

## (28) 縮尺模型と実物による鉄筋コンクリート板の衝撃実験と解析

IMPACT TEST AND ANALYSIS  
OF SMALL-SCALE AND FULL-SCALE REINFORCED CONCRETE PANELS

坪田張二\*, 河西良幸\*, 小鹿紀英\*\*, 澤本佳和\*\*\*, 森川博司\*\*\*\*

Haruji TSUBOTA, Yoshiyuki KASAI, Norihide KOSHIKA, Yoshikazu SAWAMOTO and Hiroshi MORIKAWA

\* 工博 鹿島技術研究所第三研究部室長 (☎182 東京都調布市飛田給2-19-1)

\*\* 工博 鹿島建設株式会社 小堀研究室 (☎107 東京都港区赤坂6-5-30)

\*\*\* 鹿島技術研究所第三研究部研究員 (☎182 東京都調布市飛田給2-19-1)

\*\*\*\* 鹿島建設株式会社情報システム部開発課長 (☎107 東京都港区元赤坂1-2-7)

キーワード：鉄筋コンクリート，航空機エンジン，局部破壊，相似則，個別要素法

(reinforced concrete, aircraft engine, local damage, law of similarity, discrete element method)

## 1. はじめに

航空機のエンジンのような比較的硬い飛来物が鉄筋コンクリート板(以下RC板と略す)に衝突すると、貫入・裏面剥離・貫通のような局部損傷が生ずる。これらの局部損傷の程度は、飛来物の速度・重量・形状・硬さ、RC板の厚さ、コンクリート強度・鉄筋量等により影響を受ける。これらの多くのパラメータの影響を実物に近い試験体で実験的に評価するのは莫大な費用と時間が掛かるので、通常模型実験の手法が用いられる。

筆者らは、飛来物として航空機エンジン、ターゲットとして鉄筋コンクリート板を用いた1/7.5縮尺模型による衝撃実験<sup>1)2)</sup>を行い、各種のパラメータの影響度を把握するとともに、最終的には実物航空機エンジンによる衝撃実験<sup>1)2)</sup>を行って衝撃応答の評価や相似則の妥当性を確認している。更に、衝撃応答の評価に有効性を発揮している個別要素法<sup>3)4)</sup>によって模型と実物の衝撃実験結果を解析し、衝撃実験の相似則の妥当性を解析面からも確認した。そこで、本報告では模型実験における柔飛来物及びターゲットのモデル化と衝撃実験の相似則に関して、実験及び解析の両面から検討した結果を報告する。

## 2. 衝撃実験の目的と概要

## (1) 衝撃実験の目的

本論文で扱う衝撃実験は航空機のエンジンのような柔らかい飛来物がRC板に高速で衝突した場合の現象である。飛来物が鉄筋コンクリート板に衝突すると、図-1に示すような貫通や裏面剥離のような局部損傷を生ずる。それらの損傷が生ずるぎりぎりの厚さを「限界厚さ」と呼び、飛来物に対する耐衝撃設計では重要な評価項目である。従来、飛来物が非常に硬い剛飛来物の限界厚さの評価式<sup>10)11)</sup>はいくつか提案されていたが、航空機のエンジンのような柔飛来物の評価式はなかった。柔飛来物の場合にはRC板の損傷が剛飛来物に比べて低減するので、その効果を正確に評価することが耐衝撃設計の合理化につながるようになる。

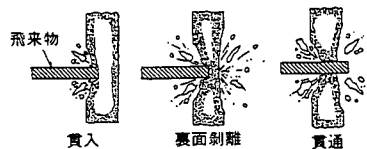


図-1 RC板の局部損傷

## (2) 衝撃実験の概要

以下に示す航空機エンジンの限界厚さの評価に関する一連の衝撃実験では、小型(縮尺1/7.5)、中型(縮尺1/2.5)、実物(縮尺1/1)という異なる縮尺の実験が段階的に実施され、既に報告<sup>1)2)</sup>されている。以下には筆者らが関係した小型及び実物の衝撃実験に関して示す。

小型模型の衝撃実験装置の概要を図-2に、実物の衝撃実験装置の概要を図-3に示す。小型衝撃実験では、火薬を用いた発射装置によって航空機エンジンを模倣した飛来物を高速で発射し、RC板のターゲットに衝突させたものである。

図-3に示す実物衝撃実験は米国サンディア国立研究所 (Sandia National Laboratories, SNLと略す) の屋外実験場で実施したもので、飛来物をロケットによってレールの上を走行させ、ターゲットのRC板に衝突させたものである。

### 3. 模型による衝撃実験の相似則とモデル化

#### (1) 衝突問題の相似則

縮小模型の衝撃実験に用いられる相似則<sup>12)</sup>を表-1に示す。この相似則は模型と実物で同一の材料を用い、実物と模型で同じ応力とひずみを生じさせるという仮定から導かれたものである。衝撃実験で最も重要なパラメータである衝突速度に関しては、模型と実物で同一の値となるが、模型の時間が幾何学的縮尺率 $s$ の比率で小さくなっているため、衝撃問題に重要と言われるひずみ速度は模型の方が実物に比べ $s$ 倍大きくなっている。

この相似則は英国the United Kingdom Atomic Energy Authority (UKAEAと略す) の衝撃実験<sup>12), 13)</sup>やSNLと米国Stanford Research Institute (SRIと略す) でなされたタービンミサイルの衝突実験<sup>14), 15), 16)</sup>でも用いられている。

#### (2) 航空機エンジンのモデル化

表-2は小型及び実物の衝撃実験で用いた実験パラメータを示したものである。まず実験施設の大きさを元に小型実験の幾何学的な縮尺を1/7.5と定めた。飛来物の実験パラメータは飛来物の構造と衝突速度である。小型模型実験では図-4に示すモデル化の方法にしたがってファントム戦闘機のGE-79エンジンの単純化した柔飛来物モデルを以下のように作成した。実物の航空機エンジン(図-4)はコンプレッサー、コンバッションチャンバー、アフターバーナー

とエグゾーストダクトという3つの部分からなる。エンジンは、重量が集中して剛性の比較的高い3つのフレームからなり、その間の部分は軽く柔らかい部材からなっている。アフターバーナーとエグゾーストダクトの剛性は他の部分に比べて非常に低い。このような構造特性を考慮してエンジンを3つの質量を有するばね-マスモデルに理想化した。別に実物エンジンの静的な座屈解析を行って軸方向の挙動を把握し、図-4に示すモデルのばね定数を定めている。エンジン模型の直径と重量は幾何学的縮尺率 $s$ を元に定めている。剛性の小さなアフターバーナーとエグゾーストダクトの部分は重量のみを図-4に示す質点位置に考慮している。そのようにして作成した1/7.5縮尺の航空機エンジン模型が図-5に示す柔飛来物である。また、航空機エンジンのような柔飛来物が局部破壊に及ぼす影響を把握するため、同一の直径と重量を有する剛飛来物も図-5に示すように使用した。

実物実験では図-6に示すように2種類の飛来物、即ち、実物のGE-79エンジンそのものと、小型実験で用いた単純

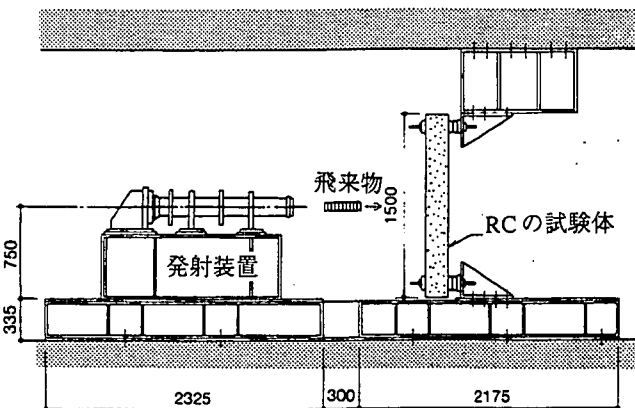


図-2 小型模型の衝撃実験装置

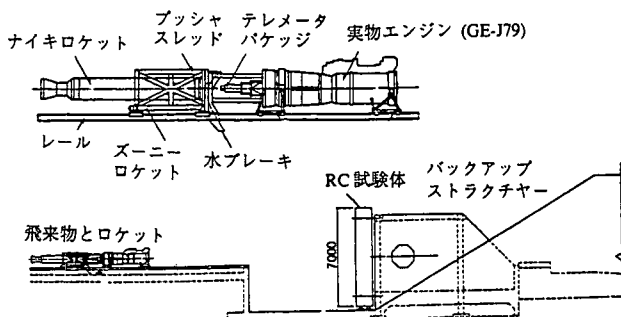


図-3 実物の衝撃実験装置

表-1 衝撃実験の相似則

パラメータ	次元	実物	模型	代表的な項目
幾何学的縮尺率	L	l	s	飛来物及びターゲットの寸法
長さ・変位	L	d	sd	貫入深さ、貫通厚さ、裏面剥離厚さ
質量	M	m	s <sup>3</sup> m	飛来物及びターゲットの質量
時間	T	t	st	衝撃の継続時間
速度	LT <sup>-1</sup>	v	v	飛来物の衝突速度、剥離物の残留速度
応力	ML <sup>-1</sup> T <sup>-2</sup>	$\sigma$	$\sigma$	飛来物及びターゲットの応力
ひずみ	L/L	$\epsilon$	$\epsilon$	飛来物及びターゲットのひずみ
ひずみ速度	T <sup>-1</sup>	$\dot{\epsilon}$	s <sup>-1</sup> $\dot{\epsilon}$	飛来物及びターゲットのひずみ速度
加速度	LT <sup>-2</sup>	a	s <sup>-1</sup> a	飛来物の加速度、減速
力	MLT <sup>-2</sup>	f	s <sup>2</sup> f	衝撃力、支持点反力
エネルギー	ML <sup>2</sup> T <sup>-2</sup>	E	s <sup>3</sup> E	飛来物の運動エネルギー、ターゲットのひずみエネルギー

表-2 衝撃実験の主要なパラメータ

主要なパラメータ		小型模型実験	実物実験	
飛 来 物	縮尺率	1/7.5	1/1	
	重量 (kgf)	3.6	約1500	
	直径 (cm)	10.1	約76	
	種類	剛飛来物	剛飛来物	単純化模型
		エンジン模型	エンジン模型	実物エンジン
衝突速度 (m/s)	100, 150, 215	215		
R C 板	大きさ (m)	1.5×1.5	7×7	
	厚さ (cm)	6~35 (10種類)	90~160 (4種類)	
	主筋比 (%)	0.2, 0.4, 0.6	0.4	
	せん断補強筋比 (%)	0, 0.2, 0.4	0	
コンクリート強度 (MPa)	23.5	23.5		
試験体数	44	6		

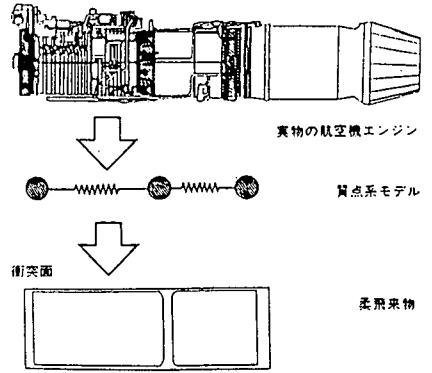


図-4 航空機エンジンのモデル化

化した航空機エンジン模型をそのまま7.5倍して実物大にしたもの、の2種類を用いた。

衝突速度は小型模型実験では100, 150, 215m/sの3レベルを採用したが、実物実験では最も大きな215m/sのみとした。

(3) RC板のモデル化

ターゲットであるRC板は図-7及び図-8に示すように4点支持で、表-2に示すように小型模型では1.5m角の矩形板、実物実験では試験装置の制約もあって7m角の矩形板とした。RC板試験体の実験パラメータは厚さと鉄筋比である。小型模型実験では飛来物の種類や衝突速度を変化させたので、広い範囲の試験体の厚さを設定したが、実物実験では、小型模型実験の結果を踏まえて少ない試験厚さを設定した。小型模型と実物の試験体の厚さは幾何学的縮尺率sで対応するものとした。

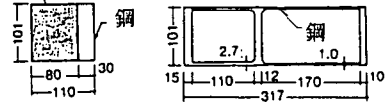
小型模型では鉄筋比を変化せさ、主筋(各面及び各方向)として0.2, 0.4, 0.6%の鉄筋比を、せん断補強筋として0, 0.2, 0.4%を設定した。実物実験では、せん断補強筋のない主筋0.4%を標準試験体として設定した。小型模型や実物でのコンクリート強度は23.5MPaを目標とした。実物実験では、RC板の裏面に鋼製ライナーを設置して、局部破壊の防止効果も把握している。

4. 衝撃実験結果

衝撃実験の結果の詳細は既報<sup>1)2)</sup>に示しているが、模型と実物の相似に関わる結果を示すと図-9の通りである。図-9は、目標とする衝突速度が215m/sと同一である、1/7.5縮尺の航空機エンジン模型と実物エンジンの衝撃実験について、対応する2つの試験体厚さの衝

撃実験後の損傷を比較したものである。小型模型の場合、12cm厚さでは貫通、15cm厚さでは裏面剥離の損傷、実物の場合、小型の12cm厚さに対応する90cm厚さでは貫通限界、15cm厚さにはほぼ対応する115cm厚さでは裏面剥離の損傷で、概ね対応する結果となっている。また小型模型の損傷の大きさを7.5倍した損傷寸法を実物の損傷と比較すると、図-9のように同等な大きさになっている。

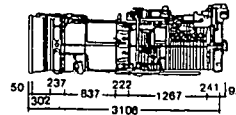
アルミニウム



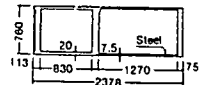
剛飛来物

柔飛来物 (単位:mm)

図-5 小型模型実験の飛来物

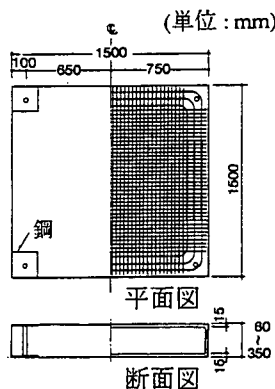


実物エンジン (GE-J79)



単純化模型

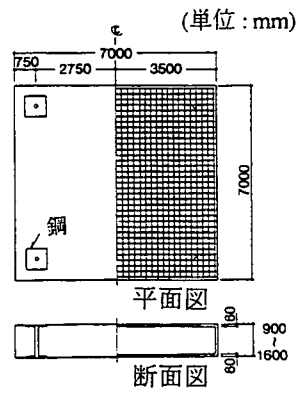
図-6 実物実験の飛来物



平面図

断面図

図-7 小型模型実験のターゲット



平面図

断面図

図-8 実物実験のターゲット

一連の衝撃実験では、小型模型実験での貫通や裏面剥離の限界厚さを7.5倍して実物相当の限界厚さに換算し、実物実験結果と対応させながら、航空機エンジンのような柔飛来物に対する貫通や裏面剥離の限界厚さの評価を行った。その結果、航空機エンジンがRC板に衝突する場合には、貫通限界厚さに関しては、剛飛来物の貫通限界厚さの評価式であるDegen式<sup>10)</sup>に対して0.6倍程度に、裏面剥離限界厚さに関しては、剛飛来物の裏面剥離限界厚さであるChang式<sup>11)</sup>に対して0.55倍程度に各々低減しうること<sup>12)</sup>がわかった。

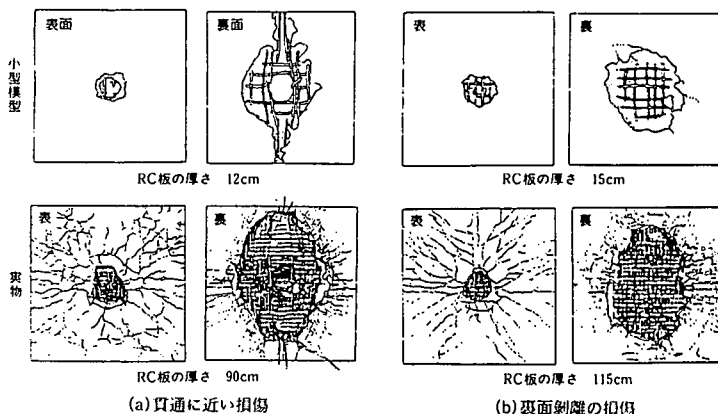


図-9 模型実験と実物実験による損傷の比較 (衝突速度：215m/sの場合)

## 5. 個別要素法による解析

### (1). 解析の目的

筆者らはコンクリートの衝撃破壊解析に個別要素法 (Discrete Element Method, DEMと略す) を適用し、コンクリートシリンダーの一軸圧縮試験<sup>3), 4), 5)</sup> や割裂試験<sup>6)</sup> 等の材料試験, RC板及び鋼製ライナー付きRC板<sup>6), 7)</sup> への剛飛来物及び柔飛来物<sup>3), 8), 9)</sup> の衝撃実験結果を良く説明できる解析結果を得、既に報告している。それらは1/7.5ないし1/10程度の縮小模型実験や実物の衝撃実験のいずれにも適用可能であったことから、本報告では、表-1に示した衝撃実験の相似則に則って作成した1/7.5縮尺と実大のDEM解析モデルに同一の衝突速度を与えて解析し、衝撃実験結果との対応や相似則の確認を行った。

### (2). 解析ケースと解析モデル

図-9に示した1/7.5縮尺の小型エンジン模型と実物エンジンの衝撃実験に関する2ケースについて表-3に示すようにDEM解析を行った。小型模型の15cm厚さの場合を例として解析モデルを図-10に示す。図-10にはエンジン模型の拡大図も並記してある。解析モデル化は既報<sup>9)</sup> に示した方法に準拠し、まず小型模型の15cm厚さの解析モデルを作成した。小型模型の解析モデルは150cm×150cmのRC板の内の直径90cmの円板を解析対象とし、その円周上を固定端とする軸対称とした。実物模型の要素半径、鉄筋径、ピッチ等は基本的に小型模型を7.5倍して表-3のように作成した。衝突速度は2つの実験値の平均である207m/sとして、小型模型及び実物とも同一の値とした。なお、コンクリートの圧縮強度及び粘着力に関しては、既報<sup>3), 8)</sup> に示したように藤本式によってひずみ速度によるコンクリート強度増加を時々刻々考慮した。したがって、小型模型と実物におけるひずみ速度による強度増加の効果は異なっている。

### (3) 解析結果

表-3 DEMによる解析ケース

主要な条件	小型模型実験	実物実験
RC板の厚さ (cm)	15	115
RC板の大きさ (cm)	直径120cmの軸対称	小型模型の7.5倍
飛来物の大きさ (cm)	直径10.1×長さ31.7	
コンクリート強度 (MPa)	23.5	
飛来物の降伏強度 (MPa)	412	
RC板の要素数 (個)	1323	小型模型と同じ
飛来物の要素数 (個)	218	
RC板の要素半径 (cm)	0.3934	小型模型の7.5倍
飛来物の要素半径 (cm)	0.25	
衝突速度 (m/s)	207	
コンクリートの強度増加	藤本式によりひずみ速度に応じて考慮	
計算時間刻み (s)	$2.5 \times 10^{-7}$	$1.875 \times 10^{-6}$

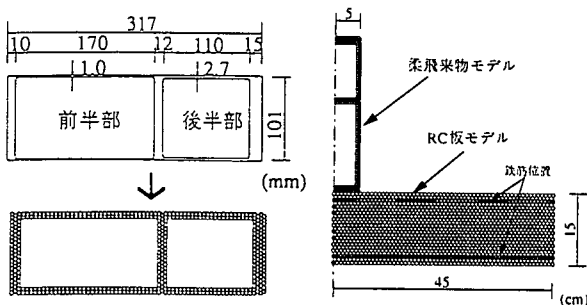
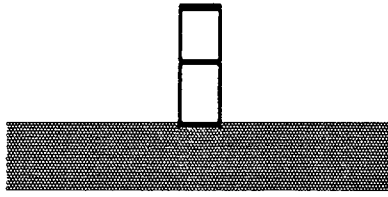
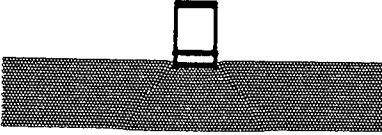


図-10 小型航空機エンジン模型の軸対称解析モデル



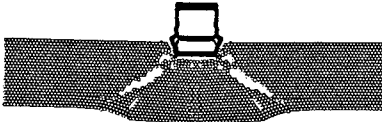
0.25msec



1.0msec

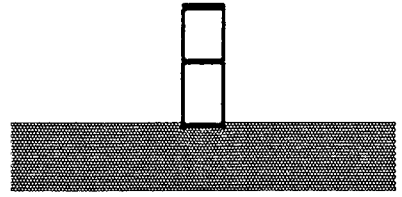


2.0msec

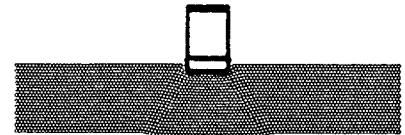


3.0msec

RC 板厚さ 15cm



1.875msec



7.5msec



15.0msec



22.5msec

RC 板 115cm

図-11 1/7.5縮尺小型模型のDEM解析による損傷状況

図-12 実物のDEM解析による損傷状況

図-11及び図-12は、1/7.5縮尺の小型模型実験及び実物実験を対象とした解析結果を示す。図-11の表示に当たっては7.5倍して図-12と対応するようにしている。図-11の小型模型実験の解析では衝突後0.25ms、1.0ms、2.0ms及び3.0msでの損傷状況を示す。図-12の実物実験の解析では、表-1に示した相似則に則って小型模型の7.5倍に相当する1.875ms、7.5ms、15.0ms及び22.5msでの損傷状況を示す。図-11及び図-12によると、ひずみ速度によるコンクリート強度増加の効果は、模型と実験で7.5倍相違しているが、小型模型と実物のDEM解析によるRC板の損傷は概ね対応している。損傷状況は両解析結果とも裏面剥離となっており、衝撃実験と比較的近い損傷となっている。

また、飛来物の貫入速度の時刻歴を図-13に示す。小型模型の解析結果は表-1に示した相似則に則って時間を7.5倍して示した。いずれのRC板厚さの場合とも小型模型実験と実物では良く対応する結果であり、差は小さい。次に飛来物の衝撃力を図-14に示す。この場合、小型模型の解析結果は表-1に示した相似則に則って時間を7.5倍、衝撃力は $7.5^2=56.25$ 倍して示している。貫入量の場合と同じように、いずれのRC板厚さの場合とも小型模型実験と実物では良く対応する結果であり、差は小さい。さらに、力積を比較すると、実物は小型模型の約402倍となり、ほぼ $7.5^3=421.875$ 倍と近い値となっている。

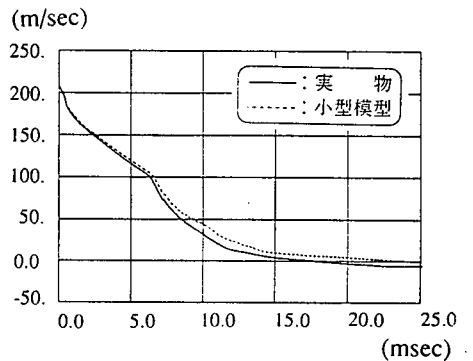


図-13 解析による飛来物の貫入速度

以上の解析結果を総合すると、表-1の相似則に則って同一材料でモデル化して同一の衝突速度を与えて解析すると、1/7.5縮尺模型と実物のひずみ速度に7.5倍の相違があっても実験結果の損傷はほとんど変わらず、模型実験によっても実物の衝撃応答を評価しうると判断される。

#### 6. まとめ

飛来物として航空機エンジン、ターゲットとして鉄筋コンクリート板を用いた1/7.5縮尺模型と実物の衝撃実験と個別要素法による解析を行い、表-1に示す衝突問題における相似則の妥当性を確認した。

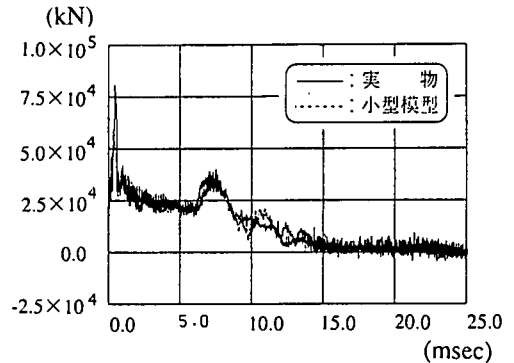


図-14 解析による飛来物の衝撃力

#### [参考文献]

- 1) K. Muto et al., "Experimental Studies on Local Damage of Reinforced Concrete Structures by the Impacts of Deformable Missiles Part1 : Outline of Test Program and Small-Scale Tests, Part2 : Intermediate Scale Test, Part3 : Full-Scale Test, Part4 : Overall Evaluation of Local Damage", 10th-SMiRT, J-Session, pp257-284, August 1989, Anaheim, California, USA
- 2) T. Sugano, H. Tsubota et al. " Local damage to reinforced concrete structures caused by impact of aircraft engine missiles Part 1. Test Program, method, and results, Part 2. Evaluation of test results", Nuclear Engineering Design 140 (1993) .pp407-423
- 3) Koshika, N. et al. , "Quantitative Estimations of Local Damages on Concrete Structures under Impulsive Loadings", Proceedings ISIE, International Symposium on Impact Engineering in Sendai, pp.258-263, 1992
- 4) Sawamoto, Y. et al. , " Analytical studies on impact penetration behavior of concrete structures by discrete element method", 13th-SMiRT, Vol. , , pp219-224, 1995
- 5) 森川博司, 澤本佳和, 小鹿紀英「個別要素法を用いたコンクリートの破壊解析」, 日本建築学会構造系論文集, 第473号, pp127~135, 1995年7月
- 6) Koshika, N., Tsubota, H. et al. " Quantitative Studies on Impact Resistance of Reinforced Concrete Panels with Steel Liners under Impact Loading Part 2 : Analytical Studies for Small-scale and Full-scale Tests", 12th-SMiRT, August, 1993
- 7) 森川博司, 河西良幸, 坪田張二他「飛来物の高速衝突を受ける鋼製ライナー付き鉄筋コンクリート板の耐衝撃性に関する実験と解析」, 日本建築学会構造系論文集, 第477号, pp107~114, 1995年11月
- 8) Morikawa, H. et al. , " Estimation of Impact Strength on Reinforced Concrete Structures by the Discrete Element Method", 12th-SMiRT, August, 1993.7
- 9) 瀬戸裕他「個別要素法を用いたコンクリートの破壊解析 (その11 RCスラブの衝撃実験シミュレーション解析)」, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北海道), pp829~830, 1995年8月
- 10) P.Degen, Perforation of Reinforced Concrete Slabs by Rigid Missiles ,Journal of the Structural Division,ASCE,vol.106,No.ST7, pp.1623-1642,1980
- 11) W.S.Chang,"Impact of solid missiles on concrete barriers", Journal of Structural Division ASCE,Vol. 107, No.ST2, February 1981
- 12) P.Barr and M.L.Brown,"Studies of missile Impact with reinforced concrete structures", Nuclear Energy, 19, No.3,June 1980
- 13) F.Sage and A.Pfeiffer,"Response of reinforced concrete targets to impacting soft missiles an FRGMRT-UKAEA co-operation in tests to validate computer codes and scaling laws", 5th-SMiRT ,J8/4, 1979
- 14) R.L. Woodfin,"Full-scale turbine missile concrete impact tests", Electric Power Research Institute NP-2745, Sandia National Laboratories, January 1983
- 15) S.McHugh, L.Seaman and Y. Gupta." Scale-modeling of turbine missile impact into concrete, scale-model tests of turbine missile containment by reinforced concrete panels, Electric Power Research Institute, NP-2747, SRI International,February 1983
- 16) C.M. Romander and A. Florence,"Scale-model tests of turbine missile containment by reinforced concrete panels", Electric Power Research Institute, NP-2747, SRI International, March 1983