

剛飛翔体の高速衝突を受けるコンクリート板の耐衝撃補強に関する実験的検討

防衛大学校 学生会員 ○薄井 康二 学生会員 三輪 幸治
正会員 別府 万寿博 正会員 大野 友則

1. 諸言

爆発テロや爆発事故が生じた場合、爆発に伴って生じる金属破片やコンクリート片等が数 100～1000m/s の高速度で飛散するため、周囲の構造物がこれらの飛翔体の衝突を受けて、二次被害が生じることが報告されている¹⁾。コンクリート構造物が剛飛散物（以後、飛翔体という）の高速衝突を受けると、条件の相違によって「表面破壊」、「裏面剥離」、「貫通」の局部破壊が生じる²⁾。建物内部に居住する人命保護の観点から、飛翔体の高速衝突に対する防護設計を行う上では、裏面剥離および貫通は許容できない破壊モードである。

本研究は、コンクリート板の裏面剥離および剥離片の飛散を防止するために、連続繊維シートや高分子材料で裏面を補強したコンクリート板の耐衝撃性能について実験的検討を行ったものである。

2. 実験の概要

実験は、図-1 に示す高圧空気式飛翔体発射装置を用いて、飛翔体をコンクリート板に衝突させた。コンクリート板は、上下2辺を固定して発射管出口から 1m の位置に設置した。写真-1 に飛翔体および固定具を示す。飛翔体は半球型の鋼製で、質量は 50g、直径は 25mm であり、専用の固定具に取り付けて、空気圧により発射させた。コンクリート板の寸法は縦 50cm×横 50cm で、板厚は 4, 6, 8, 10cm の 4 種類、圧縮強度は 38.9N/mm² である。

表-1 に、補強材料の力学的特性値を示す。補強材料は 1)鋼板(厚さ 0.3mm, 0.1mm)、2)連続繊維シートとして 2 方向アラミド繊維(目付量 330g/cm², 650g/cm², 以後、アラミド 330, アラミド 650 という)、2 方向カーボン繊維(目付量 330g/cm², 以後、カーボン 330 という)、3)高分子材料としてポリウレア樹脂を用いた。表-2 に、実験ケースを示す。鋼板および連続繊維シート補強の実験では、全てのケースで衝突速度を 300m/s とし、高分子材料による補強ケースの場合は衝突速度を 200～500m/s に変化させた。本研究では図-3 に示すように、破壊モードの分類をコンクリート板の破壊モードに着目して、「表面破壊」、「裏面剥離」、「板のみ貫通」に分類し、特に、補強材料まで貫通した場合は「完全貫通」と分類した。

3. 鋼板および連続繊維シートによる耐衝撃補強に関する考察

図-4 に、全ての実験における破壊モードの一覧を示す。板厚 4cm, 6cm の場合は補強の有無に関わらずコンクリート板は全て貫通した。ただし、板厚 6cm の場合は、アラミド 330 およびカーボン 330 で補強した場合では、繊維シートによって、剥離片の飛散および飛翔体が完全貫通するのを防止できたので、板のみ貫通と判定した。板厚 10cm の場合は、補強の有無にかかわらず、コンクリート板裏面に損傷は認められず、破壊モードはすべて表面破壊と判定した。

図-5 に、鋼板およびアラミド繊維シートで補強した板厚 8cm

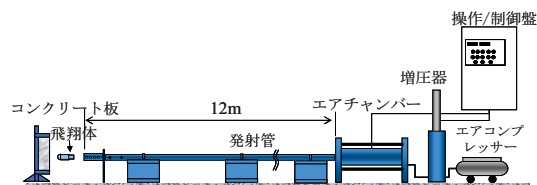


図-1 高圧空気式飛翔体発射装置の概要

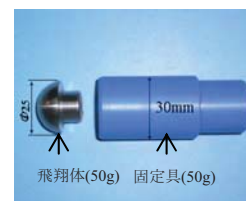


写真-1 剛飛翔体および固定具

表-1 補強材料の力学的特性値

補強材料	目付量 (g/m ²)	厚さ t(mm)	引張強度 (N/mm ²)	縦弾性係数 E(N/mm ²)	引張剛性 Et(kN/mm)	破断伸び (%)
鋼板	—	0.3	400	200000	60	21
	—	1	—	—	200	—
アラミド繊維 (2方向1枚)	330	0.095	2060	118000	11.2	—
	650	0.19	2060	—	22.4	2
	—	0.193	—	—	22.8	—
カーボン繊維 (2方向1枚)	330	0.091	2500	245000	22.3	1.3
ポリウレア樹脂	—	5	30	250	1.25	—
	—	10	—	—	2.5	450

表-2 実験ケース

補強材料	板厚(cm)	衝突速度(m/s)
なし	4	—
	6	—
	8	—
	10	—
鋼板0.3mm	8	—
鋼板1.0mm	8	—
アラミド330 (2方向1枚)	4	300
	6	—
	8	—
	10	—
アラミド650 (2方向1枚)	8	—
	10	—
アラミド330 (2方向2枚)	8	—
	10	—
カーボン330 (2方向1枚)	6	—
	8	—
	10	—
なし	6	200
	8	300
ポリウレア樹脂 5mm	6	200
	—	300
	—	500
ポリウレア樹脂 5mm	8	—
	10	—
(両面補強)	8	300
ポリウレア樹脂 10mm	8	—
	10	—

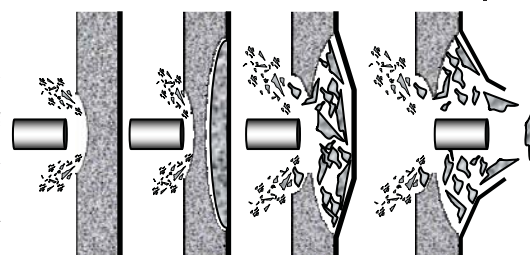


図-3 破壊モードの分類

キーワード：コンクリート板、剛飛翔体、高速衝突、耐衝撃補強

連絡先：〒239-8686 横須賀市走水 1-10-20 防衛大学校建設環境工学科 Tel : 046-841-3810(ex3521) E-mail : s54070@ed.nda.ac.jp

のコンクリート板の破壊状況を示す。補強なしでは裏面剥離が発生していたが、鋼板および繊維シートで補強したコンクリート板は貫通しなかった。コンクリート板の内部の損傷状況をみると、厚さ 0.3mm の鋼板で補強した場合は内部のひび割れが低減し、破壊モードは表面破壊であった。鋼板の厚さが 1.0mm の場合は、さらに板内部の破壊領域が低減した。アラミド 330 を 1 枚用いて補強した場合は、厚さ 0.3mm 鋼板補強の場合と比べて内部の損傷が大きかったが、剥離は形成されていなかった。アラミド 330 を 2 枚用いて補強した場合は、内部のひび割れがアラミド 330 を 1 枚用いて補強した場合に比べて低減されており、剥離していないことがわかる。よって、アラミド繊維シートで補強した板の破壊モードはどちらも表面破壊と判定した。

すなわち、鋼板およびアラミド繊維シートによる補強厚さおよび補強枚数を増加させると、コンクリート板内部の破壊が低減されることがいえる。また、連続繊維シートで剥離片の飛散を防止できることがわかった。

4. 高分子材料による耐衝撃補強に関する考察

図-6 に、ポリウレア樹脂で補強したコンクリート板の破壊状況を示す。板厚 6cm の場合は、無補強コンクリート板に速度 200m/s で飛翔体を衝突させた場合は、破壊モードは裏面剥離であった。裏面を厚さ 5mm のポリウレア樹脂で補強した場合は、コンクリート板に裏面剥離が生じているが、ポリウレア樹脂は破断していないため、剥離片は飛散していない。衝突速度 300m/s の場合ではコンクリート板に貫通孔が生じたが、ポリウレア樹脂は破断せず、剥離片の飛散防止効果がみられる。これは、写真-2 に示すように、衝突後、ポリウレア樹脂が伸張して剥離片の飛散を防止しているためである。ただし衝突速度 500m/s になると、ポリウレア樹脂も貫通して完全貫通となった。板厚 8cm、衝突速度 300m/s の場合は、補強なし、ポリウレア樹脂を厚さ 5mm、10mm、両面に 5mm 補強した場合の破壊モードはすべて裏面剥離で、板内部の破壊の大きさの変化はあまりみられなかった。

5. 結言

本研究の成果を以下に要約する。

- (1) 剛飛翔体の高速衝突を受けるコンクリート板の裏面を鋼板および連続繊維シートで補強することにより、内部のひび割れが生じにくくなり、裏面剥離が抑止される。さらに、鋼板や連続繊維シートの補強枚数や補強厚さを増加させると、コンクリート板内部の損傷低減効果は向上する。また、連続繊維シート補強によってコンクリート板の剥離片の飛散を防止できることがわかった。
- (2) ポリウレア樹脂による補強はコンクリート板の内部のひび割れを低減させる効果はあまり認められないが、ポリウレア樹脂の破断伸びが大きいので、剥離片の飛散を防止する効果があることがわかった。

参考文献

- 1) Department of Defense, U.S. : DoD Ammunition and explosives safety standards, DoD6055.9-STD, 2002.
- 2) Kennedy, R.P. : A review of procedures for the analysis and design of concrete structures to resist missile impact effects, Nuclear Engineering and design, 37, pp.183-203, 1976.

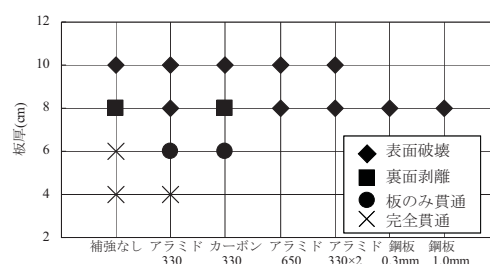


図-4 破壊モードの一覧

板厚 (cm)	補強	衝突速度 (m/s)	破壊状況	
			裏面	断面／破壊モード
8	なし	300		裏面剥離
	鋼板 0.3mm			表面破壊
	鋼板 1.0mm			表面破壊
	アラミド 330			表面破壊
	アラミド 330×2			表面破壊

図-5 コンクリート板の破壊状況
(板厚 8cm, 鋼板・アラミド繊維補強)

板厚 (cm)	補強	衝突速度 (m/s)	破壊状況	
			裏面	断面／破壊モード
6	なし	200		裏面剥離
	ポリウレア樹脂 5mm	200		裏面剥離 (飛散防止)
		300		板のみ貫通 (飛散防止)
		500		完全貫通
8	なし	300		裏面剥離
	ポリウレア樹脂 5mm			裏面剥離 (飛散防止)
	ポリウレア樹脂 5mm (両面)			裏面剥離 (飛散防止)
	ポリウレア樹脂 10mm			裏面剥離 (飛散防止)

図-6 コンクリート板の破壊状況
(ポリウレア樹脂補強)

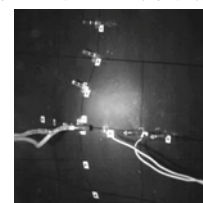


写真-2 ポリウレア樹脂の最大伸張状況
(板厚 6cm, 衝突速度約 300m/s)