

# 論文 繊維シート補強によるコンクリート板の耐爆性能向上に関する 実験的研究

大久保 一徳<sup>\*1</sup>・別府 万寿博<sup>\*2</sup>・大野 友則<sup>\*3</sup>・佐藤 和幸<sup>\*4</sup>

**要旨**：本研究は、コンクリート板の裏面をカーボンあるいはアラミド繊維シートで補強することによる、コンクリート板の耐爆性能の向上効果について実験的に検討したものである。まず、C4 爆薬の接触爆発を受けるコンクリート板の損傷・破壊を確認するために繊維シート補強をしない供試体に対する爆発実験を行い、既存の評価式の適用性について検討した。次に、カーボンあるいはアラミド繊維シートでそれぞれ補強したコンクリート板に対する爆発実験を行った。その結果、繊維シート補強することによりコンクリート板の裏面剥離（スポール）が低減し、コンクリート片の飛散を防止する効果を確認した。

**キーワード**：コンクリート板、繊維シート、C4 爆薬、クレータ、スポール

## 1. はじめに

近年、花火工場等における不測の爆発事故やテロ活動による爆破事例が国内外で多発しており、人命の保護や社会機能の保全のためには、社会的に重要な施設および火薬類や危険物等の貯蔵施設を建設する際に、爆発荷重を考慮する必要がある<sup>1)</sup>。爆発荷重から構造物を防護する設計法を確立するためには、構造物の破壊メカニズムを解明する必要がある。しかしながら、爆発荷重を受ける構造物の破壊挙動に関する研究は、米国・シンガポール・イスラエルなど一部の国では盛んに行われているが、わが国においては実験施設の制約や安全上の問題から限られた研究機関や一部の大学で行われているにすぎない。国内における最近の研究としては、森下らがペントライト爆薬（TNT とペンスリットの混合物）を用いて、コンクリート強度、鉄筋の種類および配筋方法を変化させた爆発実験<sup>2),3)</sup>を行っている。この研究によると、コンクリートの強度、鉄筋の種類および配筋方法は、局部破壊の程度にあまり影響を与えないことが報告されている。したがって、コンクリート板の耐爆性能を向上させるためには、コン

クリートの強度や配筋によらない別の手段を考  
える必要がある。

近年、橋梁等のコンクリート構造物に対する耐震補強用の材料として、カーボンおよびアラミド繊維シートを用いることが注目され実用に供されている。これらの繊維シートは、コンクリート片の剥落防止効果も確認されているため、衝撃荷重等の作用で破壊されたコンクリート片の飛散を防止する効果も期待できる。本研究では、まず、C4 爆薬の接触爆発を受けるコンクリート板の局部破壊を確認するため、無補強コンクリート板に対する接触爆発実験を行い、既存の評価式の適用性を確認した。次に、カーボンおよびアラミド繊維シートで裏面補強したコンクリート板に対する接触爆発実験を行い、これらの繊維シート補強によるコンクリート板の耐爆性能向上（飛散物の防止およびコンクリート板の損傷低減効果）について検討を行った。

## 2. C4 爆薬の接触爆発を受けるコンクリート板の局部破壊

爆発荷重を受けるコンクリート構造物の破壊

\*1 防衛大学校 建設環境工学科 理工学研究科前期課程学生 (正会員)

\*2 防衛大学校 建設環境工学科講師 博(工) (正会員)

\*3 防衛大学校 建設環境工学科教授 工博 (正会員)

\*4 前田工織(株) 東京本社 メンテナンス事業本部

に関する既往の実験では、TNT 爆薬やペンスリット爆薬などが用いられている。田中ら<sup>4)</sup>は、爆薬の種類が異なると爆発エネルギーや爆轟速度も異なるため、TNT 爆薬を基準にして爆薬の質量を換算することでコンクリート構造物の局部破壊を評価できると報告している。本研究では、取り扱いが安全で成形が容易である Composition C-4 (C4) 爆薬を用いた。ここで、TNT 爆薬の爆発熱<sup>5)</sup>は 4,521kJ/kg、C4 爆薬は 5,651kJ/kg であり、C4 爆薬の TNT 爆薬に対する比効力は 1.25 となる。本章では、C4 爆薬による接触爆発荷重を受けるコンクリート板の局部破壊を確認するとともに、これらの局部破壊が既存の評価式により適切に評価できるかについて検討する。

## 2.1 実験の概要

無筋コンクリート板供試体および爆薬の設置状況を図-1 に示す。供試体は、支持幅 50mm の枠状支持台上に載せ（四辺単純支持）、板表面中央に C4 爆薬を設置した。供試体の寸法は、縦 500mm×横 500mm×厚さ 100mm で、実験時のコンクリートの圧縮強度は 25.9N/mm<sup>2</sup> であった。C4 爆薬は、写真-1 に示すように、高さ/径=1 の円柱形に成形し、その上面から 6 号電気雷管を装着して、雷管の添装薬側をコンクリート板に向けて起爆した。実験は、爆薬量 20g および 50g をコンクリート板上に接触させた状態で爆発させた。

## 2.2 実験結果および既存の評価式の適用性

爆発荷重を受けるコンクリート板の局部破壊は、一般に、図-2 に示すように、クレータ（表面破壊）、スポール（裏面剥離）および貫通に分類される。本研究においても、この分類に従って、爆薬量と破壊の関係を調べた。

爆発によるコンクリート板の破壊状況を図-3 に示す。表面に残された爆発痕から、爆発による圧力は板中央に集中して作用していることがわかる。爆薬量 20g では爆発面にクレータおよび裏面中央に小さなひび割れが発生し、50g では表面のクレータと裏面にスポールが生じた。

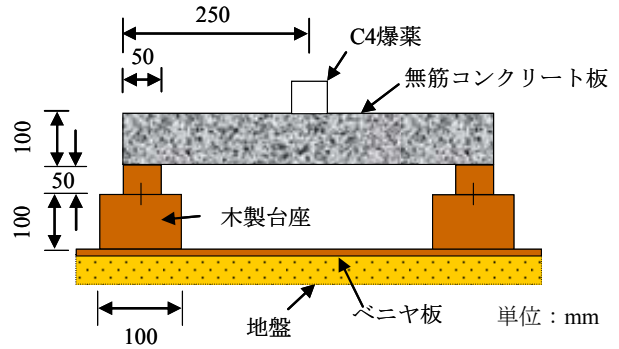


図-1 実験の概要



写真-1 C4 爆薬および 6 号電気雷管



(a) 表面破壊（クレータ）



(b) 表面破壊と裏面剥離（スポール）



(c) 貫通

図-2 局部破壊の種類

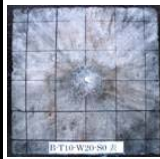
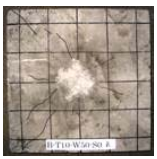
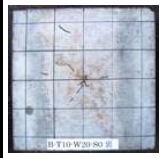

爆薬量	20g	50g
表面		
裏面		
破壊モード	クレータ	クレータ+スポール

図-3 損傷状況

爆発荷重を受けるコンクリート板の局部破壊に対する既存の評価式として、McVay 式<sup>6)</sup>および森下らの式<sup>3)</sup>がある。McVay 式は、近接爆発を受ける鉄筋コンクリート版の損傷予測式であり、森下らの式は、McVay 式を基に接触爆発、クレータ発生限界を補足したものである。接触爆発に対する損傷予測式は、次式で表される。

(スポール限界)

$$\text{接触爆発 } T/W^{1/3} \leq 3.6 \quad (1)$$

(貫通限界)

$$\text{接触爆発 } T/W^{1/3} \leq 2.0 \quad (2)$$

(クレータ発生限界)

$$R/W^{1/3} \leq 3.1 \quad (3)$$

ここに、 $T$ :版厚(cm)、 $R$ :スタンドオフ(cm)、 $W$ :TNT 換算量(g)、 $T/W^{1/3}$ :換算コンクリート厚、 $R/W^{1/3}$ :換算距離、である。

式(1)~(3)は、TNT 爆薬に対する評価式なので、C4 爆薬の質量を TNT 爆薬に換算するため、1.25 倍にして用いている。

実験では、爆薬量 20g の場合、裏面にスポールは発生せず微小なひび割れのみであったが、式(1)によるとスポールが発生するという結果が得られ、実験結果と一致しない。しかし、本実験条件による換算コンクリート厚は  $T/W^{1/3} = 3.4\text{cm}/\text{g}^{1/3}$  であり、スポール限界値  $T/W^{1/3} = 3.6\text{cm}/\text{g}^{1/3}$  に近接しており、コンクリートの裏面にひび割れが確認されていることから、内部にはスポールに近い損傷が生じていると考えられる。また、爆薬量 50g の場合は、換算コンクリート厚と換算距離はそれぞれ  $T/W^{1/3} = 2.5\text{cm}/\text{g}^{1/3}$ 、 $R/W^{1/3} = 0\text{cm}/\text{g}^{1/3}$  となり、破壊モードは実験結果と同様にクレータとスポールとなった。すなわち、C4 爆薬の質量を TNT 換算して用いることにより、式(1)~(3)でコンクリート版の損傷が評価できると言える。

### 3. 繊維シートで裏面補強したコンクリート板に対する接触爆発実験

#### 3.1 実験の概要

コンクリート板供試体および爆薬の設置状況



写真-2 供試体の設置状況

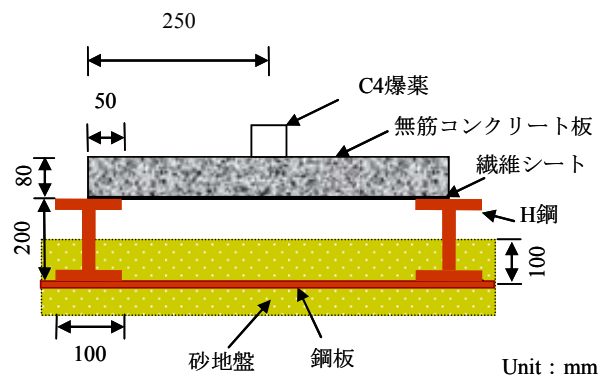


図-4 実験の概要

を写真-2 および図-4 に示す。鋼板の上に H 鋼を設置し、H 鋼の高さ 100mm の位置まで砂を敷き詰めた。その後、供試体を H 鋼上に設置し、支持幅 50mm の二辺単純支持とした。なお、二辺支持にしたのは、繊維の方向性が補強効果に与える影響を明瞭にするためである。ただし、補強をしないコンクリート板の破壊は、局所的な現象なので支持条件の違いによる影響は小さいと考えられる。

#### 3.2 供試体、繊維シートおよび実験ケース

無筋コンクリート板供試体は、図-5 に示すように、縦 500mm×横 500mm×厚さ 80mm で、実験時の圧縮強度は、 $22.3\text{N}/\text{mm}^2$  であった。繊維シートの種類は、カーボンおよびアラミド繊維シートを用いた。その力学特性を、表-1 に示す。繊維シートとコンクリート板の接着面は、繊維シートを接着する前に目荒しした後、プライマーを塗布した。繊維シートの接着は、繊維シートに含浸樹脂を下塗りした後に行った。実験ケースは、表-2 に示すカーボンおよびアラミド繊維の枚数を 1 枚および 2 枚とし、それぞれを 2

表-1 繊維シートの力学特性

繊維シートの種類	方向	目付け量 (g/m <sup>2</sup> )	引張強度 (GPa)	弾性係数 E(GPa)	設計厚さ t(mm)
カーボン繊維シート	2方向	200	2.50	245	0.0556/0.0556(縦/横)
アラミド繊維シート	2方向	650	2.06以上	118	0.193/0.193(縦/横)

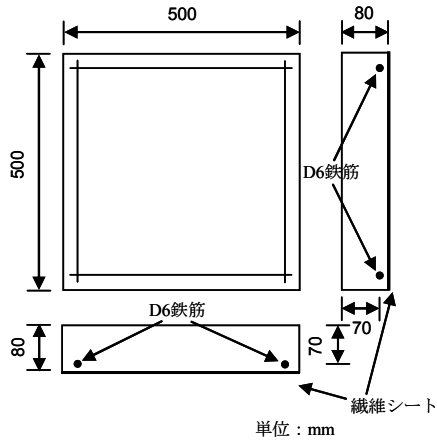


図-5 無筋コンクリート板供試体の寸法

回ずつ行った。爆薬量は、式(2)を基に算出し、貫通限界の破壊モードが得られる 46g に設定した。

#### 4. 実験結果および考察

##### 4.1 損傷の状況

実験で得られた損傷状況を図-6, 7 に示す。ここで、繊維シート補強したコンクリート板裏面における円状の実線は、繊維シートの上からパルハンマーを用いて音の変化により確認した損傷領域を示している。また、切断面は、支持方向に対して直交方向の断面である。ここで、破壊されたコンクリート片がコンクリート板から完全に分離した場合をスポール、分離はしていないがひび割れが発生した場合を斜めひび割れ、コンクリートと繊維シートの接着面におけるコンクリートの剥離損傷を接着面の損傷と定義する。

##### (1) カーボン繊維補強コンクリート板の損傷

図-6 に、カーボン繊維補強コンクリート板の損傷状況を示す。繊維シート補強なしのケース（実験番号 1, 2）では、クレータとスポールおよび貫通の結果が得られた。繊維シート補強 1

表-2 実験ケース

実験	実験番号	繊維の種類	枚数	設計厚さ (mm)	引張剛性 E・t(kN/mm)
実験 I	1	カーボン繊維シート	1	0.0556/0.0556	13.6/13.6
	2				
	3				
	4				
	5				
	6				
実験 II	7	アラミド繊維シート	1	0.193/0.193	22.8/22.8
	8				
	9				
	10				

枚のケース（実験番号 3, 4）では、クレータとスポールの他に、斜めひび割れおよび約 35cm の接着面の損傷が生じた。また、スポールの程度は、繊維シート補強なしのケースとほとんど変わらないことがわかる。しかし、繊維シート補強の枚数を 2 枚（実験番号 5, 6）にすると、スポールは発生せず、コンクリート板内部に斜めひび割れが発生し、約 25cm の接着面の損傷が生じた。以上より、カーボン繊維シートで補強することにより、内部の損傷を完全に防ぐことはできないが、スポール損傷は低減され、裏面におけるコンクリート片の飛散を防止することができた。

##### (2) アラミド繊維補強コンクリート板の損傷

図-7 に、アラミド繊維補強コンクリート板の損傷状況を示す。繊維シート補強 1 枚のケース（実験番号 7, 8）では、クレータとともに直径約 10cm の接着面の損傷が生じていたが、コンクリート板内部のひび割れなどは確認されなかった。繊維シート補強 2 枚のケース（実験番号 9, 10）では、1 ケースは微小なクレータと接着面の損傷があり、他方は、接着面には全く損傷はなかった。以上より、アラミド繊維シートで裏面

実験番号	枚数	損傷状況			破壊モード
		表面	裏面	断面	
1	なし				クレータ+スポール
2	なし				貫通
3	1枚				クレータ+スポール+斜めひび割れ+接着面の損傷
4	1枚				クレータ+スポール+斜めひび割れ+接着面の損傷
5	2枚				クレータ+斜めひび割れ+接着面の損傷
6	2枚				クレータ+斜めひび割れ+接着面の損傷

図-6 カーボン繊維シートで補強したコンクリート板の損傷状況

実験番号	枚数	損傷状況			破壊モード
		表面	裏面	断面	
7	1枚				クレータ+接着面の損傷
8	1枚				クレータ+接着面の損傷
9	2枚				クレータ
10	2枚				クレータ+接着面の損傷

図-7 アラミド繊維シートで補強したコンクリート板の損傷状況



を補強した全てのケースにおいて、スポールの発生が抑えられ、かつ、裏面におけるコンクリート片の飛散も防止されていた。すなわち、アラミド繊維シートでコンクリート板を補強することにより、コンクリート板の耐爆性能を飛躍的に向上することができた。

#### 4.2 クレータの直径および深さ

図-8に、全ケースのクレータの直径および深さを示す。ここで、クレータの直径および深さの値は、2ケースの平均値を示している。繊維シート補強を行ったコンクリート板では、全てのケースにおいて、繊維シート補強なしのコンクリート板よりもクレータが小さいことがわかる。また、繊維シートの枚数を増加させると、クレータの直径、深さも小さくなっていることもわかる。カーボン繊維シート2枚の場合は、繊維シート補強なしのコンクリート板に対して、直径が40%、深さが15%低減した。また、アラミド繊維シート2枚で補強を行った場合は、繊維シート補強なしのコンクリート板に対して、直径が60%、深さが78%低減したことがわかる。この理由は、アラミド繊維シートはカーボン繊維シートに比べて目付け量が3.25倍、引張剛性が1.68倍大きいため、局部破壊を大幅に低減させたものと考えられる。また、図-6、7の断面の損傷と比較すると、コンクリート板裏面の損傷は、クレータが小さい程低減するという傾向が認められる。

#### 5. 結言

- (1) C4爆薬の質量をTNT換算することにより、森下らの式を用いて接触爆発荷重を受けるコンクリート板の局部破壊の程度を評価できた。
- (2) カーボン繊維シートで補強した場合は、スポールを低減させたが、コンクリート板内部の損傷を完全に抑制することはできなかった。しかしながら、裏面におけるコンクリート片の飛散は防止できた。
- (3) アラミド繊維補強シートで補強した場合は、スポールを完全に抑制するとともに、裏面に

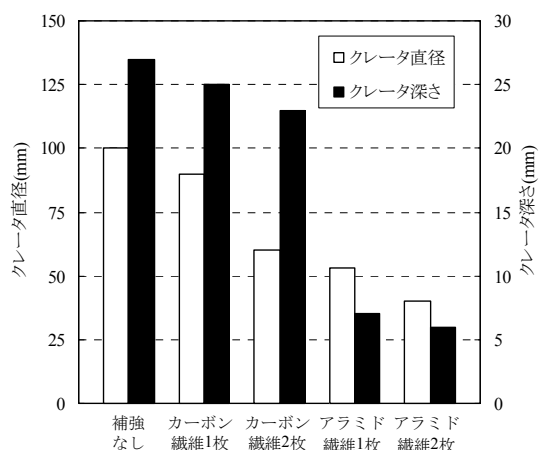


図-8 クレータの直径および深さ

におけるコンクリート片の飛散も防止できた。

- (4) 繊維シートの枚数を増加させるとともにクレータの直径および深さは小さくなることがわかった。また、コンクリート板裏面の損傷は、クレータが小さい程低減するという傾向が認められた。

#### 参考文献

- 1) テロにも負けないインフラ施設, 日経コンストラクション, pp.38-61, 2002.2.8
- 2) 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板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
- 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.1785-1796, 2000.3
- 4) 田中秀明, 森下政浩, 伊藤孝, 山口弘: 爆発を受ける鉄筋コンクリート版の損傷に及ぼす爆発位置の影響, 土木学会論文集, No.675/I-55, pp.297-312, 2001.4
- 5) 社団法人 火薬学会: エネルギー物質ハンドブック, pp.165-170, 1993.3
- 6) M. K. McVay: Spall Damage of Concrete Structures, Technical Report SL88-22, U.S. Army Corps of Engineers Waterways Experimental Station, June 1988