

(28) 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

EFFECTS OF STEEL LINER ON LOCAL DAMAGE OF REINFORCED CONCRETE
STRUCTURES UNDER IMPACT LOADING大沼博志^{*}、伊藤千浩^{**}、白井孝治^{**}

Hiroshi OHNUMA, Chihiro ITO, Koji SHIRAI

^{*}工博 北海道大学教授 大学院工学研究科 (〒060-8628 北海道札幌市北区北13条西8丁目)^{**}工博 (財) 電力中央研究所 主任研究員 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646)

キーワード: 鋼ライナー、裏面剥離、貫通、補強効果

(steel liner, scabbing, perforation, reinforcing effect)

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物に関する衝撃問題には、原子力施設への飛来物の衝突、道路や鉄道のロックシェッドへの落石、橋脚や電柱への車両の衝突、海洋構造物への船舶の衝突など種々のものがある¹⁾。

鉄筋コンクリートスラブに飛来物が衝突する場合の補強工法にはいくつかのものがあるが、このうち、プレストレスの導入、鋼繊維の混合、コンクリートの強度を高くすることおよび飛来物の剛性を考慮することに関しては既に報告した^{2), 3), 4)}。

本論文では、鉄筋コンクリートスラブの前面あるいは裏面を鋼製ライナーの配置によって補強する場合の、裏面剥離および貫通の局部損傷に対する補強効果について検討した。

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ことができる。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SD365Bを用い、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0.5%、16mmおよび65mmとした。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。コンクリートの圧縮強度は、試験時において鋼ライナーのあるものが30.8N/mm²、ないものが28.3N/mm²であった。

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 高速衝撃実験

高速衝撃実験装置は、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。模擬飛来物の衝突速度は、充填された火薬の量とランチャー上の走行距離によって調整し、想定した速度の数パーセントの範囲であった。試験体の衝突面付近に2点の標的を設置して標的間の距離と模擬飛来物が標的を通過する時間から衝突速度を

求めた。また、試験体は縦置きされ、支持台と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、記号のSLIは鋼ライナー有り、SRCは無しを示す。その厚さは35cmおよび45cmの2種類である。鉄筋にはSD365Bを用い、鉄筋比は0.4%で餅網状配筋とした。スラブ厚さが35cmおよび45cmの鉄筋径と鉄筋間隔は、それぞれD13mmが90mm間隔、およびD16mmが110mm間隔である。鋼ライナーには、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。スタッドの量は3種類あり、表-2のSLI-1と2は同一量で量が多く、SLI-3、SLI-4の順に少なくなる。コンクリートの平均圧縮強度は32.9N/mm²であった。

高速度衝撃実験には、剛性の低い模擬飛来物（柔飛来物）を用いた。この模擬飛来物は、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。模擬飛来物の直径、質量および衝突速度はそれぞれ0.30m、100kgおよび約215m/sec、また先端形状は平坦とした。

2.3 実験の要因

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、鋼ライナーの有無および衝突面を、また高速度衝撃実験はスラブ試験体の厚さ、鋼ライナーの有無およびスタッド量をパラメータとしている。

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。本論文の対象は前者であり、局部損傷は飛来物が高速度で衝突した時に発生し、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-1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

表-1 中速度衝撃実験の結果

	衝突速度 (m/sec)	貫入深さ (cm)	破壊形態	衝突面
HRE-1	16.89	0.9	ひび割れ	C
2	20.79	2.0	裏面剥離	C
3	27.89	3.6	裏面剥離	C
4	32.00	7.0	裏面剥離	C
5	36.83	10.4	裏面剥離	C
6	41.84	18.1	貫通	C
HLI-1	20.73	0.6	ひび割れ	L
2	39.84	9.5	裏面剥離	L
3	20.73	1.8	膨らみ'	C
4	39.60	9.5	膨らみ'	C

*: ライナー, C: コンクリート面, L: ライナー面

表-2 高速度衝撃実験の結果

	スラブ厚 (cm)	衝突速度 (m/sec)	貫入深さ (cm)	破壊形態
SRC-1	35	210	—	貫通
2	45	213	15.0	裏面剥離
SLI-1	35	215	—	ほぼ貫通''
2	45 ¹⁾	216	13.0	膨らみ
3	45 ²⁾	217	13.0	膨らみ
4	45 ³⁾	210	14.4	膨らみ

1): スタッド量が大, 2): 中, 3): 小

** : ライナー破断, 模擬飛来物残留

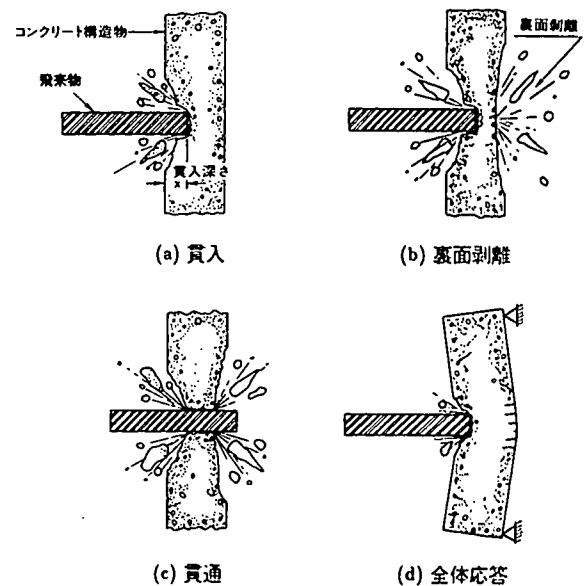


図-1 スラブの破壊形態

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_c は基本的にはChang式⁵⁾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とすることによって次式のように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、 V_0 : 基準速度 (60.96m/sec) , V : 衝突速度 (m/sec) , M と d はそれぞれ飛来物の質量 (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⁴⁾ から、この実験に用いた柔飛来物に対する低減率 RF_s および係数 α_s は、0.7 および 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。すなわち、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。

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

柔飛来物に対する低減率 RF_p および係数 α_p は、裏面剥離と同一の既往の研究から、0.9 および 8.96×10^{-4} の値が得られている。

4. 実験結果とその考察

中速度実験の結果を表-1に、また貫入深さと衝突速度の関係を図-2に示す。鋼ライナーを衝突面とする場合 (HLI-1,2)、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

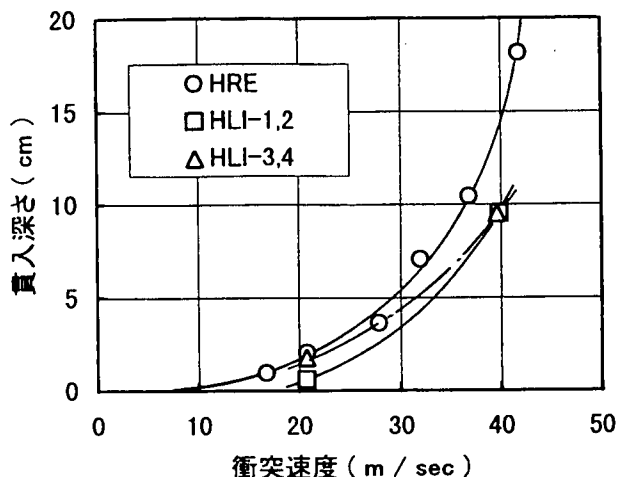


図-2 貫入深さと衝突速度の関係

い試験体(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。

鋼ライナーを裏面とする試験体 (HLI-3 と 4、衝突速度 : 20.73 と 39.60m/sec) は両方と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、スラブ厚さを 20cm とすると、(1)式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。

高速衝撃実験の結果を表-2に、また各試験体の裏面の状況を写真-1から写真-6に示す。スラブ厚さ 45cm の試験において、鋼ライナーを取付けない試験体(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、スタッドの量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、(1)式から裏面剥離限界厚さは 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等の防止効果があることが示された。

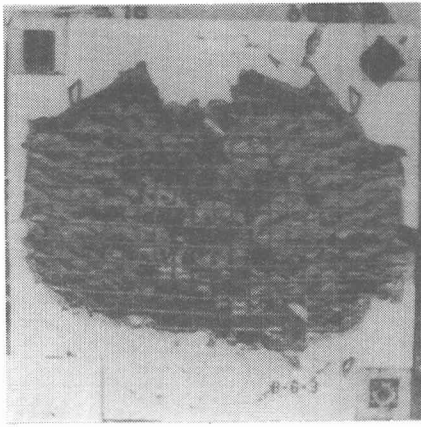


写真-1 裏面状況(SRC-2)

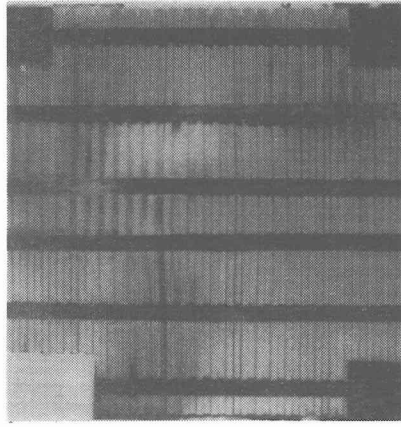


写真-2 裏面状況(SLI-2)

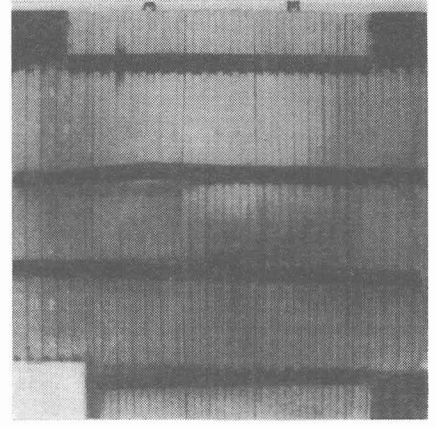


写真-3 裏面状況(SLI-3)

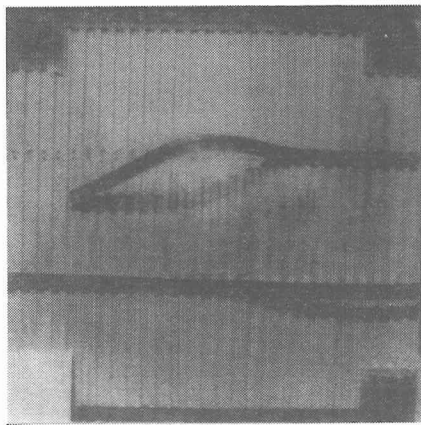


写真-4 裏面状況(SLI-4)

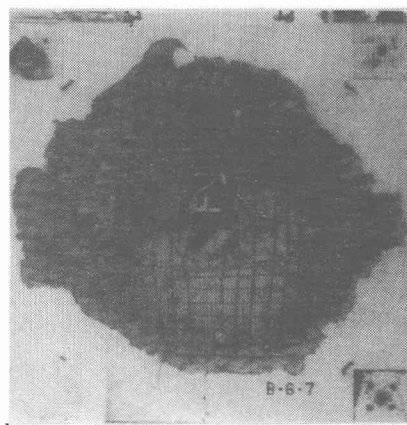


写真-5 裏面状況(SRC-1)

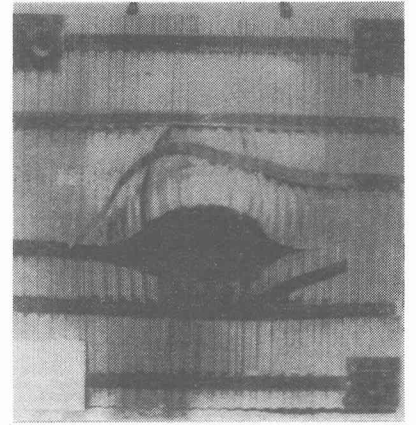


写真-6 裏面状況(SLI-1)

スラブ厚さ 35cm の試験において、鋼ライナーを配置していない試験体は完全に貫通した（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。（2）式から、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の一つとして、鋼ライナーの配置による効果について検討した。鋼ライナーは、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、裏面剥離に対する防止効果は著しく大きいことが示された。

参考文献

- 1) 土木学会 構造工学シリーズ6：構造物の衝撃挙動と設計法、1993
- 2) 大沼博志、伊藤千浩：プレストレストコンクリートスラブの衝撃応答特性および有限要素法による解析、コンクリート工学年次講演会論文集、Vol.7、pp353-356、1985
- 3) 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、pp761-764、1986
- 4) 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、(投稿中)
- 5) Chang,W.S. : Impact of Solid Missiles on Concrete Barriers, J. of the ST Division of ASCE, Vol.106, No.ST2, pp257-271, 1981