

(5) 剛飛来物の衝突に対する鉄筋コンクリート床版の設計評価式

(財) 電力中央研究所 ○伊藤 千浩
白井 孝治
大沼 博志
日本大学 生産工学部 能町 純雄

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物の耐衝撃性に関する研究は、軍事的な目的で第2次世界大戦中盛んに行われたが、戦争の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ともない、その信頼性の向上のために、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。初期のころは、戦中のデータあるいは評価式のレビューが主であったが、戦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。本論文は、これまでの研究成果をレビューするとともに、当所で実施した衝撃実験の概要について述べたものである。

2. 既往の評価式

飛来物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、図-1に示す4種類に分類される¹⁾。本論文では、図-1 a, b, c に示した局部破壊を対象とした設計法について述べる。

耐衝撃設計に当っては、設計シナリオに基づき、裏面剥離は許容するが貫通は防護する等の評価基準が設定される。したがって、設計においては、速度、重量、大きさが与えられた飛来物に対し、裏面剥離や貫通を防ぐ鉄筋コンクリート構造物の板厚(限界板厚)を決めることが主たる目的となる。

このため、裏面剥離や貫通について、その限界板厚を求める評価式がこれまでにいくつか提案されている。これらの一覧を表-1に示す。先にも述べたように、戦後から原子力による発電が行われる狭間の1950年代には、評価式の提案が行われていないことがわかる。

代表的ないくつかの式について内容を述べる。

修正 NDRC 式

1946年米国国防委員会(National Defence Research Committee)はマッシュパなコンクリートに剛飛来物が衝突した場合の貫入深さに関する NDRC 式を提案した。この式は貫入深さのほかに、衝撃力-時間履歴および貫入深さ-時間履歴を計算することが出来るものである。この NDRC 式の特長は、理論に基づいているので、精度良く試験データの範囲外に外挿することが出来ることである。しかし、残念ながら、1946年以降、コンクリートへの飛来物貫入に関する興味が薄れ、NDRCは、研究を中止し、提案した NDRC 式については最近まで極秘扱いとされた。しかし、1966年、理論的・実験的に再検討が行われ ACE式における裏面剥離および貫通

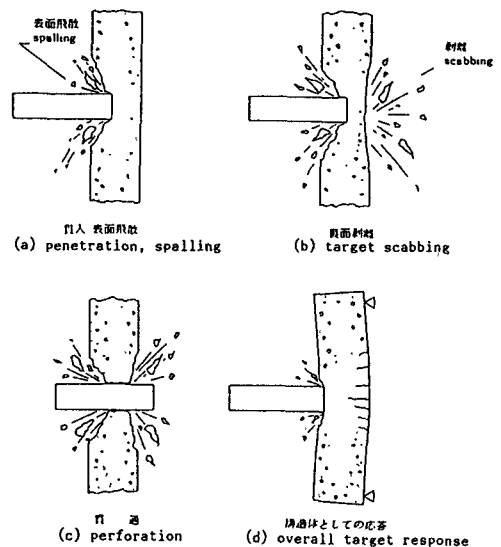


図-1 飛来物の衝突による鉄筋コンクリートの破壊形態¹⁾

に対する評価の考え方を取り入れ、修正 NDRC 式として提案された。

IRS 式

西独の原子炉安全協会がファントム RF-4E が 215m/s の速度で衝突した場合の限界厚さを求めるために提案した式である。評価式の基となったデータおよび 215m/s の根拠については、不明である。

CEA-EDF 式

1974年フランスにおいて、貫通限界速度（厚さ）に対する独自の評価式を求めるため、衝撃実験のプロジェクトが開始された。本式は、その成果として提案された評価式である。

Chang 式

この評価式は、飛来物の運動エネルギーとコンクリート床版の吸収エネルギーの釣り合いから、簡略化されたモデルを用いて理論的に求められた。この式には、不確定なパラメータ（鉄筋やコンクリートの強度、ミサイルの衝突位置や角度など）に関する係数が含まれている。このため、この係数を確率変数として取り扱い、過去の実験結果をもとに、ペイズの更新過程を用いた統計的期待値として求めたものである。

UKAEA 式

UKAEA (United Kingdom Atomic Energy Authority) が独自の実験および文献調査より収集したデータをもとに提案した式である。

これらの評価式は、今後予定している実験結果をもとに修正していく予定となっている。

表-1 局部破壊評価式

～1950年	1960年～		1980年～	
修正 PENTRY 式 (米 1910) 浜田式 (日 1940) ACE式 (米 1946) NDRC式 (米 1946)	修正 NDRC 式 (米 1966) Amman & Whitney 式 (米 1965) 修正 BRL 式 (米 1968) IRS 式 (独 1973)	Bechtel 式 (米 1975) Stone & Webstar 式 (米 1975) Kar 式 (米 1977) CEA-EDF 式 (仏 1979)	Degen 式 (米 1980) Chang 式 (米 1981) 修正 Halder & Miller 式 (米 1983) Adeli & Amin 式 (米 1985)	電研式 (日 1986) UKAEA 式 (英 1987)

3. 評価式の適用性

3.1 衝撃実験

当所では、飛来物の衝突に対する鉄筋コンクリート構造物の評価手法を確立するため、これまでに数多くの衝撃実験を行ってきた。実験は、2つの Phase からなり、Phase-1では、比較的小型(重量 70kg, 径 10cm)で中速度(4.0m/s ~ 42m/s)の飛来物と厚さ 20cm, 縦×横 1.5m × 1.5mの鉄筋コンクリート床版を用いた実験を行った。

ここでは、主に、衝突速度、コンクリート強度、飛来物の先端形状のパラメーターを変えた実験を行った。実験条件の一覧を表-2に示す。

Phase-2では、重量 50~200 kgf, 衝突速度 40m/s~250m/s の飛来物と 縦×横 2.5m×2.5m で厚さ40cm, 50cm および 60cm の鉄筋コンクリート床版を用いた実験を行った。

実験条件の一覧を表-3に示す。

表-2 Phase-1 実験条件一覧







実験 No.	飛来物重量 (kgf)	飛来物衝突速度 (m/s)			床版厚さ (cm)	コンクリート強度 (kgf/cm ²)	パラメーター	
		4.6	16.8	20.8			27.9	飛来物先端形状
A	70	32.0	36.8	41.8	20	240		0.5
B	70	20.6	21.2	31.4	20	420		0.5
C	70	3.7	5.1	14.6	20	240		0.5
		4.7	14.9	17.5				

表-3 Phase-2 実験条件一覧

実験 No.	飛来物重量 (kgf)	飛来物衝突速度 (m/s)					床版厚さ (cm)	コンクリート強度 (kgf/cm ²)	パラメーター		
		40	50	100	150	200			250	飛来物先端形状	鉄筋比 (%片側)
A	50	150					40	240		0.5	
	100	40	50	100	150	200					250
	150	150									
	200	150									
B	100	50 100 150 200					50	240		0.5	
		50	100	150	200	250					
C	50	200 20					60	240		0.5	
	100	50	100	150	200	250					
	150	200									

3.2 評価式の検証

本説では、Phase-2の実験結果に基づいた評価式の検証結果について述べる。表-4にPhase-2での実験結果の一覧を示す。同表に示されるように同一板厚の場合、速度および重量が増加するに従い破壊モードが、ひびわれ→裏面剥離→貫通と変化して行くことがわかる。また、同一速度、重量の場合には、板厚が薄い方が損傷が大きいことがわかる。写真-1に、実験で得られた代表的な破壊モードを示す。この写真は、同一板厚(40cm)で、速度の違いにより、破壊モードが異なった例を示したものである。

次に破壊モードについて先に述べた評価式による計算結果と、この実験結果との比較を行い、評価式の適用性について検証を行う。

各評価式ごとに実験結果と比較したものを図-2に示す。

これらの図から裏面剥離、貫通に対し適用性があると考えられる式は、次のようになる。

裏面剥離

Bechtel Chang 電研

貫通

CEA-EDF Chang 電研 Degen

これらの式の中で、電研式は、比較的精度良く実験結果と一致しており、他の式は、幾分安全側の評価を与えている。これらの式の内容について、とりまとめたものを表-5に示す。

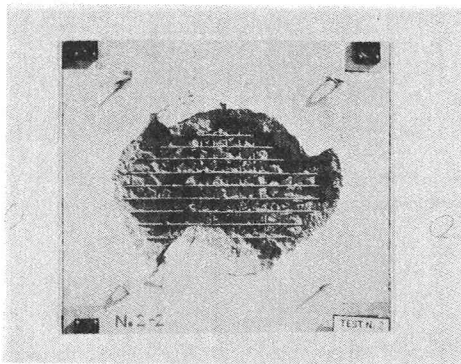
表-4 実験結果のまとめ-破壊モード-

試験 No.	飛 来 物						試験コンクリート 床版板厚 (cm)
	重量 (kgf)	速 度 (m/s)					
		40	50	100	150	200	
I	50				⊕		40
	100	○	⊕	⊕	●	●	
	150				●		
	200				●		
II	100		○	⊕	⊕	●	50
III	50					○	60
	100		○	⊕	⊕	●	
	150					●	

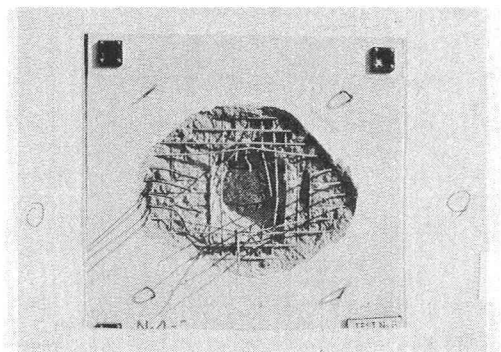
○：ひびわれ ⊕：裏面剥離 ●：貫通

4. おわりに

実験結果と評価式を比較することにより、適用性の高い評価式を明らかにした。しかし、本実験は、ある限られた条件のもとで行われたものであり、今後、より広い範囲での実験を行うことにより評価式の信頼性の向上が望まれる。最後に、実験の実施およびデータの整理にあたっては、前田建設工業(株)河野一徳氏に多大なご協力をいただいた。ここに感謝の意を表します。



飛来物速度：100 m/s
飛来物重量：100 kgf
床版厚さ：40 cm



飛来物速度：250 m/s
飛来物重量：100 kgf
床版厚さ：40 cm

写真-1 実験結果 破壊モード

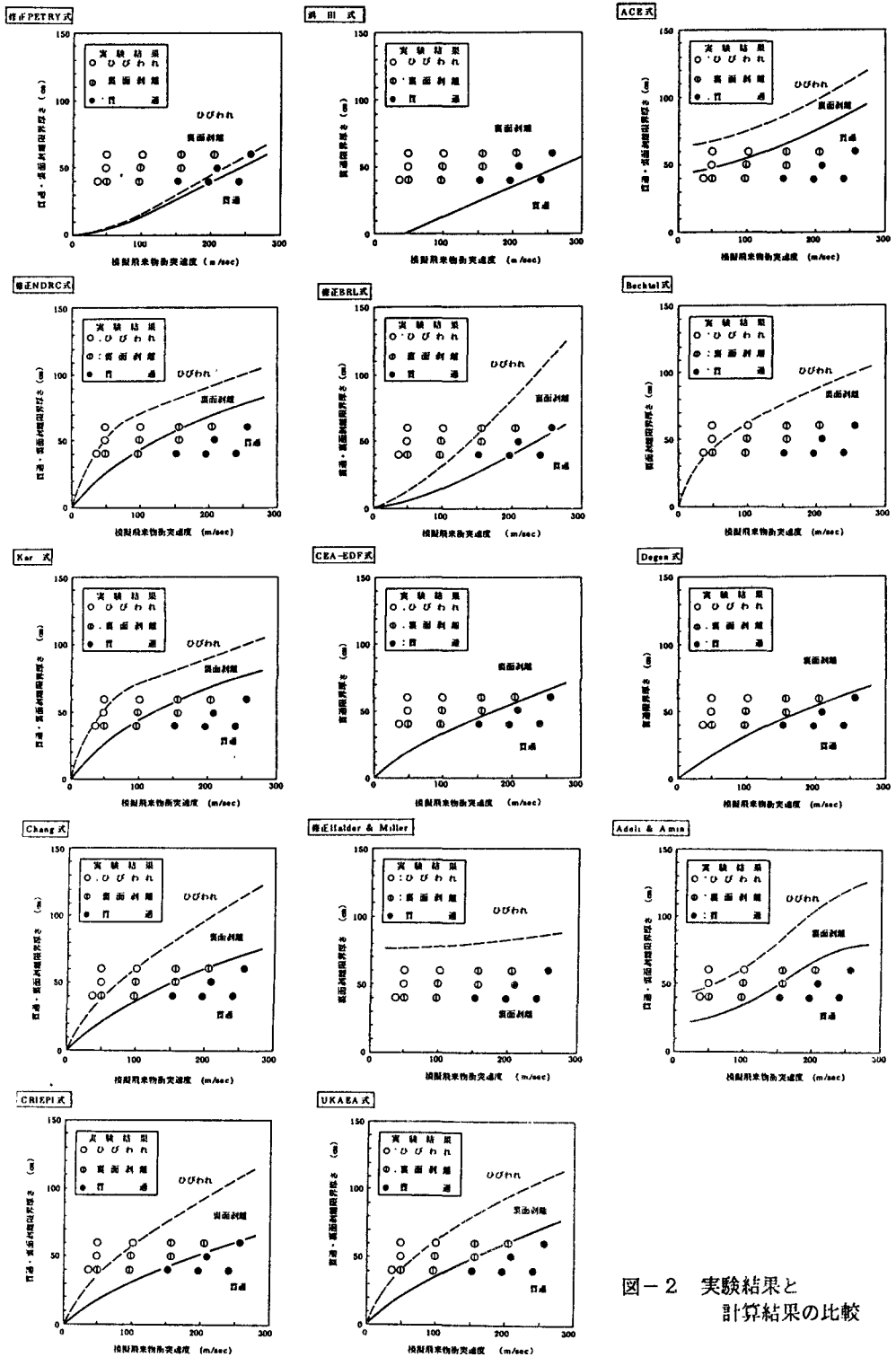


図-2 実験結果と計算結果の比較

表-5 鉄筋コンクリート局部破壊評価式一覧表

No.	評価式名称	項目		備考	飛来物の条件		文献	
		評価式	項目		重量	速度		直径・形状
1	Bechtel式 (1975)	$s = \frac{15.5}{\sqrt{f'c}} \frac{W^{0.4} V^{0.5}}{d^{0.2}}$ (solid missile)	貫通限界厚さ e	$4500 \leq f'c \leq 5700 (\text{lb/in}^2)$ $1.5 < t/d < 3$ $4400 \leq f'c \leq 5700 (\text{lb/in}^2)$ $1.4 < t < 2.8$		径 8inの パイプ	[1]	
		$s = \frac{5.42}{\sqrt{f'c}} \frac{W^{0.4} V^{0.65}}{d^{0.2}}$ (pipe missile)						
2	CEA-EDF式 (1979)	—	$e = 0.0321 (f'c)^{-3/8}$ $\cdot \rho^{-1/8}$ $\cdot \left(\frac{W}{d}\right)^{1/2} \cdot V^{3/4}$	$65.6 < V < 656 \text{ ft/sec}$ $0.3 < e/d < 4$ $435 < f'c < 653 \text{ lb/in}^2$ $2.7 \times 10^{-3} < \gamma < 1.08 \times 10^{-2}$ lb/in^3 $66.1 < W < 756 \text{ lb}$	$33.1 \sim 661$ lb	$\phi 3.9 \sim 11.8 \text{ in}$ 先端平坦 $e/d = 0.3 \sim 4.0$	[2] [3] [4]	
		—						
3	Degen式 (1980)	—	$e/d = 0.69 + 1.29(x/d)$ $1.52 \leq x/d \leq 13.42$ $e/d = 2.2(x/d) - 0.3(x/d)^2$ $x/d \leq 1.52$	x/d は次式 (修正 NDRC 式) ^{a)} より求める。 $x/d = \left[2 \left(\frac{180}{\sqrt{f'c}} N d^{0.2} \cdot D(V/1000)^{1.9} \right)^{0.5} \cdot D(V/1000)^{1.9} + 1 \right]$ $x/d \leq 2.0$ $x/d \geq 2.0$	$80.2 \sim 995$ ft/sec	$3.9 \sim 12.2 \text{ in}$ $h/d = 0.5 \sim 2.7$	[5]	
		—						
4	Chang式 (1981)	$s = 9.92 \left(\frac{V_0}{V}\right)^{0.13} \cdot \frac{(MV^2)^{0.4}}{d^{0.2} (f'c)^{0.4}}$	$e = 3.28 \left(\frac{V_0}{V}\right)^{0.25} \cdot \left(\frac{MV^2}{df'c}\right)^{0.5}$	V_0 は参考速度であり、本式では $V_0 = 200 \text{ ft/sec}$ としている。	$0.24 \sim 756$ lb	$54.8 \sim 1024$ ft/sec	$0.79 \sim 11.8 \text{ in}$	[6]
5	電研式 (1986)	$s = 0.40 \left(\frac{V_0}{V}\right)^{0.13} \cdot \frac{(MV^2)^{0.4}}{d^{0.2} (f'c)^{0.4}}$	$e = 0.03 \left(\frac{V_0}{V}\right)^{0.25} \cdot \left(\frac{MV^2}{df'c}\right)^{0.5}$	独自の試験結果をもとに、 chang 式を變形したものの。	$88 \sim 440$ lb	≤ 820 ft/sec	$3.9 \sim 11.8 \text{ in}$ 円柱 先端平坦	[7]

* ϕ b, inch, 速度 V (f/sec)

参考文献

- 1) G. E. SLITER ; ASSESSMENT OF EMPIRICAL CONCRETE IMPACT FORMULAS JOURNAL OF THE STRUCTURAL DIVISION, PROCEEDINGS OF ASCE VOL. 106, No. ST5, MAY. 1980.
- 2) C. BERRIAUD, A. SOKOLOVSKY, R. GUERAUD, J. DULAC AND R. LABROT ; LOCAL BEHAVIOUR OF REINFORCED CONCRETE WALLS UNDER HARD MISSILE IMPACT 4TH SMIRT, 1977.
- 3) C. BERRIAUD, P. VERPEAUX, A. HOFFMANN, P. JAMET AND R. AVETFLANCARD ; TEST AND CALCULATION OF THE LOCAL BEHAVIOUR OF CONCRETE STRUCTURES UNDER MISSILE IMPACT 5TH SMIRT, 1979.
- 4) C. BERRIAUD, P. VERPEAUX AND P. JAMET ; CONCRETE WALL PERFORATION BY RIGID MISSILE CONCRETE STRUCTURE UNDER IMPACT AND IMPULSIVE LOADING, 1982.
- 5) P. P. DEGEN ; PERFORATION OF REINFORCED CONCRETE SLABS BY RIGID MISSILES JOURNAL OF THE STRUCTURAL DIVISION, PROCEEDINGS OF ASCE, VOL. 106, No. ST7, JULY. 1980.
- 6) W. S. CHANG ; IMPACT OF SOLID MISSILES ON CONCRETE BARRIERS JOURNAL OF THE STRUCTURAL DIVISION, PROCEEDINGS OF ASCE, VOL. 107, No. ST2, FEB. 1981.
- 7) 大沼、伊藤、佐藤、高野；鉄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 電力中央研究所 研究報告 NO. 384027, APRIL. 1985.
- 8) 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.