

# 剛飛来物の衝突に対する鉄筋コンクリート構造物の設計評価式

伊藤千浩<sup>1</sup>・白井孝治<sup>2</sup>・大沼博志<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 (財)電力中央研究所原燃サイクルプロジェクト部主査研究員 (〒277 我孫子市我孫子 1646)

<sup>2</sup>正会員 工修 (財)電力中央研究所原燃サイクルプロジェクト部担当研究員

<sup>3</sup>正会員 工博 (財)電力中央研究所原燃サイクルプロジェクト部部長

鉄筋コンクリート床版と剛飛来物を用いて衝撃実験を行った。実験では、床版に関しては板厚、コンクリート強度、また、剛飛来物については先端形状をパラメータとした。これらの実験結果をもとに、飛来物の裏面剝離や貫通を防ぐために必要となる鉄筋コンクリート床版の板厚を求める設計評価を提案するとともに、他の実験結果と比較し、その適用性を検証した。

**Key Words :** *impact, rigid missile, reinforced concrete*

## 1. 目 的

我国の原子力発電所に建設されているコンクリート製格納容器は想定される重大な事故に対しても、その安全性を保持するように地震荷重や仮想事故時の圧力、温度上昇などの荷重を考慮した計算が行われている。一方、海外においては、これら荷重の他に飛来物の衝突に対する耐衝撃設計が考慮されている。

飛来物の衝突に対するコンクリート構造物の設計手法に関しての研究は、当初、軍事的な目的で第2次世界大戦中盛んに行われたが、戦争終結とともに研究は一時休止状態となった。しかし、原子力発電所の出現に伴い、極めてまれに生じる現象に対しても安全性の確認が行われるようになり、欧米において航空機の衝突という問題が再びクローズアップされることとなった。初期の頃は、戦争中の試験データあるいは評価式のレビューが主であったが、戦時中のデータには公開されていないものが多いことなどから、各国で独自の実験研究が行われるようになった。

一例を挙げれば、米国においては、流出冷却材のジェット圧力によって破損した機器の破片、冷却材流出過程で再循環ポンプの加速によるインペラ破片のケーシング外飛散事故による低圧タービン最終段動翼の破片等の衝突、竜巻により巻き上げられた飛来物(電柱、配管等)の衝突について評価されており、また、西独、仏国においては、航空機の墜落に対する検討が行われている。

一方、我国においては、現在、青森県六ヶ所村に建設されている使用済燃料再処理施設において航空機の墜落

に対する防護設計が考慮されている<sup>1)</sup>。

本論文においては、鉄筋コンクリート床版を用いた衝撃実験をもとに、飛来物の衝突に対する鉄筋コンクリート構造物の設計手法として破壊モードを推定する算定式を提案する。

## 2. 対象とする飛来物および破壊モード

飛来物は、被衝突体との相対的な剛性から、柔飛来物(Soft Missile)と剛飛来物(Hard Missile)に大別される。Hard Missileは飛来物自身の変形はほとんどなく、変形が被衝突体のみで発生し飛来物もつ運動エネルギーの多くは被衝突体によって吸収される。Soft Missileは被衝突体だけでなく飛来物自身も衝突により変形し、運動エネルギーの一部を飛来物自身でも吸収する。

したがって重量・速度等が同一のHard MissileとSoft Missileが同じ諸元を持つ鉄筋コンクリート床版に衝突する場合、床版が受けるダメージはHard Missileの方が大きく安全側の評価を与えることから、本研究では特にHard Missileを対象とした実験・検討を行った。なお、飛来物の剛性を考慮することによって、設計を合理化(床版の厚さを薄くできるなど)できることから、将来的には剛性を考慮した評価が望ましく、Soft Missileを対象とした研究<sup>2)-5)</sup>も行っている。

このようなHard Missileが鉄筋コンクリート構造物に衝突した場合の設計手法については、我国では確立されたものがないが、欧米では破壊モードの評価に基づく

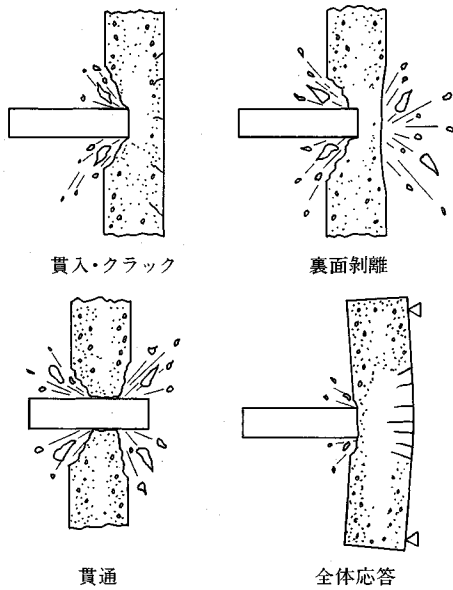


図-2.1 破壊モード

表-3.1 鉄筋コンクリート床版の諸元

記号	厚さ (cm)	鉄筋		コンクリートの設計基準強度 (Mpa)	実験パラメーター	試験本数 (体)
		鉄筋径-本数 (本/10cm)	鉄筋比			
SLB-10	10	D6-3	0.95	23.52	床版厚さ	6
SLB-20	20	D13-1.5	0.95	23.52		6
SLB-30	30	D16-1.5	0.95	23.52		4
HiSLB-10	20	D13-1.5	0.95	41.16	コンクリート強度	4
SLB-20M	20	D6-1.5	0.95	23.52	先端形状	11

手法が主流となっており、本論文でもこのような観点からの設計式を提案する。

Hard Missile が衝突した場合の鉄筋コンクリート構造物の破壊モードは、通常、図-2.1 に示すように貫入、裏面剝離、貫通および構造物としての全体応答の 4 種類に分類される<sup>6)</sup>。

設計においては、速度、重量、大きさが与えられた想定される飛来物に対し、裏面剝離や貫通を防ぐ鉄筋コンクリート構造物の板厚やコンクリートの強度等の諸元を決めることとなる。

本論文では、3章において算定式を構築するために行った実験について述べ、4章では提案した算定式の適用性について検討を行った。

### 3. 衝撃実験

#### (1) 試験方法

##### a) 鉄筋コンクリート床版試験体

実験に用いた鉄筋コンクリート床版の諸元を表-3.1 に示す。床版の寸法は 150 cm×150 cm であり、厚さは

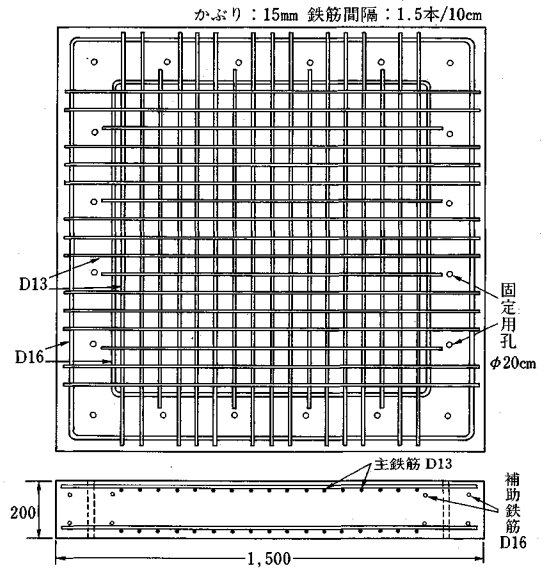


図-3.1 鉄筋コンクリート床版配筋図

表-3.2 コンクリートの機械的性質

試験体	材令	単位体積質量 (kg/ℓ)	圧縮強度 (Mpa)	静弾性係数 (Mpa)	ポアソン比	引張強度 (Mpa)
SLB-10	28	2.19	27.64	2.675×10 <sup>4</sup>	0.16	2.22
	試験時	2.19	27.73	2.313×10 <sup>4</sup>	0.18	—
	56	2.19	26.26	2.117×10 <sup>4</sup>	0.15	2.01
SLB-20	28	2.21	30.28	2.411×10 <sup>4</sup>	0.20	2.34
	試験時	2.20	30.77	2.264×10 <sup>4</sup>	0.16	—
	56	2.20	31.26	2.195×10 <sup>4</sup>	0.17	2.59
SLB-30	28	2.29	28.52	2.499×10 <sup>4</sup>	0.20	2.24
	試験時	2.28	28.81	2.411×10 <sup>4</sup>	0.21	—
	56	2.26	28.32	1.970×10 <sup>4</sup>	0.17	2.22
HiSLB-20	*28	2.30	40.87	2.793×10 <sup>4</sup>	0.21	2.69
	2.32	46.45	2.989×10 <sup>4</sup>	0.20	—	
	試験時	2.28	43.22	2.470×10 <sup>4</sup>	0.10	3.01
SLB-20M	28	2.26	27.93	2.332×10 <sup>4</sup>	0.15	2.20
	試験時	2.26	29.99	2.244×10 <sup>4</sup>	0.16	2.13
	56	2.26	28.32	2.215×10 <sup>4</sup>	0.17	—
SLB-20M	28	2.22	29.40	2.372×10 <sup>4</sup>	0.19	1.93
	試験時	2.22	28.91	2.215×10 <sup>4</sup>	0.20	2.15
	56	2.21	26.46	2.146×10 <sup>4</sup>	0.19	—

\*：上段は気中養生であり、下段は水中養生である。その他は全て気中養生である。

表-3.3 鉄筋の機械的性質

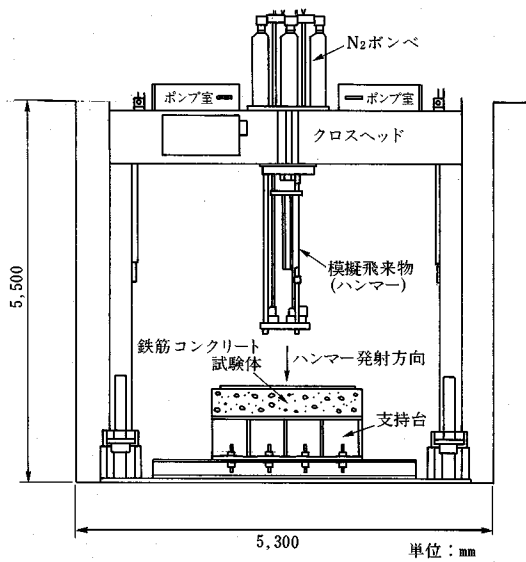
鉄筋の種類	降伏点 $\sigma_{sy}$	引張強度 $\sigma_{su}$	弾性係数 $E_s$
D 6	332.2 Mpa	500.8 Mpa	177.4×10 <sup>3</sup> Mpa
D 13	369.5	538.0	187.2×10 <sup>3</sup>
D 16	365.5	546.3	185.2×10 <sup>3</sup>

10 cm, 20 cm および 30 cm の 3 種類とし、普通コンクリートおよび高強度コンクリートを用いた床版を製作した。

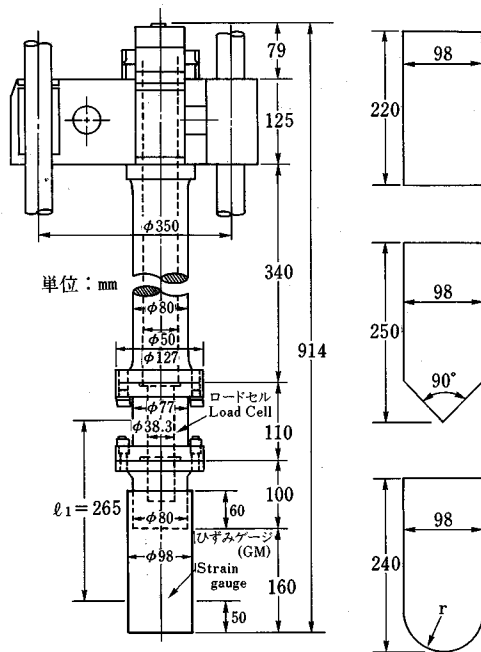
配筋は複鉄筋断面とし、鉄筋比を片側約 1% とした。一例として、厚さ 20 cm の床版の配筋図を図-3.1 に示す。

表—3.4 実験結果のまとめ

試験体	衝撃速度 (m/sec)	衝撃力 ( $\times 10^4$ N)	貫入深さ (cm)	試験体裏面中央の最大変形 (mm)	破壊状態
SLB-10 -1	4.68	627.2	0.05	0.0	ひびわれ発生
2	7.95	813.4	1.1	25.0	ひびわれ発生
3	12.14	931.0	2.7	54.5	裏面剝離 (一部)
4	15.43	117.2	3.8	54.5	裏面剝離 (全体)
5	18.07	1037.8	6.3	50.5	裏面剝離 (全体)
6	20.60	1048.6	10.0	80.0	貫通
SLB-20 -1	16.80	1568.0	0.9	14.0	ひびわれ発生
2	20.79	1509.2	2.0	28.0	裏面剝離 (一部)
3	27.89	1862.0	3.6	70.5	裏面剝離 (全体)
4	32.00	—	7.0	85.0	裏面剝離 (全体)
5	36.83	1862.0	10.4	98.2	裏面剝離 (全体)
6	41.84	2058.0	13.1	107.5	貫通
SLB-30 -1	18.60	1783.6	0.3	0.0	ひびわれ発生
2	29.10	2097.2	1.5	0.0	ひびわれ発生
3	38.75	2087.4	2.2	12.5	ひびわれ発生
4	47.50	2273.6	2.4	24.0	ひびわれ発生
HiSLB-20 -1	20.58	—	0.8	13.0	ひびわれ発生
2	21.16	1744.4	1.0	16.5	裏面剝離 (ほぼ全体)
3	31.40	2401.1	3.8	41.0	裏面剝離 (ほぼ全体)
4	40.00	2744.0	9.7	57.0	裏面剝離 (全体)
RSNB-SPH -1	3.70	215.6	0.4	0.0	ひびわれなし
2	5.05	313.6	0.5	0.0	ひびわれ発生
3	14.64	646.8	1.6	0.0	ひびわれ発生
4	27.16	901.6	3.7	1.25	裏面剝離 (一部)
5	39.37	1107.4	貫通	6.8	貫通
RSNB-C090 -1	3.70	—	1.3	0.0	ひびわれなし
2	4.67	166.6	1.5	0.0	ひびわれなし
3	14.85	—	3.5	0.0	ひびわれ発生
4	17.47	558.6	3.5	0.0	ひびわれ発生
5	27.25	832.2	5.6	0.8	裏面剝離 (一部)
6	38.17	1038.8	貫通	—	貫通



図—3.2 衝撃試験装置

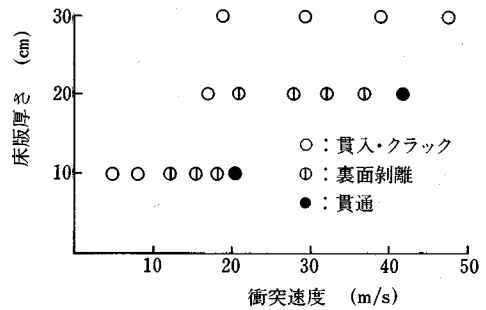


図—3.3 模擬飛来物の形状・寸法

鉄筋コンクリート床版に用いたコンクリートおよび鉄筋の機械的性質を各々表—3.2, 表—3.3に示す。

b) 衝撃試験装置

本実験で使用した衝撃試験装置を図—3.2に示す。本装置は圧搾N<sub>2</sub>ガスによってHard Missileを試験体に衝突させるものであり、最大質量150kgの模擬飛来物を最大50m/sec速度で衝突させることができる。実験では質量70kgの模擬飛来物を用いた。衝突速度はN<sub>2</sub>



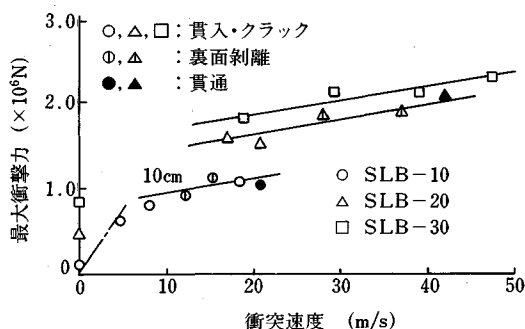
図—3.4 衝突速度および床版厚さと破壊モード

ガス圧によって制御する。飛来物の先端形状は平坦、球状および円錐状の三種類とした。本実験で用いたHard Missileおよび先端の形状寸法を図—3.3に示す。

鉄筋コンクリート床版の四辺は鋼製支持台に固定した。固定方法は試験体の端から12.5cmの位置に、固定用孔(径20mm, 一辺につき5個)を設け、床版を幅15cm, 厚さ12mmの鋼板で支持台との間にはさみ込み、ボルトにより締めつけ固定した。

(2) 実験結果および考察

表—3.4に実験結果の一覧を示す。3章(1)で述べ



図—3.5 衝突速度と最大衝撃力

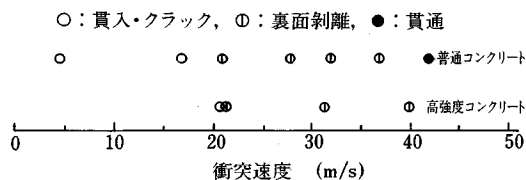
たように、衝突速度は  $N_2$  ガス圧によってコントロールする。実験は速度の小さいほうから始め破壊モードを確認しながら同一の板厚において3種類のモードが発生するように衝突速度を上げていった。衝撃力は飛来物側面に取付けたひずみゲージより得られた最大ひずみに飛来物の断面積およびヤング係数を掛けて求めた。また、破壊状態の評価において一部でも裏面に剝離が生じたものは「裏面剝離」とした。

#### a) 板厚による破壊モード

図—3.4に衝突速度と破壊モードとの関係を示す。同図に示されるように、同一板厚で速度の増加にともない、クラック→裏面剝離→貫通と推移し、また、同一衝突速度では板厚の減少とともにクラック→裏面剝離→貫通と破壊モードが変化していく。このような定性的な傾向は実験前に予想されたことであるが、この破壊モードの変化を定量的に推定する算定式を提案するのが、本論文の目的とするところである。

次に図—3.5に衝突速度と最大衝撃力との関係を示す。この最大衝撃力は上述したように、飛来物の側面に取付けたひずみゲージより得られた最大ひずみを荷重に換算したものである。また、図中、速度0 m/sの位置に静的な押抜きせん断耐力を角田式<sup>7)</sup>により求めた値を示した。板厚が10 cm, 20 cmの床版では荷重が各々110 トン, 190 トン程度までは貫通が発生しておらず、静的な押抜きせん断荷重の2倍以上の耐力があることがわかる。また、板厚が30 cmの床版についても少なくとも230 トン程度までは貫通が発生しておらず、やはり2倍以上の耐力のあることが示されている。この耐力の向上は衝撃荷重のように載荷速度が極めて速い場合には材料の強度特性が変化し、強度が増加すること(ひずみ速度効果)に起因するものと考えられる。一例として板厚が10 cmで衝突速度が12.1 m/sの場合(破壊モードは裏面剝離)のミサイル衝突面直下の下側の鉄筋ひずみより得られたひずみの衝突直後の時刻歴よりひずみ速度  $\dot{\epsilon}$  を求めると、

$$\dot{\epsilon} \approx 10/\text{sec} \quad (3-1)$$



図—3.6 コンクリート強度が破壊モードに及ぼす影響

となる。平面保持の仮定が成立するとすれば、コンクリートのひずみ速度も同程度となる。

文献8), 9)によればひずみ速度が10/secのとき圧縮、引張強度とも静的強度の2倍程度の増加が見られ、耐力の向上がひずみ速度効果の点から定性的に説明ができる。

#### b) コンクリート強度の影響

同一諸元を持ちコンクリート強度のみが異なる床版SLB-20とHiSLB-20について衝突速度と破壊モードの関係を図—3.6に示す。同図に示されるように実験回数に制限があることから破壊モードに対する限界速度はある範囲を持つ。裏面剝離限界速度については、SLB-20のケースで16.8 m/s~20.79 m/s, HiSLB-20のケースでは20.58 m/s~21.16 m/sとなり、貫通限界速度はSLB-20のケースで36.83 ~ 41.84 m/s, HiSLB-20のケースでは本実験の範囲内では貫通モードは発生しなかった。

コンクリート強度が裏面剝離限界速度に及ぼす影響を従来より提案されている破壊モード算定式のなかで比較的精度がよいとされているChang式<sup>10)</sup>によって検討してみる。Chang式において裏面剝離限界速度とコンクリート強度の関係は、

$$V_s \propto f_c'^{0.597} \quad (3-2)$$

$V_s$ : 裏面剝離限界速度

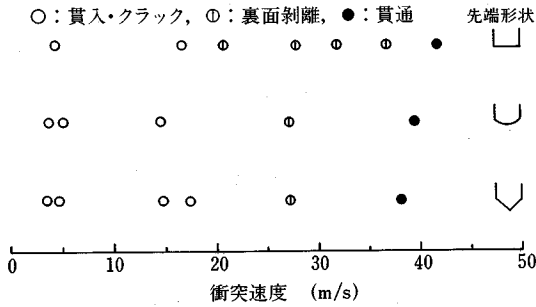
$f_c'$ : コンクリート強度

と表すことができる。したがって、SLB-20での強度30.77 MpaとHiSLB-20での強度43.22 Mpaを用いて、限界速度の比を求めると、

$$\frac{V_s(\text{SLB-20})}{V_s(\text{HiSLB-20})} = 0.82 \quad (3-3)$$

となる。実験結果によれば、SLB-20における裏面剝離限界速度は16.8 m/s~20.79 m/sの範囲にあるが安全側に16.8 m/secとすると式(3-3)を用いてHiSLB-20での裏面剝離限界速度は20.50 m/secと求まる。一方、実験結果(図—3.7参照)によれば裏面剝離限界速度は20.58 m/s~21.16 m/sの間にあり、ほぼ実験結果と一致していることがわかる。一方、貫通限界速度についてコンクリート強度との関係は、

$$V_p \propto f_c'^{0.667} \quad (3-4)$$



図—3.7 飛来物先端形状が破壊モードに及ぼす影響

表—3.5 先端形状の違いによる限界速度

先端形状	算定式	裏面剝離限界速度 (m/s)	貫通限界速度 (m/s)
球	Adeli&Amin	14.26	31.23
	Degen	—	30.69
円すい	Adeli&Amin	13.35	29.53
	Degen	—	28.58

$V_p$ : 裏面剝離限界速度

となる。ここで、SLB-20における貫通限界速度を安全側に36.83 m/sとすると裏面剝離の場合と同様な手法を用いてHiSLB-20での貫通限界速度は41.19 m/sと推定される。

#### c) ミサイルの先端形状の影響

これまでに提案されている算定式の中で、飛来物の先端形状の影響については修正NDRC式<sup>9)</sup>(およびこの式を基に作成された式)中の形状係数 $N$ (鋭い:1.14, 球状:1.0, 平坦:0.72)によって貫入深さの評価に対してのみ考慮されている。裏面剝離および貫通限界厚さに対する算定式において、飛来物の先端形状を直接考慮したものはない。ただし、これらの算定式において、たとえば、Degen式<sup>11)</sup>のように貫入深さの関数として裏面剝離限界厚さを求めている場合、貫入深さを求める段階で上述した形状係数が使用され、結果として限界厚さを求める算定式の中に反映される。しかし、これらの裏面剝離や貫通限界厚さを求める式は基本的に先端が平坦な場合の実験に基づき得られた式であり、先端形状が裏面剝離等の破壊モードに及ぼす影響について、現状では実証されているとは言い難い。

図—3.7に先端形状を変えた場合の実験結果を示す。先に述べたが限界速度には範囲があるため、先端形状が破壊に及ぼす影響は明確ではないが、既述の算定式の中で先端形状の効果が考慮されているDegen式(貫通)とAdeli & Amin式<sup>12)</sup>(裏面剝離、貫通)とを用いて、その影響について検討してみる。Adeli & Amin式において裏面剝離および貫通限界速度は共に形状係数の—

1/2乗に比例しており、Degen式において貫通限界速度は形状係数の—1/1.8乗に比例している。

ここで、先端形状が平坦な場合における裏面剝離および貫通限界速度を実験結果より安全側に、各々16.80 m/sおよび36.83 m/sとして、先端形状が球状のものと円錐形状の場合の限界速度を求めると、表—3.5のようになる。

同表に示されるように、先端形状が異なった場合について、両式より得られた結果は実験結果に対し、安全側の値を与えることが分かる。

## 4. 算定式の提案

### (1) 裏面剝離に対する算定式

裏面剝離に対する算定式はChang式導入<sup>10)</sup>の過程で用いられている「鉄筋コンクリートスラブに飛来物が衝突するとき、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負の曲げモーメントが生じてスラブが曲げ降伏するものと仮定し、裏面剝離が発生するときにはこの変形に対するスラブの吸収エネルギーと飛来物の運動エネルギーが釣り合う」という考えに基づいて求めた。すなわち、 $1/2 MV^2 = 2\pi R M_u r_u = 2\pi R t_s^2 f_c' r_u$ として $t_s$ と $V$ の関係を導いている。ここで、 $t_s$ は裏面剝離限界厚さ、 $V$ は飛来物衝突速度(m/s)、 $d$ は飛来物先端径(m)、 $M$ は飛来物質量、 $f_c'$ はコンクリート圧縮強度(Mpa)、 $R$ は影響半径、 $M_u$ は終局曲げモーメント、 $r_u$ は終局回転角である。また、3章(2)b)で示したように本式は限界厚さに対するコンクリート強度の影響も比較的良く考慮されている。Chang式では上記の考えに基づき、次式を誘導している。

$$t_s = a_s \left( \frac{V_0}{V} \right)^{0.13} \frac{(MV^2)^{0.4}}{d^{0.2} (f_c')^{0.4}} \quad (4-1)$$

ここで、 $V_0$ は基準速度(60.96 m/s)である。Chang式において $a_s$ は確率変数として過去の実験データをもとにベイズの定理を用いて定められている(Chang式では $a_s = 8.42 \times 10^{-3}$ )が本論文では3章で示したSLB-20での実験結果での諸値を用いて $a_s$ を一義的に定めた。すなわち、 $t_s = 0.2$  m、 $V = 16.80$  (m/s)、 $d = 0.098$  (m)、 $M = 70$  (kg)、 $f_c = 30.8$  (Mpa)とすると $a_s = 8.01 \times 10^{-3}$ となる。

### (2) 貫通に対する算定式

貫通に対する算定式についてもChang式の導入<sup>10)</sup>の過程で用いられている「ミサイルが通過したときの仕事とミサイルの運動エネルギーが等しい」という考えに基づき求めた。すなわち、 $1/2 MV^2 = \int_0^{t_p} f(1-x/t_s) dx$ として $t_p$ と $V$ の関係を求めている。

ここで  $t_p$  は貫通限界厚さ,  $x$  は貫入量,  $f$  はコンクリート強度や飛来物先端径等によって定まる値である。Chang 式では, 上記の考え方にに基づき次式を導き,

$$t_p = a_p \left( \frac{V_0}{V} \right)^{0.25} \left( \frac{MV^2}{df_c} \right)^{0.5} \quad (4-2)$$

$a_p$  を実験結果より求めた。

ここで,  $a_p$  は実験により定まる定数である。裏面剝離限界式の場合と同様 Chang 式では  $a_p$  をベイズの定理より求めている (Chang 式では  $a_p = 1.10 \times 10^{-3}$ ) が, 本論文では 3 章で示した SLB-20 の実験での諸値を用いて  $a_p$  を一義的に定めた。すなわち,  $t_p = 0.2 \text{ m}$ ,  $V = 36.83 \text{ m/s}$ ,  $d = 0.098 \text{ (m)}$ ,  $f_c = 30.8 \text{ (Mpa)}$  とすると  $a_p$  は  $9.94 \times 10^{-4}$  となる。

### (3) 先端形状の影響

3 章 (2) c) で述べたように, 先端形状の影響を形状係数によって表した既応の算定式と実験結果との比較より, 限界速度が形状係数の  $-1/2$  乗,  $-1/1.8$  乗に比例するものとしても, 概ね実験結果と一致することが明らかとなった。この結果を以下の点に考慮して式 (4-1) および (4-2) に適用する。ひとつは破壊モードに対してより安全側に評価を与えることから  $-1/1.8$  乗を採用すること。もうひとつは式 (4-1) および (4-2) は先端が平坦な場合に対する式であることから, この場合の形状係数を 1 とし, 球状, 鋭い場合は修正 NDRC 式における形状係数  $N$  に  $(1/0.72)$  をかけて換算した値を用いた。

その結果を限界厚さに注目して整理すると,

$$t_s = a_s \alpha \left( \frac{V_0}{V} \right)^{0.13} \frac{(MV^2)^{0.4}}{d^{0.2} (f_c)^{0.4}} \quad (4-3)$$

となる。ここで,  $a_s : 8.01 \times 10^{-3}$ ,  $\alpha$ : 裏面剝離に対する形状係数 (平坦: 1.0, 球状: 1.13, 鋭い: 1.18) である。

### 貫通限界厚さ

$$t_p = a_p \beta \left( \frac{V_0}{V} \right)^{0.25} \left( \frac{M \cdot V^2}{df_c} \right)^{0.5} \quad (4-4)$$

となる。ここで,  $a_p : 9.94 \times 10^{-4}$ ,  $\beta$ : 貫通に対する形状係数 (平坦: 1.00, 球状: 1.1, 鋭い: 1.21) である。

### (4) まとめ

以上に述べられた条件の範囲ではあるが, 貫通および裏面剝離に対する限界板厚の算定式を提案した。これら算定式による計算結果を実験結果上にプロットしたものを図-4.1 から図-4.3 に示す。図-4.1 は SLB-10, 20 および 30 の試験体を用いた試験結果で飛来物の先端形状は“平坦”の場合である。図-4.2 は SLB-20 (普通コンクリート) および HiSLB-20 (高強度コンクリート)

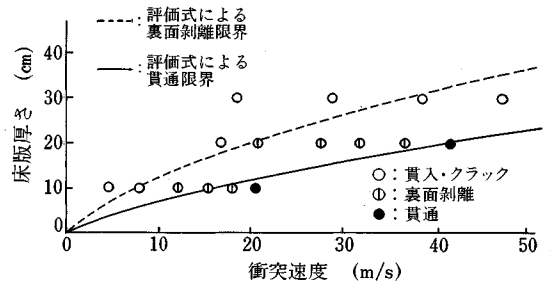


図-4.1 算定式と実験結果の比較 (板厚の影響)

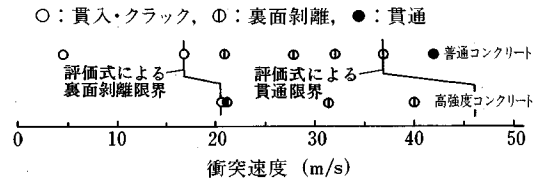


図-4.2 算定式と実験結果の比較 (コンクリート強度の影響)

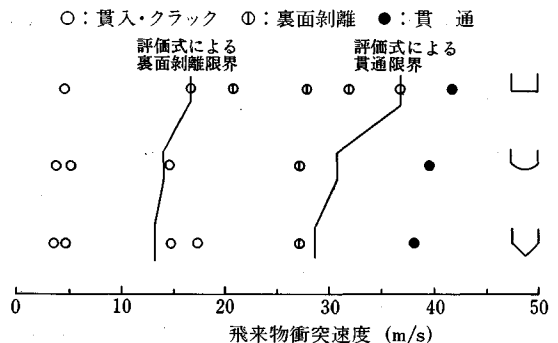


図-4.3 算定式と実験結果の比較 (先端形状の影響)

の実験結果をプロットしたものであり飛来物の先端形状は“平坦”である。また, 図-4.3 は先端形状をパラメーターとした実験結果をプロットしたものである。

## 5. 算定式の検証

4 章で提案した算定式の精度や適用範囲を検証するため, 以下に示す実験の結果と算定式による計算結果の比較を行った。各実験の実験条件等の詳細は文献 (13), 3) および 4) に述べられているので, ここでは概略を述べる。

シリーズ 1) ミサイル径 23 cm, ミサイル速度 40 m/s ~ 250 m/s, ミサイル質量は 50 kg ~ 200 kg, 床版厚さは 40 cm, 50 cm, 60 cm, コンクリート設計基準強度 23.5 Mpa

シリーズ 2) ミサイル径 30 cm, ミサイル速度 100

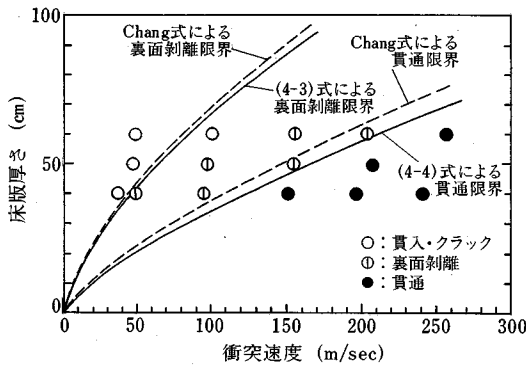


図-5.1 算定式と実験結果(シリーズ1)の比較

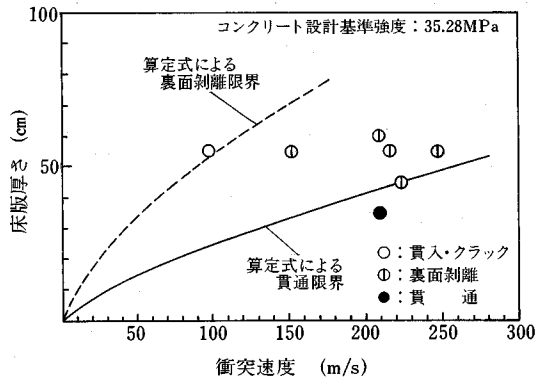


図-5.2 算定式と実験結果(シリーズ2)の比較

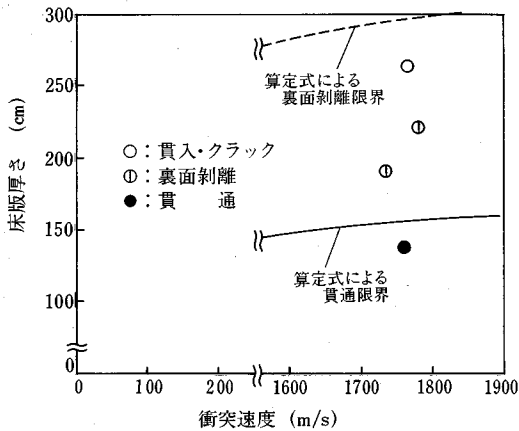


図-5.3 算定式と実験結果(シリーズ3)の比較

m/s~250m/s, ミサイル質量は 100 kg ~200 kg, 床版厚さは 35 cm, 55 cm, 60 cm, コンクリート設計基準強度 23.5 Mpa と 35.28 Mpa

これらの実験は剛飛来物が原子力施設に衝突した場合の挙動を検討するために実施したものである。ミサイル

はミサイル内に充填された火薬により加速され、所定の速度に達した後、床版に衝突する。ミサイルの先端形状は“平坦”である。

シリーズ3) 実物の航空機エンジン GEJ 79, エンジン径約 76 cm, エンジン質量約 1700 kg, 衝突速度 215 m/s, 床版厚は 90 cm, 115 cm, 135 cm, 160 cm

この実験は, Soft Missile の範中に入るものであるが, 文献5) にこの実験結果に基づき同一諸元をもつ Hard Missile に対して得られる限界板厚に対する剛性を考慮した低減係数が提案されており, この値を用いて Hard Missile に対する限界板厚に換算して比較を行った。

これらの実験と4章で提案した算定式との比較を図-5.1~図-5.3に示す。これらの図より明らかなように提案した算定式による結果は速度, 重量および先端径等の飛来物の諸元が異なる場合でも実験結果とよく一致し, 本式の適用性が確認された。なお, 図-5.1に参考として, Chang 式により求めた限界厚さを示した。

## 6. 結 論

衝撃実験をもとに, 裏面剝離, 貫通限界板厚を推定する算定式を提案した。これを他の実験結果と比較することによりその適用性について検討した結果, 速度が 250 m/s, 重量がおおよそ 1800 kg 程度で先端の径が 76 cm 程度までの飛来物に本式が適用できることが明らかとなった。また, 先端形状の影響について従来の成果をベースに算定式に取入れた。先端形状が鉄筋コンクリートの破壊モードに及ぼす影響については十分な検証が行われていないので今後, さらに適用性を確認していく必要があると考える。

謝辞: 本研究の推進にあたっては, 日本大学講師, 能町純雄先生室蘭工業大学, 岸助教授より多くの有益な御助言をいただき, また, 実験の実施においては多くの方の御協力を頂いた。ここに感謝の意を表したい。

## 参考文献

- 1) 原子力工業, 第35巻, 第9号, p.29, 1989年1月。
- 2) MUTO, K. et al : Experimental studies on local damage of reinforced concrete structures by the impact of deformable missiles part 1-Outline of test program and small-scale tests-, *Proceedings of 10th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology*, Aug.1989.
- 3) ESASHI, Y., OHNUMA, H. and ITO, C. et al : Experimental studies on local damage of reinforced concrete structures by the impact of deformable missiles Part 2-Intermediate-scale tests-, *Proceedings 10th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology*, Aug.1989.

- 4) MUTO, K. et al : Experimental studies on local damage of reinforced concrete structures by the impact of deformable missiles Part 3-Full-scale tests-, *Proceedings of 10th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology*, Aug.1989.
- 5) ESASHI, Y., OHNUMA, H. and ITO, C et al : Experimental studies on local damage of reinforced concrete structures by the impact of deformable missiles Part4-Overall evaluation of local damage, *Proceedings of 10th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology*, Aug.1989.
- 6) KENNEDYR, P. : A review of procedures for the analysis and design of concrete structures to resist missile impact effects, *Nuclear Engineering and Design* 37, 1976.
- 7) 角田, 井藤, 藤田 : 鉄筋コンクリートスラブの押抜きせん断耐力に関する実験的研究, 土木学会論文報告集, 第228号, 1974年8月.
- 8) SUARIS, W. and SHAH, S. P. : Experimental properties of materials subjected to impact, *Proceedings of Symposium on Concrete Structures Under Impact and Impulsive Loading*, June,1982.
- 9) 竹田仁一 et al : コンクリートと衝撃, コンクリート工学, Vol. 19, No. 4, 1977年4月.
- 10) CHANG, W. S. : Impact of solid missiles on concrete barriers, *Journal of the Structural Division, Proceedings of ASCE*, Vol.107. No.ST2, Feb.1981.
- 11) DEGEN, P. P. : Perforation of reinforced concrete slabs by rigid missiles, *Journal of the Structural Division, Proceedings of ASCE*, Vol.106. No.ST7, July,1980.
- 12) ADELI, H. and AMIN, A. M. : Local effects of impactors on concrete structures, *Nuclear Engineering and Design* 88, 1985.
- 13) 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, 電力中央研究所研究報告 U24, 1991年7月.

(1993. 8. 12 受付)

## DESIGN FORMULA OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES AGAINST RIGID MISSILE IMPACT

Chihiro ITO, Koji SHIRAI and Hiroshi OHNUMA

For the design of concrete containment structures built in nuclear power stations in Japan, internal pressure, temperature load and earthquake load have so far been considered as the major types of load that could result from accident. In some foreign countries, impact load caused by collision of missile is taken into consideration for the design of this kind of structures as well. Also in Japan, in the design of the repossessing plants which is now under construction at Shimokita area, air craft crash is taken into account. In this study, in order to establish the design method of concrete structures against impact due to collision of missile, the impact tests have been carried out using hard missile with the velocity from 4.0m/s to 250m/s. Based on these results, we proposed the design method of reinforced concrete structure against the collision of hard missile.