

ポリウレア樹脂による裏面補強を施したコンクリート板の接触爆発実験

Contact explosion tests of resined reinforcement concrete plates using polyurea

山内稔也*, 市野宏嘉**, 別府万寿博***, 福井秀平****
Toshiya Yamauchi, Hiroyoshi Ichino, Masuhiro Beppu, Shuhei Fukui

*防衛大学校理工学研究科学生 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

** 博 (工), 防衛大学校准教授, 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)

****IMARI 株式会社 (〒848-0024 佐賀県伊万里市大川内町甲 984-3)

キーワード: 接触爆発実験, ポリウレア樹脂, コンクリート, 裏面剥離

Keywords: contact explosion test, polyurea resin, concrete, spall

1. 序言

近年, 爆破テロや爆発事故等の爆発災害により多くの構造物に被害が生じ, 人命や財産が失われている. このため, 公共施設等の社会的に影響度の高い構造物に対して爆発による被害を局限できるよう考慮した設計が要求されることがある. コンクリート構造物が接触あるいは近接爆発を受けた場合, コンクリートの局部破壊や, 破片の飛散が大きな問題となる. ただし, 局部破壊や破片の飛散に対応できるように断面や鉄筋量を増加させると, 常時荷重に対してこれらをかなり大きくせざるを得ず, 自重の増大などの別の問題も生じる. そこで, 断面や鉄筋の増大を伴わない様々な方法でコンクリート部材を補強し, 破壊を低減したり飛散物の発生を抑止したりする方法が考えられる. 主な補強の方法として, 鋼板あるいは連続繊維シートを接着剤で貼り付ける方法. 樹脂材料をスプレーガンで吹き付けて被覆する方法がある. 後者は, 樹脂の材料にもよるが樹脂の吹き付け後ただちに供用が可能であり, また, 様々な形状の部材に対応できる利点がある. 樹脂材料で裏面補強したコンクリート板(版)の接触爆発に対する損傷効果については, これまで, 大久保ら¹⁾, Wang ら²⁾, の研究がある. これらの研究では, コンクリート板の裏面側に樹脂材料を塗布すると, 板の損傷が低減, あるいは破片の飛散が防止され, 高い耐爆補強効果をもたらすことが報告されている. しかしながら, このような裏面補強による効果は定量的には把握されていない. したがって, 現状では, 設計において樹脂の塗布厚さや部材の断面を合理的に決定することができない.

本研究では, コンクリート構造物の耐爆設計法の確立

に資するため, ポリウレア樹脂を裏面に塗布したコンクリート板の接触爆発実験を行い, 樹脂の塗布厚さの違いが補強効果に及ぼす影響について調べる. 次に, その補強効果の評価法について検討を行うとともに, 既往の研究との比較を行う.

2. 接触爆発実験の方法

2.1 実験の概要

実験に使用した試験体を図-1 に示す. コンクリート板試験体の寸法は, 500×500×60mm であり, 爆発面の反対(裏面)側にポリウレア樹脂を種々の厚さで塗布した. また, 比較のため裏面を補強していない無補強コンクリート板に対する実験も行った. コンクリートの圧縮強度は 35.9N/mm² で, 割裂引張強度は 2.7N/mm² であった. 配筋については, 取り扱い中の損傷を防ぐために D6 鉄筋を四周に配置するのみとし, 鉄筋の影響を受けることなくポリウレア樹脂による効果を抽出できるようにした.

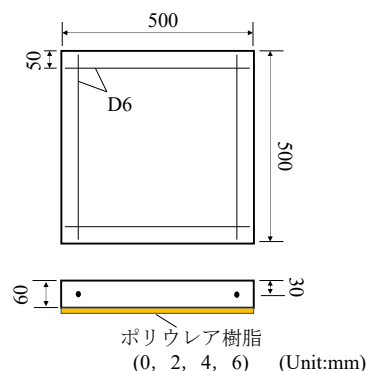


図-1 試験体寸法

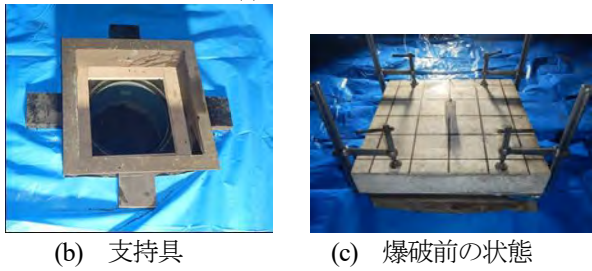
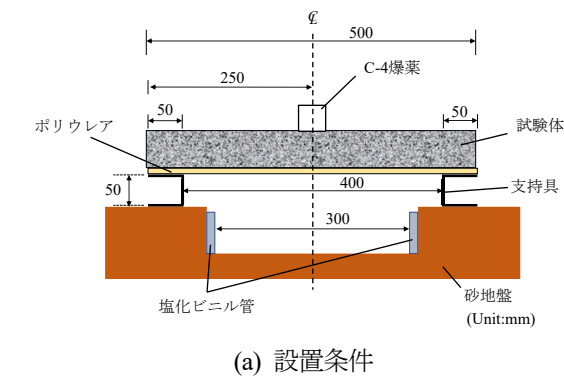


図-2 実験条件

図-2 に試験体の支持具および実験室内にコンクリート板と爆薬を設置した状態を示す。図-2(b)に示すように、溝型鋼を四角形に組み合わせて溶接して試験体の支持具を用いた。溝型鋼の短辺は50mmであり、板のスペンは縦横400mmとなる。ポリウレア樹脂は破断までの伸びが300%程度に達する材料である。爆発により板が大きな変形を生じ、地表面に接触することを避けるため、砂地盤には堅穴を掘った。支持具から伝達される爆発荷重による穴の崩壊を防ぐため、穴の側壁は内径300mmの塩化ビニル管で補強した。図-2(c)に示すように試験体を支持具に乗せ、跳ね返り防止のために4か所をクランプで留めた。試験体の中央に直径と高さが等しい円柱形に成型した爆薬を設置し、これを6号電気雷管で起爆した。実験用の爆薬には、塑性があり、衝撃や熱などに対して比較的安定で取り扱いが容易なC-4爆薬を用いた。

実験ケースを表-1に示す。実験のパラメータは、ポリウレア樹脂の塗膜厚さと爆薬量である。ポリウレア樹脂の厚さは、0、2、4および6mmとし、爆薬量はポリウレアの厚さに応じて15~100gとした。

2.2 計測項目

図-3および図-4にコンクリート板が接触爆発によって損傷された状態の模式図を示す。図-3に示す無補強の場合には、爆発面(表面)にクレータとよばれる破壊を呈する。爆薬量がある条件を上回ると、爆発面の反対側(裏面)にスポール、あるいは裏面剥離と呼ばれる剥離破壊が生じる。さらに爆薬量が大きくなると、クレータとスポールが接続し、貫通孔が生じる。以上より、無補強コンクリートの損傷状態については、クレータ、スポール及び貫通の3種類に区分できる。

表-1 実験ケース

No.	コンクリートの厚さ(mm)	爆薬量(g)	ポリウレアの厚さ(mm)
1	60	15	0(無補強)
2	60	15	2
3	60	30	2
4	60	50	2
5	60	75	2
6	60	30	4
7	60	50	4
8	60	75	4
9	60	100	4
10	60	15	6
11	60	100	6

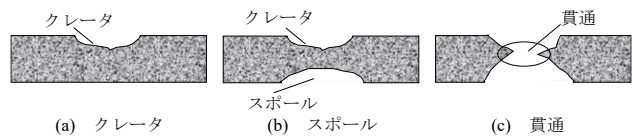


図-3 無補強コンクリートの損傷状態

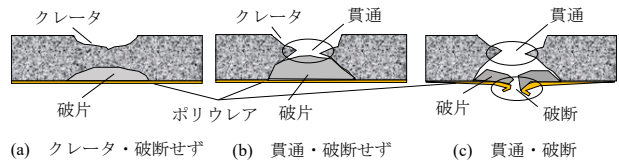


図-4 補強コンクリートの損傷状態

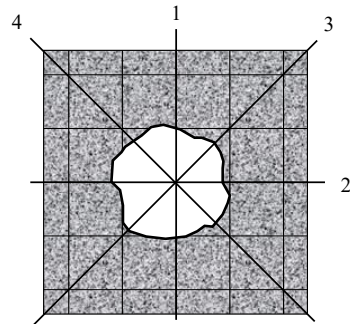


図-5 クレータの直径の計測

図-4に示す裏面補強を施したコンクリート板の場合にも、無補強の場合と同じようにクレータが生じる。一方、裏面にはポリウレア樹脂が塗布されているため、スポールが発生しているか否かは外観からは確認できない。爆薬量が板厚および樹脂の厚さに対してある一定の値を超えたところで樹脂が破断される。補強コンクリート板の損傷状態については、コンクリート板とポリウレアと分けて考えた。コンクリートについては損傷状態をクレータ、貫通の2種類に区分した。図-4(b)に示すように、クレータの凹み中央部に穴が生じ、コンクリート片が板本体から分離されている状態を貫通とした。ポリウレアについては、図-4(c)に示す破断の有無で区分した。クレ

ータおよびスポールの直径は、図-5 に示すように 4 方向から測定し、その数値の平均値を採用した。各試験体のグリッド線の間隔は 10cm である。

3. 実験後の試験体の状況および損傷の規模

実験結果を表-2 に示す。また、試験体の損傷状態の代表例を図-6 に示す。図-6(a)に示す無補強のコンクリート板の爆薬量 15g のケースでは、表-2 でも示すように、表面側に直径 114mm のクレータが生じており、裏面側では直径 187mm のスポールが発生している。すなわち、コンクリート板の裏面側を補強しなかった場合、爆薬量 15g の接触爆発での損傷状態は「スポール」となる。

次に、裏面をポリウレア樹脂で補強したコンクリート板の実験結果について検討する。図-6(b)に厚さ 2mm のポリウレアを塗布した板厚 60mm、爆薬量 15g の損傷状態を示す。無補強の場合と比較すると、表面の破壊に大きな変化はない一方、裏面側では破片の飛散はなく、膨らみも目視では認められない程度であった。次に、同じくポリウレアの厚さ 2mm で爆薬量を 50g としたケースでの結果を図-6(c)に示す。コンクリートには貫通孔が生じたのに対し、ポリウレア樹脂は膨らんでいるが破断には至っておらず、破片の飛散は生じなかった。図中に線で囲っている範囲が膨らみの範囲である。図-6(d)にポリウレアの厚さが 4mm、爆薬量 50g のケースでの結果を示す。本ケースでもコンクリート板には貫通孔が生じ、損傷状態は図-6(c)のケースと大きな変わりはない。裏面側の状態は、図-6(c)と比較して膨らみの高さは抑えられているのに対して、膨らみ全体の面積が大きくなった。図-6(e)にポリウレアの厚さが 4mm、爆薬量 100g の結果を示す。この実験ではポリウレア樹脂が破断し、終

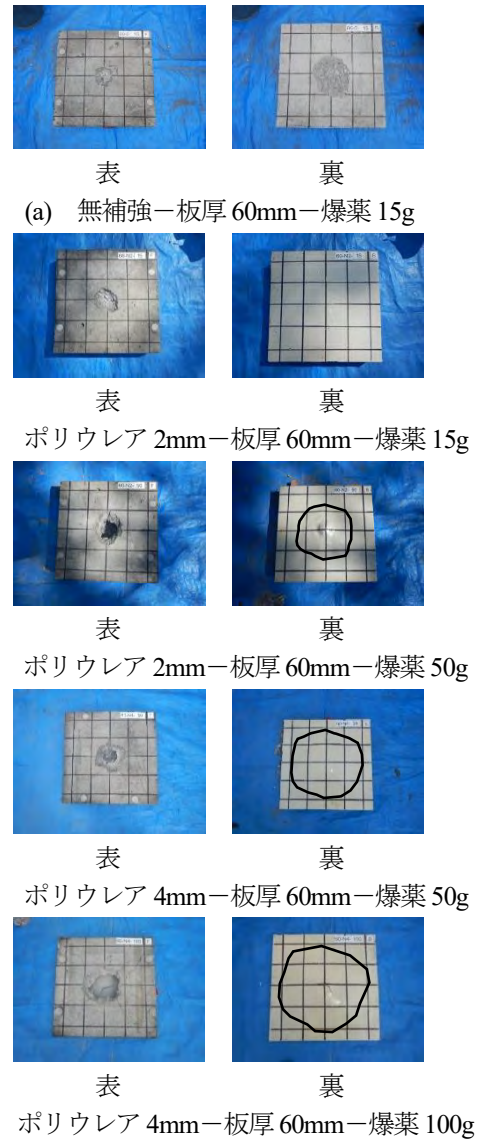


図-6 試験体の損傷

表-2 実験結果

No.	厚さ(mm)		爆薬量 (g)	コンクリート 損傷状態	ポリウレア 損傷状態	クレータ 直径(mm)
	コンクリート	ポリウレア				
1	60		15	スポール		114
2	60	2	15	クレータ	破断せず	102
3	60	2	30	貫通	破断せず	134
4	60	2	50	貫通	破断せず	145
5	60	2	75	貫通	破断	157
6	60	4	30	貫通	破断せず	123
7	60	4	50	貫通	破断せず	155
8	60	4	75	貫通	破断せず	164
9	60	4	100	貫通	破断	184
10	60	6	15	クレータ	破断せず	116
11	60	6	100	貫通	破断せず	191

局状態に至った。ただし、図-6(d)に示した爆薬量 50g の場合と比較して、ポリウレア樹脂の膨らみの高さ及び膨らみの面積に大差は認められない。クレータ直径と爆薬量の関係を図-7 に示す。図より、爆薬量の増加に伴いクレータ直径が線形的に増加する傾向が認められる。この傾向にはポリウレアの厚さによる差が認められず、その影響は比較的小さいことが分かる。

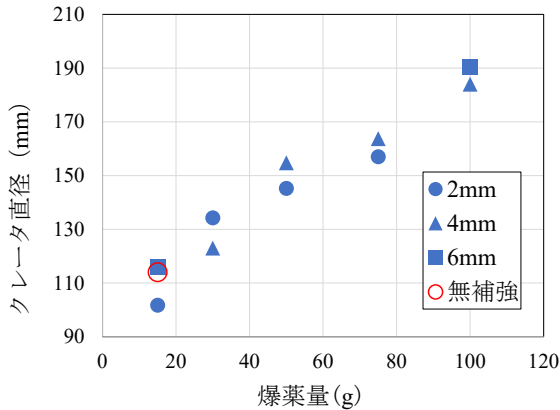


図-7 クレータ直径と爆薬量の関係

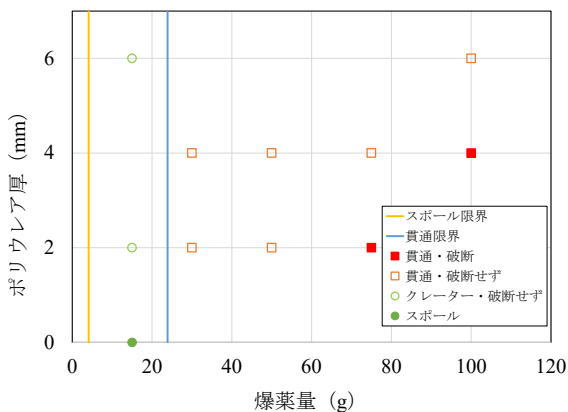


図-8 ポリウレア厚さと爆薬量の関係

4. ポリウレア樹脂による補強の効果の評価

ここでは前章で確認したポリウレア樹脂による裏面補強の効果の評価する。図-8 は、実験におけるポリウレアの塗布厚さと爆薬量の関係について損傷状態別にプロットしたものである。なお、図中には森下ら³⁾が提案した裏面を補強しない鉄筋コンクリートに対する実験式による計算値も併せて示した。森下らは接触爆発を受けた裏面を補強しない鉄筋コンクリートについて、そのスポールの発生と貫通の限界となる版厚 $T(\text{cm})$ と爆薬量 $W(\text{g})$ との関係を下のように提案している。

$$\text{(スポール限界)} \quad \frac{T}{W^{1/3}} = 3.6 \quad (1)$$

$$\text{(貫通限界)} \quad \frac{T}{W^{1/3}} = 2.0 \quad (2)$$

なお、 W はある種類の爆薬量を、エネルギーを基準として TNT 爆薬に換算した爆薬量である。C-4 が爆発で発生させるエネルギーは、TNT の 1.13 倍⁴⁾ であるので、本実験では爆薬量に 1.13 を乗じた値が W となる。 $T/W^{1/3}(\text{cm/g}^{1/3})$ を換算コンクリート厚さといい、接触爆発荷重を受けるコンクリート板の損傷評価の際に用いられている。式(1)および(2)により本実験での無補強の板厚 60mm のコンクリート板に対する各限界の C-4 爆薬量は、スポール限界が 4.1g、貫通限界が 23.9g となる。

図-8 でコンクリートの破壊性状に注目すると、無補強コンクリートのスポール限界を表す閾値と貫通限界を表す閾値の間の破壊性状は 3 ケースあり、全て破壊性状は貫通に達していない。また、貫通限界を表す閾値を超えたケースは全て破壊性状が貫通である。そのため、コンクリートの損傷に対する裏面側のポリウレアの影響は限定的であるといえる。また、ポリウレアの厚さが増加すると、同じ爆薬量のケースであっても、ポリウレアの損傷状態がより軽減されていることがわかる。すなわち、ポリウレアが厚いほどより大きな爆薬量に対してコンクリート片の飛散を防ぐことができる。

ここで、ポリウレアによる補強効果を定量的に表すことを考える。図-8 より、ポリウレアの厚さ 2mm では、爆薬量 50g においてコンクリートには貫通孔が生じているものの、ポリウレアは破断せず、スポールによる破片の飛散は生じていない。仮に、C-4 爆薬 50g に対してスポールを生じないために必要な板厚は、式(1)より 132mm となる。破片を飛散させないという観点からは、ポリウレア 2mm による補強は、少なくとも $132-60=72\text{mm}$ のコンクリート板厚と同等の補強効果があったといえる。ポリウレア 4mm による補強では、C-4 爆薬 75g の接触爆発でも破片の飛散は生じなかったため、同様に計算すると少なくとも 91mm のコンクリートに相当したことになる。ポリウレア 6mm による補強は、100g の爆発で破片の飛散は生じなかったことから、同様に計算すると、少なくとも 107mm に相当したことになる。ポリウレアの厚さと補強効果との関係については、今後、板厚を変えた実験を行うなどしてより詳細に検討していく必要がある。

5. 既往の研究との比較

Wang ら²⁾ は、コンクリート版の裏面補強の材料として、一般的なポリウレア樹脂と比較してより高い引張強度 (25N/mm^2) と破断伸び (465%) を有する Polyisocyanate-oxazodone (POZD) を使用した接触爆発実験を行った。この実験では、厚さ 150mm コンクリート板に POZD を 0, 4, 6, 8, 10, 12mm 塗布した試験体が用いられた。図-9 に、本実験と Wang ら²⁾ の実験における換算コンクリート厚さと、樹脂の塗布厚さを爆薬量の 3 乗根で除した換算塗膜厚さとの関係を、2.2 で定義した損傷状態別にプロットした。図より、換算コンクリート厚さと換算塗

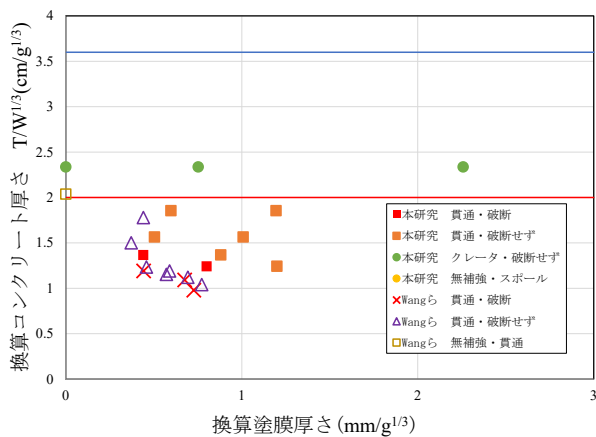


図-9 本実験と Wang ら²⁾の実験との比較

膜厚さがともに増加すると、より軽微な損傷状態となる傾向があることがわかる。また同等の換算コンクリート厚さに対しては、換算塗膜厚さを増すことにより、より軽微な損傷状態に移行することがわかる。たとえば、両者の実験とも、換算コンクリート厚さが $1.5\text{cm/g}^{1/3}$ を上回っていれば換算塗膜厚さが、 $0.5\text{mm/g}^{1/3}$ 程度で破片の飛散が生じなくなる。一方、換算塗膜厚さが $1\text{mm/g}^{1/3}$ では、本実験の条件では破片の飛散は生じていない。本実験と Wang²⁾らの実験を比較すると、同等の換算コンクリート厚さにおいて破片の飛散が生じない、すなわち樹脂が破断しないためには、本実験の方がより大きな換算塗膜厚さを要する。これは、それぞれの実験で使用した材料の物性値が違う影響や、実験の規模が異なることによる影響などに起因したと考えられる。

6. 結言

本研究では、ポリウレア樹脂で裏面補強したコンクリート板に対して接触爆発実験を行い、その補強効果を検

討した。本研究で得られた主な結果を以下に要約する。

- (1) ポリウレア樹脂をコンクリート板の裏面に塗布することで、膨らみを伴いながら、接触爆発によって生じたコンクリート片の飛散を防止できた。
- (2) ポリウレア樹脂で補強したコンクリート板は、ある値を上回る爆薬量の接触爆発を受けるとポリウレアに亀裂を伴う破断が生じた。
- (3) 森下ら³⁾が提案した実験式から、ポリウレアが接触爆発によるコンクリート片の飛散を抑止する効果をそれと等価な無補強コンクリートの板厚で概ね評価することができた。
- (4) 樹脂により裏面補強されたコンクリート板が接触爆発を受けた場合、その換算コンクリート厚さと換算塗膜厚さがともに増加すると、より軽微な損傷状態となる。また同等の換算コンクリート厚さに対しては、換算塗膜厚さを増すことにより、より軽微な損傷状態となる。

参考文献

- 1) 大久保一徳, 大野友則, 別府万寿博, 福井秀平, 横島順一: 高分子材料で裏面補強したコンクリート板の耐爆効果に関する実験的研究, 防衛施設学会平成19年度年次研究発表会, 2007
- 2) Wei Wang, Jianchao Yang, Jianhui Wang, Xing Wang and Qing Huo : Experimental investigation of polyisocyanate-oxazodone coated square reinforced concrete slab under contact explosions, International Journal of Impact Engineering, Vol 149, pp.1-14, 2021
- 3) 森下政浩, 田中秀明, 伊藤孝, 山口弘: 接触爆発を受ける鉄筋コンクリート版の損傷, 構造工学論文集, Vol. 46A, pp. 1787-1797, 2000
- 4) Headquarters, Departments of the Army. Unified Facilities Criteria (UFC), Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions, Chapter2, 2014.