

# 低速衝突を受ける薄型鉄筋コンクリート板の損傷制御に関する実験的研究

Experimental study on damage control of thin RC panels subjected to low-velocity impact

井戸裕勇樹\*, 水島靖典\*\*, 郷原昌樹\*\*\*, 米澤泰斗\*\*\*\*  
 Yuki Idosako, Yasunori Mizushima, Masaki Gouhara, Yasuto Yonezawa

\*博 (工), 竹中工務店, 技術研究所 (〒270-1395 千葉県印西市大塚 1-5-1)  
 \*\*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)  
 \*\*\*兵庫県立大学, 環境人間学部 (〒679-0079 兵庫県姫路市新在家本町 1-1-12)  
 \*\*\*\*修 (工), JFE 建材, 建築技術部 (〒108-0075 東京都港区港南 1-2-70 品川シーズンテラス 11 階)

キーワード: 鉄筋コンクリートスラブ, 低速衝突, 衝突実験, デッキプレート  
 Keywords: reinforced concrete slab, low-velocity impact, impact test, deck plate

## 1. はじめに

比較的厚みの小さい鉄筋コンクリート(RC)板に低速の衝突物が衝突した際の挙動について水島らは実大実験および有限要素解析により検討を実施している<sup>1)</sup>。その中で, Degen 式<sup>2)</sup>によって算定される貫通限界を衝突条件が超えた場合であっても, 裏面に破片の飛散やデッキの脱落が生じるものの, 貫通には至らなかったケースなどを報告している。しかし, 例えば衝突の対象がスラブでありその裏面に施設や通路が存在する場合には, 万が一破片が飛散すると影響が多大であるため, 破片の飛散等も防止する必要がある。

貫通や裏面剥離防止など RC 板の局部損傷の耐衝撃性向上を目的として, 裏面を補強する実験はこれまでに多数実施されている。例えば<sup>3),4)</sup>比較的低速の衝突を対象とした例を挙げると, 三上ら<sup>5)</sup>は裏面を CFRP シートや AFRP で補強した RC 板について重錘落下実験を実施し, シート剛性と無補強試験体との耐力比の関係などについて検証している。また, 渡邊ら<sup>6)</sup>は津波漂流物に対する既存建物の補強を目的として, RC 造壁の裏面をポリウレアや CFRP シートなど各種の補強材で補強した低速衝突実験を実施し, 補強により貫通破壊に至るまでの剥離・剥落を防止できたことなどを報告している。

本研究では, 低速衝突を受ける RC 板の裏面への破片飛散防止のための損傷制御機構として鋼製デッキプレートに着目する。具体的には, 既往の補強法よりも簡易かつ低コストの補強を意図して, 鋼製デッキプレートの端部を折り曲げた定着機構による補強を提案する。本報では提案する定着機構の有無を実験変数として実施した低速衝突実験についてその概要を述べる。

## 2. 試験体

試験体形状を図-1 に, 配筋図を図-2 にそれぞれ示

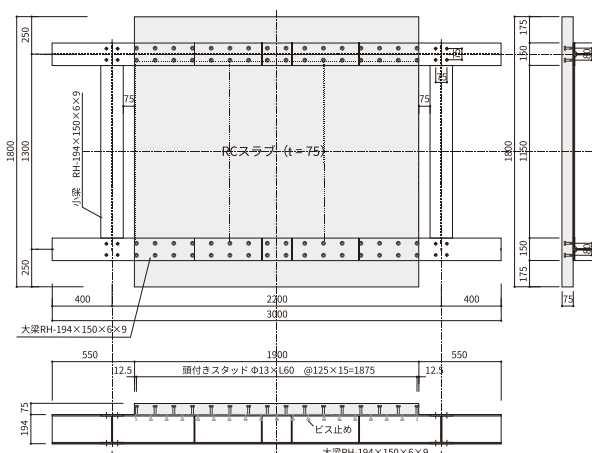


図-1 試験体形状

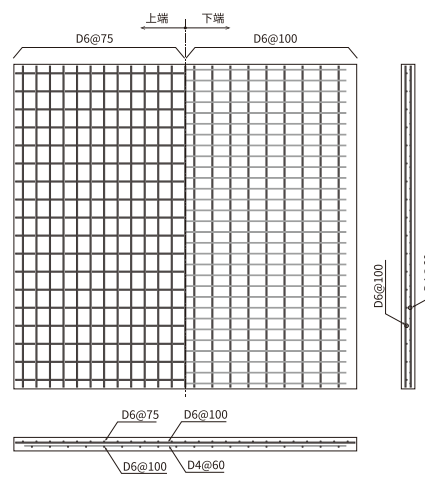


図-2 試験体配筋図

す。試験体は鉄骨造建物で一般的に使用される RC スラブの仕様を模擬しており、実大の 1/2 縮小相当の試験体とした。RC スラブは厚さ 75mm とし、支持スパンは 1300mm とした。配筋は上端が主筋 D6@75, 配力筋 D6@100 とし、下端が主筋 D6@100, 配力筋 D4@60 とした。支持スパン内のスラブ底面には、0.6mm 厚の鋼板で製作した鋼製デッキを捨型枠として用いた。

鉄骨梁は長さ 3m の H-194×150×6×9 を 2 本用い、これら二本の鉄骨梁の材軸方向の回転を防止するために捻れ止め小梁として同一断面の梁で接合した。RC スラブは一方向スラブとして頭付きスタッドを用いて鉄骨梁に接合した。頭付きスタッドは 2-φ13@125 とした。

試験体は 6 体で外形・配筋はいずれも同一であり、6 体のうち 3 体は、図-3 に示すように折り上げた定着機構を設けた。折り上げの高さは、スラブ筋との干渉を防ぐためスラブのかぶり厚さと同等とした。

表-1～表-3 には使用した材料の材料試験結果を示す。なお、試験は 3 日間にわたり実施したが、表-1 に示すコンクリートの材料試験結果は実験開始前日に実施したものである。

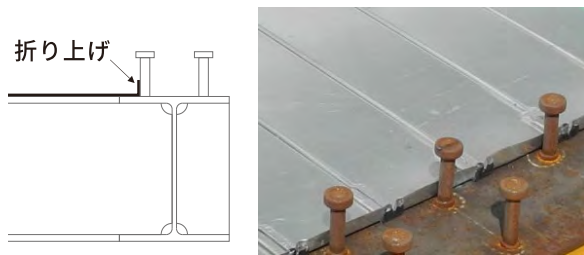


図-3 デッキ端部定着機構

表-1 材料試験結果 (コンクリート)

試験体	圧縮強度 [MPa]	ヤング係数 [10 <sup>4</sup> MPa]	割裂強度 [MPa]
N-7.5, N-9	34.5	2.64	2.23
N-13, F-13 F-14, F-15	39.7	3.18	2.62

表-2 材料試験結果 (鉄筋) ※0.2%オフセット耐力

鉄筋径	ヤング係数 [10 <sup>5</sup> MPa]	降伏強度 [MPa]	引張強度 [MPa]
D4	1.91	382 <sup>*</sup>	535
D6	1.91	389 <sup>*</sup>	599

表-3 材料試験結果 (鋼板)

使用箇所	降伏強度 [MPa]	引張強度 [MPa]
梁	314	452
デッキ	296	356

### 3. 試験方法

#### 3.1 試験装置

実験実施状況を図-4 に、試験体設置図を図-5 に支承部の詳細図を図-6 に示す。図-7 に示す落下衝突物は口



図-4 実験実施状況

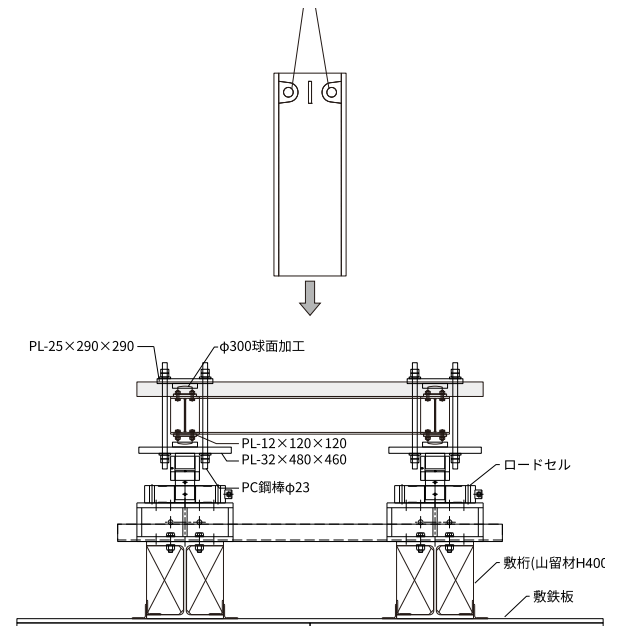


図-5 試験体設置図

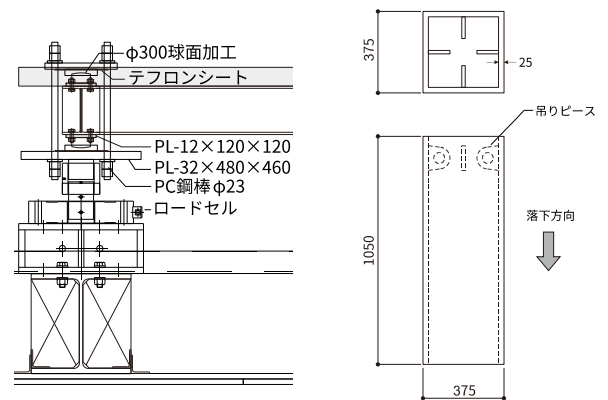


図-6 支承部詳細図

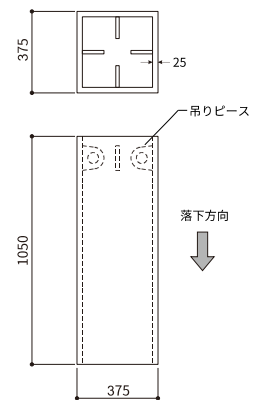


図-7 落下衝突物形状

-375×375×25 の断面で長さ 1050mm の鋼管であり、上部にはクレーンによる揚重のための吊りピースを設けている。重量は吊りピース・吊り治具を含めて 310.8kg であった。

実験は屋外で実施し、落下衝突物の鋼管はクレーンにより所定の高さまで揚重後に落下させた。試験架台は地盤面上に敷鉄板を敷設し、敷桁材を設置した上に4つのロードセルを設置し、4点で試験体を支持した。試験体支持部には球座を設置し、球座と鋼板の間にテフロンシートを挟み込むことで回転と水平方向の滑りの両方を許容する機構とした。

### 3.2 試験変数

試験変数はデッキ端部加工の有無と落下高さである。試験体の一覧を表-4 に示す。落下高さの目標値はデッキ端部加工無しの試験体では 7.5, 9, 13m とし試験体名はそれぞれ N-7.5, N-9, N-13 (以下、まとめて N シリーズ)、デッキ端部加工有りの試験体では 13, 14, 15m とし試験体名はそれぞれ F-13, F-14, F-15 (以下、まとめて F シリーズ) とした。

表-4 試験体一覧

高さ[m]	7.5	9	13	14	15
端部加工無し	N-7.5	N-9	N-13	-	-
端部加工有り	-	-	F-13	F-14	F-15

### 3.3 計測方法

衝突時に RC スラブに作用する荷重は支持部の4つのロードセルにより計測した。

落下衝突物の変位・速度は表面に貼付したマーカーをハイスピードカメラで撮影し、画像解析ソフトを用いてマーカーの追跡を行うことにより測定した。マーカーは検出作業時に検出の欠損がないよう、落下衝突物下端 100mm 位置から 150mm ピッチで3点とし、4面すべてに貼付した。なお、撮影の設定は1コマ1/4000秒とした。

## 4. 実験結果

図-8 に落下衝突物の落下速度時刻歴を示す。衝突時の速度は上述のようにハイスピードカメラで撮影された動画から画像解析によって求めた。なお、いずれのケースにおいても落下速度の符号が反転しており、完全な貫通には至っていないことがわかる。

実落下高さは衝突時速度から式(1)を用いて算出した。ここで、 $h$ :実落下高さ、 $v$ :衝突時速度、 $g$ :重力加速度である。

$$h = v^2 / 2g \quad (1)$$

図-10 および図-11 に N シリーズおよび F シリーズの損傷状況、貫入深さ、衝突時速度、実落下高さをそれ

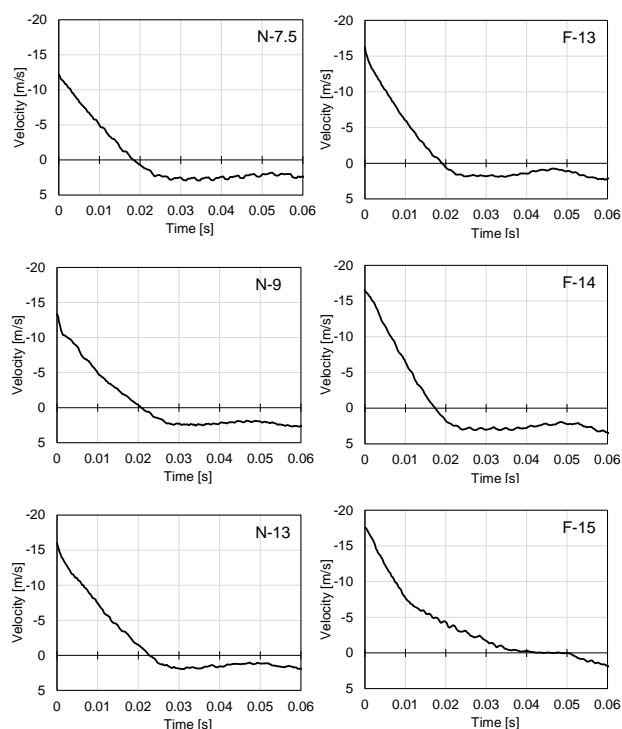


図-8 落下速度時刻歴

ぞれ示す。貫入深さは貫入が生じている部分の角部と周辺部 RC 板表面との距離をメジャーで測定し、その平均値として算出した。鉄筋が露出している部分については RC 板表面と鉄筋間の距離を測定してかぶり厚さを減じることで算出した。

### 4.1 N シリーズ (デッキ端部加工無し)

試験体 N-7.5 では衝突時の速度から算出した実落下高さが 7.6m でありほぼ想定通りの衝突条件となっていた。衝突面では 43 mm の貫入が衝突部に生じていた。また、RC 板の全体曲げ圧壊の兆候も見られた。裏面のデッキプレートは片端部で抜け出しが生じており、ここからコンクリートの破片が落下した。また、衝突部のデッキのみ大きく変形することで隣接するデッキとの間に隙間ができており、この隙間からも破片の落下が生じた。しかしながら、実大のデッキでは隣接するデッキ間が機械的に嵌合されており、文献1)の実験結果もふまえれば、実際の RC スラブではこの部分からの破片の落下はほぼ生じないと考えられる。また、デッキのビスが外れるとともにビス穴の周辺にデッキプレートに破断が生じていたが、これについても実大のデッキではビス止めによる加工はなされていないため破断は生じないものと推察される。

試験体 N-9 の実落下高さは 9.1 m であり、ほぼ想定通りの衝突条件となっていた。衝突面では 59mm と RC 板厚に近い貫入が生じた。コンクリートの損傷状況としては N-7.5 と同様の傾向を示すとともに、衝突部で鉄筋 1 本の破断が確認された。

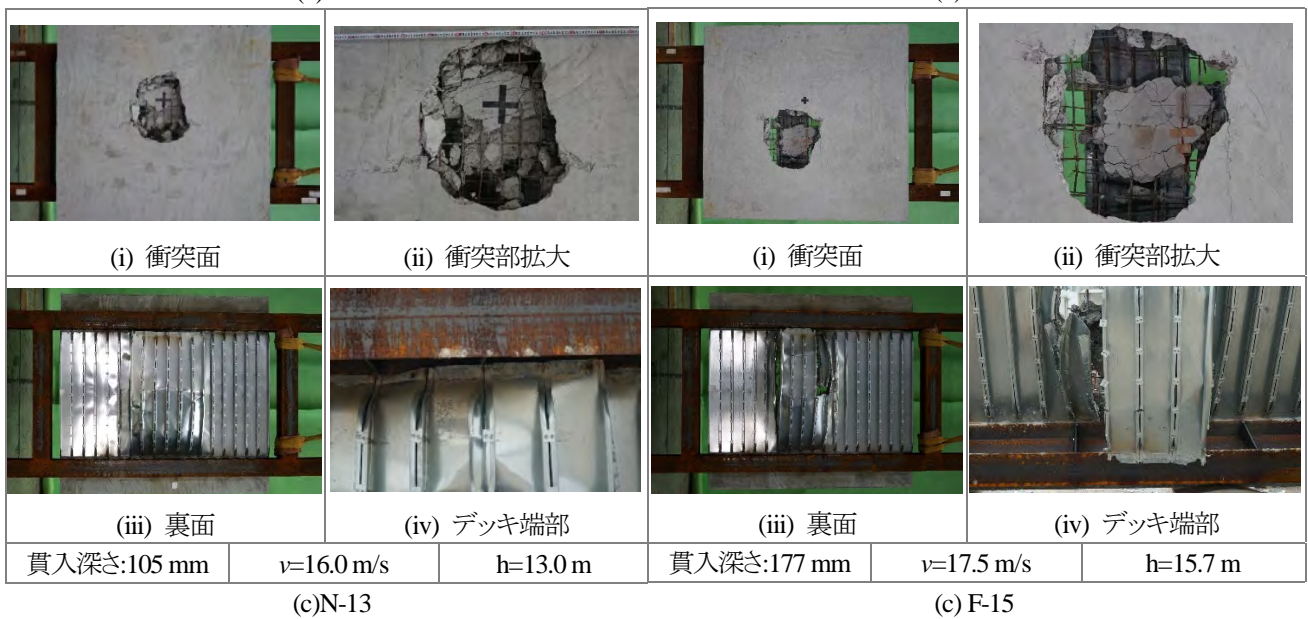
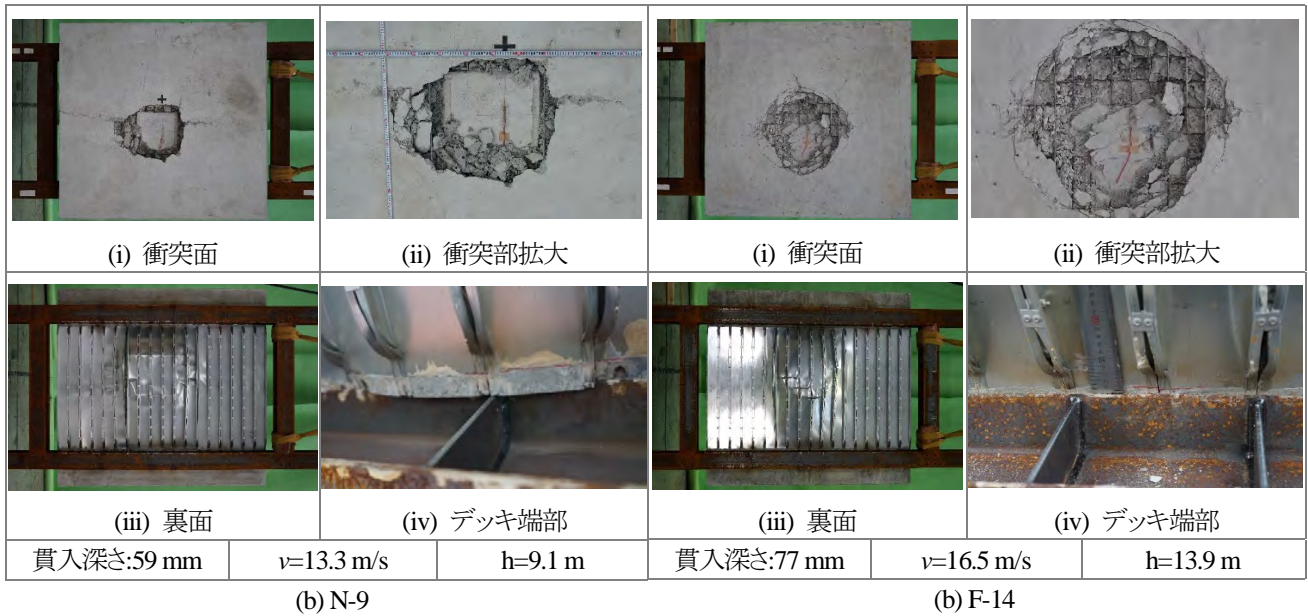
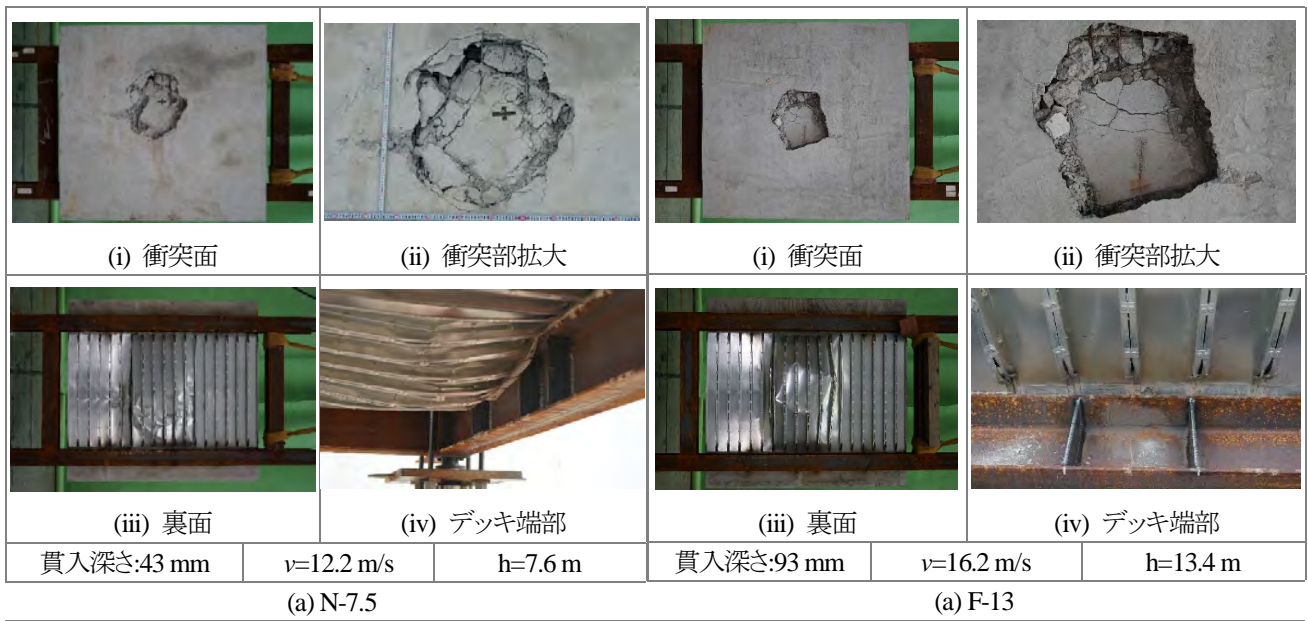


図-10 Nシリーズ損傷状況

図-11 Fシリーズ損傷状況

試験体 N-13 の実落下高さは 13.0 m であり、想定通りの衝突条件となっていた。貫入深さは 105 mm であり、RC 板厚を越える貫入が生じていた。また衝突部で上端 4 本、下端 3 本の鉄筋が破断していることが確認された。デッキは大きく脱落し、大量の破片が裏面に飛散する結果となった。

#### 4.2 F シリーズ（デッキ端部加工有り）

試験体 F-13 では実落下高さが 13.4 m であり、想定よりもやや衝突速度が大きくなっていた。衝突部に 93 mm の貫入が生じており、N-13 と比較して貫入量の低減は 1 割程度であり大きな差異はなかった。一方で裏面では衝突後もデッキの脱落、端部の脱落は確認されず大きな破片の飛散を防いでいた。デッキーデッキ間の隙間から小さな破片の落下が確認されているが前述の理由から実際のデッキでは生じないものと考えられる。

試験体 F-14 での実落下高さは 13.9 m でほぼ想定通りの衝突条件であったことが確認できた。F-14 では貫入深さが 77 mm 程度となり、F-13 よりも貫入量が減少した。デッキ端部の脱落は F-13 と同様に確認されなかった。F-14 では他のケースと比較して衝突体が斜めになって衝突していることが目視で確認された。そのため、衝突面において衝突部から比較的広い範囲で損傷が生じており、損傷に寄与するエネルギーが分散されたために貫入深さが F-13 よりも小さくなったと推察される。また、デッキもビス穴を起点として広く破断が進展していた。

試験体 F-15 では実落下高さが 15.7 m となっており、想定よりもやや衝突速度が速かった。貫入深さは F-13, 14 と比較しても急激に増大し 177 mm となった。デッキも完全に脱落するとともに、破断も生じており衝突部の破片が裏面に大量に飛散した。デッキ端部の折り曲げ部は図-12 に示すように完全に引き延ばされて平坦になっていた。



図-12 実験後の F-15 試験体デッキ端部

## 5. まとめ

低速衝突を受ける薄型鉄筋コンクリート板の損傷制御性能向上を目的として、鋼製デッキプレート端部を折り上げ加工した RC スラブの衝突実験を実施した。以下に得られた知見をまとめる。

- 鋼製デッキプレート端部に定着機構を有していない N-7.5, 9, 13 では全てデッキプレートが脱落し、RC 板裏面に破壊されたコンクリートの破片が飛散した。
- デッキ端部に定着機構を設けた F-13, 14 ではデッキの脱落が生じず裏面への破片の飛散を防止することができ、本研究で提案するデッキ定着機構を設けた場合は、定着機構を設けない場合と比較して倍程度の高さからの落下でも裏面への破片の飛散を防止できることが確認された。
- デッキ端部に定着機構を設けた場合でも落下高さを 15m とした F-15 ではデッキの脱落が生じ、RC 板裏面への破片の飛散が生じた。

## 参考文献

- 1) 施工中の吊荷落下を受ける鉄筋コンクリート床スラブの損傷性状に関する研究：水島靖典，堀内康史，原口圭，細川一昂，大場航，日本建築学会構造系論文集，Vol. 83, No. 751, pp.1239-1249, 2018.9
- 2) Degen P, P.: Perforation of reinforced concrete slabs by rigid missiles, Journal of the Structural Division, Proceedings of ASCE, Vol.106, No.ST7, pp.1623-1642, 1980.7
- 3) 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：森川博司，河西良幸，坪田張二，内田孝，大野友則，小暮幹太，日本建築学会構造系論文集，Vol. 60, No. 477, pp.107-114, 1995.11
- 4) アラミド繊維シート補強による RC 版の裏面剥離抑制効果に関する基礎的研究：清田翔吾，片岡新之介，別府万寿博，市野宏嘉，佐藤和幸，構造工学論文集 A, 66A 巻, p.1047-1058, 2020.4
- 5) FRP シートで下面補強した RC 版の耐衝撃性に関する実験的研究：三上浩，岸徳光，安藤智啓，栗橋祐介，構造工学論文集 A, 48A 巻, p.1531-1542, 2002.03
- 6) 津波浮遊物の衝突を受ける RC 壁の局部損傷に関する実験的研究（その 5 補強試験体実験概要）（その 6 実験結果及び既往評価式による評価）：渡邊秀和，中村聡，小原拓，山本発，藤掛一典，河野進，田中仁史，鈴木紀雄，大村哲矢，日本建築学会大会学術講演梗概集（九州），pp.175-178, 2016.8