

論文 接触爆発を受けるポリウレア樹脂塗布コンクリート板の耐爆性能に関する実験的研究

道上 剛幸*1・別府 万寿博*2・市野 宏嘉*3

要旨：本研究は、ポリウレア樹脂を爆発の裏面側に塗布したコンクリート板に対する接触爆発実験を行い、ポリウレア樹脂塗布 RC 板の耐爆性能を検討したものである。板厚 80mm の無塗布コンクリート板およびポリウレア樹脂を板の裏面に 2mm および 4mm 塗布した同板厚のコンクリート板に対して、爆薬量 20g ~ 150g の接触爆発実験を実施した。なお、引張試験によって得られたポリウレア樹脂の引張強度および伸び率を樹脂厚さ毎に確認した。実験結果から、ポリウレア樹脂の塗布によって、破壊した破片の飛散を抑制する効果が確認された。また、ポリウレア樹脂の塗布厚さと耐爆性能の関係について考察を行った。

キーワード：ポリウレア樹脂, 耐爆性能, コンクリート板, 接触爆発

1. はじめに

土木・建築分野における鉄筋コンクリート構造物は、地震・衝撃あるいは爆発などの外力作用を受けることがある。この中でも地震に対しては、1995 年の阪神淡路大震災での被害を受け、わが国の耐震補強対策とその補強技術は急速に進歩した。また、耐震設計技術についても見直しが行われ許容応力度設計法から塑性変形性能に期待する設計法の導入が行われてきた。

しかしながら、爆発荷重については近年研究が進められているが耐爆性能を確保するための設計法は確立されていない¹⁾。爆破テロや爆発事故では、被害が甚大であるため社会に与える影響が大きく、被害の推定法の確立や防護対策が必要である。特に、コンクリート部材に局部破壊が発生し、中でも爆発を受ける面の反対側の表面（裏面）が剥離して破片が飛散する破壊（スポール）を防ぐことが求められる^{1),2)}。スポールに対する補強方法として、コンクリート部材の裏面側に鋼板あるいは炭素繊維などの連続繊維シートを接着剤で貼付する方法³⁾⁻⁵⁾や樹脂材料を吹付けて被覆する方法がある。後者においては、様々な形状に追従することができる利点がある。これらは、土木分野でも構造物の補強方法として一般的に用いられる工法であり多種多様な材料が存在する。この中でも、ポリウレア樹脂を裏面塗布したコンクリート板の爆発荷重に対する効果として、破片の飛散を防止する効果をもたらすことが報告されている⁶⁾。ポリウレア樹脂は引張強度が高く、大きな破断ひずみを利用して耐爆性能向上への適用が期待され、その評価法についても検討されている。しかしながら、評価例が少ない状況であり、設計法の提案までには至っていない。

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、既往の研究⁶⁾とは異なる種類の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、樹脂の塗膜厚さの違いが耐爆性能の向上効果に与える影響について調べる。次に、既往の研究結果との比較を通して、ポリウレア樹脂塗布による耐爆性能の評価法について検討する。また、塗膜厚が樹脂物性に与える影響の観点からも検討を行う。

2. 接触爆発実験概要

2.1 使用材料

本研究で使用したポリウレア樹脂は加温硬化型ポリウレアであり、カタログ値では引張強度 18 ~ 24MPa、伸び率 200 ~ 300%を有するものである。コンクリートは呼び強度 30 のレディーミクストコンクリートを用い、試験時の圧縮強度は 31.9N/mm²、プライマーはエポキシ系樹脂を用いた。表 - 1 にコンクリートの配合を示す。

2.2 試験体

図 - 1 に、実験に用いたコンクリート板試験体の概要を示す。コンクリート板の寸法は縦 500×横 500×厚さ 80mm である。配筋が局部破壊に及ぼす影響は小さいことが既往の研究⁷⁾において報告されているため、ここではコンクリート板を取扱う際の破損を防ぐために D10 鉄筋をコンクリート板の四周に配置した。ポリウレア樹脂の施工に際しては、RC 板の裏面をディスクグラインダにより研磨し、プライマー塗布後にポリウレア樹脂を塗膜厚さ 2mm および 4mm で吹付け施工した。塗膜厚さの管理については、施工時に計測針を塗膜に刺して厚さを確認しながら吹付けし、施工後の塗膜厚さは塗膜計で計測した。測定位置は試験体四隅および中心の 5 点とした。設計塗膜 2mm および 4mm に対し、実測の平均値はそれぞれ 2.02mm および 4.03mm であった。標準偏差は、塗膜厚さ 2mm および 4mm に対してそれぞれ 0.09mm および 0.18mm であった。なお、ポリウレア樹脂を塗布していない無補強のコンクリート板も作製した。

*1 (株)ケー・エフ・シー 開発営業部課長 (正会員)

*2 防衛大学校 建設環境工学科教授 博士(工学)(正会員)

*3 防衛大学校 建設環境工学科准教授 博士(工学)(正会員)

表-1 コンクリートの配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)				
				水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤
20	8	49.5	42.7	158	320	784	1078	2.88

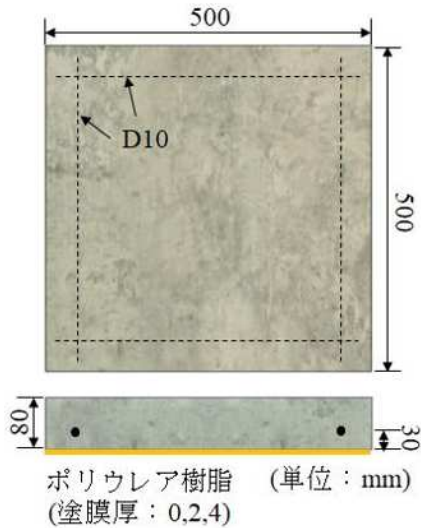


図 - 1 試験体の寸法

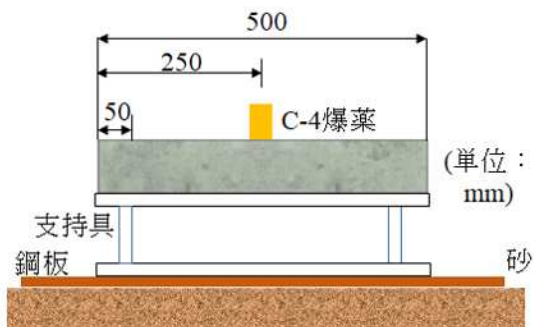


図 - 2 試験体の設置状況

2.3 実験概要

図 - 2 に試験体と爆薬の設置状況を示す。図 - 2 に示すように短辺 50mm の H 鋼を縦横 500mm の正方形に組み合わせたものを試験体の支持具として用いた。そのため、板のスパンは縦横 400mm となり、計測範囲も同範囲にて行った。試験体の中央に直径と高さの比が等しい円柱状に成型した爆薬を設置し、6 号電気雷管で起爆した。実験の爆薬には、Composition-C-4 爆薬を用いた。爆薬量はポリウレタ樹脂の塗膜厚さに応じて 20 ~ 150g とした。

2.4 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およびその局部破壊の寸法の定義を示す。図 - 3 に示す無補強の場合には、爆発面（表面）に

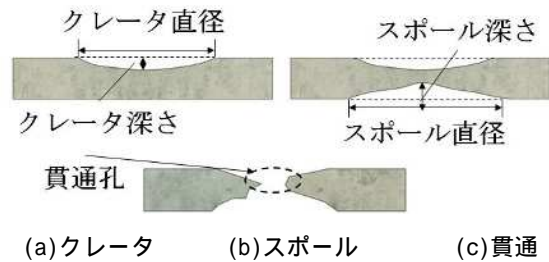


図 - 3 無補強コンクリートの損傷状態

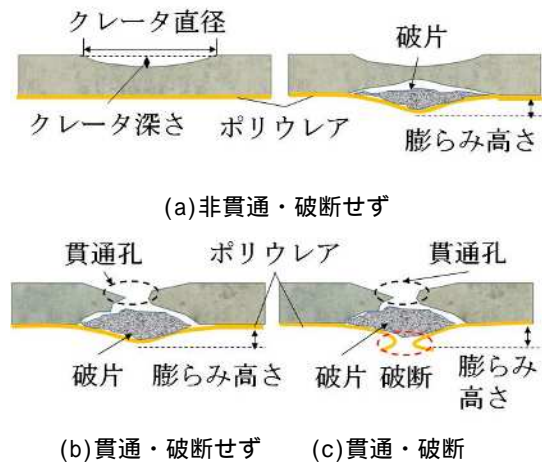


図 - 4 ポリウレタ塗布コンクリートの損傷状態

クレータとよばれる破壊が生じ、爆薬量が増加すると、爆発面の裏面側にスポールと呼ばれる剥離破壊が生じる。さらに爆薬量を増加させると、クレータとスポールが繋がることにより貫通孔が生じる。以上より、無補強コンクリート板の破壊形態は、上記の 3 種類に分類する。図 - 4 に示す補強コンクリート板の場合にはポリウレタ樹脂を塗布しているため、スポールの発生状況は外観からは確認できないが、爆薬量が一定値を超えたとき樹脂が破断する。よって、ポリウレタ樹脂塗布コンクリート板の破壊形態は、コンクリート板とポリウレタ樹脂に分けて分類した。コンクリート板は図 - 4(a)のような状態を非貫通、図 - 4(b)および(c)の状態を貫通とし、樹脂については破断の発生有無に区分した。計測項目を図 - 3 および図 - 4 に示す、クレータ範囲、クレータ深さ、裏面の膨らみ高さおよび膨らみ範囲である。クレータの深さおよび膨らみの高さはレーザー変位計 (KEYENCE LJ-X 8000)、範囲については定規により計測した。

3. ポリウレア樹脂の力学特性

3.1 試験方法および試験体

塗膜厚さがポリウレア樹脂の物性に与える影響について検討した。検討項目は、ポリウレア樹脂の引張強度および伸び率とし、塗膜厚 1mm, 2mm, 4mm の試験体を作製して、精密万能試験機(島津製作所 AGS-X)で引張試験を行った。載荷速度は 200mm/min とした。また破断伸び率は、ビデオ式非接触伸び計(島津製作所 TRViewX)で計測した。試験体は JIS K6251 引張 3 号ダンベルにて硬化後のポリウレア樹脂から引張試験体を作製した。

3.2 試験結果

引張試験結果を表 - 2 に示す。また、図 - 5 に塗膜厚さ 1mm, 2mm, 4mm の供試体毎の応力 - 変位関係を示す。塗膜厚さ毎の平均引張強度は、塗膜厚さ 1mm, 2mm および 4mm に対して、それぞれ 20.39N/mm², 13.99N/mm² および 9.50N/mm² であった。塗膜厚さ 2mm の場合は 1mm と比較して引張強度が 31% 程度低下し、塗膜厚さ 4mm の場合は 53% 程度低下した。伸び率では、塗膜厚さ 1mm と 2mm の試験体については大きな差はなく、塗膜厚さ 4mm の場合に 20% 程度低下した。

既往の研究^{8),9)}より、材料に含まれる気泡の含有率が增大するとともに破壊強度が指数関数的に低下していくことを示す実験式が提案されている。本研究で用いているポリウレア樹脂は吹付けにより施工しているので、硬化後の材料は空気を含み、多孔質の材料と同様に断面積の増減が破壊強度に影響していることが推察される。図 - 6 に吹付け施工したポリウレア樹脂の断面写真を示す。断面を確認すると気泡は不規則に配置されており、破壊箇所は気泡により塗膜厚さが小さくなっている部分で発生していることが考えられる。断面積に対する気泡発生率と引張強度の関係については今後の検討課題である。

4. 試験体の損傷状況

実験結果を表 - 3 に示す。表には、全ケースの破壊モード、クレータおよびスポールの直径を示している。直径については、縦、横、斜め 2 箇所を合計 4 つを計測し平均した値を示している。図 - 7 に、試験体の損傷状態の代表例を示した。図 - 7(a) に示す無補強のコンクリート板の爆薬量は 50g のケースでは、表 - 3 に示すように、表面側に深さ 28mm, 直径 161mm のクレータが生じた。裏面側には深さ 43mm, 直径 229mm のスポールの発生とともにコンクリートの破片が飛散したが、貫通は生じなかった。なお、爆薬量を 60g のケースでは、無補強コンクリートには貫通が発生した。

次に、裏面にポリウレア樹脂を塗布したコンクリート板の実験結果について検討する。図 - 7(b)には、塗膜厚さ 2mm で補強したコンクリート板、爆薬量 50g の損傷

表 - 2 引張試験結果

【試験体厚さ 1mm】 (設計値)	試験体厚み 実測 (mm)	引張強度 (N/mm ²)	伸び率 (%)
No.1	1.36	18.99	319.7
No.2	1.41	17.77	303.9
No.3	1.38	18.74	309.3
平均	1.38	18.50	311.0
【試験体厚さ 2mm】 (設計値)	試験体厚み 実測 (mm)	引張強度 (N/mm ²)	伸び率 (%)
No.1	2.51	12.32	258.4
No.2	2.52	12.60	264.4
No.3	2.09	16.77	306.9
平均	2.37	13.90	276.6
【試験体厚さ 4mm】 (設計値)	試験体厚み 実測 (mm)	引張強度 (N/mm ²)	伸び率 (%)
No.1	4.26	10.51	263.3
No.2	3.97	9.50	258.1
No.3	4.69	9.12	235.5
平均	4.31	9.71	252.3

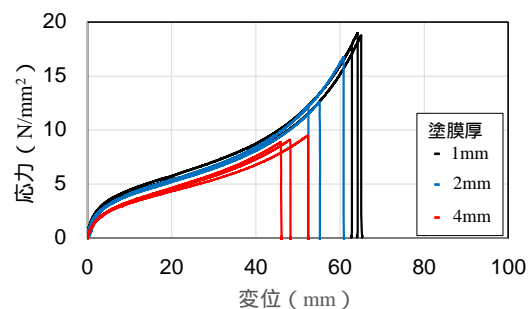


図 - 5 応力 - 変位関係

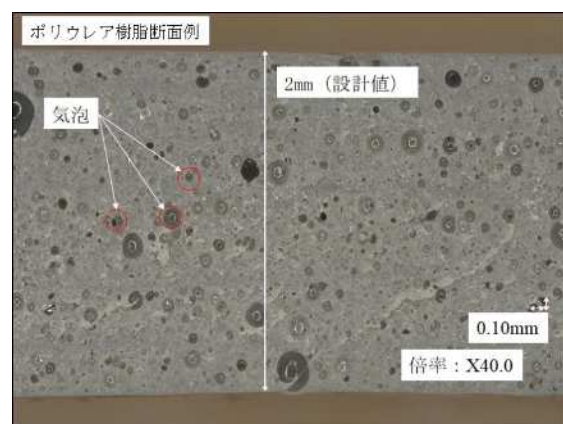
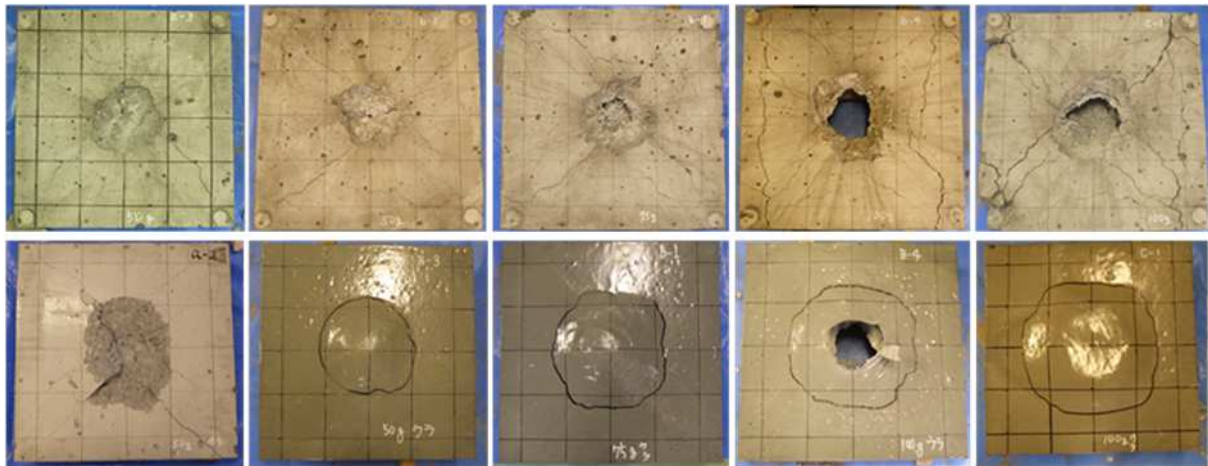


図 - 6 ポリウレア樹脂の断面写真

状態を示す。無補強コンクリート板の場合と比較すると、表面の破壊はクレータの直径が 16mm 減少したこととどまり大きな変化はなかった。爆薬量 30g で比較した場合も同様の結果が得られた。一方、裏面側では爆発によるコンクリート破片の飛散は生じなかった。裏面の膨らみは高さ 30mm, 膨らみの直径は 222mm であり、無補強の場合のスポール直径 229mm と近い値となった。爆薬量 30g で比較した場合も同様の結果が得られた。図 -

表 - 3 実験結果

No.	ポリウレア 厚さ(mm)	爆薬量 (g)	コンクリート の損傷状態	ポリウレアの 損傷状態	クレータ		1.スポール(無補強板) 2.膨らみ(補強板)	
					深さ(mm)	直径(mm)	1.深さ(mm) 2.高さ(mm)	直径(mm)
1	0	20	クレータ		16	133	0	0
2	0	30	スポール		29	132	33	232
3	0	50	スポール		28	161	43	229
4	0	60	貫通			143		250
5	2	30	非貫通	破断せず	22	118	5	249
6	2	50	非貫通	破断せず	24	145	30	222
7	2	75	貫通	破断せず		158	36	266
8	2	100	貫通	破断		179	22	315
9	2	100	貫通	破断		187	25	291
10	4	30	非貫通	破断せず	31	135	4	225
11	4	50	非貫通	破断せず	23	138	15	234
12	4	75	貫通	破断せず		174	20	289
13	4	100	貫通	破断せず		191	18	319
14	4	125	貫通	破断せず		202	21	345
15	4	150	貫通	破断		208	21	355



(a)無補強-爆薬 50g (b)2mm-爆薬 50g (c)2mm-爆薬 75g (d)2mm-爆薬 100g (e)4mm-爆薬 100g

図 - 7 試験体の損傷状態

7(c) に示すポリウレア樹脂の塗膜厚さ 2mm 爆薬量 75g の場合、コンクリート板には貫通孔が生じたのに対し、ポリウレア樹脂は破断に至らず、破片の飛散は生じなかった。裏面の膨らみ直径は 266mm で爆薬量の増大に応じて大きくなり、膨らみの高さは 36mm に達した。さらに爆薬量を増加して 100g とすると、図 - 7(d)に示すように、膨らみの最頂部でポリウレア塗膜にき裂が生じて破断した。ここで、塗膜厚さを 4mm に増すと、図 - 7(e)に示すようにポリウレア塗膜の破断は生じず膨らみの直径は 319mm、膨らみの高さは 18mm となった。表 - 3 より、塗膜厚さ 4mm の場合、爆薬量を 125g にしても破断は生じず、スポール直径と高さが増加し、爆薬量 150g で 2mm のときと同様に、ポリウレア塗膜の膨らみの最頂部

でき裂が生じて破断する。このように、ポリウレアの塗膜厚さを増大すると、より大きな爆薬量の爆発に対しても塗膜の破断が生じにくくなる。爆薬量の増大に伴う補強コンクリート板の状態変化について検討すると、図 - 8 より、クレータの直径は爆薬量に対して線形に近い傾向で増大していることがわかる。ただし、クレータ直径はポリウレア樹脂の有無や塗膜厚さにかかわらずほとんど変化しない。図 - 9 より、スポール直径についても爆薬量の増大に伴い大きくなる傾向がある。図 - 10 に示す膨らみ高さは、ポリウレア樹脂の塗膜厚さが大きいほど小さくなることに加え、爆薬量の影響も受ける。ただし、爆薬量の増大に応じて大きくなるわけではなく、爆薬量 100g で塗膜厚さ 2mm の場合は減少、塗膜厚さ 4mm の場

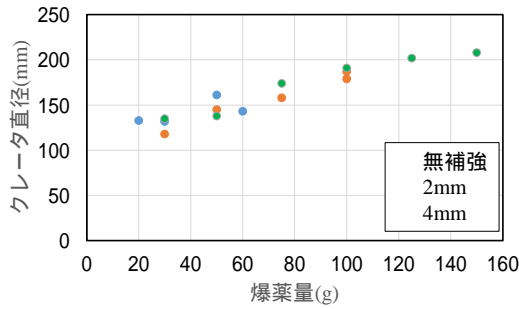


図 - 8 爆薬量とクレータ直径の関係

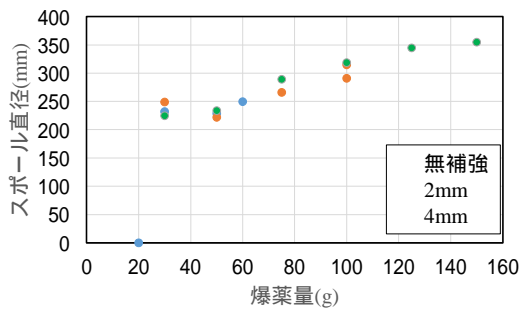


図 - 9 爆薬量とスポール直径の関係

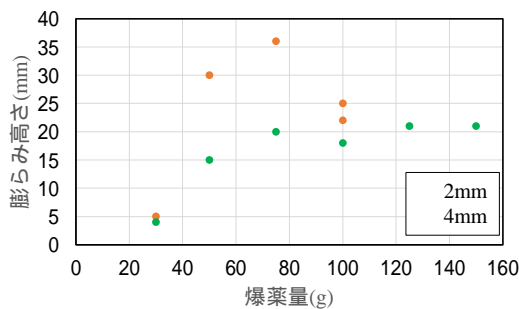


図 - 10 爆薬量と膨らみ高さの関係

合は同程度である。塗膜厚さ 2mm については、爆薬量 75g から 100g の間に膨らみ高さの減少幅は 14mm に達するが、これはポリウレア塗膜が破断されたことにより応力が解放されてひずみが小さくなったためと考えられる。塗膜厚さ 4mm については、爆薬量 75g ~ 125g および塗膜が破断した 150g を含めて膨らみ高さは 20mm 前後を保持した。このことから、接触爆発に対して効果的な補強方法については、今後、ポリウレア樹脂の物性値や塗膜厚を変えた実験を行い、検討する必要がある。

5. 実験結果の検討

5.1 ポリウレア樹脂による補強効果の評価

ここでは、前章で確認したポリウレア樹脂による耐爆性能における裏面補強の効果を、山内⁹⁾らと同様の評価方法で行った。森下¹⁰⁾は、接触爆発を受ける RC 版のスポール限界および貫通限界が以下のように表せること

を明らかにしている。

(a) スポール限界

$$T/W^{1/3} = 3.6 \quad (1)$$

(b) 貫通限界

$$T/W^{1/3} = 2.0 \quad (2)$$

ここに、T はコンクリート板厚(cm)、W は爆薬量(g)である。なお、W は爆薬の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 の爆発エネルギーは TNT の 1.13 倍であるので、本実験では、爆薬量に 1.13 を乗じた値が爆薬量 W となる。また、 $T/W^{1/3}$ を換算コンクリート厚さと呼ぶ。

図 - 11 に、本実験におけるポリウレア樹脂の塗膜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を示す。図中には式(1)および(2)に本実験の条件である $T=8$ (cm) を代入した値も併記した。

図 - 11 より、式(2)の貫通限界未満の爆薬量では、ポリウレア樹脂補強板の場合ではコンクリートの非貫通、無補強板の場合ではスポールであり、コンクリート板が貫通しないという点で実験結果と式(2)が合致している。一方で、式(2)の貫通限界を上回る爆薬量ではいずれの場合でも補強板のコンクリート板部分には貫通孔が生じている。以上より、ポリウレア樹脂の裏面塗布の有無やポリウレア樹脂の塗膜厚さがコンクリート板の損傷に及ぼす影響は小さいといえる。次に、ポリウレア樹脂の損傷について検討する。式(2)で表される RC 版の貫通限界を超えても、ポリウレア樹脂は直ちに破断しない。また、ポリウレア樹脂の塗膜厚が増大すると、ポリウレア樹脂の破断に必要な爆薬量も増大する。このことを定量的に表すことを試みる。ポリウレア樹脂厚さ 2mm では、爆薬量 75g においてコンクリート板には貫通が生じているものの、ポリウレア樹脂は破断せず、破片の飛散は生じていない。仮に、C-4 爆薬 75g に対して裏面にポリウレアを塗布しないコンクリート板がスポールを生じないために必要な板厚は、式(1)より 158mm となる。スポールによるコンクリート片の飛散を発生させないという観点からは、本研究に使用したポリウレア樹脂 2mm の塗布は、少なくとも $158 - 80 = 78$ mm のコンクリート板厚と同等の効果がある。ポリウレア樹脂 4mm の塗布では、C-4 爆薬 125g でもスポールが生じなかったため、同様に計算すると少なくとも 107mm のコンクリート板厚と同等の効果がある。

5.2 既往の実験結果との比較

ここでは、同じ接触爆発実験を行った山内⁹⁾の実験結果との比較を行う。山内⁹⁾らは、裏面塗布の材料として本実験と同様にポリウレア樹脂を使用している。このポリウレア樹脂の物性は、引張強度 9.9N/mm²、破断伸び率 276%、密度 0.95g/cm³ である。また、実験では厚さ 60mm

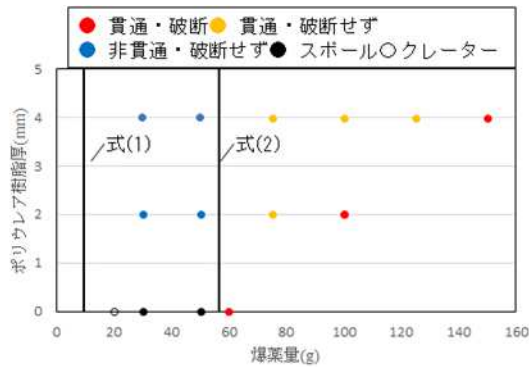


図 - 11 ポリウレア厚さと破壊形状の関係

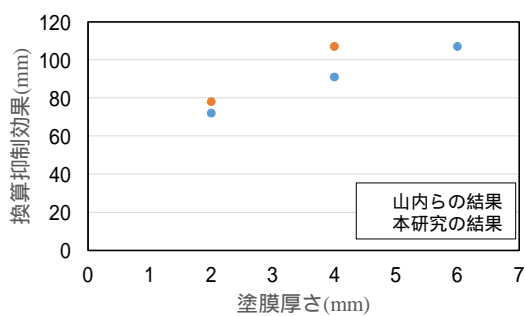


図 - 12 換算補強効果の比較

のコンクリート板に対して 0, 2, 4 および 6mm の厚さで施工し、爆薬量 15 ~ 100g において同様の接触爆発実験を行っている。ポリウレアの塗膜厚さと破壊性状との関係は同等の結果が得られており、試験体の板厚やポリウレアの種類が異なる場合にも、スポール限界や貫通限界の式で表現できると考えられる。また、スポールを発生させない観点でのポリウレアの補強効果として図 - 12 に比較した結果を示す。図 - 12 からポリウレア樹脂の物性値の違いによる、補強効果度合いにやや差異が生じることがわかる。ただし、今回の比較ではデータ数が少なく詳細な検討は難しいため、ポリウレア樹脂の物性値が抑制効果に及ぼす影響についての検討は今後の課題である。

6. まとめ

本研究では、ポリウレア樹脂を裏面塗布したコンクリート板に対して接触爆発を行い、耐爆性能を確認した。本実験条件の範囲で得られた主な結果を以下に示す。

(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、樹脂塗膜の膨らみを伴いながら、破壊片の飛散を抑制する効果が得られた。

(2) ポリウレア樹脂を裏面塗布したコンクリート板がある一定の爆薬量を超える接触爆発を受けた場合、ポリウ

レア樹脂塗膜は、膨らみの最頂部においてき裂が生じて破断する破壊性状を示した。

(3) 接触爆発に対するコンクリート板の裏面剥離限界の実験式を使用して、ポリウレア樹脂が破断しない効果をコンクリートの厚さに換算した。

(4) 材料の引張試験により、ポリウレア樹脂の塗膜厚さを増大させると引張強度と伸び率が減少する傾向にあることが確認された。

謝辞

本研究を実施するにあたり、防衛大学校理工学研究科の森広毅氏、峯好古氏のご協力をいただきました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 爆発・衝撃作用を受ける土木構造物の安全性評価 - 希少事例に備える - , 土木学会, 2017.9
- 2) 爆発作用を受けるコンクリート構造物の安全性評価 - 評価手法と対策技術 - , 防衛施設学会, 2018.9
- 3) 別府万寿博, 大野友則, 大久保一徳, 佐藤和幸: 接触・近接爆発に対する繊維シート補強コンクリート板の耐爆性能, 土木学会論文集 A, Vol.66, No.4, pp.700-716, 2010.12
- 4) 別府万寿博, 河野克哉, 岸良竜, 溝口愛実, 市野宏嘉: 接触爆発を受ける繊維補強 PFC パネルの耐爆性に関する実験的研究, 構造工学論文集 Vol.69A, pp.1176-1186, 2023.3
- 5) 山口信, 森島慎太郎, 張志成, 片山隆: ポリアリレート繊維シートにより裏面補強した鉄筋コンクリート版の接触爆発に対する耐爆性能, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.2, pp.739-734, 2018.3
- 6) 山内稔也, 市野宏嘉, 別府万寿博, 福井秀平: ポリウレア樹脂により裏面補強したコンクリート板に対する接触爆発実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.44, No.2, pp.895-900, 2022.6
- 7) 森下政浩, 田中秀明, 安藤智啓, 萩谷浩之: 接触爆発を受ける鉄筋コンクリート版の損傷に及ぼすコンクリート強度及び鉄筋間隔の影響, コンクリート工学論文集, Vol.15, No.2, pp.89-98, 2004.5
- 8) 新保實, 小沢道秀, 西野広平, 三澤章博: 発泡体の曲げ破断強度の向上に寄与する気泡微細化の効果, 成型加工, Vol.23, No.11, pp.685-690, 2011.5
- 9) 吉田啓悟, 槻館裕紀, 村上明, 宮田寛: 多孔質セラミックスの気孔径寸法と破壊強度, 日本機械学会論文集 Vol.72, No.722, pp.1511-1517, 2006.10
- 10) 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, 2000.3