

(21) 成形爆薬による鉄筋コンクリート部材中の鉄筋の切断方法に関する研究

Study on cutting method of reinforced steel in reinforced concrete members with shaped charges

福田貴志*, イアムラオー・ピーラサク*, 藤掛一典**, 小枝 進***, 浦野 弘***, 星野 学***
Takashi Fukuda, Aemlaor Peerasak, Kazunori Fujikake, Susumu Koeda, Hiroshi Urano, Manabu Hoshino

*防衛大学校理工学研究科前期課程, 建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

**博 (工), 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)

***中国化薬(株)吉井工場, 火工開発部, 火工技術課 (〒370-2131 群馬県高崎市吉井町岩崎 2530)

キーワード: 発破解体, 成形爆薬, スタンドオフ, 鉄筋切断

Key Words: demolition, shaped charge, stand-off, cutting of reinforcing steel

1. 序言

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鉄筋コンクリート(RC)建物が耐用年数を迎えることから, 今後, これらの建物の解体需要が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機械を使った圧砕解体工法が一般的に適用されてきているが, 振動・騒音・粉じんなどの公害が懸念されるとともに作業時に瓦礫が落下して重大事故を招く恐れが予想されるなどの問題点が指摘されている¹⁾。

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^{2), 3)}。発破解体工法は, 従来の圧砕解体工法に比較すると, 解体施工期間と費用を約半分程度に節約することが可能であり, 長期的にわたる振動・騒音・粉じん等の公害問題も少なくできる等の多くの利点を有している^{4), 5)}。

このように有望な発破解体工法であるが, 我が国のRC建物の解体に適用するには解決すべき問題点も多い。その一つとして, 欧米のRC建物に比較し, 耐震性を向上させるために多くの鉄筋が部材内部に配置されており, これらの鉄筋が発破解体時のRC建物の倒壊を阻害する恐れが懸念されている^{6), 7)}。

イアムラオー⁸⁾は, 爆薬の破壊力を最も効率的に利用できる内部装薬発破法を用いてRC柱部材中の鉄筋が発破解体に及ぼす影響を調べる実験的研究を行った。その結果, 発破によってRC柱中のコンクリートを破砕し吹き飛ばすことは可能であるが, 主鉄筋を切断すること

は不可能であること, およびせん断補強筋が密に配置された場合には発破後の残存耐力を十分低下させることが困難であることを明らかにしている。したがって, 発破後のRC柱部材の残存耐力が大きい場合には, 建物が倒壊しない可能性も十分あり得ると思われる。そのような場合を考えると, 主鉄筋を爆薬によって切断する技術を開発することが建物を安全かつ効率的に解体する上で有効であるとの考えに至った。

そこで本研究では, 鋼板の切断に用いられる成形爆薬^{9), 10)}を用いてRC部材中の鉄筋を切断することが可能なかどうかを調べることにした。その際, 鉄筋のかぶり厚さ, 鉄筋の直径, コンクリートの強度および爆薬量が成形爆薬を用いた鉄筋の切断効果に及ぼす影響を調べて調べることにした。

2. 実験概要

2.1 試験体の概要

成形爆薬によるRC部材中の鉄筋に対する切断効果を調べるために鉄筋径, 鉄筋かぶりおよびコンクリート強度の異なるRC要素試験体を作成した。RC要素試験体の諸元ならびに一覧を, それぞれ図-1と表-1に示す。RC要素試験体は高さ150mm×幅150mmの断面を有し, 長さは500mmである。試験体中には所定のかぶり位置(0, 25, 50, 100mm)にD13, D22あるいはD32異形鉄筋を配置している。鉄筋の降伏強度は345MPaであり, 鉄筋とコンクリートの付着を十分確保するために厚さ3mmの鋼板を鉄筋の両端に溶接した。使用するコンクリートの圧縮強度は, それぞれ50.4MPa, 68.5MPaおよび93.8MPaの3種類でありそれぞれFc50, Fc70およびFc90と呼ぶことにする。

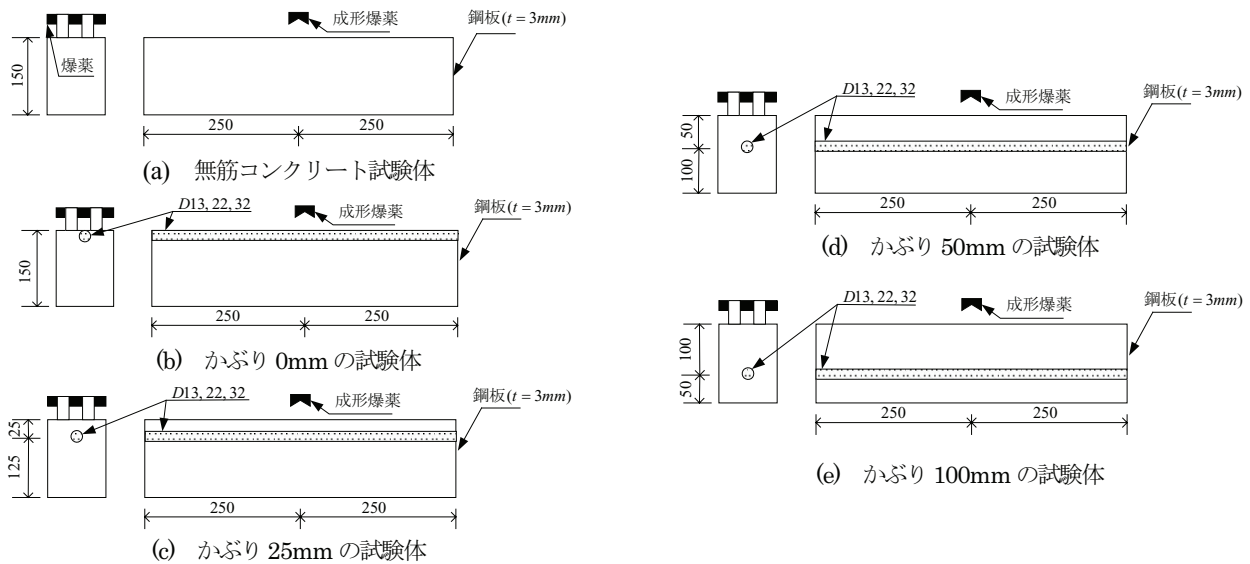


図-1 RC要素試験体

表-1 試験体一覧

| No | 試験体名 | かぶり厚 (mm) | 鉄筋の種類 | コンクリート強度 (N/mm ²) | No | 試験体名 | かぶり厚 (mm) | 鉄筋の種類 | コンクリート強度 (N/mm ²) |
|----|-------------|-----------|-------|-------------------------------|---------------|--------------|-----------|-------|-------------------------------|
| 1 | Cv0D0Fc50 | — | — | 50.4 | 8 | Cv50D13Fc50 | 50 | D13 | 50.4 |
| 2 | Cv0D13Fc50 | 0 | D13 | | 9 | Cv50D22Fc50 | 50 | D22 | |
| 3 | Cv0D22Fc50 | | D22 | | 10 | Cv50D32Fc50 | | D32 | |
| 4 | Cv0D32Fc50 | | D32 | | 11 | Cv100D13Fc50 | | 100 | |
| 5 | Cv25D13Fc50 | 25 | D13 | | 12 | Cv100D22Fc50 | D22 | | |
| 6 | Cv25D22Fc50 | | D22 | | 13 | Cv100D32Fc50 | D32 | | |
| 7 | Cv25D32Fc50 | | D32 | | 14 | Cv50D22HFc70 | 50 | D22 | |
| | | | | 15 | Cv50D22SHFc90 | D22 | | 93.8 | |

2.2 使用成形爆薬

成形爆薬は、図-2 に示すように爆薬、ライナー、ケース、プースターおよび電気雷管から構成され、爆轟によってライナーから生成された金属粒子が高速で飛ぶノイマンジェットとなって鋼材を切断する能力を有する。ライナー材には、一般的に銅、亜鉛、アルミニウム等が用いられる。ライナー材の密度が大きくなるほど切断可能な鋼材厚も大きくなる。

写真-1 に本試験で用いた爆薬量の異なる3種類の成形爆薬(Sc20, Sc35, Sc50)を示す。また、それらの諸元を表-2 に示す。本成形爆薬にはコンポジションB爆薬(爆速: 約 8,000m/s)を用いるとともにライナー材には密度が大きく比較的切断能力の大きな銅を用いている。ちなみに、Sc20, Sc35, Sc50 の各成形爆薬はそれぞれ厚さ20mm, 35mm, 50mm の鋼板を切断する能力を有する。また、図-3 に示すように切断対象物から成形爆薬までの距離はスタンドオフと呼ばれ、爆破によって形成されるノイマンジェットを十分に成長させるためには切断対象物と成形爆薬の間に適切な距離をとる必要がある。一般的には成形爆薬の幅に相当するスタンドオフをとるのが理想的とされている。

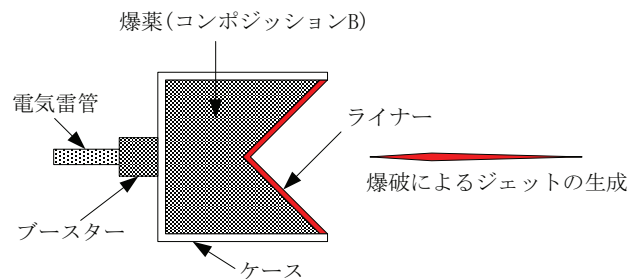


図-2 成形爆薬の概要

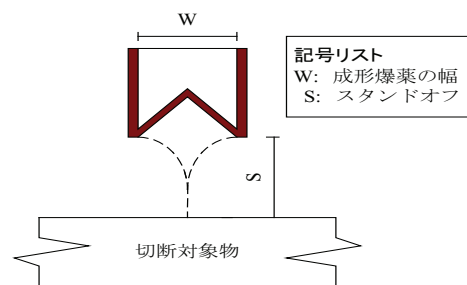


図-3 成形爆薬とスタンドオフ

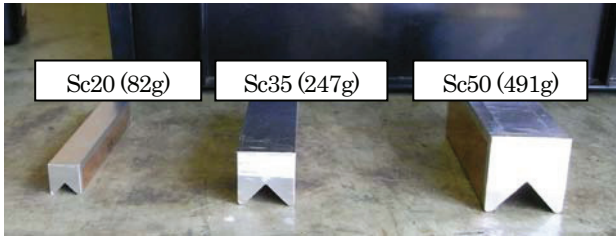


写真-1 3種類の成形爆薬

表-2 成形爆薬の諸元

| 呼名 | 薬量 (g/cm) | ライナ 材厚 (mm) | 密度 (g/cm ³) | 高さ (mm) | 幅 (mm) | スタ ンド 幅 (mm) |
|------|--------------|-------------------|----------------------------|------------|-----------|-----------------------|
| Sc20 | 5.47 | 1.0 | 1.68 | 20 | 20 | 20 |
| Sc35 | 16.45 | 1.8 | | | | |
| Sc50 | 32.73 | 2.5 | | | | |

2.3 成形爆薬発破試験

表-3 に発破試験の一覧を示す。ここでは、まず無筋コンクリートに対する成形爆薬による破断効果を調べるために、Cv0D0Fc50 試験体を用いた3ケースの発破試験を行う。次に成形爆薬によるRC試験体中の鉄筋の切断効果を調べるために、かぶり、鉄筋径、コンクリート強度および爆薬量をパラメータとする25ケースの発破試験を行う。本試験では Sc20, Sc35, Sc50 の各成形爆薬のスタンドオフとして、それぞれ20mm, 35mm, 50mm を発泡スチロールで作成した支持具によって確保することにした。なお、成形爆薬の起爆には6号電気雷管を使用することにした。

3. 実験結果及び考察

3.1 試験体の破壊状況

写真-2 に発破試験直後の無筋コンクリート試験体(Cv0D0Fc50)および鉄筋の破壊状況を示す。成形爆薬の爆発によって無筋コンクリートは粉々に破壊された。成形爆薬による鉄筋を配置したRC要素試験体の破壊状況をまとめて表-4 に示す。ここでは、写真-2 に示すように成形爆薬の爆発により生成されるジェットによって鉄筋が完全に切断される場合を完全切断(表-4 中の記号○で表示)、そしてジェットが鉄筋にくい込むものの切断に至らない場合を不完全切断(表-4 中の記号×で表示)にそれぞれ分類した。また、不完全切断の場合には、ジェットによって鉄筋中に切り欠かれた溝の深さをくい込み量としてノギスで計測した。なお、鉄筋の切断面を観察するとライナ材として用いた銅が付着していることが認められた。

3.2 鉄筋径が及ぼす影響

表-4 に示すように同じ成形爆薬 Sc20 を用いた鉄筋か

ぶりが0で鉄筋径の異なる Cv0D13Fc50-Sc20, Cv0D22Fc50-Sc20, Cv0D32Fc50-Sc20 の試験結果をみると、鉄筋径が13および22mmのCv0D13Fc50-Sc20, Cv0D22Fc50-Sc20は鉄筋が完全に切断されるのに対して、鉄筋径が32mmのCv0D32Fc50-Sc20は鉄筋が完全に切断されるまでには至っていない。また、成形爆薬 Sc35 を用いた鉄筋かぶりが0で鉄筋径が32mmであるCv0D32Fc50-Sc35の場合には、鉄筋が完全に破断することがわかる。したがって、鉄筋径が大きくなるほど鉄筋を切断するのに必要な爆薬量は増加するといえる。

3.3 鉄筋かぶりおよび爆薬量が及ぼす影響

表-5 に鉄筋のかぶり厚さおよび爆薬量の異なる発破試験における鉄筋の代表的な損傷状況を示す。

成形爆薬 Sc20 を用いた場合には、かぶり0mmのCv0D13Fc50-Sc20では鉄筋が完全に切断されるのに対して、かぶりが25mmおよび50mmのCv25D13Fc50-Sc20,

表-3 発破試験一覧

| No | 発破試験ケース | 試験体名 | 使用爆薬 |
|----|-------------------|--------------|------|
| 1 | Cv0D0Fc50-Sc20 | Cv0D0Fc50 | Sc20 |
| 2 | Cv0D0Fc50-Sc35 | | Sc35 |
| 3 | Cv0D0Fc50-Sc50 | | Sc50 |
| 4 | Cv0D13Fc50-Sc20 | Cv0D13Fc50 | Sc20 |
| 5 | Cv0D22Fc50-Sc20 | Cv0D22Fc50 | Sc20 |
| 6 | Cv0D32Fc50-Sc20 | Cv0D32Fc50 | Sc20 |
| 7 | Cv0D32Fc50-Sc35 | | Sc35 |
| 8 | Cv25D13Fc50-Sc20 | Cv25D13Fc50 | Sc20 |
| 9 | Cv25D13Fc50-Sc35 | | Sc35 |
| 10 | Cv25D22Fc50-Sc20 | Cv25D22Fc50 | Sc20 |
| 11 | Cv25D22Fc50-Sc35 | | Sc35 |
| 12 | Cv25D32Fc50-Sc35 | Cv25D32Fc50 | Sc35 |
| 13 | Cv25D32Fc50-Sc50 | | Sc50 |
| 14 | Cv50D13Fc50-Sc20 | Cv50D13Fc50 | Sc20 |
| 15 | Cv50D13Fc50-Sc35 | Cv50D13Fc50 | Sc35 |
| 16 | Cv50D13Fc50-Sc50 | | Sc50 |
| 17 | Cv50D22Fc50-Sc35 | Cv50D22Fc50 | Sc35 |
| 18 | Cv50D22Fc50-Sc50 | | Sc50 |
| 19 | Cv50D32Fc50-Sc50 | Cv50D32Fc50 | Sc50 |
| 20 | Cv100D13Fc50-Sc35 | Cv100D13Fc50 | Sc35 |
| 21 | Cv100D13Fc50-Sc50 | | Sc50 |
| 22 | Cv100D22Fc50-Sc35 | Cv100D22Fc50 | Sc35 |
| 23 | Cv100D22Fc50-Sc50 | | Sc50 |
| 24 | Cv100D32Fc50-Sc50 | Cv100D32Fc50 | Sc50 |
| 25 | Cv50D22Fc70-Sc35 | Cv50D22Fc70 | Sc35 |
| 26 | Cv50D22Fc70-Sc50 | | Sc50 |
| 27 | Cv50D22Fc90-Sc35 | Cv50D22Fc90 | Sc35 |
| 28 | Cv50D22Fc90-Sc50 | | Sc50 |



写真-2 コンクリートおよび鉄筋の破壊状況

表-4 RC 部材要素試験体の試験結果一覧

| 発破試験ケース | 鉄筋破壊状況 | |
|-------------------|--------|-----------|
| | 切断状況 | くい込み量(mm) |
| Cv0D13Fc50-Sc20 | ○ | — |
| Cv0D22Fc50-Sc20 | ○ | — |
| Cv0D32Fc50-Sc20 | × | 25 |
| Cv0D32Fc50-Sc35 | ○ | — |
| Cv25D13Fc50-Sc20 | × | 4.8 |
| Cv25D13Fc50-Sc35 | ○ | — |
| Cv25D22Fc50-Sc20 | × | 8.4 |
| Cv25D22Fc50-Sc35 | ○ | — |
| Cv25D32Fc50-Sc35 | × | 16.7 |
| Cv25D32Fc50-Sc50 | ○ | — |
| Cv50D13Fc50-Sc20 | × | 0 |
| Cv50D13Fc50-Sc35 | ○ | 4.1 |
| Cv50D13Fc50-Sc50 | ○ | 6.8 |
| Cv50D22Fc50-Sc35 | × | — |
| Cv50D22Fc50-Sc50 | ○ | 27.8 |
| Cv50D32Fc50-Sc50 | ○ | 0 |
| Cv100D13Fc50-Sc35 | × | 5.4 |
| Cv100D13Fc50-Sc50 | ○ | 0 |
| Cv100D22Fc50-Sc35 | × | 2.15 |
| Cv100D22Fc50-Sc50 | × | 3.6 |
| Cv100D32Fc50-Sc50 | × | 8.5 |
| Cv50D22Fc70-Sc35 | × | — |
| Cv50D22Fc70-Sc50 | ○ | 8 |
| Cv50D22Fc90-Sc35 | × | 18 |
| Cv50D22Fc90-Sc50 | ○ | — |

Cv50D13 Fc50-Sc20 では鉄筋は完全に切断されずにかぶりが増加するにしたがっていくい込み量が減少する結果となっている。すなわち、かぶりコンクリートがあることによって成形爆薬による鉄筋の切断性能は著しく減少することがわかる。

また、直径 32mm の鉄筋を切断する際に、かぶり 50mm の場合には Sc50 の成形爆薬が必要なのに対して、かぶり 0mm の場合には Sc35 の成形爆薬で十分であることがわかる。すなわち、実際の RC 柱の主鉄筋を成形爆薬で切断する場合、切断位置近傍のかぶりコンクリートをはつり、主鉄筋を露出させた状態で成形爆薬を設置するようにすれば、主鉄筋を切断するために必要とされる爆薬量を減らし節約できるといえる。

3.4 コンクリートの圧縮強度が及ぼす影響

かぶり 50mm で D22 鉄筋を配置したコンクリート強度の異なる試験体に対する発破試験で得られた鉄筋へのくい込み量とコンクリートの圧縮強度の関係を図-4 に示す。なお、D22 鉄筋が完全に切断された Cv50D22Fc50-Sc50 と Cv50D22Fc70-Sc50 のくい込み量は鉄筋径に等しい 22mm として図-4 に表示している。この図から、成形爆薬 Sc50 の場合には、コンクリートの圧縮強度が増加するにしたがっていくい込み量がわずかに減少する傾向を示していることがわかる。しかしながら、成形爆薬 Sc35 の場合にはくい込み量はコンクリートの圧縮強度によらず約 7mm 程度となっている。したがって鉄筋へのくい込み量にコンクリートの圧縮強度が及ぼす影響は無視できるほど小さいといえる。

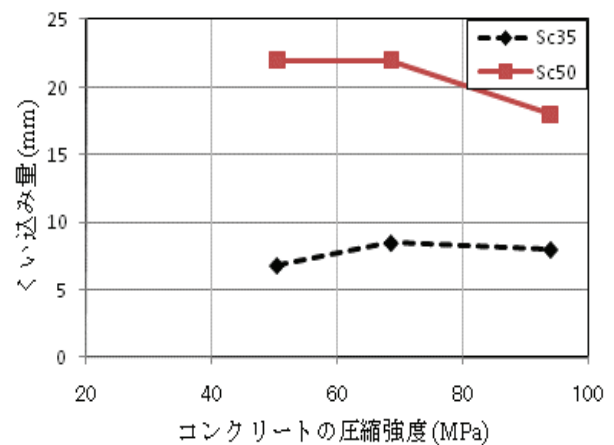


図-4 コンクリート圧縮強度とくい込み量の関係

3.5 鉄筋を切断するために必要な爆薬量の評価

これまでの検討から、コンクリート中にある鉄筋を切断するために必要な爆薬量は、主にかぶりおよび鉄筋径に影響を受けることがわかった。そこでここでは、本発破試験で得られた不完全破断した場合の鉄筋へのくい込み量および完全破断した場合の鉄筋径を切断可能な鉄筋径として、図-5 に爆薬量と切断可能な鉄筋径の関係を示す。この図から各かぶりにおける切断可能な鉄筋径は爆薬量が増加するにつれ線形的に増加することがわかる。











次に、図-5 に示す切断可能な鉄筋量と爆薬量ならびに鉄筋のかぶり厚さの関係を回帰したところ次式を得た。

$$Da = 0.875Wsc - 0.427Cv + 16.162 \quad (1)$$

ここで、 Da :切断可能な鉄筋径(mm)、 Wsc :爆薬量(g/cm)、 Cv :鉄筋のかぶり(mm)である。式(1)は、試験結果と良い一致を示すことがわかる。

したがって、かぶり Cv の位置にある直径 Da の鉄筋

表-5 各爆薬量における破壊状況に対するかぶり厚さの及ぼす影響

| 試験体の かぶり厚さ(mm) | 成形爆薬の種類 | | |
|-------------------|--|--|---|
| | Sc20 | Sc35 | Sc50 |
| 0 |  完全切断 Cv0D13Fc50-Sc20 |  完全切断 Cv0D32Fc50-Sc35 | |
| 25 |  くい込み量=4.8mm Cv25D13Fc50-Sc20 |  くい込み量=16.7mm Cv25D32Fc50-Sc35 |  完全切断 Cv25D32Fc50-Sc50 |
| 50 |  くい込み量=0mm Cv50D13Fc50-Sc20 |  くい込み量=6.8mm Cv50D22Fc50-Sc35 |  完全切断 Cv50D32Fc50-Sc50 |
| 100 | |  くい込み量=0mm Cv100D13Fc50-Sc35 |  くい込み量=3.6mm Cv100D32Fc50-Sc50 |

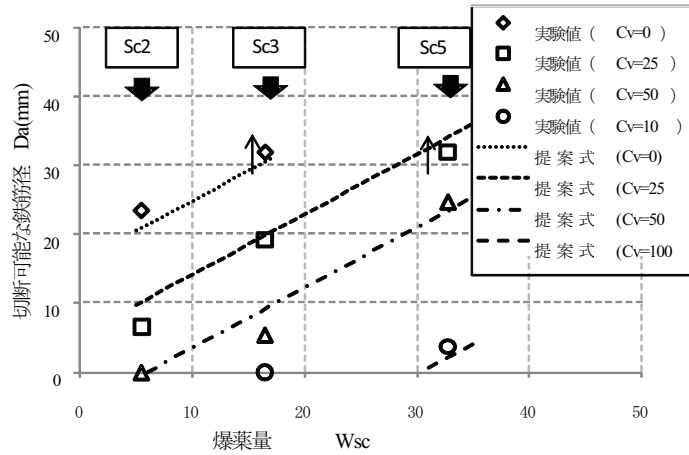


図-5 各かぶり厚さにおける爆薬量と切断可能な鉄筋径の関係

を切断するために必要となる爆薬量 W_{sc} は式(1)により次式で与えることができる。

$$W_{sc} = 1.143Da + 0.488Cv - 18.471 \quad (2)$$

式(2)を用いると、例えば、 $Cv = 60\text{mm}$ で $Da = 29\text{mm}$ の場合に必要な爆薬量は $W_{sc} = 44\text{g/cm}$ と計算されることになる。

4. 結 言

本研究では、成形爆薬を用いてRC部材中の鉄筋を切断することが可能であるのかどうかを調べるとともに、鉄筋のかぶり厚さ、鉄筋の直径、コンクリートの強度及び爆薬量が成形爆薬を用いた鉄筋の切断効果に及ぼす影響をあわせて調べた。その結果から得られた結論を以下にまとめる。

- 1) 適切な爆薬量の成形爆薬を用いることによってコンクリート内部の鉄筋でも切断することが可能であることがわかった。
- 2) コンクリート中の鉄筋を切断するために必要な成形爆薬の爆薬量は、鉄筋径ならびにかぶりの厚さに大きく影響を受けるが、コンクリートの圧縮強度が及ぼす影響は小さいことがわかった。
- 3) 本試験結果に基づき、成形爆薬で切断可能な鉄筋径と爆薬量ならびに鉄筋のかぶり厚さの関係を回帰した。また、その回帰式から、かぶり厚さならびに鉄筋径を考慮してコンクリート中にある鉄筋を切断するために必要となる爆薬量を求める方法を提示した。
- 4) 成形爆薬を用いて鉄筋を切断する手法は、本試験で行った柱・梁部材のみならず鉄筋コンクリート建物を構成する耐震壁等にも適用できると考える。

参考文献

- 1) 小林茂雄・坂田英一・橋爪清・中川浩二：鉄筋コンクリート建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, pp.146-153, Oct., 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, No2, 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建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(報告)，pp.173-182, 1989.
- 8) イアムラオー ピーラサック・藤掛一典・大野友則：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，構造工学論文集，Vol.56A, pp.1189-1195, 2010.
- 9) 加藤政利・中村雄治・松尾彰・緒方雄二・勝山邦久・橋爪清：鋼構造物の発破解体に用いる成形爆薬の有効な形状と鋼板の衝撃破壊に関する研究，火薬学会誌，Vol.59, No.5, pp.261-274, 1998.
- 10) 加藤政利・中村雄治・松尾彰・緒方雄二・勝山邦久・橋爪清：成形爆薬による鋼構造物の発破解体に関する研究(第1報)－鋼板の材料強度の違いによる成形爆薬の切断能力，火薬学会誌，Vol.61, No.6, pp.281-295, 2000.