

論文 飛来物の衝突に対する鉄筋コンクリート構造物の耐衝撃補強工法

大沼博志*¹、伊藤千浩*²、白井孝治*³

要旨：鉄筋コンクリート構造物に高速度の飛来物が衝突するとき、裏面剥離および貫通の局部損傷が生じることが想定される。これらの局部損傷を防止あるいは低減する工法として、鋼繊維の混合、コンクリートの高強度化、飛来物の剛性を考慮すること、せん断補強鉄筋の配筋、および鋼ライナーの配置について検討・評価した。その結果、いずれの工法も鉄筋コンクリート構造物の裏面剥離や貫通を防止する効果のあることが明らかにされた。とくに、鋼繊維の混合、飛来物の剛性を考慮すること、および鋼ライナーの配置は裏面剥離に対する効果の顕著なことが示された。

キーワード：補強工法、局部損傷、鋼繊維、飛来物剛性、せん断補強鉄筋、鋼ライナー

1. はじめに

鉄筋コンクリートスラブに飛来物が衝突する場合の耐衝撃設計では、裏面剥離あるいは貫通の局部損傷を防止すること、および耐衝撃性を向上させる補強工法が重要となる。前者については、局部損傷に関する評価式をすでに提案した¹⁾。本論文では、後者の補強工法、すなわち鋼繊維の混合、コンクリートの圧縮強度を高くすること、飛来物の剛性を考慮すること、せん断補強鉄筋の配置、およびスラブ前面あるいは裏面の鋼ライナーの配置について、その補強効果を検討したものである。

2. 実験の概要

2.1 中速度衝撃実験

中速度衝撃実験装置は圧搾窒素ガスの圧力を利用して剛な模擬飛来物を所定の速度でスラブ試験体に衝突させる。模擬飛来物の衝突速度はガス圧力によって制御し、光電式速度計によって測定した。スラブ試験体は鋼製の支持台上に水平に設置され、上面に置かれた幅 15cm、厚さ 12mm の鋼板と支持台を 20 本のボルトで締

め付けることによって四辺固定とした。

スラブ試験体は一辺が 1.5m の正方形で、その厚さは 20cm である。鉄筋には SD345 を使い、餅網状に配筋した。鉄筋比、鉄筋径および鉄筋間隔はそれぞれ片側 0.5%、13mm および 65mm とした。鋼繊維は、寸法 $\phi 0.6 \times 60\text{mm}$ のものを 1m^3 当たり 78.5kg (混入率 1%) 混合した。鋼ライナーには、厚さ 2.3mm の SS400 鋼板を使用した。また、鋼ライナーとコンクリートを一体化するために、直径 6mm、高さ 3cm のスタッドを 20cm 間隔に配置した。

中速度衝撃実験の模擬飛来物は、鋼製中実円柱で剛体 (剛飛来物) とみなすことができる。その直径および質量は 0.098m および 70kg と一定であり、先端形状は平坦とした。

2.2 高速度衝撃実験

高速度衝撃実験装置は、ランチャー、試験体支持台、安全装置から構成されている。模擬飛来物はその内部に充填された火薬の推進力により V 字型の鋼製 (SS400) ランチャー上を加速しながら進み、所定の速度で支持台に取り付けられた試験体の中央に衝突する。また、試験体

* 1 北海道大学教授 大学院工学研究科社会基盤工学専攻 工博 (正会員)

* 2 (財) 電力中央研究所我孫子研究所上席研究員 工博 (正会員)

* 3 (財) 電力中央研究所我孫子研究所主任研究員 工博

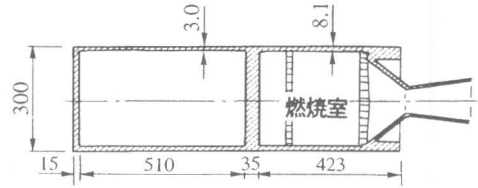
は縦置きされ、支持台に4点支持されている。

試験体は、一辺が 2.5m の正方形の鉄筋コンクリートスラブであり、その厚さは 30cm から 60cm とした。鉄筋には SD295B を使い、鉄筋比は対象とした構造物の代表値である 0.4% で餅網状配筋とした。スラブ厚さが最小と最大である 30cm および 60cm の鉄筋径と鉄筋間隔は、それぞれ D13mm が 105mm 間隔、および D19mm が 120mm 間隔である。せん断補強鉄筋はスラブ厚さ方向に D16mm を 22cm 間隔に配置し、その鉄筋比は 0.4% である。鋼ライナーには、厚さ 1mm の既製品のデッキプレートを使用した。鋼ライナーに設けたスタッド(直径 9mm、高さ 10cm)によりコンクリートと鋼ライナーは合成構造とされている。スタッドの配置は、2列、4列および6列の3種とした。

高速度衝撃実験には、模擬飛来物として中空で剛性の低い柔飛来物と剛飛来物を用いた。柔飛来物は、図-1に示すように、前後二つの鋼製(SC450)中空円筒から構成されており、後部円筒室は火薬の燃焼室として利用した。前部と後部円筒室の厚さはそれぞれ 3mm と 8.1mm であり、静的な圧縮試験からその座屈荷重はそれぞれ 0.95MN と 4.02MN であった。剛飛来物は、柔飛来物の前部円筒室を取り除き、衝突面の厚さを 130~138mm としたものである。模擬飛来物の直径および質量はそれぞれ 0.30m および 100kg、また先端形状は平坦とした。

2.3 実験の条件

表-1および表-2に示すように、中速度衝撃実験は模擬飛来物の衝突速度、鋼繊維の有無お



(単位:mm)

図-1 模擬柔飛来物

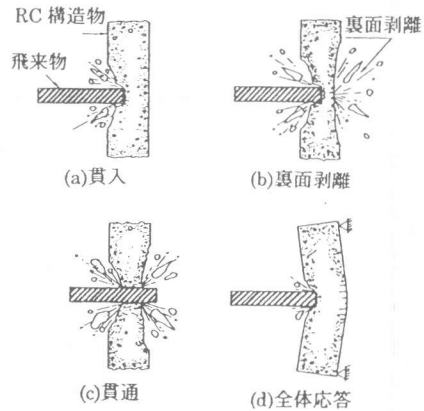


図-2 RCスラブの破壊形態

表-1 中速度衝撃実験の条件

	鋼繊維の有無	鋼ライナーの有無	f_c	試験体数
鉄筋のみ			30.8	8
鉄筋と鋼繊維	有		25.3	5
鉄筋と鋼ライナー		有	28.3	4

f_c : コンクリートの圧縮強度 (N/mm²)

表-2 高速度衝撃実験の条件

	模擬飛来物		鉄筋コンクリートスラブ				
	剛性	速度 (m/sec)	厚さ (cm)	せん断筋	鋼ライナー	f_c	試験体数
Series a	剛	105~248	45,55,60			29.5	6
b	剛	99~247	35~60			42.1	7
c	柔	100~251	30~60			33.7	8
d	柔	137~250	45	有		34.2	4
e	柔	210~217	35,45		有	32.9	4

f_c : コンクリートの圧縮強度 (N/mm²)

よび鋼ライナーの有無を、また高速度衝撃実験は模擬飛来物の剛性と衝突速度、スラブ厚さ、コンクリートの圧縮強度、せん断補強鉄筋の有無および鋼ライナーの有無を実験要因とした。

3. 局部損傷の評価式

3. 1 鉄筋コンクリートスラブの破壊形態

飛来物が鉄筋コンクリート構造物に衝突する時の破壊形態は、局部損傷と全体破壊に分類される。本論文は前者を対象とし、飛来物が高速度で衝突したとき、衝撃エネルギーの大部分が構造物によって局部的に吸収されるために損傷の範囲が衝突部付近に集中する。

図-2に示すように、衝突速度が比較的遅い場合には、局部損傷は飛来物が貫入したことによって衝突面ではコンクリートの表面飛散、裏面では曲げあるいはせん断ひび割れが発生する。飛来物の衝突速度が速くなると貫入は深くなり裏面剥離が発生する。さらに衝突速度が速くなると飛来物の貫通が起こる。

3. 2 裏面剥離限界厚さの評価式

裏面剥離に対する限界厚さ t_s は基本的にはChang式²⁾を適用した。この式は、鉄筋コンクリートスラブに飛来物が衝突したとき、スラブ裏面に圧縮曲げ応力が生じるような限界の円周において、最大曲げモーメントが生じてスラブは曲げ降伏するものと仮定し、この変形によるエネルギーと飛来物の運動エネルギーの釣合いから導かれたものである。

曲げによって吸収される運動エネルギーが限界の円周に沿ったひずみエネルギー容量を越えるとき、スラブには裏面剥離が生じるものとする。したがって、裏面剥離限界厚さは、運動エネルギーがひずみエネルギー容量に等しいことによって誘導することができる。

$$t_s = RF_s \times \alpha_s \times \left\{ \frac{V_0}{V} \right\}^{0.13} \frac{(MV^2)^{0.4}}{d^{0.2} f_c^{0.4}} \quad (1)$$

ここで、 RF_s ：柔飛来物に対する低減率（剛飛来物では1.0）、 V_0 ：基準速度（60.96m/sec）、

V ：衝突速度（m/sec）、 M と d ：飛来物の質量（kg）と直径（m）、 f_c ：コンクリートの圧縮強度（N/mm²）である。既往の研究³⁾から、係数 α_s は、 6.96×10^{-3} の値が得られている。

3. 3 貫通限界厚さの評価式

貫通限界厚さ t_p は、Changによって基本式が誘導されている。飛来物が鉄筋コンクリートスラブに衝突した際に飛来物の貫入に対するスラブの抵抗を考えて、貫入深さがゼロのとき最大で貫通限界厚さに等しいときゼロとなるような放物線の抵抗関数を仮定する。このような仮定の基に、ある飛来物の衝突に対してスラブが丁度貫通するのに必要なエネルギーと飛来物の運動エネルギーの釣合いから次式が得られる。

$$t_p = RF_p \times \alpha_p \times \left\{ \frac{V_0}{V} \right\}^{0.25} \left\{ \frac{MV^2}{d \cdot f_c} \right\}^{1/2} \quad (2)$$

ここで、 RF_p は柔飛来物に対する低減率であり、剛飛来物では1.0とする。係数 α_p は、裏面剥離と同一の既往の研究から、 8.96×10^{-4} の値が得られている。式（1）と式（2）は、以後CRIEPI式と呼ぶこととする。

4. 実験結果とその考察

4. 1 鋼繊維の混入による補強効果

鋼繊維を混合した鉄筋コンクリートスラブと混合しないものの局部損傷と衝突速度の関係を図-3に示す。鋼繊維によって補強されたスラブは円周方向および半径方向のひびわれが発生するものの裏面剥離は起こらなかった。したが

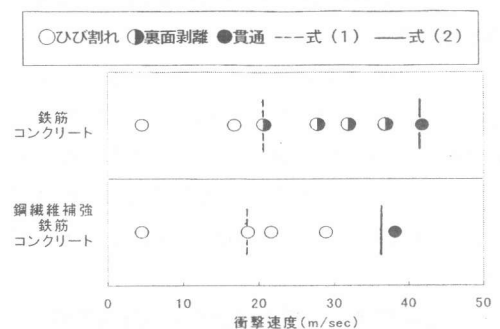


図-3 鋼繊維補強スラブの破壊形態

って、鋼繊維は裏面剥離を防止する上で著しく有効であり、構造物そのものだけではなく、中に設置された機器などの安全性を高めるものと考えられる。

4.2 コンクリートの高強度化による補強効果

コンクリートの圧縮強度が異なる場合の剛飛来物に対する裏面剥離および貫通限界厚さと衝突速度の関係を図-4および図-5に示す。普通および高強度コンクリートの圧縮強度はそれぞれ 29.5N/mm^2 および 42.1N/mm^2 であった。これらの図から、コンクリートの圧縮強度が異なる場合にも CRIEPI 式は安全側の評価を与えることが示された。

コンクリートの圧縮強度が高くなると、裏面剥離と貫通限界厚さは減少する。評価式から明らかのように、裏面剥離と貫通限界厚さは圧縮強度のそれぞれ 0.4 乗および 0.5 乗に反比例する。したがって、いま飛来物の衝突速度、質量および直径が 200m/sec , 100kg および 0.3m のとき、圧縮強度を 30N/mm^2 から 40N/mm^2 に高めると、裏面剥離および貫通を防止するために必要なスラブ厚さはそれぞれ 11% および 13% 減少させることができる。

4.3 飛来物の剛性を考慮する効果

飛来物の剛性が小さいとその運動エネルギーが自身の変形によって吸収されるために、鉄筋コンクリート構造物への衝撃作用は減少する。一例として、2.2節で述べた中空円筒形の柔飛来物の場合について、各限界厚さに及ぼす飛来物の剛性の影響を検討した。

この柔飛来物に対する裏面剥離および貫通限界厚さと衝突速度の関係を図-6に示す。この図から、柔飛来物の各限界厚さは剛飛来物よりも減少することが明瞭に示された。さらに、CRIEPI 式を用いるとき、裏面剥離限界厚さの低減率 (RF_s) は 0.7 が、また貫通限界厚さの低減率 (RF_p) は 0.9 が適切な値であると考えられる。

4.4 せん断補強鉄筋の配置による補強効果

各限界厚さの評価式とせん断補強鉄筋を配置

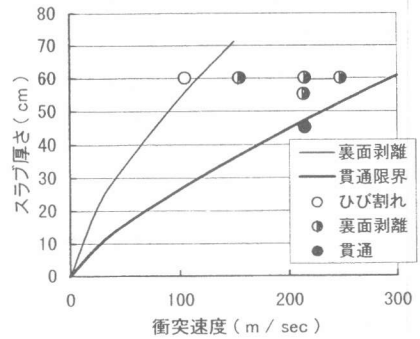


図-4 普通コンクリートの局部損傷

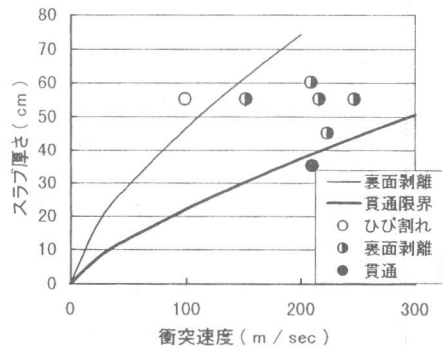


図-5 高強度コンクリートの局部損傷

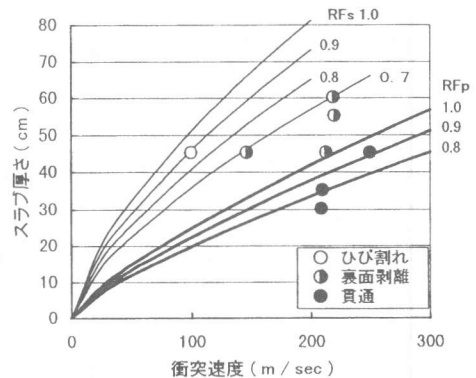


図-6 柔飛来物に対する局部損傷と低減率

したものの実験結果を図-7に示す。せん断補強鉄筋を配置したスラブの破壊形態はすべて裏面剥離であった。衝突速度が $137\sim 223\text{m/sec}$ の場合にも裏面剥離が生じて、せん断補強鉄筋を配置しないものと同じ破壊形態であるが、配置した方が裏面剥離の面積が小さくなった。

一方、衝突速度が 250m/sec の場合、貫通限界厚さの評価式 (2) では貫通なのに対して、

実験結果は裏面剥離に留まっており、明らかに補強効果のあることが明らかにされた。

4.5 鋼製ライナーの配置による補強効果

中速度衝撃実験の貫入深さと衝突速度の関係を図-8に示す。鋼ライナーを衝突面に配置した場合（HLI-1,2、衝突速度：20.73 と 39.84m/sec）、鋼ライナーが飛来物の運動エネルギーの一部を吸収するために貫入深さが減少することが示された。鋼ライナーを配置していない（鉄筋のみ）の試験体（HRE）との比較から、鋼ライナーの効果を貫入深さの減少量で評価すると、HLI-1 と HLI-2 がそれぞれ 1.41cm と 4.69cm であり、これらの値は鋼ライナー厚さの 6.1 倍と 20.4 倍に相当する。

鋼ライナーを裏面に配置した試験体（HLI-3,4、衝突速度：20.73 と 39.60m/sec）は両方も鋼ライナーが膨らんでいるものの裏面剥離は起こしていない。これに対して、鋼ライナーのないもの（HRE）は衝突速度が 20.79m/sec の時、一部に裏面剥離を生じた。また、スラブ厚さが 20cm の場合、式（1）から算定される裏面剥離の限界速度は 20.68m/sec である。これらの結果、約 2 倍の衝突速度においても裏面剥離を防止できることから、鋼ライナーの裏面配置は著しく有効であることが明らかにされた。

高速衝撃実験の各試験体裏面の状況を写真-1から写真-6に、また各評価式と実験結果の関係を図-9に示す。スラブ厚さ 45cm の試験体において、鋼ライナーを取付けていない試験体（SRC-2）は裏面が広い面積にわたって剥離を生じ、コンクリート塊が多数飛散した（写真-1）。一方、鋼ライナーを配置した場合（写真-2から写真-4）には、スタッドの配置が少なくなると飛来物の貫入深さや鋼ライナーの膨らみ変形が大きくなるものの、スタッドの配置数量にかかわらず裏面剥離は生じなかった。したがって、鋼ライナーの配置は、裏面剥離による剥離物の飛散を防止する上で大きな効果のあることが明らかにされた。衝突速度を平均 214m/sec とすると、式（1）から裏面剥離限界厚さは

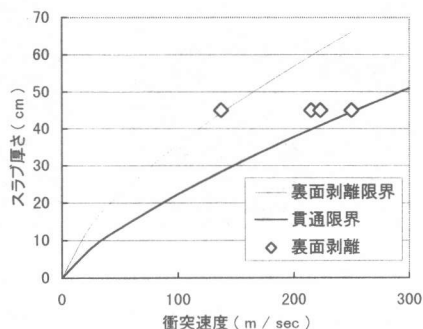


図-7 せん断補強鉄筋の補強効果

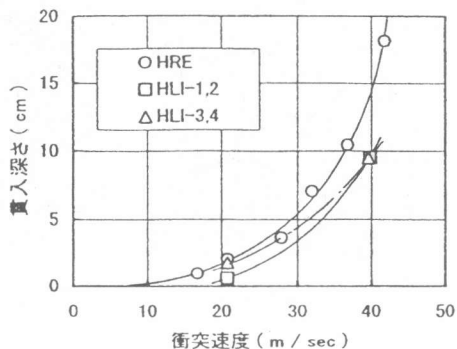


図-8 鋼ライナーの補強効果（中速度）

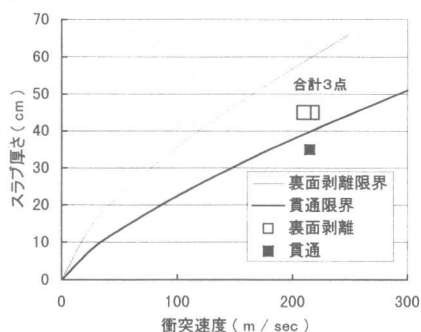


図-9 鋼ライナーの補強効果（高速度）

60.6cm となる。実験では、鋼ライナーの配置によって 45cm の試験体まで裏面剥離を防止できたことから、少なくとも 1.33 倍のスラブ厚さと同程度の防止効果があることが示された。

スラブ厚さ 35cm の試験体において、鋼ライナーを配置していない試験体（SRC-1）は完全に貫通した（写真-5）のに対して、鋼ライナーを配置したものは鋼ライナーが大きく変形して破断したものの模擬飛来物は試験体の内部に残留

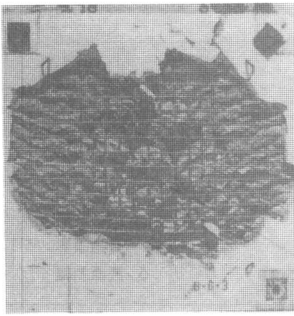


写真-1 裏面状況 (SRC-2)

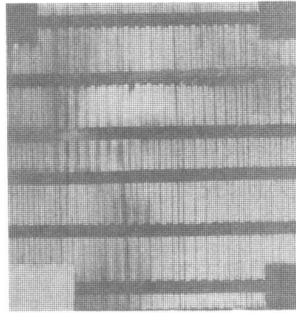


写真-2 裏面状況 (SLI-2)

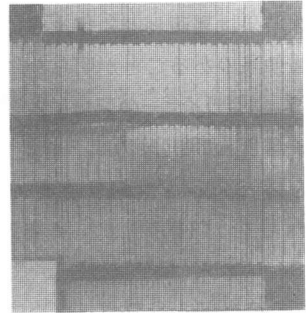


写真-3 裏面状況 (SLI-3)

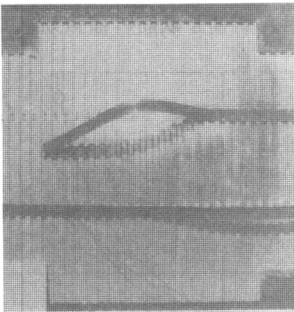


写真-4 裏面状況 (SLI-4)



写真-5 裏面状況 (SRC-1)

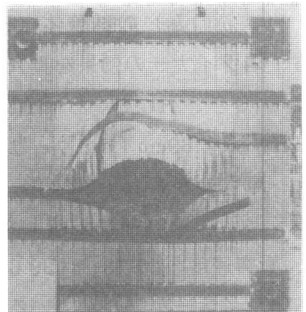


写真-6 裏面状況 (SLI-1)

しており、ほとんど貫通限界に近い破壊形態であった(写真-6)。両者の比較から、貫通の防止に対しても鋼ライナーは効果のあることが示された。式(2)から、衝突速度を212.5m/secとすると貫通限界厚さ39.4cmとなる。35cmの試験体がほぼ貫通限界であるので、1.12倍のスラブ厚さと同等の効果があると考えられる。

5. まとめ

飛来物の衝突に対する鉄筋コンクリート構造物の耐衝撃補強工法として、鋼繊維の混合、コンクリートの高強度化、飛来物の剛性、せん断補強鉄筋、鋼ライナーの配置による効果について検討した。いずれの工法も、裏面剥離ならびに貫通を防止する上で効果のあることが明らかにされた。とくに、鋼繊維の混合、柔飛来物の場合には飛来物の剛性を考慮すること、および鋼ライナーの裏面配置は、裏面剥離に対する防止効果が著しく大きいことが示された。

参考文献

- 1)大沼博志、伊藤千浩、白井孝治：剛・柔飛来物の衝突に対する鉄筋コンクリート構造物の局部損傷評価、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.20、No.3、pp.1063-1068、1998.7
- 2)Chang,W.S.：Impact of Solid Missiles on Concrete Barriers、J. of the ST Division of ASCE、Vol.106、No.ST2、pp.257-271、Feb. 1981
- 3)伊藤千浩、大沼博志、白井孝治：衝突に対するコンクリート構造物の耐衝撃設計手法、電中研総合報告 No.U24、1991.7
- 4)伊藤千浩、大沼博志、山本宗一、能町純雄：鋼繊維補強コンクリート床版の衝撃応答特性、コンクリート工学年次講演会論文集、Vol.8、pp.761-764、1986.6
- 5)大沼博志、伊藤千浩、白井孝治：鋼ライナーによる鉄筋コンクリート構造物の耐衝撃補強効果、土木学会第4回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集、pp.145-148、1998.6