
- ⑦窓がなく、構造体としてほぼ健全なまま残っていた壁は、事前処理部で折れ曲がった (写真一九)。
- ⑧2階, 1階外柱 (A, C通り柱) は完全に鉛直および曲げ耐力を失い所定の高さまで折れ曲がった (写真一八)。
- ⑨足場と金網による枠の外に発破の破片と思われるものは全く発見できなかった。また隣接構造物に発破による損傷は全く見られなかった。

逆に予定外であった点は、

- ①' 全体的に変形の進む速度 (落下速度) が早く、相対的に起爆タイミングが遅かったと考えられる。
- ②' 2階, 1階外柱 (A, C通り柱) はそれより上階の落下の影響を受け、外側引張りのモーメントにより外側にはらんだ状態で座屈した (写真一八)。

#### (2) 起爆タイミングについて

今回の発破計画では、3階の変形進行に1秒程度時間がかかるとして、起爆を前半 (DS#2~DS#4) と後半 (DS#7~DS#10) に分けたが、この間隔は縮めるべきであったと思われる。起爆より先に変形が大きく進んでしまうと孔中の雷管が押しつぶされて不発に終わる危険性があるためである。これを回避するには落下速度、変形速度をより正確に予測することが必要であるが、そのためには数値シミュレーションに負うところが大きい。数値シミュレーション手法の更なる精細化が望まれる。

#### (3) 事前処理ならびに発破による破砕量の妥当性について

1通りおよび4通りの壁は事前にすべて撤去する必要はなかったと思われる。すなわち側面柱を転倒させる3階以外の2階, 1階についてはA, C通りの壁同様ワイヤリングあるいは上部重量により面外変形させることとし、A, C通り壁との干渉にのみ留意した事前処理だけ

にとどめることが可能であると思われる。

発破箇所についてはいずれも予定通りの変形が得られ、十分条件は確実に満足していたと判断できる。1層目、2層目梁の切断発破は安全側を見て設計外に実施したものであったが、これは落下速度が解析より多少早まったことを見ても必要なかった可能性が高い。

#### (4) 薬量について

薬量については各部とも、完全に破碎しつつも防護材を飛散させるほどではなく、防護とのバランスという意味では適切であったと思われる。

## 7. 結 言

本報告における最大の意義はとかく不安の目をもって見られることの多い鉄筋コンクリート構造物の発破解体を、細部における問題点においても大筋で予定通りに行い得たことである。換言すれば発破解体を十分な管理のもとに行い得たということを実証できたことにある。

細部について得られた成果は以下である。

(1) 予定通り周辺にはみ出すことなく所定の区域で、しかも当初高さの1/3まで倒壊させることができ、2次解体作業の安全性、効率のアップを図れた。

(2) 壁付きラーメン構造鉄筋コンクリート製構造物を発破を用いて一挙倒壊させる場合の、計画、設計の考え方の妥当性を確認できた。

(3) 壁を確実に面外に変形させるための補助工法としてワイヤリング手法が有効であることを確認した。

ここで紹介した例は実施工として確実にかつ安全に倒壊させるという立場から行ったものの結果であり、倒壊計画においてはかなりの安全率を見ていたことは否めない。しかし、このような検討を積み重ねることにより、必要十分な安全環境対策と倒壊の確実性を示すことが可能となれば、市街地で実施する場合に必要な付近住

民の同意を得ることもでき、本工法の適用範囲は広がるであろう。その意味で有用な考え方と知見を提供できたものと考えらる。

## 謝 辞

本工事の実施にあたって、新日本製鐵(株)八幡製鉄所の関係各位に多大なる援助を頂いた。また(株)奥村組九州支店には、工事の主要な部分を担当して頂いた。深い感謝の意を表したい。

## 参 考 文 献

- 1) 全国火薬類保安協会：コンクリート構造物発破解体工事保安指針，1991。
- 2) 通商産業省：火薬類取締法施行規則の一部を改正する省令，1992。
- 3) 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。
- 4) 小林茂雄・草深守人・池田義之・中川浩二：発破による鉄骨建家の倒壊工法に関する実験的研究，土木学会論文集，第415号/VI-12，pp.145-154，1990。
- 5) 小林茂雄・木下雅敬・中津賢一・中川浩二：鉄骨構造物の発破解体工法における設計・施工，構造工学論文集，Vol.38A，pp.1213-1225，1992。
- 6) M. A. Perkin：DEMOLITION OF CONCRETE STRUCTURES BY USE OF EXPLOSIVES，explosives engineering spring 1989。
- 7) International Conference of Building Officials：Uniform Building Code (U. S. A.)，1979。
- 8) 大西有三：岩盤解析における不連続変形法(DDA)の導入と課題，第9回岩盤システム工学セミナー「岩盤工学における解析手法の現状と課題」，pp.157-178，1992。
- 9) 坂田英一・小林茂雄・橋爪清・松尾聖子ほか：RC制御発破解体時の倒壊挙動の予測，土木学会第48回年次学術講演会概要集第1部，pp.10-11，1993。
- 10) 世一英俊・小林茂雄・橋爪清・中川浩二：RC構造物発破解体時の振動，騒音について，土木学会第48回年次学術講演会概要集第6部，pp.382-383，1993。

(1993.9.20受付)

## A PRACTICAL STUDY ON BLASTING-DEMOLITION METHODS OF REINFORCED CONCRETE BUILDING

Shigeo KOBAYASHI, Eiichi SAKATA, Kiyoshi HASHIZUME and Koji NAKAGAWA

In recent years there has been renewal of interest in blasting demolition methods of structures as more effective and safer technique at lower cost. We applied it to demolish a whole part of the reinforced concrete structure successfully in an iron-works, under the condition that it had to be carried out without failure. The present paper describes the procedures of this actual blasting-demolition for the buildings having powerfully reinforced beams and pillars and many wall structures, including the details of planning and design concepts and verifies its reasonableness.

Moreover we describe the analysis of the results to give instructive information with regard to necessary cares to be taken when applying blasting techniques to reinforced concrete buildings.