

# 建築施工時の吊荷落下を想定した薄型鉄筋コンクリートスラブの 低速衝突に関する研究

Behaviors of thin reinforced concrete slab under low-velocity impact assuming accidental falling objects during building construction

水島靖典\*

Yasunori Mizushima

\*博(工), 兵庫県立大学講師, 環境人間学部(〒679-0079 兵庫県姫路市新在家本町 1-1-12)

キーワード: 鉄筋コンクリートスラブ, 低速衝突, 実大衝突実験, 有限要素解析

Keywords: reinforced concrete slab, low-velocity impact, full-scale impact test, finite element analysis

## 1. はじめに

建築物の施工中に, クレーンなどで揚重された重量物が万が一落下し, 更に下部のスラブを貫通した場合には, そのスラブ下部にいる人員に甚大な被害をもたらす恐れがある. 特に, 建築工事が道路, 線路上空のような公共動線上空で行われている場合には, その被害は建築現場内部にいる作業員等に留まらず, 第三者にまで被害がおよぶ可能性がある. このようなリスクを避けるために, 公共動線上空の建築工事では, 重量物の落下に備えた膨大な補強工事が求められる, あるいは夜間工事を強いられるという事態を招く可能性があり, 工期, コスト増大の要因となりうる. このような制限が, 利用価値が高いと思われる都市部の公共動線上空の開発を妨げる要因の一つとなっていると考えられる. そのため, 建築施工中の万が一の落下物に対して, 下部のスラブの安全性を確認することができれば, 付加価値の高い公共空間の開発を促進することができると考えられる. それゆえ, 一般的な建築物で用いられている鉄筋コンクリート(RC)スラブの落下物に対する耐貫通性能を把握し, 下部の人員に対する被害を抑制することは重要であるといえる.

一方で, RC 板の耐衝撃性能に関しては, 過去に数多くの研究が実施され, これに基づく貫通限界評価式なども提案されている. 例えば, Muto, Esashi らは RC 板への航空機衝突を想定し, 60~350 mm の厚さの RC 板に衝突速度 100~250 m/s で直径 101~760 mm の飛翔体を衝突する実験を行っている<sup>1)3)</sup>. また伊藤らは 100~300 mm の RC 板に対して, 衝突速度 4.6~47.5 m/s で直径 98 mm の飛翔体を衝突させる実験を行い裏面剥離および貫通限界厚さの評価式を提案している<sup>4)</sup>. この伊藤らの貫通限界

式の他にも多数の実験結果を基に Degen は RC 板の貫通限界を算定する式を提案し<sup>5)</sup>, 現在でも広く用いられている<sup>例えば6)</sup>.

しかしながら本研究で対象とする建築施工時の RC スラブへの落下物の衝突では, 過去の数多くの研究と比較して衝突速度が遅く, 相対的に RC スラブの板厚が小さいことが想定される. 例えば鉄骨造建物の 3 層 1 節での鉄骨建方を想定すると, 吊荷の落下が生じた際の衝突速度は数 m/s~20 m/s 程度であり先に挙げた研究の中では伊藤らの研究の下限程度の速度となる. また同様に鉄骨造建物を想定すると, RC スラブは 150 mm 程度の厚さであることが通常であり, 落下する吊荷として柱部材などを想定するとその外径は 1 m であると考えられる. この時, 飛来物径と RC 板厚の比(衝突径比)は 0.15 となる. これに対して, 伊藤らの研究では最低でも衝突径比が 1.0, Muto らの研究ではおおよび 0.6, Degen 式の適用対象では 0.5 となる. そのため衝突径比 0.15 程度を取りうる建築現場における吊荷落下は, 相対的に RC 板厚が小さいといえる.

一方で, 近年では RC 板への低速衝突に関する研究もいくつか報告されているものの, やはり本研究で対象とする事象よりも RC 板厚が大きいものが多い. 中村らは津波漂流物を想定し, 衝突速度 9.8 m/s 以下での種々の貫通限界式の適用性について検討している<sup>7)</sup>. 衝突径比は 0.8 であり, 本研究の対象事象と比較すると RC 板厚が大きい. また Xiao らも RC 板への低速衝突に着目し, 実験的研究を行っているが, その衝突径比は 0.75~1.0 であり相対的に板厚が大きい<sup>8)</sup>.

そこで本研究では, 一般的な建築物に用いられる床スラブを想定した実大 RC 板の衝突実験を行い, その挙動

を確認する。RC 板および落下衝突物の仕様は統一して、落下高さを変更することで衝突時の落下物速度をパラメータとした実験を行った。

なお、本研究は文献 9), 10), 11)をまとめて編集したものである。

## 2. 実大 RC スラブを対象とした落下衝突実験

### 2.1 試験体

本研究では、公共動線上空建築で採用されることが多い鋼構造建物の RC スラブを想定し、実大試験体による落下衝突実験を行った。落下物は柱部材を想定して角形鋼管を用いた。

RC スラブの概要を図-1 に、配筋を図-2 にそれぞれ示す。RC スラブの厚さは 150 mm、支持スパンは 2600 mm として、鉄骨梁で支持される一方向スラブとした。支持スパンの外側についても 1000 mm ずつ RC スラブを作成した。配筋は上端主筋 D13@150, 同配力筋 D13@200, 下端主筋 D10・13@150, 同配力筋 D10・13@200 とした。配筋についても鋼構造建物の床スラブで一般的に用いられる仕様を想定している。スラブ底面に鋼製デッキプレート(デッキ)を捨て型枠として用いた。スラブを支持する鉄骨梁は長さ 6 m の H-450×200×9×14 とし、これらの鉄骨梁の捻じれを抑制するために同断面の小梁を用いて連結した。RC スラブと鉄骨梁は頭付スタッドによって接合されている。頭付スタッドの径および配置は 2-φ16@150 とした。デッキと鉄骨梁は、210 mm 間隔の焼き抜き栓溶接で接合した。

落下衝突物の概要を図-3 に示す。落下衝突物は柱部材を想定し、長さ 4 m の溶接箱型断面(□-750×750×25)とした。揚重時に使用する吊りピースは衝突時のスラブに与える影響を極力減らすため、断面の内側に設置した。落下衝突物の全質量は  $2.3 \times 10^3$  kg であった。

表-1 に試験体に用いた各部材の材料試験結果一覧を示す。

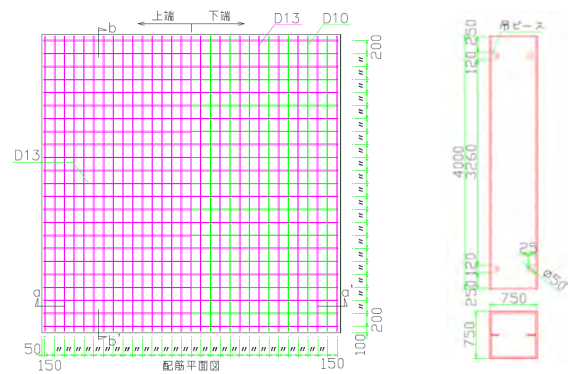


図-2 配筋

図-3 落下衝突物

表-1 材料試験結果

(a) 鋼材

	降伏応力[MPa]	引張強度[MPa]	破断伸び[%]
鉄筋 D13	361	498	21.8
鉄筋 D10	366	493	21.4
デッキ	263.6	357.9	40.6
鉄骨梁	315	469	27.8

(b) コンクリート

ヤング係数[MPa]	圧縮強度[MPa]
$2.24 \times 10^4$	29.3

### 2.2 実験方法

本研究では図-4 に示すように RC スラブを架台上に設置し、落下衝突物を移動式クレーンを用いて所定の落下高さまで揚重し、自由落下させて RC スラブに衝突させた。図-5 に架台上への試験体設置状況を示す。落下衝突物が完全に RC スラブを貫通しても、その後の挙動を確認できるように東柱によって地上からかさ上げを行った。図-6 に試験体支付近の拡大図を示す。試験体は架台の東柱の上に球座を介して支持されている。また、この球座を更に鋼板で挟み込み、凹面球座と鋼板の間に摺動材を設置することで梁材軸方向の並進を許容した。

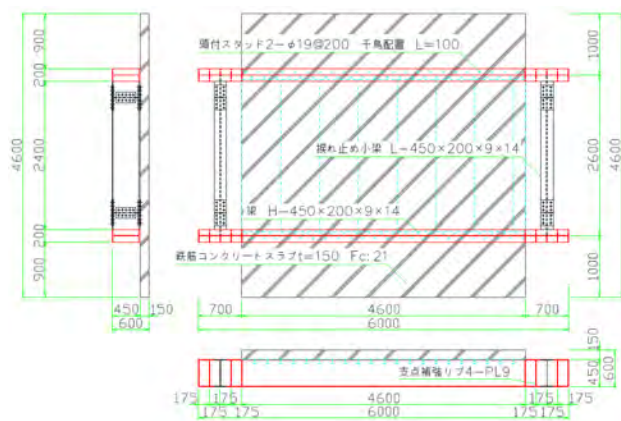


図-1 RC スラブ概要

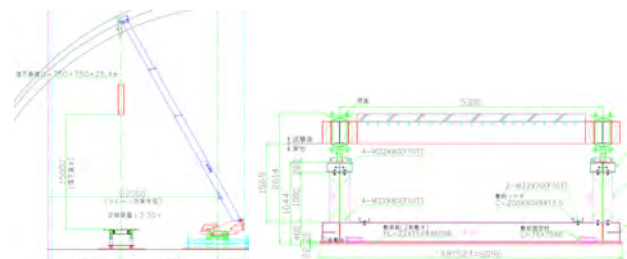


図-4 実験状況

図-5 試験体設置状況

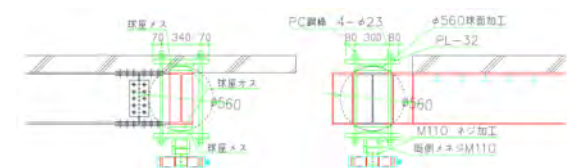


図-6 支付近拡大図

落下衝突物の速度は、衝突時の様子をハイスピードカメラで撮影し、画像解析によって落下衝突物に貼り付けられたマーカの挙動を追跡することにより測定した。マーカは落下衝突物の下端から 300 mm 間隔で複数枚貼り付けた。撮影速度は 4000 fps とした。

### 2.3 実験結果

表-2 に実験結果概要を、図-7 に各ケースの破壊状況写真を示す。全てのケースにおいて落下衝突物は RC スラブを完全には貫通しなかった。貫入深さは図-7 に示すように衝突部に残存したコンクリートから衝突部周辺部までの距離を実験終了後に計測した。

表-2 実験結果概要一覧

落下高さ [m]	衝突時落下物速度[m/s]	貫入深さ[mm]	損傷状況概要
4.0	9.7	71	貫入
7.0	12.2	160	貫入
10.0	14.6	183	鉄筋露出
15.0	17.5	計測不能	一部鉄筋破断

落下高さ 4.0m では、衝突部で 70mm 程度の貫入が生じた。衝突面の破壊範囲はほぼ落下衝突物の断面形状と一致していた。裏面のデッキプレートに大きな残留変形が生じていることが視認できた。ただし、デッキプレート端部には脱落等は見られなかった。落下高さ 7m では、落下高さ 4m の時と同様に衝突部で、落下衝突物断面形状と同様の形状の破壊が生じ、デッキプレートに大きな残留変形が生じていた。衝突部のデッキプレート端部において、焼抜栓溶接の破断が見られた。落下高さ 10m においても、衝突面では落下衝突物の断面形状と同様の範囲で破壊が生じた。衝突部のデッキプレートの端部が脱落し、脱落部から破壊されたコンクリートの破片が試験体下部へ落下した。また衝突部のコンクリートは完全に破壊されており、衝突面から鉄筋が露出していることが確認できるとともに、デッキプレートを視認することができた。落下高さ 15m においても衝突面の破壊範囲は落下衝突物の断面形状とほぼ同様であった。衝突部のデッキプレートが脱落し、脱落部から破壊されたコンクリートの破片が試験体下部へ落下した。また衝突部のコンクリートは完全に破壊されており、衝突面から反対側を視認できる状況であった。衝突部の鉄筋は、上端鉄筋のほぼ全数、下端鉄筋の 1 本が破断していた。

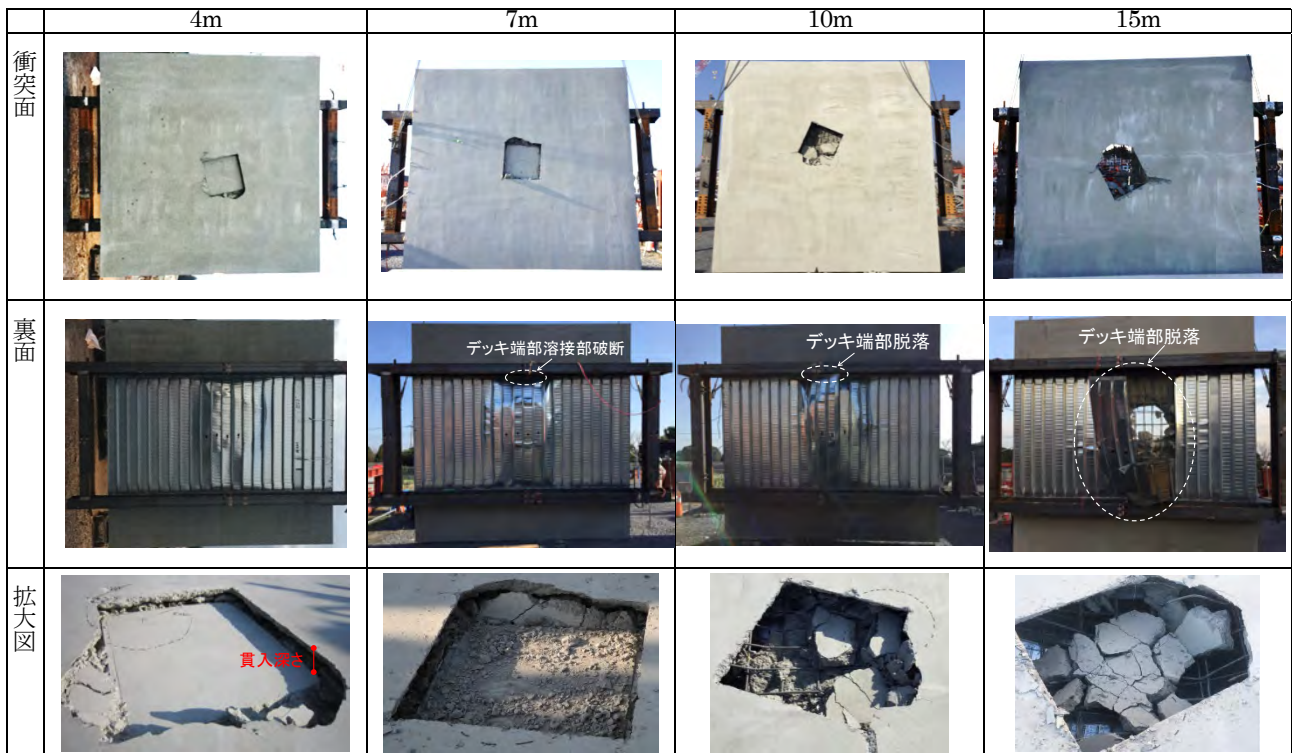


図-7 実験後損傷状況一覧

### 2.4 既往の貫通限界式と破壊モードの比較

図-8 に、既往の実験式として式(1)で表される Degen 式<sup>9)</sup>によって計算される貫通限界厚さ(貫通が生じない最小の板厚)―落下高さ関係を示す。また図-8 中に本研

究における落下高さを実験結果とともにプロットする。

$$e = \alpha_p \left\{ 2.2 \left( \frac{X}{d} \right) - 0.3 \left( \frac{X}{d} \right)^2 \right\} \cdot d \quad \left( 1.52 > \frac{X}{d} \right) \quad (1)$$

ここでそれぞれ、 $e$ : 貫通限界厚さ(m)、 $d$ : 飛来物径、 $\alpha_p$ :

飛来物の特性に応じた低減係数,  $X$ :式(2)で表される修正 NDRC 式<sup>12)</sup>によって算定される貫入深さ(m)である。

$$\frac{X}{d} = \alpha_c \cdot 0.01233 \{f'_c{}^{-0.5} \cdot MN \cdot d^{-2.8} V^{1.8}\}^{0.5} \quad (2)$$

(2.0 ≥ X/d)

ここでそれぞれ,  $\alpha_c$ :低減係数,  $f'_c$ :コンクリート一軸圧縮強度(Pa),  $M$ :飛来物質量,  $N$ :先端形状係数(平坦:0.72を採用),  $V$ :衝突速度(m/s)である。

実験の破壊状況と貫通限界厚さ一落下高さ関係を比較すると, Degen 式<sup>9)</sup>の貫通限界よりも落下高さが低い範囲では衝突面にくぼみが生じ, 落下衝突物の貫入が生じるのみで, 鉄筋は露出せず落下位置中心部の原型を保っていると言える。Degen 式<sup>9)</sup>の貫通限界ラインを超える落下高さ 10m, 15m の範囲ではコンクリートが完全に破壊され, 鉄筋が露出していた。またデッキプレート端部が脱落し, 裏面に大量のコンクリート片が飛散した。衝突部は大きな損傷を受けてはいるものの完全な貫通には至らなかった。これは落下後の状況からコンクリート破壊後に鉄筋が図-9に示すようにネット状の抵抗機構を示して落下鉄骨の貫通を防いでいたと推察される。

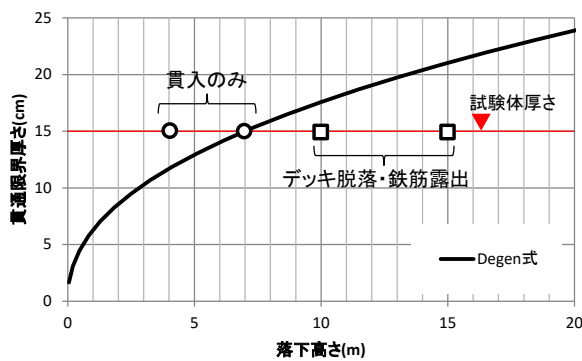


図-8 貫通限界厚さ一落下高さ関係



図-9 落下高さ 15m 衝突後の裏面状況

### 3. 有限要素解析による検討

有限要素解析によって, Degen 式<sup>9)</sup>で算定される貫通限界付近での破壊モードの変化について衝突時に生じる RC スラブの各部材に蓄えられるひずみエネルギーに着目して考察を与える。

### 3.1 解析モデル

#### (1) 試験体モデル化方法

図-10に解析モデルを示す。RC スラブのコンクリートは一点積分のソリッド要素を用いてモデル化した。鉄筋は断面積分を伴うビーム要素を用いてモデル化した。支持スパン内のスラブにはスラブ底面の捨て型枠として鋼製デッキを用いているが, これもシェル要素を用いてモデル化した。鉄骨梁は面内に4点, 断面方向に4点の積分点を持つシェル要素を用いて, 部材の板厚中心位置にてモデル化を行った。解析には汎用有限要素解析ソフト LS-DYNA を用いた。

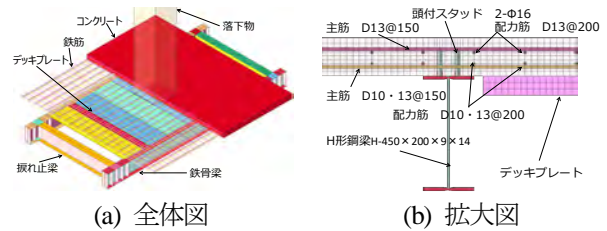


図-10 解析モデル図

#### (2) 材料モデル

鋼材はひずみ速度依存性を考慮した Mises の降伏条件に従うバイリニア弾塑性体としてモデル化した。鉄筋, デッキプレート, 鉄骨梁については材料試験結果から降伏強度を定めた。全ての鋼材の密度は 7.85 t/m<sup>3</sup>, ヤング率は 2.05 × 10<sup>5</sup> MPa, 塑性化後の二次勾配はヤング率の 1/200 とした。鉄筋は相当塑性ひずみに破断基準を設けて要素削除を行った。

鋼材のひずみ速度依存性は式(3)に示す, Cowper-Symonds 式<sup>13)</sup>により考慮する。

$$\sigma_y = \left\{ 1 + \left( \frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{1/p} \right\} (\sigma_{y0} + E_p \epsilon_{eff}^p) \quad (3)$$

ここで  $\sigma_y$ :降伏応力,  $\dot{\epsilon}$ :ひずみ速度,  $\sigma_{y0}$ :初期降伏応力,  $E_p$ :塑性硬化係数,  $\epsilon_{eff}^p$ :相当塑性ひずみを表す。またひずみ速度依存性を支配する材料定数  $C$  および  $p$  は島田が作成した鋼材のひずみ速度依存性に関するデータベース<sup>14)</sup>を基に設定した。図-11に設定した定数を用いて得られるひずみ速度依存性とデータベース値の関係を示す。

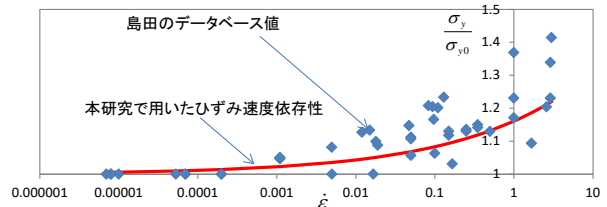


図-11 鋼材ひずみ速度依存性

コンクリートは LS-DYNA に組み込まれている Winfrith コンクリートモデルを適用した<sup>15)</sup>。また, 最大主ひずみと, 最大せん断ひずみに対して要素削除基準を設けており, 要素削除によって破壊を表現する。コンクリートの

一軸圧縮強度は材料試験結果から 29 MPa とした。引張強度、ヤング率は鉄筋コンクリート構造計算規準<sup>16)</sup>に基づき、一軸圧縮強度からそれぞれ 3.02 MPa、 $2.63 \times 10^4$  MPa とした。

### 3.2 解析結果

#### (1) 実験結果との比較

図-12 に各落下高さでの解析終了時の変形図および、実験時の RC スラブ損傷状況、落下物の落下速度時刻歴をそれぞれ示す。全てのケースにおいて実験時の破壊状況および落下衝突物の速度時刻歴を概ね再現できていると言える。落下高さ 4.0 m では、落下物形状に沿って貫入が生じている様子が再現できている。貫入深さは実験で 75 mm のところ、64 mm であった。落下高さ 7 m について、4 m の時と同様に衝突部で、落下物断面形状と同様の形状で貫入が生じた。貫入深さは実験で 120 mm のところ、解析でも 120 mm であった。落下高さ 10 m においては、解析でも衝突部のコンクリートは完全に破壊されており、衝突面から鉄筋が露出していることが確認できた。貫入深さは実験で 180 mm のところ、154 mm であり RC 板厚を越える結果となった。落下高さ 15 m においても衝突部のコンクリートは完全に破壊され、衝突面から反対側を視認できる状況であった。実験、解析共に衝突部の上端主筋のほぼ全数が破断していた。実験では上端配力筋の全数と下端鉄筋の 1 本も破断していたが、解析では上端配力筋および下端鉄筋は破断には至らなかった。

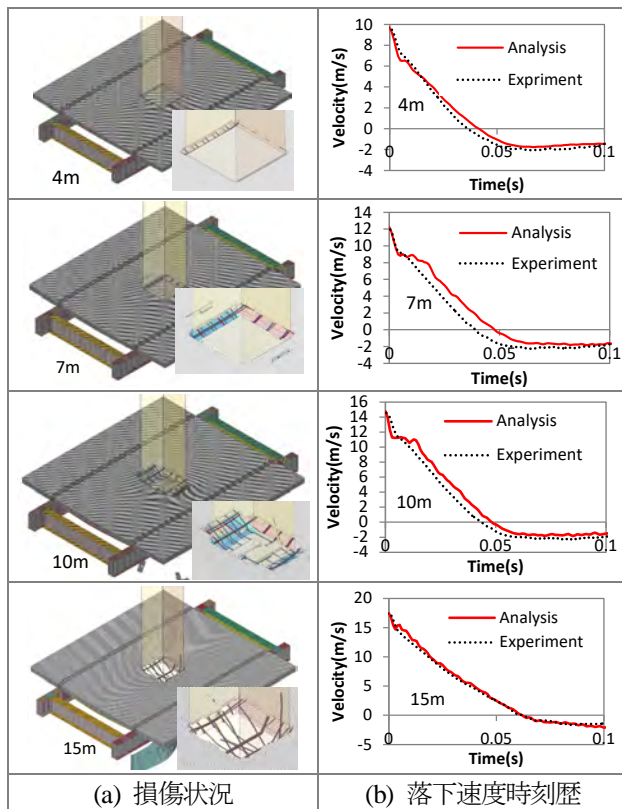


図-12 解析結果

#### (2) 各部材に生じるひずみエネルギー

図-13 にそれぞれの落下高さにおける衝突によって生じた各部材のひずみエネルギーを示す。貫通限界を越えない範囲では落下高さの増加に伴って、コンクリート、鉄筋ともにひずみエネルギーが増加していることがわかる。一方で貫通限界を超える範囲ではコンクリートのひずみエネルギーはほとんど増加せず鉄筋のひずみエネルギーは落下高さに応じて増大している。貫通限界を超える落下高さ 10m では鉄筋とコンクリートのひずみエネルギーが同程度となっている。更に、落下高さ 15m では鉄筋のひずみエネルギーはコンクリートのひずみエネルギーを大きく超えている。すなわち、Degen 式<sup>5)</sup>で算定される貫通限界を越える範囲では、鉄筋が落下衝突物の貫通を防いでいることを示唆している。

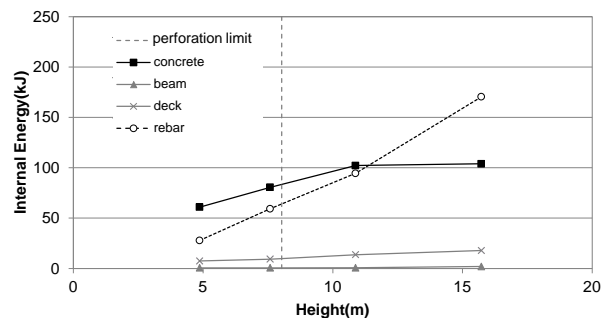


図-13 各部材の衝突時のひずみエネルギー

### 4. まとめ

本報告では公共動線上空での建築施工時に生じる吊荷の下部 RC スラブへの落下を想定した実大 RC スラブの落下衝突実験および有限要素解析について報告した。得られた知見を以下に示す。

- 衝突条件が、貫通限界板厚を算定する式として広く用いられている Degen 式<sup>5)</sup>から計算される貫通限界を越えない範囲では、貫入が生じるものの落下位置のデッキプレートは脱落もなく、裏面への破片の飛散もなかった。
- 衝突条件が Degen 式<sup>5)</sup>で計算される貫通限界を越えると、衝突部コンクリートが大きく破壊されデッキプレートが脱落し、裏面へ破片が飛散するものの完全な貫通には至らなかった。実験後の様子から鉄筋がネット状に変形することで落下衝突物の貫通を防いでいることが推察された。
- 実大 RC スラブの衝突実験を有限要素解析により再現した。解析により、RC スラブの破壊状況を概ね再現できるとともに、衝突物の速度時刻歴を精度よく再現できることを確認した。
- 有限要素解析から得られた衝突時の RC スラブの各部材に生じるひずみエネルギーを見ると、貫通限界を越える衝突条件ではコンクリートと比較して鉄筋のひずみエネルギーが大きく増加していた。本研究で対象と

する比較的板厚の小さい RC 板の低速衝突では Degen 式で算定される貫通限界を衝突条件が越える場合でも、鉄筋によって貫通が防止されることが示唆された。

#### 参考文献

- 1) 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 –, Transaction of the 10th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, Vol. J, pp.257-264, 1989.8
- 2) Esashi Y., Ohnuma H., Ito C. and Shirai K. Experimental studies on local damage of reinforced concrete structures by the impact of deformable missiles Part 2 – Intermediate scale tests –, Transaction of the 10th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, Vol. J, pp.265-270, 1989.8
- 3) Muto K., Sugano T., Tsubota H., Nagamatsu N., Koshika N., Okano M., Suzuki K., Ohru S., W. A. von Riesenmann, D. C. Bickel, R. L. Parrish and R. D. M. Tachau. Experimental studies on local damage of reinforced concrete structures by the impact of deformable missiles Part 3 – Full scale tests –, Transaction of the 10th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, Vol. J, pp.271-278, 1989.8
- 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, 電力中央研究所報告, 総合報告 U24, 1991.7
- 5) Degen P., P.: Perforation of reinforced concrete slabs by rigid missiles, Journal of the Structural Division, Proceedings of ASCE, Vol.106, No.ST7, 1980.6
- 6) 藤掛一典: 爆発・衝撃作用を受ける土木構造物の安全性評価—希少事象に備える—, 公益財団法人土木学会, 2017
- 7) 中村聡, 渡邊秀和, 河野進, 藤掛一典, 田中仁史, 鈴木紀雄, 小原拓: 浮遊物の衝突を受ける RC 壁の局部損傷評価に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, Vol.80, No.715, pp.1459-1468, 2015.9
- 8) Xiao Y., Li B. and Fujikake K. Behavior of reinforced concrete slabs under low-velocity impact, ACI Structural Journal, No.114-S52, pp.643-658, 2017.5
- 9) 細川一昂, 水島靖典, 堀内康史, 佐久間康如, 町田隆祐, 鈴木陽介: 鉄筋コンクリート製床スラブに対する柱部材の実大落下実験に関する研究 —その1: 実験計画—, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (中国), 構造 I, pp.275-276, 2017.8
- 10) 水島靖典, 細川一昂, 堀内康史, 佐久間康如, 町田隆祐, 鈴木陽介: 鉄筋コンクリート製床スラブに対する柱部材の実大落下実験に関する研究 —その2: 実験結果—, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (中国), 構造 I, pp.277-278, 2017.8
- 11) 水島靖典, 細川一昂, 堀内康史, 佐久間康如, 町田隆祐, 鈴木陽介: 鉄筋コンクリート製床スラブに対する柱部材の実大落下実験に関する研究 —その3: 数値解析による検討—, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東北), 構造 I, pp.225-226, 2018.9
- 12) Kennedy R. P. A review of procedures for the analysis and design of concrete structure to resist missile impact effect, Nuclear Engineering and Design 37, 1976.9
- 13) Cowper G. R. and Symonds P. S.. Strain hardening and strain rate effects in the impact loading of cantilever beams, Brown University, Applied Mathematics Report, 1958
- 14) 島田侑子: 歪速度による鋼材の履歴特性に関するデータベース, 鋼構造年次論文報告集, 第 20 巻, pp.1-8, 2012.11
- 15) Broadhouse B. J. and Neilson A. J.. Modelling reinforced concrete structure in DYNA3D, AEE Winfrith, 1987.10
- 16) 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 (2018), 一般社団法人日本建築学会, 2018