

論文 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

大沼博志*¹・伊藤千浩*²・白井孝治*³

要旨：本論文では、屋根あるいは壁のようなスラブ状の構造物に対する飛来物の衝突を対象とする。この場合、耐衝撃設計において必要なのは裏面の剥離あるいは飛来物の貫通を防止することである。飛来物の剛性、直径、質量および衝突速度、鉄筋コンクリートスラブの厚さ、ならびにコンクリート強度をパラメータとして高速衝突実験を行い、既存の裏面剥離と貫通限界厚さに関する評価式の適用性を明らかにした。さらに、剛性が異なる飛来物の実験から、剛性の低い柔飛来物は自身の変形によるエネルギー吸収によってスラブに与える衝撃は減少することを示し、また柔飛来物に対する限界厚さの低減率を提案した。

キーワード：衝撃、剛飛来物、柔飛来物、裏面剥離限界、貫通限界、耐衝撃設計

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。

本論文では、鉄筋コンクリートスラブに飛来物が衝突する場合に、耐衝撃設計において最も重要であるスラブの裏面剥離限界厚さおよび貫通限界厚さを評価する算定式について検討したものである。また、飛来物の剛性が小さい場合には飛来物自身がエネルギーを吸収するため、剛なものよりも限界厚さの低減が見込まれる。このような柔飛来物の耐衝撃設計についても検討を加えた。

2. 実験の概要

2.1 高速衝撃実験装置

実験に使用した高速衝撃実験装置を図-1に示す。本装置は、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、その誤差は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。

縦置きされた試験体は、支持台に4点支持されており、試験体と支持台の間に1.96MNの荷重計を設置した。

2.2 鉄筋コンクリート試験体

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38体である。スラブ厚さは実験によって裏面剥離限界厚さおよび貫通限界厚さを把握できるものとし、30cmから60cmとした。鉄筋にはSD365Bを用い、鉄筋比は対象とした構造物の代表的な値である0.4と0.5%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

*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主任研究員 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

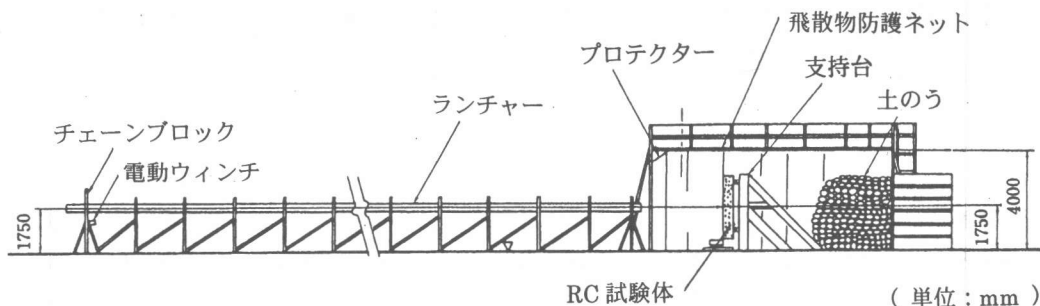


図-1 高速衝撃実験装置

D13mm が 105mm 間隔および D19mm が 120mm 間隔である。コンクリートの圧縮強度は、平均 30.2N/mm^2 のものと圧縮強度の依存性を評価するため 42.1N/mm^2 のものを用いた。

2.3 模擬飛来物

飛来物の剛性が低いと飛来物自身が衝撃エネルギーを吸収し、鉄筋コンクリートスラブの局部損傷は低減する。そのため、耐衝撃設計では飛来物の剛性を考慮することが合理的であると考えられる。飛来物の剛性の影響を評価するために、剛飛来物と柔飛来物の 2 種を高速衝撃実験に用いた。直径 0.3m の飛来物の形状寸法を図-2 に示す。剛飛来物は、その前面を剛体としたものである。模擬飛来物は火薬の燃焼によって推進するために燃焼室が必要であり、完全な剛体とは言えないがそのエネルギー吸収は少ないと考えられる。

一方、柔飛来物は二つの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。この柔飛来物の変形特性を明らかにするために、静的な圧縮試験を行った。荷重と変形の関係を図-3 に示す。この図から、荷重-変形曲線には 0.95MN と 4.02MN の二つのピークがあり、それらはそれぞれ前部と後部の円筒室の座屈荷重に相当する。

鋼製(SC450)模擬飛来物の直径、質量および衝突速度の範囲はそれぞれ 0.23m と 0.30m, 50kg~150kg および 37~257m/sec である。

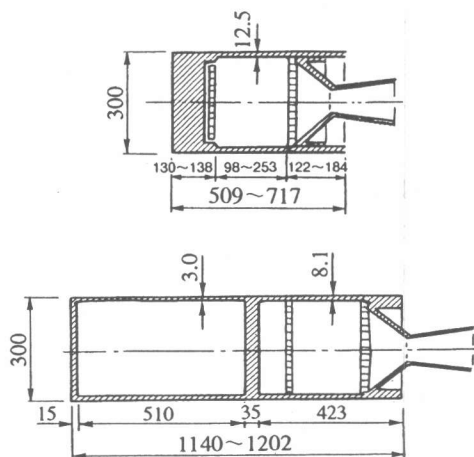


図-2 模擬飛来物(上:剛, 下:柔)

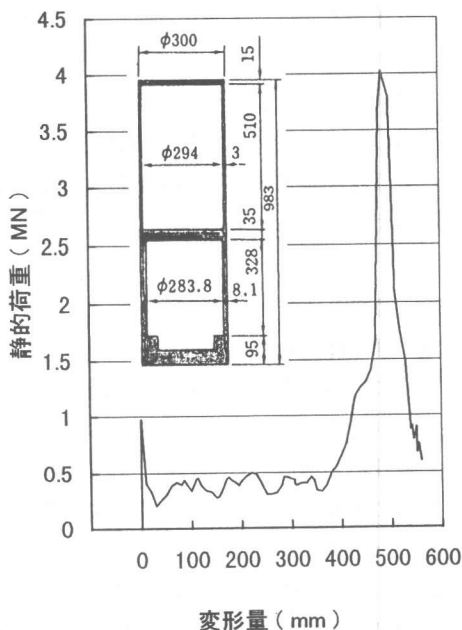


図-3 柔飛来物の静的荷重-変形曲線

表-1 高速衝撃実験の条件

	模擬飛来物				鉄筋コンクリートスラブ			
	剛性	径(m)	質量(kg)	速度(m/s)	厚さ(cm)	鉄筋比(%)	強度 ¹⁾	試験体数
Series 1a	剛	0.23	100	37~257	40,50,60	0.5	28.5	15
1b	剛	0.23	50~150	平均 198	40,50,60	0.5	28.6	5(3) ²⁾
Series 2a	剛	0.30	100	105~248	45,55,60	0.4	29.5	6
2b	剛	0.30	100	99~247	35~60	0.4	42.1	7
2c	柔	0.30	100	100~251	30~60	0.4	33.7	8

1): N/mm², 2): () 内は 1a と重複する試験体数

2.4 実験条件の設定

裏面剥離限界厚さと貫通限界厚さに及ぼすコンクリートの圧縮強度、模擬飛来物の質量、速度、剛性の影響を評価するために、表-1に示すように、実験条件を設定した。

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モード

飛来物が鉄筋コンクリート構造物に衝突するときの破壊モードは、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ときに発生し、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たために損傷の範囲が衝突部付近に集中する。

図-4のように、衝突速度が比較的遅い場合には、飛来物が貫入する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し、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³⁾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り合いから導かれたものである。

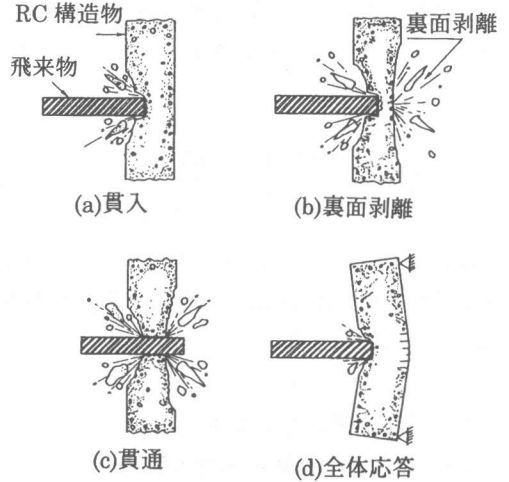


図-4 スラブの破壊モード

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ずるものとする。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、誘導することができる。

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

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。

係数 α_s は、衝突速度が 50m/sec 以下、飛来物の質量と直径がそれぞれ 70kg と 0.098m, コンクリートの平均圧縮強度が 30.8N/mm², スラブ厚さが 10, 20, 30cm の既往の実験²⁾から求められており、 $\alpha_s = 6.96 \times 10^{-3}$ であった。

3.3 貫通限界厚さの評価式

貫通に関する限界厚さ t_e は、Chang³⁾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ときの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。このような仮定をもとに、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。

$$t_e = \alpha_e \times \left\{ \frac{V_0}{V} \right\}^{0.25} \left\{ \frac{MV^2}{df_c} \right\}^{1/2} \quad (2)$$

3.2 節で述べた実験結果から、係数 $\alpha_e = 8.96 \times 10^{-4}$ が得られた。式(1)と式(2)は、以後 CRIEPI 式と呼ぶことにする。

4. 実験結果とその考察

4.1 最大衝撃荷重と衝突速度

この高速衝撃実験では、飛来物がランチャー上を走行するため飛来物から直接衝撃荷重を求めることができなかった。そのため、試験体と4点の支持点の間に設置した荷重計によって衝撃荷重を測定し、4点の総荷重で整理した。

シリーズ I a の飛来物質量が 100kg の場合について、最大衝撃荷重と衝突速度の関係を図-5 に示す。スラブ厚さが 40cm の場合、100m/sec までは衝突速度の増加とともに衝撃荷重は増大するが、150m/sec では減少し、それ以後ほぼ横ばいとなっている。すなわち、ひび割れや裏面剥離が発生する範囲では、衝突速度の増加によって衝撃荷重は増大するが、貫通が発生するようになると逆に低減する。これは、貫通が発生する段階では、スラブに押し抜きせん断によるせん断コーンが形成されるためと考えられる。

4.2 剛飛来物に対する局部損傷評価

局部損傷モードは、前述のように、ひび割れ

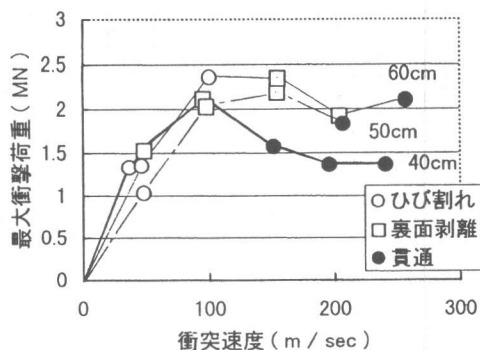


図-5 最大衝撃荷重と衝突速度の関係

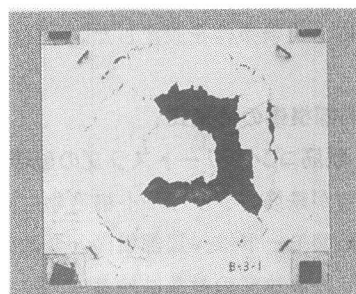


写真-1 裏面剥離限界に近い損傷

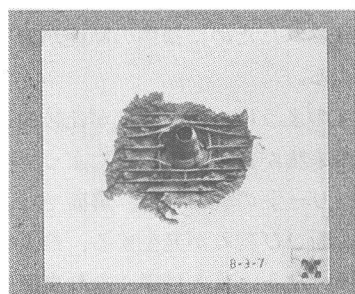


写真-2 貫通限界に近い損傷

の発生、裏面剥離および貫通に分類することができる。裏面剥離限界は鉄筋コンクリートスラブの裏面においてコンクリートの塊が剥離する寸前の状態と、また貫通限界は飛来物の先端が鉄筋コンクリートスラブの裏面で丁度停止した状態と定義することができる。

しかしながら、高速衝撃実験によってこれらの限界を直接求めることは困難であり、実験結果はひび割れのみ、スラブ裏面の剥離、模擬飛来物の貫通となる。裏面剥離および貫通が生じ

た試験体のうち、写真-1と写真-2に示すように、裏面剥離が僅かで裏面剥離限界に近いもの、模擬飛来物が試験体に止まっていて貫通限界に近いものを区別して図示した。

シリーズIa(飛来物の直径 $d=0.23\text{m}$ 、剛飛来物)の衝突速度と裏面剥離、貫通限界厚さの関係を図-6に示す。この図は、飛来物の質量を一定(100kg)として衝突速度を変化させたものであり、また前述の各限界に近い実験結果は記号に縦線を引いて表した。

裏面剥離および貫通限界厚さの評価式において、各限界に及ぼす衝突速度の影響はそれぞれ衝突速度の0.67乗および0.75乗に比例するように定められている。図-6から、裏面剥離限界厚さの評価式は1点の実験結果(衝突速度が 48.6m/sec)のみ過少に評価するものの全体的には安全側にあるものと考えられる。また、貫通限界厚さの評価式は全ての実験結果を安全側に評価しており、とくに貫通限界に近い実験結果との比較から精度の良い評価式であると判断される。

図-7に各限界厚さの評価式と飛来物の質量との関係を示す(シリーズIb)。この図は、衝突速度の範囲が 187 から 207m/sec で、その平均が 198.4m/sec の実験結果を図示したものである。評価式では、各限界厚さに及ぼす飛来物の質量の影響は、飛来物の質量のそれぞれ0.4乗および0.5乗に比例する。ひび割れの実験結果は衝突速度が平均よりも低い(187m/sec)ために、裏面剥離の評価式は過大評価する傾向にあるが、貫通の評価式は精度が良いことがわかる。

図-8および図-9は、シリーズIIaおよびIIb(飛来物の直径が 0.30m 、剛飛来物)の各限界厚さと衝突速度の関係を示している。これらの図はコンクリートの圧縮強度が異なっており、平均圧縮強度はそれぞれ 29.5N/mm^2 および 42.1N/mm^2 であった。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。評価式から明らかなように、裏面剥離と貫通限界厚さはコンクリートの圧縮強度のそ

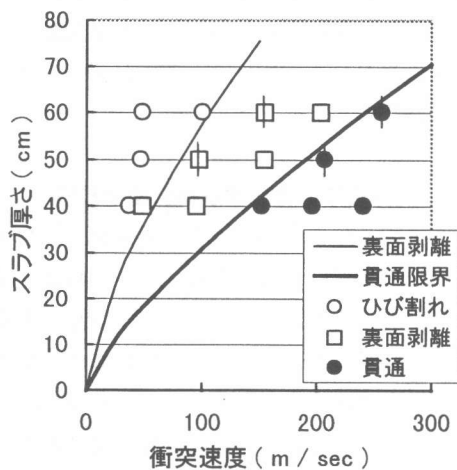


図-6 局部損傷と衝突速度の関係

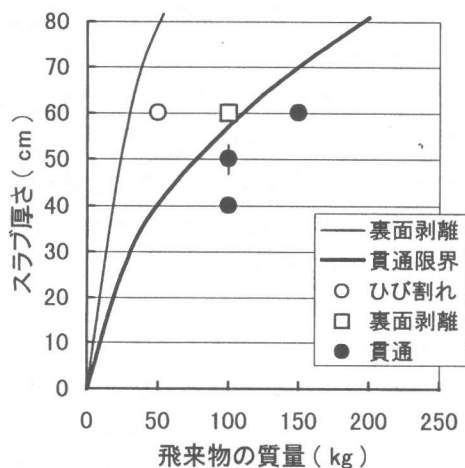


図-7 局部損傷と飛来物質量との関係

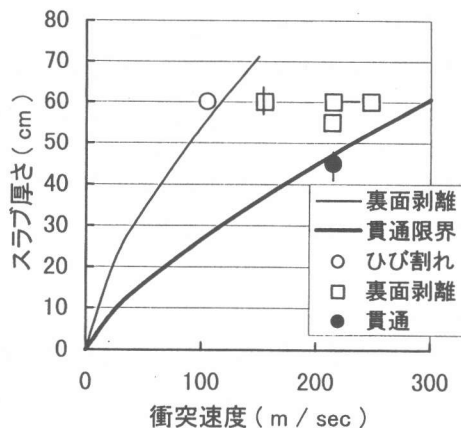


図-8 普通コンクリートの局部損傷

れぞれ 0.4 乗および 0.5 乗に反比例する。

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。

4.3 柔飛来物に対する局部損傷評価

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、2.3 節に述べた円筒形の柔飛来物を用いて高速衝撃実験を行い、飛来物の剛性が裏面剥離と貫通限界厚さに及ぼす影響を明らかにするとともに CRIEPI 式を使用する際の低減率を提案した。

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-10 に示す。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(RFs)は 0.7 が、また貫通限界厚さの低減率(RFp)は 0.9 が適切な値であると考えられる。

5. まとめ

(1)飛来物の直径、質量および衝突速度、鉄筋コンクリートスラブの厚さ、ならびにコンクリートの圧縮強度をパラメータとして高速衝撃実験を行い、既存の CRIEPI 式はスラブの裏面剥離限界厚さと貫通限界厚さを安全かつ精度よく評価できることが明らかにされた。

(2)飛来物の剛性が減少すると裏面剥離や貫通を防止するために必要なスラブ厚さは減少することが示された。CRIEPI 式を用いるときの低減率として、裏面剥離限界に対して 0.7 を、また貫通限界に対して 0.9 を提案した。

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，1993.12
- 2)大沼博志，伊藤千浩，佐藤宏一，高野博：鉄

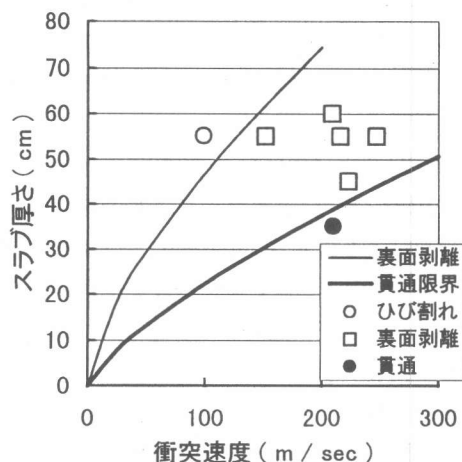


図-9 高強度コンクリートの局部損傷

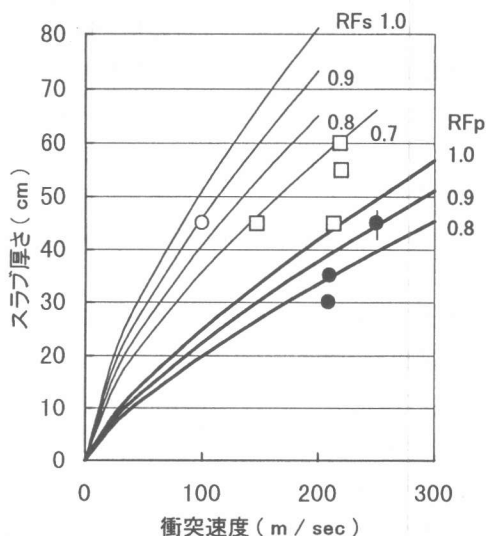


図-10 柔飛来物に対する局部損傷と低減率

筋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，電中研研究報告 No.384027,1985.4

- 3)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
- 4)伊藤千浩，大沼博志，白井孝治：飛来物の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