

RC スラブの局部損傷に及ぼす飛来物の先端形状の影響

INFLUENCE OF NOSE SHAPE OF MISSILE ON LOCAL RUPTURES OF RC SLAB

大沼 博志*, 伊藤 千浩**

Hiroshi OHNUMA, Chihiro ITO

*工博 北海道大学教授 大学院工学研究科 (〒060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目)

**工博(財) 電力中央研究所我孫子研究所 上席研究員 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646)

キーワード: RC スラブ、飛来物の先端形状、貫入深さ、裏面剥離、貫通、耐衝撃設計

(RC Slab, Nose Shape of Missile, Penetration Depth, Scabbing, Perforation, Impact Design)

1. はじめに

著者らは、これまで衝撃力を受ける鉄筋コンクリート(RC)構造物の耐衝撃設計法に関する研究を行ってきた。^{1), 2), 3)}とくに、高速飛来物の場合、裏面剥離および貫通などの局部損傷を起こさないように設計することが最も重要であることから、裏面剥離および貫通に対する限界厚さの算定式を提案した。

しかしながら、これらの限界厚さ算定式においては、飛来物の先端形状は平坦としている。一方、飛来物の先端形状はRC構造物の局部損傷に大きな影響を及ぼすことが予想される。そのため、本研究では5種の先端形状に関してRCスラブ試験体を用いた衝撃実験を実施し、局部損傷に及ぼす飛来物の先端形状の影響について検討・評価した。

2. 実験の概要

2.1 実験に使用した諸材料

スラブ試験体の製作には、普通ポルトランドセメントを用いた。粗骨材は、最大寸法が25mmであり、その比重、吸水率および粗粒率はそれぞれ2.62、

1.27%および6.77であった。また、細骨材の比重、吸水率および粗粒率はそれぞれ2.58、1.50%および2.50であった。コンクリートの配合を表-1に示す。また、衝撃試験時のコンクリートの圧縮強度、ヤング係数、ポアソン比および引張強度は平均するとそれぞれ29.1N/mm²、21.4kN/mm²、0.17および2.33N/mm²であった。

鉄筋はD13mm(SD345)を用いた。その降伏強度、引張強度および伸びはそれぞれ360N/mm²、540N/mm²および22%であった。

2.2 鉄筋コンクリートスラブ試験体

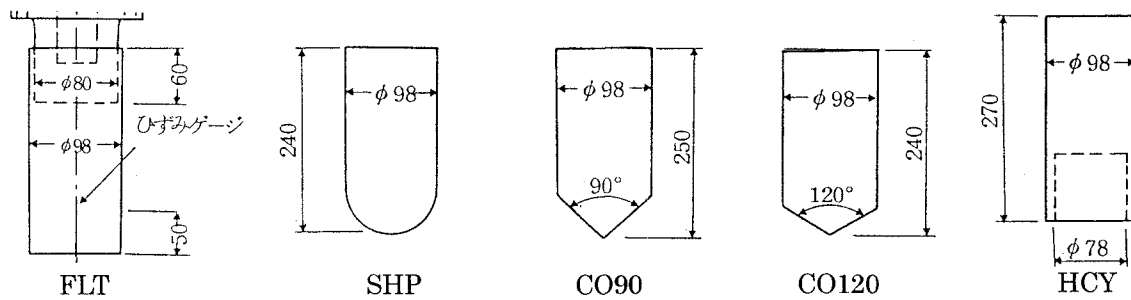
スラブ試験体は一辺が1.5mの正方形で、その厚さは20cmである。鉄筋にはSD345を用い、2段に餅網状に配筋した。鉄筋比、鉄筋径および鉄筋間隔はそれぞれ片側0.5%、13mmおよび65mmである。

2.3 模擬飛来物

模擬飛来物の先端形状は、平坦型(FLT)、半球型(SPH)、90度円錐型(CO90)、120度円錐型(CO120)および中空円筒型(HCY)の5種類とした。これらの模擬飛来物の詳細を図-1に示す。そ

表-1 コンクリートの配合

粗骨材の 最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 S/A (%)	単位質量 (kg/m ³)				
				セメント C	水 W	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤
25	18.0	51.0	43.5	338	172	764	1009	0.845



図－1 模擬飛来物の形状と寸法

の直径および質量は 9.8cm および 70kg と一定である。その他の試験条件の一覧表を表－2 に示す。

2.4 衝撃試験方法

衝撃実験装置は圧搾空素ガスの圧力を利用して模擬飛来物を所定の速度でスラブ試験体に垂直に衝突させるものである。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。

3. 貫入深さおよび限界厚さの評価式

3.1 RC スラブの破壊モード

飛来物が高速度で衝突するとき衝撃エネルギーの大部分は構造物によって局部的に吸収されるので、本論文の対象は損傷の範囲が衝突部付近に集中する局部損傷である。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 貫入深さの評価式

修正 NDRC 式⁵⁾を基本に、衝突速度が 50m/sec 以下、飛来物の質量と直径がそれぞれ 70kg および 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 (本研究の FLT)、30cm の既往の実験¹⁾から、飛来物の貫入深さの評価式(1)が得られている。ただし、この式の適用範囲は、衝突速度が 50m/sec 以下で、貫入深さがスラブ試験体厚さの 3 割以下の場合である。

$$\frac{x}{d} = 4.9NMd^{0.2} \frac{(114 - 1.47f_c^{2/3})}{f_c^{2/3}} \left[\frac{(d + 1.25h_0)h_0}{(d + 1.25h)h} \right] \cdot V^2 \quad (1)$$

表－2 衝撃試験の条件

記号	衝突速度 (m/sec)	試験体数
FLT	4.55～41.84	8
SPH	3.70～39.37	5
CO90	3.70～38.17	6
CO120	3.70～38.39	5
HCY	3.35～38.54	6

ここで、 x : 貫入深さ (10⁻⁶cm)、 d : 飛来物の直径 (cm)、 N : 飛来物の先端形状係数、 M : 飛来物の質量 (kg)、 f_c : コンクリートの圧縮強度 (kg/cm²)、 h_0 : 基準スラブ厚さ (20cm)、 h : スラブ厚さ (cm)、 V : 衝突速度 (m/sec) である。

3.3 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、RC 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、スラブは曲げ降伏するものと仮定して、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。

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

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。

3.2 節で述べた実験結果から、係数 $\alpha_s = 6.96 \times 10^{-3}$ が得られている。

3.4 貫通限界厚さの評価式

貫通に関する限界厚さ t_e は、Chang⁴⁾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ると、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り合いから次式が得られる。

$$t_e = \alpha_e \times \left\{ \frac{V_0}{V} \right\}^{0.25} \left\{ \frac{MV^2}{df_c} \right\}^{1/2} \quad (3)$$

3.2 節で述べた実験結果から、係数 $\alpha_e = 8.96 \times 10^{-4}$ が求められている。

4. 実験結果および考察

4.1 衝撃力

最大衝撃力は、模擬飛来物の側面に貼ったゲージから得られたひずみの最大値に鋼の静的ヤング係数と模擬飛来物の断面積を乗じて求めた。5 種の先端形状で得られた最大衝撃力と衝突速度の関係を、図-2 に示す。

この図から、最大衝撃力は衝突速度の増加に伴って大きくなる傾向にあるものの、その値は飛来物の先端形状によって相当に異なっていることが分かる。FLT は常に大きな値を、また CO90 は常に小さな値を示した。また、FLT、CO120 および CO90 の実験結果を比較すると、この順に先端の角度が大きいほど最大衝撃力は大きくなることが分かる。これは、貫入深さの増加に伴ってスラブ試験体との接触面積が大きくなることに因るものと考えられる。

4.2 貫入深さ

5 種の先端形状に対する貫入深さと衝突速度の関

係を図-3 に示す。これらの図から明らかなように、貫入深さは飛来物の衝突速度の 2 乗、すなわち運動エネルギーに比例することが示された。

図-3 の実線は(1)式を表しており、飛来物の先端形状係数として FLT は 0.72、SPH は 1.00、CO90、CO120 および HCY は 1.14 の値を用いている。これらの結果から、貫入深さがスラブ試験体厚さの 3 割程度までは、上記の先端形状係数と (1) 式を用いることによって貫入深さをほぼ評価できると考える。

4.3 裏面剥離限界と貫通限界

5 種の飛来物先端形状について衝撃速度と破壊

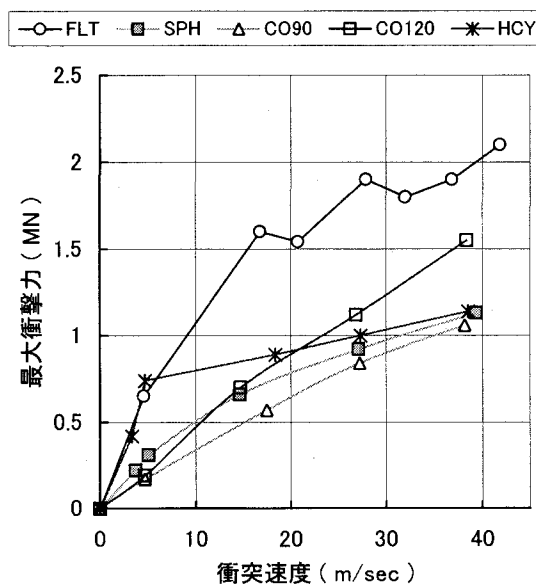


図-2 最大衝撃力と衝突速度の関係

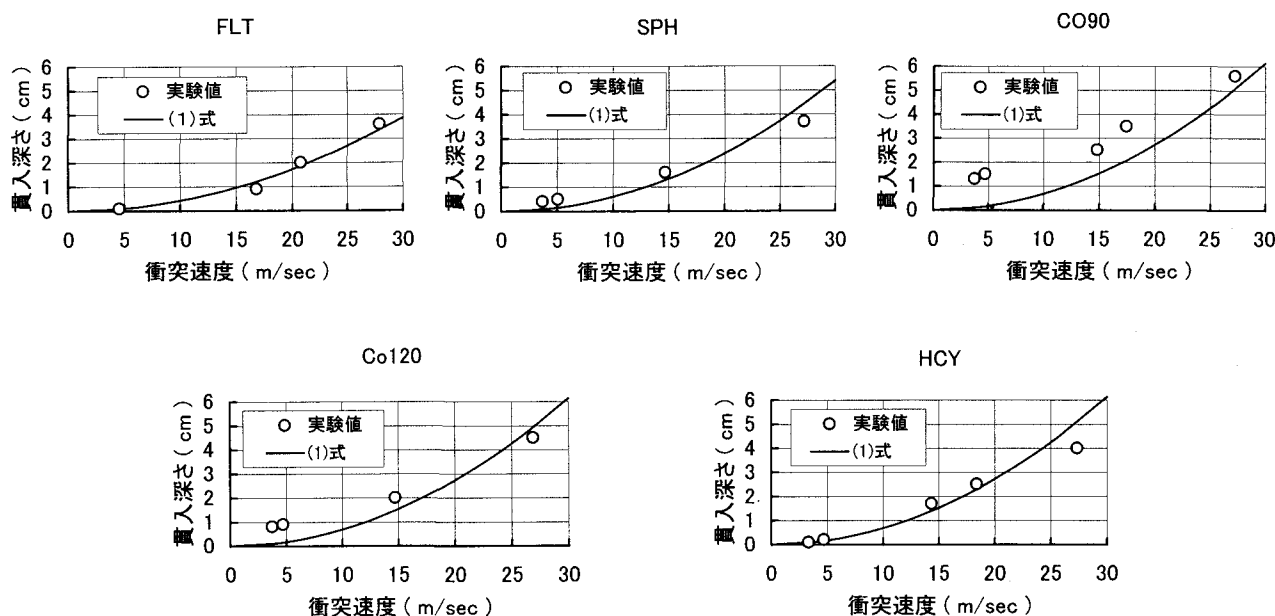


図-3 貫入深さと衝突速度の関係

モードの関係を図-4に示す。裏面剥離限界について実験結果と(2)式の算定値を比較・検討する。衝撃実験でスラブ試験体裏面の一部分に剥離が生じた衝突速度は、FLT:20.79、SPH:27.16、CO90:27.25、CO120:26.88、HCY:27.36m/secであり、これらはほぼ裏面剥離限界速度であると考えられる。これに対して、(2)式から算定される裏面剥離限界速度は、FLT:20.66、SPH:19.95、CO90:18.88、CO120:19.09、HCY:21.70m/secである。本論文では、先端形状係数の影響を考慮していないので、限界速度の違いは f_c の差によるものである。したがって、(2)式は、SPH、CO90、CO120およびHCYに対して安全側の評価を与えることが分かった。

同様に、貫通限界について比較・検討する。衝撃実験では、FLT:41.84、SPH:39.37、CO90:38.17m/secで貫通が生じた。一方、CO120とHCYはそれぞれ実験を行った38.39と38.54m/secまで貫通しなかった。これに対して、(3)式による貫通限界速度はFLT:41.72、SPH:39.48、CO90:37.73、CO120:38.20、HCY:44.07m/secである。SPHとCO90は評価式による貫通限界速度と同程度の速度で貫通しており、(3)式でほぼ評価可能である。また、CO120の場合には評価式は安全側の速度を与えている。一方、HCYの場合は、貫通限界速度付近の実験結果がないので、評価することはできなかった。

以上の結果から、飛来物の先端形状はRCスラブの裏面剥離ならびに貫通にあまり影響を及ぼさないといえる。

5. 結論

本研究で得られた主要な結果を纏めると以下の通りである。

- 1) RCスラブは、平坦以外の先端形状を有する飛来物が衝突する場合にも、飛来物の貫入、ひび割れの発生、裏面の剥離および貫通の損傷を受け、押抜きせん断によって破壊した。
- 2) 衝撃実験の結果から、最大衝撃力はスラブ試験体に接する飛来物の面積と貫入深さに依存し、接触面積が大きいほど飛来物の最大衝撃力が大きくなることが示された。
- 3) 貫入深さがスラブ試験体厚さの3割以下の場合には、飛来物の先端形状係数に平坦型では0.72、

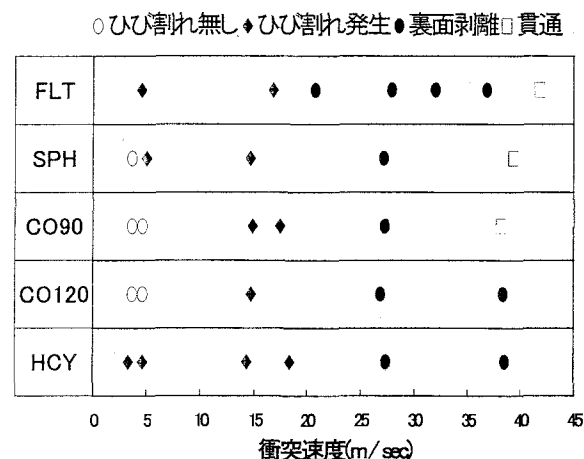


図-4 破壊モードと衝突速度の比較

半球型では1.00、60度と120度の円錐型および中空円筒型では1.14の値を用いると、貫入深さは評価式によって算定できることが分かった。

- 4) 裏面剥離厚さと貫通厚さの評価式は、飛来物の先端形状の影響を考慮しなくとも、適用することがほぼ可能である。

参考文献

- 1) 大沼博志、伊藤千浩、岸徳光、能町純雄：鉄筋コンクリートスラブの衝撃応答特性について、第6回コンクリート工学年次講演会論文集、pp.637-640, 1984.6
- 2) 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
- 3) 大沼博志、伊藤千浩、白井孝治：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、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.21, No.3, pp.1579-1584, 1999.7
- 4) W.S.Chang : Impact of Solid Missiles on Concrete Barriers, J. of the ST Division of ASCE, Vol.106, No.ST2, pp.257-271, Feb.1981
- 5) R.P.Kennedy : A Review of Procedures for the Analysis and Design of Concrete Structures to Resist Missile Impact Effects, Nuclear Engineering and Design 37, 1976