

発破による鉄骨建家の倒壊工法に関する実験的研究

AN EXPERIMENTAL STUDY ON BLASTING DEMOLITION METHODS OF STEEL FRAME BUILDINGS

小林茂雄*・草深守人**・池田義之***・中川浩二****

By Shigeo KOBAYASHI, Morito KUSAFUKA, Yoshiyuki IKEDA and Koji NAKAGAWA

Demolition works of steel frame buildings, such as factory buildings for steel making plants and other heavy industries, will increase markedly, thus entailing the need of safe and economic technique including blasting demolition methods.

Blasting demolition technology for steel frame structures consists mainly of the explosive cutting technique of steel components, the design method for the collapse, and the reduction method of air blast especially in urban area. This study focuses on the design method for collapsing down steel frame structure by blasting. In this study, an example of the design methods for the collapse was demonstrated, and an existing steel building was razed down experimentally in various collapsing patterns (vertical collapse and horizontal collapse). Through this study and experiments, we got useful data and instructive information about blasting demolition of steel structure, which would be helpful to realize more effective and safer demolition works.

Keywords : steel structure, blasting, demolition, shaped charge

1. 緒 言

近年、地域の再開発が各方面で論じられるようになり、都市の機能や景観の改善のための、老朽建造物の建て替えや土地の有効利用・再利用の必要性が増している。一方高度情報化による産業構造のリストラクチャリング等に伴い、これまで重厚長大産業を支えてきた工場施設等の遊休化が進み、これらの用地の新たなレジャー空間あるいは生活空間としての有効利用が図られつつある。このような背景の中、遊休化した工場建家等の鉄骨構造物を迅速かつ低コストで安全に解体撤去する技術の確立が強く求められている。

建造物の解体工法として欧米にみられるような発破工法がコスト・工程の面で有利な工法として注目を集めている。しかしわが国では、建造物解体への火薬類の使用に関しては消極的であった。これは主として以下の理由によるものと考えられる¹⁾。

- ① 火薬類の使用における安全性
火薬類を適正に使用しないと、発破振動・騒音・飛散物および爆風圧の問題が発生する。また、それをコントロールする制御発破技術の確立が不十分である。
- ② 指導規制
火薬類取締法施行規則 53条 5項に関連して、各都道府県の指導課における条件項目として「近隣住民の同意書を添付すること」を義務付けられることが多い。
- ③ 周辺住民の拒否反応
上記の同意書を得る際に、感情的な反対や、着工前の過大被害評価に基づく補償要求等がみられる。
- ④ 建築建造物の材料特性

これまでの解体対象物件は木造建築物が主体であり、解体が容易なため、火薬を用いる必要がない。

このような状況の中、今日、発破工法はあくまで特殊工法として使用されているのみである。しかし、発破工法は適正に使用すれば、十分に安全で低コスト・短工期の工法と思われる。そこで、今後も解体撤去のニーズが高まる中、この工法を一般工法として通常の建家解体工事の中で使用できるように、技術開発を進めていくことの意義は非常に大きいと考えられる。

以上の観点から著者らは、建造物解体への発破工法の適用について、一連の開発研究を行ってきた²⁾。本文は、

* 正会員 工修 新日本製鐵(株)設備技術本部土木建築技術部 (〒805 北九州市八幡東区枝光 1-1-1)

** 正会員 工博 間組(株)技術研究所第一部主査 (〒338 埼玉県与野市本町西 4-17-23)

*** 日本化薬(株)厚狭工場技術課課長 (〒757 山口県厚狭郡山陽町大字郡 2300)

**** 正会員 工博 山口大学教授 工学部建設工学科 (〒755 山口県宇部市常盤台 2557)

発破により鉄骨建家を倒壊させるための基礎資料を得るべく、実際の建家を用いて行った実験的研究について述べたものである。

2. 鋼構造物の解体について

既存の鉄骨構造建家解体工法としては、切断による工法、引倒し工法がある。圧砕機による切断工法は一般に周辺環境への影響が小さく安全な工法であるが、工期が長くコスト高である。一方引倒し工法は迅速かつ低コストな工法であるが、所定の倒壊形を得るために構造部材の事前処理を行い、構造物の耐力を倒壊寸前まで低下させる必要がある等、安全面での問題の多い工法である。それに対し発破制御解体工法は図-1に示すように、それまで安定であった構造を発破により瞬間的に不安定化、倒壊させる工法であり、後述の課題を解決すれば、従来の引倒し工法のもつ危険性を抜本的に解決するだけでなく、短工期、低コストの工法として期待できる。

鋼構造物の発破解体については、国内でもすでにトラス橋梁や吊り橋の橋柱の解体、さらには沈船の解体に用いられた例が報告されている³⁾が、工場建家等の一般建築物に適用された例の報告は、著者らの知るかぎりではない。鋼構造物の発破解体を行うに際して解決しなければならない問題点は多いが、解体対象を一般の建家に限定した場合、以下の3つの技術の確立を図ることが大きな技術課題と考えられる。

① 倒壊設計技術……一般建家は橋梁等よりも構造物の不静定次数が高いことが普通である。また環境の点から橋梁等よりも爆薬の使用量を抑えることを要求されることが多い。そのため、どこに爆薬を仕掛けて、いかに少ない爆薬量で効率的にしかも確実に構造物を倒壊させるかを検討する倒壊設計技術の確立が1つの課題となる。

② 鉄骨部材の切断技術……鉄骨部材の切断は通常の爆薬貼付け法によっても可能であるが、切断の確実性や爆薬量の観点から、一般には成型爆破線 (Linear Shaped Charge) とよばれる棒状の特殊爆薬を用いる。これは、ノイマン効果、すなわち成型装薬の穿孔効果を利用したもので、少量の爆薬で鋼板をガス切断に近い精

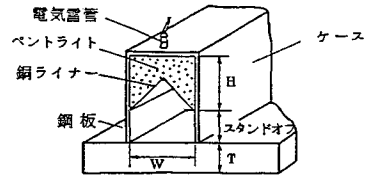


図-2 成型爆破線の概要図

度で切断することができるものである⁴⁾。図-2に今回の実験に用いた成型爆破線の模式図を示す。図のように、ケースに高性能爆薬 (ペンタライト) を詰め、これに山形の金属ライナーをはめ込んでいる。これを切断対象物上に固定して起爆すると、高温・高速のメタルジェットが発生して目標物を切断する⁴⁾。構造物の解体においては部材の切断が完全に行われることが最低限の必要条件である。もし切断が不完全なため、倒壊が途中で中断して構造物が不安定な状態で残った場合はその処理が困難である。そのため、なるべく少ない爆薬量で常に完全な切断を行うことが必要である。

③ 発破音の制御技術……鉄骨の発破については、コンクリートや煉瓦の発破のように飛び石の問題はなく、発破に伴う振動も大きな問題とはならない。しかし、ノイマン効果を得るため高爆速の爆薬を用いていることや貼付け発破であることから、発破音に伴う問題が存在する。わが国で一般的に鋼構造物の解体に発破がほとんど用いられなかった理由はこの音の問題にあると考えられる。したがって、音の制御技術の確立が必要である。

今回の実験的検討は、製鉄所の構内という地域社会から隔絶された特殊な環境を実験場所として利用できたために可能となったものであり、音の問題についてそれほど厳しい規制を強いられなかった。そのため、上記の諸課題に対していろいろな試みを行うことができた。ここでは鉄骨構造物の倒壊について行った実験のうち主として倒壊設計技術に的を絞って報告する。

3. 倒壊設計の考え方

鉄骨構造物の倒壊を設計する場合の基本的な考え方は、特定の構造部材を発破により切断し、骨組みのバランスを失わせ、自重等により生じる不釣り合いモーメントにより、構造全体に不安定構造系を形成させることである。さらに倒壊の過程では、この不安定な構造系の所定の位置に塑性ヒンジを形成させつつ計画どおりの変形モードで最終倒壊形状に至らせる必要がある。このため、塑性ヒンジの発生位置を積極的に特定するために、必要に応じてあらかじめ切欠きを行い部材弱点を作っておくことも必要となる。

ここで構造物は部材の発破切断により倒壊の確実性が得られていなければならない。また同時に切欠きの行わ

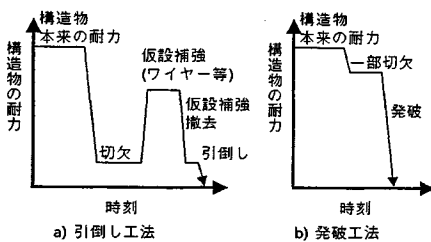
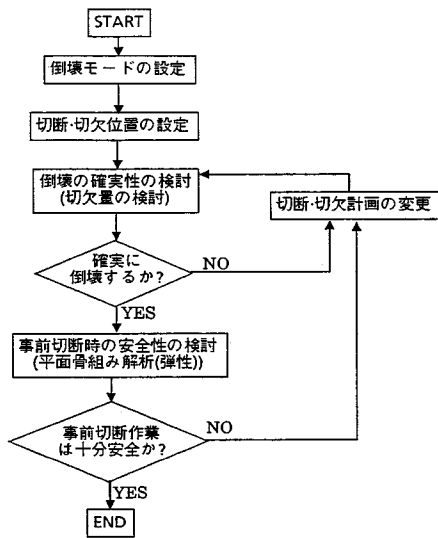


図-1 引倒し工法と発破工法の比較概念図



図—3 倒壊設計フロー図

れた構造物は発破による部材の切断前は不意の強風等によって不測倒壊の危険がないよう構造物として十分に健全な状態でなければならない。この場合倒壊後の構造物は安全な地上作業のみで二次解体が行い得ることが前提である。さらに確実な倒壊を得る発破を行うにあたって、環境問題等も十分に考慮して、使用爆薬量は最小限になるように計画することが望ましい。

以上のように、倒壊設計は倒壊の確実性と事前作業時の安全性をバランスさせた設計とする必要がある。したがって、倒壊設計は、図—3のようなフローにて検討することになる。すなわち、まず対象構造物の構造要件と周辺環境等（隣接する空地の状況等）により倒壊モードを決定する。次に、倒壊モードの実現にむけて、不安定構造系の形成のために発破切断部材と塑性ヒンジ生成位置（切欠き位置）を設定する。そして、倒壊の確実性と事前作業の安全性がバランスするように、構造解析により切欠き量や事前切断部材等を決定する。

図—3中の事前切断作業の安全性の検討は、構造安全性の検討であるから、通常の鋼構造設計規準に基づき検討し得る。しかし、倒壊の確実性の検討については、定まった考え方はない。倒壊の現象自体は弾塑性領域の動的かつ大変形の現象であり、以下のような種々のレベルでの検討があり得る。

- ① 弾性骨組みの静的解析により、ヒンジ発生予定部の応力照査を行い予定部の降伏を確認する。
- ② 弾塑性骨組みの静的解析により、架構の終局耐力を求めることで、倒壊の確実性を検討する。
- ③ ②の解析に、さらに大変形（ $P\sim\delta$ 効果）を考慮して検討する。

- ④ 倒壊の動的な運動を時間ステップごとにシミュレーションする。

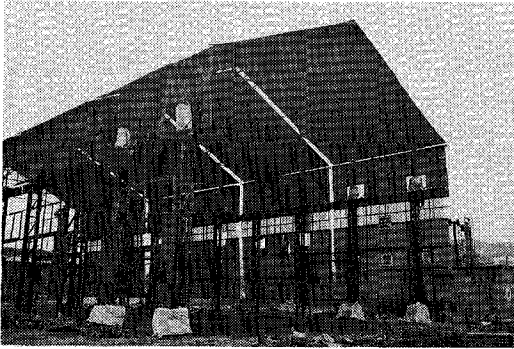
ここで、①は倒壊に対して大まかな見当をつけるための簡易手法であり、②はこれに対して倒壊の確実性を検討し得る方法である。さらに変形の状況やその時刻歴を必要とする場合には③あるいは④の方法が有用となる。本研究では確実な倒壊の実現を目的としているため、①もしくは②のレベルで十分対応できると考えられる。これらの内容について簡単に述べると以下のとおりである。

① 弾性骨組み静的解析による検討

発破後の骨組みについて、自重により発生する断面力を弾性解析により算定し、ヒンジ発生予定部（切欠き位置）が確実に降伏するように切欠き断面を決定する。そのために、切欠き部分に発生する応力が、鋼材の降伏応力を十分に越えるように切欠き断面を決定する。不安定構造系の生成においては、すべての切欠き位置が発破の瞬間に同時に降伏状態となる必要はないが、この設計方法では応力の再配分を考慮しないため、すべての切欠き位置が降伏状態となるように設計しておくことになる。すなわち、倒壊の確実性という立場からは、過剰設計となる危険性がある。また、この設計方法では、1つの切欠き部分の降伏によって、他の部分の切欠き位置が応力緩和されないことを確認する必要があり、倒壊形式が単純な場合は問題ないが、複雑な倒壊形を考える場合には適さない。さらに、倒壊の確実性を表現する指標としては、各切欠き部分の応力の降伏応力との比により表現することになるが、あくまで部分ごとの指標であり、構造全体の倒壊に対する確実性を表わす指標は得られないことになる。

② 弾塑性骨組み静的解析による検討

発破後の骨組みについて弾塑性解析を行い、自重の何割の荷重にて架構が終局状態に達するかを算定する。そして、自重より十分に小さな荷重で架構が終局状態になるように切欠き断面・切断部材を決定する。解析は、自重に相当する節点荷重ベクトルに比例する荷重をゼロから比例増分させていき、計算が発散した時点の荷重を倒壊荷重とする。このとき、各荷重増分ステップごとに部材の降伏による応力再配分を繰り返し計算により求める。この設計方法では、構造全体の倒壊に対する確実性を、自重と倒壊荷重の比（降伏時荷重係数 β ）で表わすことになり、確実性の明確な指標が得られる。また、ヒンジ形成順序が明確となるため、倒壊モードが意図どおりに形成されることを計算により確認することができる。しかし、荷重ステップごとに計算を繰り返すことになり、①の方法に比べてかなり面倒な計算を行わなければならない。さらに、切欠き量を変化させてケーススタ



写真一 実験用建家の概観

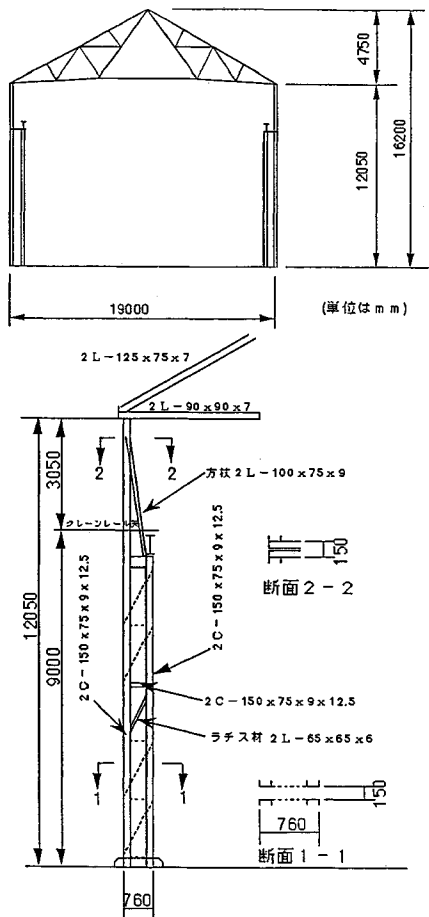


図-4 実験用建家の構造概要図

ディーを行うことが必要となるため、計算回数も多くなる。

このように、②の方法は①の方法に対し、大きな計算量を必要とし、また計算方法も若干煩雑となる。しかし、今後の鋼構造物の倒壊設計を考えると倒壊の確実性に

対する明確な指標を与えることも必要と思われる、本研究では②の方法を用いている。

4. 倒壊設計と現場実験

(1) 実験用建物と倒壊実験の概要

実験に用いた構造物は、鉄骨造の単純な工場建家の一部であり、明治時代末期に建設されたものである。その写真を写真一に、また構造概要図を図一に示す。建設年次が非常に古いこともあり、建設当時の図面は残存しておらず、使用鋼材も輸入鋼材を用いていると思われる。そのため、詳細な現物調査により新たに図面を起こすとともに、部材の一部を切り出して引張試験を実施した。その結果、使用鋼材の降伏応力は $3.2\sim 3.8\text{ tf/cm}^2$ であることが確認された。

実験は写真一にみられるように、建家の2ないしは3スパン分を切断・縁切りを行い、その部分構造物についてそれぞれ独立して種々の倒壊形式を検討する実験を実施した。今回の実験は、本構造物に最適な倒壊モードを選定するといった立場よりも、周辺環境等により種々の倒壊形式が要求されることを想定して、基本的ないくつかの倒壊形式の特性について検討することにした。

設定した倒壊形式は、①鉛直方向倒壊形式、②張間方向水平倒壊形式、③桁行方向水平倒壊形式、の3種類であり、それぞれ図一に示す計4個のパターン(CASE1～CASE4)について実験的検討を行った。

(2) 切欠きおよび発破による部材の切断計画

切欠きおよび部材の切断は、図一に設定した倒壊モードに示されるヒンジ位置に、発破後自重により塑性ヒンジが形成されるように計画しなければならない。本実験用建物の柱部は組柱構造であるが、組柱部分に塑性ヒンジを形成させる方法として、図一に示すような方法を基本とした。すなわち、

- ① まず、塑性ヒンジ形成予定箇所の部材を切り欠いておく。
- ② 発破により主部材の切断・中抜きを行う。そのため部材の切断は1断面当たり2か所で行う。
- ③ 自重のつり合いモーメントにより部材が降伏して塑性ヒンジが形成され回転が発生する。

以上のような基本的な考え方にに基づき、部材の切断・切欠きの一次計画を策定した後、先述の設計フロー(図一)に従い切欠き量の決定、前処理作業時の安全性と発破切断後の倒壊の確認のための解析を実施した。この際、倒壊の確実性の検討段階では、材料強度のばらつきや構造物の初期不整・解析の不完全性を考慮して自重の70%程度にて崩壊が発生することを指標とした。また、事前作業時の安全性の検討は、風速60mの風が吹き付けたときの骨組みの応力を計算して、切欠き部分の応力

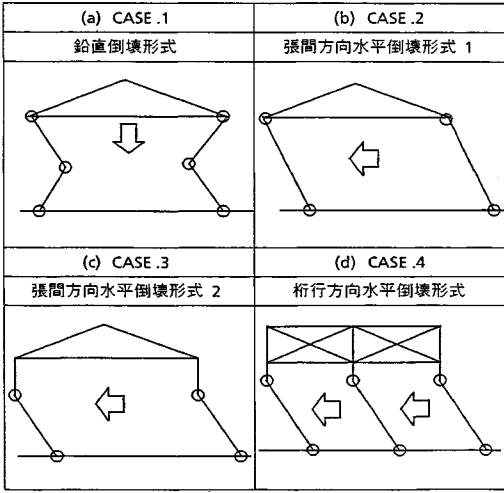


図-5 倒壊モードの設定

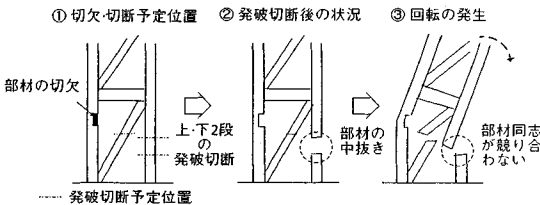


図-6 組柱部の塑性ヒンジの形成

が降伏応力以下であることを確認することとした。なお、倒壊の確実性の検討時における降伏応力は、引張試験結果の最大値である 3.8 tf/cm^2 に、事前作業の安全性の検討においては、同じく最小値である 3.2 tf/cm^2 に設定している。

CASE 1 (鉛直倒壊形式) の設計結果を示したものが図-7である。図-7 (a) は構造物の倒壊モードを概念的に示したものである。図-7 (b) は構造物の弾塑性解析において、計算が発散するまでの塑性ヒンジの形成位置とヒンジ形成順序を示したものである。図中に付した番号がヒンジ形成順序を表す。また、点線で示した骨組み図は計算が発散する直前の構造物の変形の様子を表わしている。図-7 (c) には、この塑性ヒンジの形成を、載荷荷重 P の増加 (自重をゼロから比例的に増加させたもの) と最初の塑性ヒンジ形成点 (図-7 (b) に示す点 1) の水平変位の関係で示した。図-7 (c) によると、図-7 (b) に示す点 1 での塑性ヒンジの形成は自重 W_0 の約 0.5 倍の荷重で生じ、不安定構造系の形成となった点 3 の塑性ヒンジは 0.76 倍で生じている。このときの値 P/W_0 を降伏時荷重係数 β とよんでいる。すなわち、この倒壊設計においては荷重が自重の 0.76 倍作用すれば、点 1、点 2、点 3 に塑性ヒンジが形成され、構造全体が不安定となって倒壊が始まる。この不安定状態となったときの点 1 の水平変位は $\delta = 31.6 \text{ cm}$ である。部材の発破切断および事前切欠箇所は、発破切断により自重による不つり合いモーメントが有効に生じるよう図-7 (d) のように設定している。これを詳しく説明したものが図-7 (e) である。切欠き部分を黒塗りで表わし、発破による切断・中抜き部材を破線で囲っている。すなわち柱頭部では、断面積にして 33% の切欠きを行い (断面残存率 $\alpha = 67\%$) 塑性ヒンジの形成を容易にした。また、中段部および下段部では、一方の柱 (中段部では外柱、下段部では内柱) とラチス材を発破切断・中抜きを行い、また同時に残された方の柱を切り欠く (断面残存率 $\alpha = 38\%$) ことによって塑性ヒンジの形成が起りやすいようにしている。

CASE 2~CASE 4 については切断・切欠き位置のみを倒壊予定方向 (印) とともに、図-8~10 に示す。

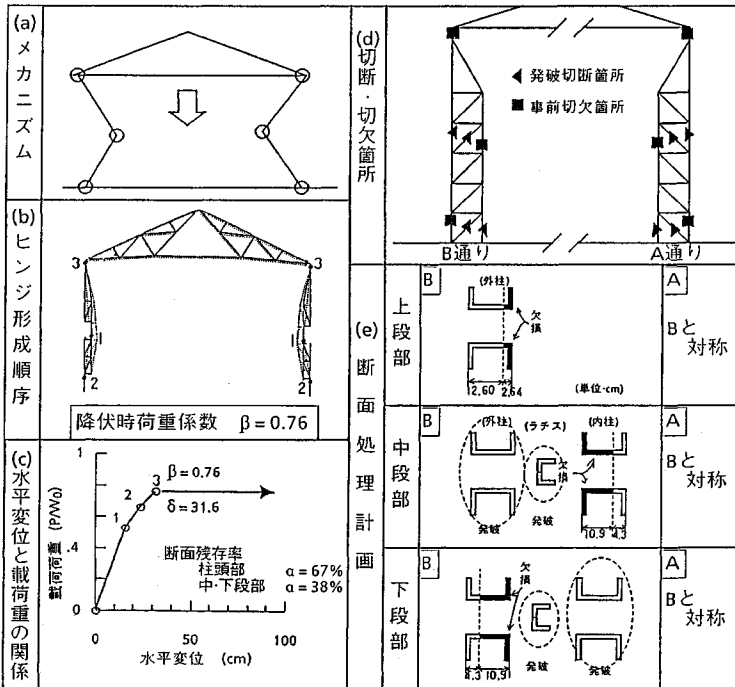


図-7 CASE 1 鉛直倒壊形式の設計結果

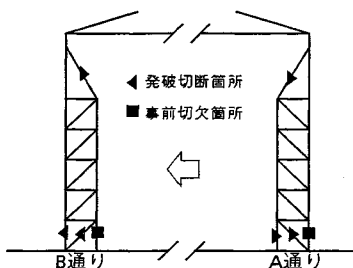


図-8 CASE 2 張間方向水平倒壊形式 1 の切断・切欠き位置図

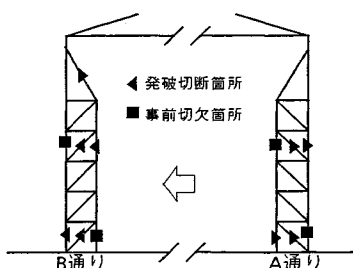


図-9 CASE 3 張間方向水平倒壊形式 2 の切断・切欠き位置図

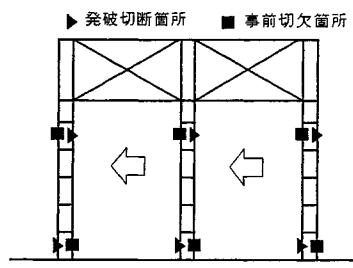


図-10 CASE 4 桁行方向水平倒壊形式 の切断・切欠き位置図

表-1 実験に用いた成型爆破線の仕様

仕様部位	部材	爆薬量 (線密度) (g/m)	薬幅 W (mm)	薬高 H (mm)	スタン ドオフ S (mm)	鋼ライ ナー厚 t (mm)	ライナ ー頂角 α(度)
柱部材	C-150×75×9×12.5	300	16	16	7	0.6	90
ラチス材	L-65×65×6	100	9	9	6	0.35	90
方杖材	L-100×75×9	300	16	16	7	0.6	90

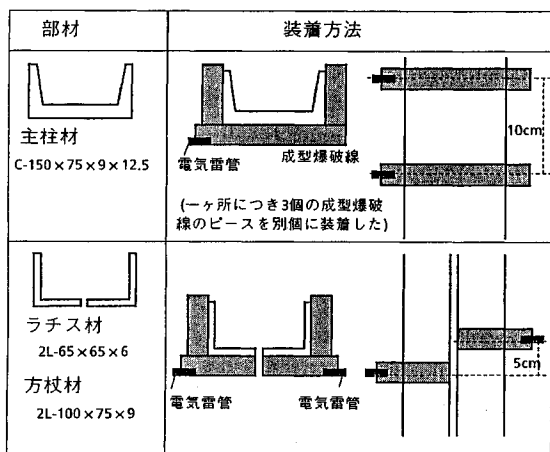
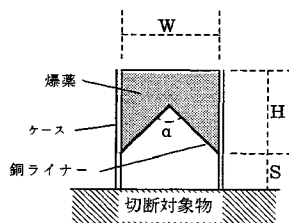


図-11 形鋼部材への成型爆破線の装着方法

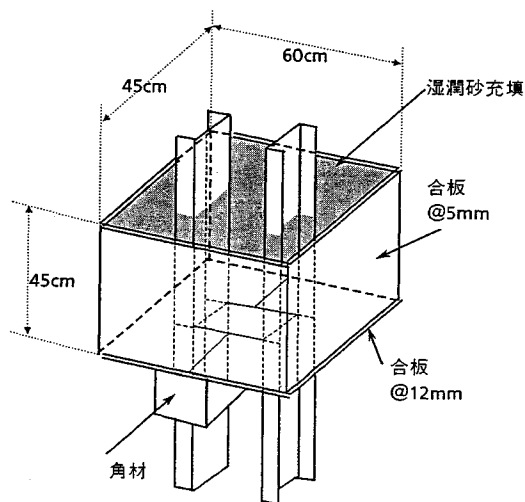


図-12 湿潤砂による防音対策

(3) 現場実験

合計4回の倒壊実験を、図-5に示すCASE 1~4の順序で実施した。

使用した成型爆薬の諸元を表-1に示す。所定厚さの鋼板を切断するのに必要な爆薬諸元は予備実験の結果から決定している。今回の構造物は、山形鋼と溝形鋼にて構成されているが、各部材への爆薬装着方法を図-11に示す。雷管はすべて瞬発電気雷管を用いているが、起爆は多段発破器により各柱ごとに40msの秒時差をつけて行った。これは、全爆薬量が同時に爆轟することを避けることによって、発生する発破音を低くすることを意図したものである。また、これにより各柱の切断に秒時差が生じるが、不安定状態となった構造物の重心の移動に

要する時間と比べて十分小さいと考えた。

また、騒音抑制の観点から、爆薬の周囲に図-12に示すような木枠を組み、その中に湿潤砂を充填することで爆破衝撃音を抑制することを試みている。

5. 実験の実施と結果

(1) CASE 1 鉛直倒壊形式

図-7に従って計画どおり実施した結果、倒壊状況は写真-2に示すように、若干A通り側が先行して落下しているものの、ほぼ予定どおり真下への鉛直倒壊形式が得られた。また、倒壊後の切断面の観察によれば、形鋼

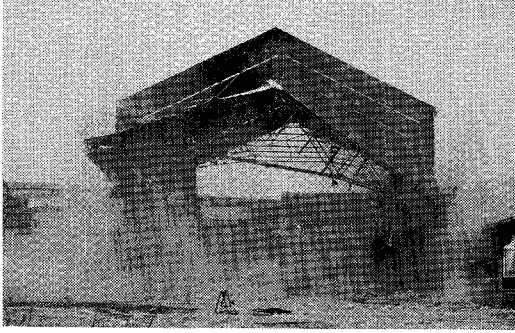


写真-2 CASE1 鉛直倒壊形式の倒壊

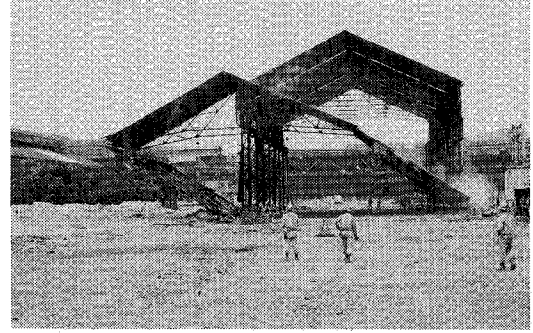


写真-3 CASE2 張間方向水平倒壊形式1の倒壊

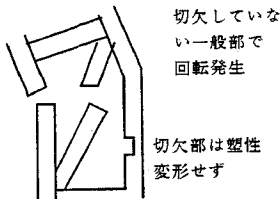


図-13 CASE1 中段部の塑性ヒンジ

の隅角部において、成型爆薬による切断ではなく外力によるねじり破断面が若干観察された。全般的に切断確率は90%程度であるが、倒壊にはほとんど影響がなかったようである。ただし、塑性ヒンジの形成については、倒壊設計時の予測と異なり、以下のような状況であった。

① 柱頭部 柱頭部の切欠きは全く効果がなく、柱頭と小屋組の接合ボルトが破断して塑性ヒンジを形成している。

② 中段部 図-13に模式的に示すように、切欠き部分にて回転しているのではなく、外柱の発破部と同じ高さの位置の切欠きを施していない部分にて塑性ヒンジが発生している。

③ 柱脚部 計画どおり切欠き部分に塑性ヒンジが形成されている。

(2) CASE2 張間方向水平倒壊形式1

図-5 (b) および図-8 に従って計画どおり実施した結果、発破後若干水平方向に傾いたが、倒壊には至らなかった。そのため、あらかじめ架けてあったワイヤーで引き倒し(写真-3)、倒壊後の切断部を観察した。方杖の切断はA通りおよびB通りともに不完全であり、かつ柱脚部B通りの切断も不十分で、柱部材の中抜きができず、部材どうしがせりあった状況となっている。これらの結果、必要な塑性ヒンジが形成されず、倒壊が妨げられたものと推測された。一方、ワイヤーで引き倒した後の塑性ヒンジの形成状況は以下のとおりである。

① 柱頭部 柱頭と小屋組の接合ボルトが破断して柱頭の塑性ヒンジを形成している。

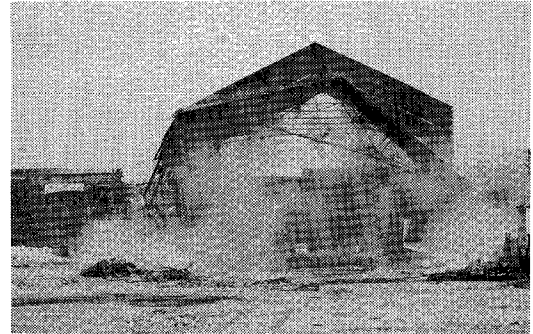


写真-4 CASE3 張間方向水平倒壊形式2の倒壊

② 柱脚部 A通り側では、計画どおりに切欠き部分で塑性ヒンジを形成している。切断が不完全であったB通り側では、外柱がせりあっているため、内柱の切欠き部分の変形は全くなく、内柱根元のボルト接合部で部材が破断している。

(3) CASE3 張間方向水平倒壊形式2

写真-4 は本実験ケースの倒壊状況を示したものであり、CASE1の鉛直倒壊形式に近い形式で倒壊した。このとき、A通り側が先行して落下している。また、倒壊後の切断面の観察によれば、B通り側の中段部のラチス材の切断が不完全であったほかは、CASE1とほぼ同程度の切断確率であった。一方、倒壊後の塑性ヒンジの形成状況は以下に示すように、柱頭部に予定外のヒンジが発生したもののほかはほぼ計画どおりであった。

① 柱頭部 この倒壊形式では柱頭部のヒンジ形成は計画されていない。しかし実際には、柱頭と小屋組の接合ボルトが破断して柱頭の回転ヒンジが形成されている。

② 中段部 計画どおり切欠き部で塑性ヒンジを形成している。

③ 柱脚部 ほぼ計画どおり切欠き部で塑性ヒンジを形成しているが、一部根元のボルト部分にて破断した部分がある。ただし、その部分でも、切欠き部の変形が

認められることから、落下の過程において根元のボルト接合部が破断したものと思われる。

(4) CASE 4 桁行方向水平倒壊形式

CASE 1 から CASE 3 までで成型爆薬による鋼材の切断確率が高くないことから、柱部材の中抜きを行うために上下二段に仕掛けた爆薬の間隔が狭く、相互の干渉作用があるのではないかとということが想定された。そこで、CASE 4 では、図-6 に示す爆薬の間隔を 10 cm から 15 cm に広げて装着した。その他は計画どおりで実施している。結果は、倒壊に至らず、発破後 CASE 2 と同様にワイヤーにて引き倒した。そのときの倒壊形式も完全な桁行き倒壊とはいえず、壁面が張間方向へ倒れ込む成分をもつ斜め方向へねじれた倒壊となっている(写真-5)。発破による切断状況は、他の 3 ケースと異なり、全切断予定位置で完全に切断されていることから、上述のように爆薬の装着間隔を適切にとることの重要性を示唆しているものと思われる。塑性ヒンジの発生状況は、図-14 に示すように、発破切断部材対面の切欠き部材が外側に變形して、座屈したような状況となり、柱脚部では切欠き部が破断しているものもみられた。

(5) 実験結果の考察

① 倒壊

CASE 1~4 の倒壊実験の発破による自重倒壊の成否とその理由・コメントをまとめ、表-2 に示した。



写真-5 CASE 4 桁行方向水平倒壊形式の倒壊

成功例は、CASE 1 と CASE 3 であるが、CASE 3 は全体の落下状況から判断して鉛直倒壊形式であるといえる。これは、本来ヒンジ形成を予定していない柱頭部に接合ボルトの破断によるヒンジが形成されたため、各柱に上段・中段・下段と 3 か所のヒンジ形成がなされ CASE 1 と同様な条件となったためである。この結果、鉛直倒壊が成功、水平倒壊が不成功と大別できる。水平倒壊形式の主たる不成功の原因は切断不良や二次部材の影響があったためと考えられ、必ずしも水平倒壊が鉛直倒壊よりも倒壊しにくい倒壊形であるとはいえない。しかし、少なくとも運動の主な起動力である重力の方向と、倒壊時の運動の方向が合致する鉛直倒壊型が自重倒壊については合理的であるように思われる。

また、構面内の倒壊形 (CASE 1~3) と桁行倒壊形 (CASE 4) を比較すると次のことがいえる。爆破直後の転倒モーメントは図-15 のように、相対する 2 本の柱脚 (溝型鋼の抱き合わせ) のうち片脚を取り去ることによる転倒モーメント $M = W \times L / 2$ (W は上部自重、 L は 2 本の柱間の距離) によって生じる。ここで、構面内倒壊形の場合は $L = 61$ cm、桁行倒壊形の場合 $L = 19$ cm であった。このため、構面内倒壊形の転倒モーメントの方がはるかに大きく、桁行倒壊形の場合では、構造の初期不整の状況によっては、上記の転倒モーメントが相殺される危険性があるといえる。さらに、発破による対向部材の切断・中抜きに伴う軸荷重の増加により、切欠き部が座屈あるいは破断してしまったものが CASE 4 でみられた。この場合、当然予定の塑性ヒンジ

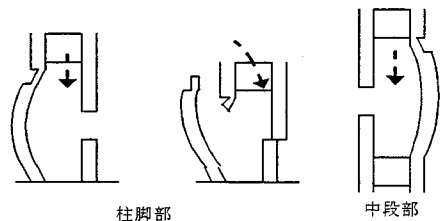


図-14 CASE 4 の発破部近傍の变形状況

表-2 倒壊実験結果のまとめ

実験ケース (倒壊型)	発破による自重倒壊の成否	成否の理由コメント
CASE.1 (鉛直倒壊)	成	若干の発破切断の不良等はあったが、ほぼ計画通りであった。
CASE.2 (張間水平倒壊)	否	発破による切断が不完全であった。(柱脚部A通り側の発破切断はほとんどOKであったが、B通り側の一部が残った。そのため上下部材がせりあい、倒壊に抵抗した。方杖については、4本のうち2本が完全切断しなかった。)
CASE.3 (張間水平倒壊)	成	全体の落下状況から判断して、鉛直倒壊型の倒壊であると言える。
CASE.4 (桁行水平倒壊)	否	構面内(CASE1~3)の倒壊に比べて、切断部と断面切欠き部の距離が小さく転倒を引き起こす倒壊モーメントが小さかったため、構造の初期不整や二次部材(胴縁、壁液鉄板)の影響により倒壊しなかったものと思われる。

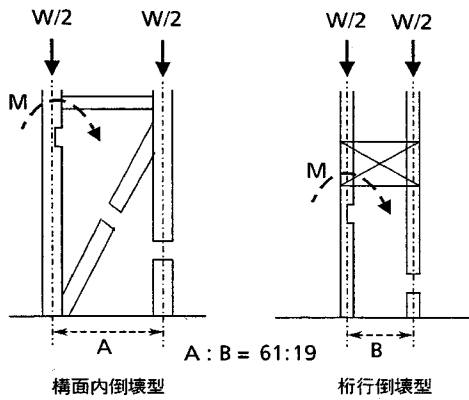


図-15 構面内倒壊型と桁行倒壊型の比較

は形成されず、中抜きされた両側の部材が接合し転倒モーメントが逆方向に作用する結果ともなっている。

さらに、桁行倒壊形では、引倒し後の状況からも判断して、胴縁・壁波鉄板等の二次部材の拘束がかなり大きいものと考えられ、事前に完全撤去しておくか、あるいは二次部材が変形の妨げとならないように倒壊モードを計画する必要があるといえる。

② 切断

爆薬による鋼材の確実な切断は確実な倒壊のための必須条件であるが、CASE 1~3 では必ずしも満足のいく切断結果が得られていない。CASE 2 の方杖材の切断においては部材厚さを誤って評価し爆薬量不足による切断不良があったが、主に切断不良の原因は爆薬の干渉によるものと考えられる。これは、雷管の起爆秒時のわずかな差により先に起爆した爆薬の爆風または衝撃波により隣接爆薬が影響を受けるとするものである。この解釈はCASE 4 において爆薬間隔をそれまでの 10 cm から 15 cm にすることによって良好な切断結果が得られたことからほぼ肯定されよう。

③ 塑性ヒンジ

CASE 1 および CASE 3 では、柱頭部と小屋組の接合ボルトが弱点となって、予定どおりの塑性ヒンジの形成がなされなかった。また、CASE 3 において柱脚の根元のボルト接合部の鋼材が破断したケースもあり、今回の実験ではボルト接合部が構造の弱点となる場合が多く見受けられた。この原因は、今回の構造物が非常に古いこともあり、腐食がかなり進行していたこと、特にボルト接合部の腐食が著しかったことにその一因があると考えられる。一般にボルト接合部はその正確な耐力評価が難しいため、設計計算上の仮定との差異を十分に検討する必要があるといえる。さらに、CASE 1 において切欠きの施していない一般部にて塑性ヒンジが形成される例があったが、この原因は腐食による予定外の弱点部分が

あったことによるものと考えられ、接合状況、腐食状況を含めた十分な事前調査を行うことの重要性が認識された。

6. 解体技術の問題点

① 倒壊設計におけるリダンダンシーの問題

倒壊設計を行う場合には、新築時の設計では、余剰力として考慮しなかった二次部材の拘束や鋼材強度のばらつき等のリダンダンシーを十分に考慮する必要がある。今回の桁行倒壊の場合のように明らかに倒壊に抵抗すると考えられる二次部材については、事前に撤去しておくべきであろう。また、鋼材の規格は一般には下限値が定められているのみであり、倒壊設計に必要な上限値を知ることが困難であるため、事前に引張試験を行っておくことが必要である。また、設計モデルの不完全さや建物の初期不整等の要因については、安全率的な考え方にに基づき吸収できるように倒壊設計を行うことが必要である。この安全率を今回の実験では 1.5 程度（自重の 70% 程度にて倒壊する）としたが、実用上どの程度に設定するのが適切かについて、今後の実験や実績を重ねる中でキャリブレーションしていくことが必要である。さらに、CASE 1, CASE 3 でみられたように耐荷力評価の困難な部分（この場合は、柱頭部と小屋組の接合ボルト）や腐食部が弱点となって倒壊モードが予定外のものとなる可能性も考慮しておくことが必要であろう。

② 引倒し工法との併用

今回の実験でも生じたように、発破により倒壊しなかった場合には、構造物を引き倒すことが必要となる。もちろん、今後の技術開発により倒壊の確実性は向上するものと考えられるが、不発問題も含めて 100% にすることは困難である。したがって、万一倒壊しなかった場合にも、後に容易に安全に引き倒すことのできる工事計画や、引倒し工法との併用を前提とした工事計画を検討する必要がある。その意味では水平倒壊形式が（事前にワイヤー掛けさえしておけば）、後の引倒しが安全かつ容易であるため、望ましい工法といえる。

③ 鋼材切断における爆薬の干渉問題・隅角部の処理

前述のように、柱の中抜きを行うために二段に仕掛けた爆薬が干渉作用を起こしたため、鋼材の切断が不完全となる場合があることが想定された。したがって、これらに対処するためには、爆薬の設置間隔を十分にとって設置するか、もしくは導爆線等を用いて 2 つの爆薬の同時起爆性を完全に確保するように工夫する必要がある。

また形鋼は、一般にはその隅角部の肉厚が厚く、その部分の切断がクリティカルである。したがって、爆薬量は隅角部の切断が確実に行われる薬量を設定するか、もしくは構造耐力上問題がなければ隅角部を事前に切り欠

いておくことで、切断の確実性を確保することが必要である。

④ 音の問題（砂箱による防音の限界）

今回の実験では鋼材の切断位置1か所当たり400gの爆薬量に対して、約0.12m³の防音用湿潤砂で爆薬を被覆している。そのときの騒音レベルは、約100m離れた地点で最大113dB（Impulse, A特性）が記録された。より厳しい騒音規制が求められるときや、爆薬量が増加した場合は砂の量を増やせばよいのだが、砂の量が膨大なものとなり、実際の作業性などから考えて、これ以上に砂の量を大幅に増やすことは現実的ではない。したがって、よりコンパクトで作業性のよい防音器具の考案が望まれる。

7. 結 言

本報告では、4回の倒壊実験を通して、単純な形式の工場建家の発破解体を行ううえでの設計方法と実際の解体工事を行ううえでの問題点について検討を行った。今回の実験は、鋼構造物の発破解体における問題点を実際に洗い出し、発破解体の考え方を明確にするために行ったものである。そのため、切断不良や二次部材の拘束のため倒壊しないケースもあったが、逆に確実に倒壊させるための問題点が明らかになったと考える。今回行った倒壊設計についても、必ずしも最善なものではなく、か

なり煩雑なところが多く、安全率の考え方や、ごく短期的な風荷重の取り方など今後解決すべき問題点が明らかにされた。今回の実験的検討により、今後の鋼構造物の発破解体技術を確立していくうえで有用なデータを提供できたものとする。

謝 辞：本実験工事の実施にあたって、新日本製鐵（株）八幡製鐵所の関係各位に多大なる援助を頂いた。特に、松岡所長をはじめとするPKセンターの皆さんには、実験の準備から後始末に至るまで大変お世話になった。記して、謝意を表したい。また、間組（株）九州支店、日新興業（株）八幡支店には、実験工事の主要な部分を担当して頂いた。同様に謝意を表したい。

参 考 文 献

- 1) 財団法人日本建築センター：建築物の解体除去技術に関する調査研究報告書（昭和63年3月），pp.13～14，1988.
- 2) 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，No.403/VI-10，pp.173～182，1989.
- 3) 松原重一：爆薬による鋼材切断の研究，昭和55年東京大学学位論文，pp.208～264，1980.
- 4) 同上，pp.1～6.

（1989.6.24・受付）