

第29回安全研究成果報告会

衝撃作用を受ける構造物の衝撃挙動 評価に関する研究

太田 良巳

地震・津波研究部門

2020年12月23日

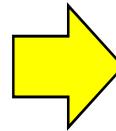
はじめに

- 原子力分野においては、古くからトルネードミサイルやタービンミサイル等の衝突に係る研究が行われてきた。
- 構造物の局部破壊（貫入・貫通・裏面剥離）については、多くの研究がなされてきた。
- 一方、衝撃荷重の作用により構造物内を伝播する応力波に関する研究はほとんど見られない。
- 構造物の衝撃評価は、構造物が内包する機器設計の観点から重要な課題である。

衝撃評価の流れ

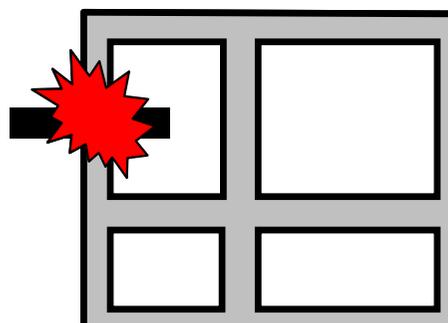
評価のポイント

- 構造評価
 - ①局部損傷
 - ・経験式による評価
 - ・数値シミュレーションによる評価
 - ②全体損傷
 - ・数値シミュレーションにより評価

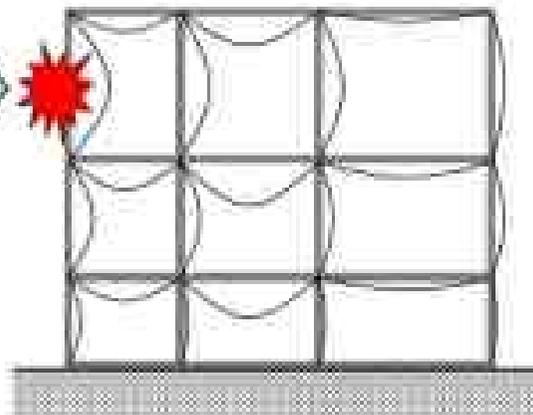
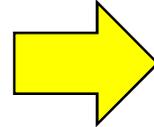


- 衝撃評価
 - ③機器影響評価
 - ・数値シミュレーションにより応力波算出による機器評価

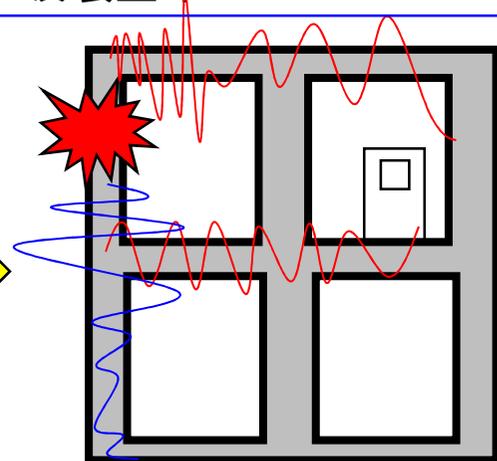
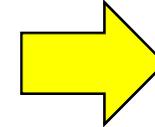
- 評価手法について
 - ✓ 経験式の適用性確認
 - ✓ 構造評価及び衝撃評価の数値シミュレーションに用いる境界条件、材料定数、減衰定数等の解析パラメータの確認
- 評価基準について
 - ✓ 速度依存性を考慮した材料の破壊基準
 - ✓ 衝撃応答に対する対象機器の破壊モード及び破壊基準



①局部損傷評価

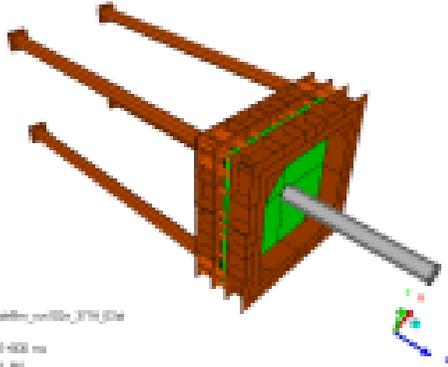
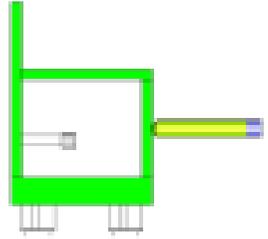


②全体損傷評価
衝撃評価の流れ



③機器影響評価

衝撃工学研究立案と国際動向

	規制庁/JNES	OECD/NEA	
2010~2012	<ul style="list-style-type: none"> IRIS2010・2012に参加（JNES） 	<ul style="list-style-type: none"> IRIS2010・2012（高速衝突に伴う局部損傷に係る解析プロジェクト） 	
2013	<ul style="list-style-type: none"> 「実用発電用原子炉に係る特定重大事故等対処施設に関する審査ガイド」、「実用発電用原子炉に係る航空機衝突影響評価に関する審査ガイド」作成に係る議論スタート 	 <p>IRIS2010・2012解析モデル</p>	
2014	<ul style="list-style-type: none"> 9月、両ガイド公開 ガイド作成時より「局部損傷評価」、「衝撃挙動（応力波伝播）評価」に関する研究の重要性を認識し研究立案 		
2015	<ul style="list-style-type: none"> 「局部損傷評価」に関する実験・解析的研究実施 		 <p>IRIS3解析モデル</p>
2016	<ul style="list-style-type: none"> 2017年3月、第2回研究報告会で発表 		
2017	<ul style="list-style-type: none"> 「衝撃挙動（応力波伝播）評価」に関する実験実施 		
2018			
2019			
2020			

研究の重要性を認識し、早期より調査を開始し、研究を立案した。

研究の目的

実構造物に飛翔体の様な衝突物を衝突させ、その挙動を計測することは不可能なことから、**模型実験**または**数値解析手法を用いたシミュレーション**による検討等から、知見を得る必要がある。

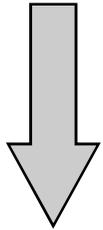


そこで、本研究では、**構造物の衝撃挙動に係る知見の拡充を目的に、**模型飛翔体と模型構造物**を用いた衝突実験を実施し、衝突時の模型構造物の挙動を観察する。また、**実験結果の再現解析**を行い、**衝突解析における課題・注意点を整理する。****

本事業は、鹿島建設株式会社に委託して実施している。

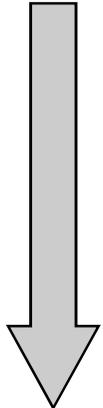
研究全体スケジュール

2016年度



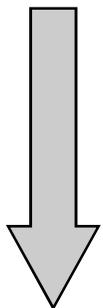
- ・試験計画
- ・大型模型の衝突試験調査
- ・試験計画の立案、知見収集
- ・事前解析

2017年度



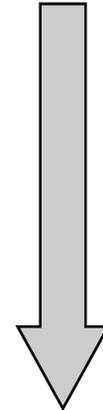
- 試験準備
- ・躯体構造物の設計・製作
 - ・飛翔体の設計・製作・試射
 - ・計測計画・機器調達・配置
 - ・振動特性試験
 - ・事前解析

2018年度



- 衝突試験（壁部）
シミュレーション解析
試験準備（2019年度向け）
- ・躯体構造物の製作
 - ・飛翔体の製作

2019年度



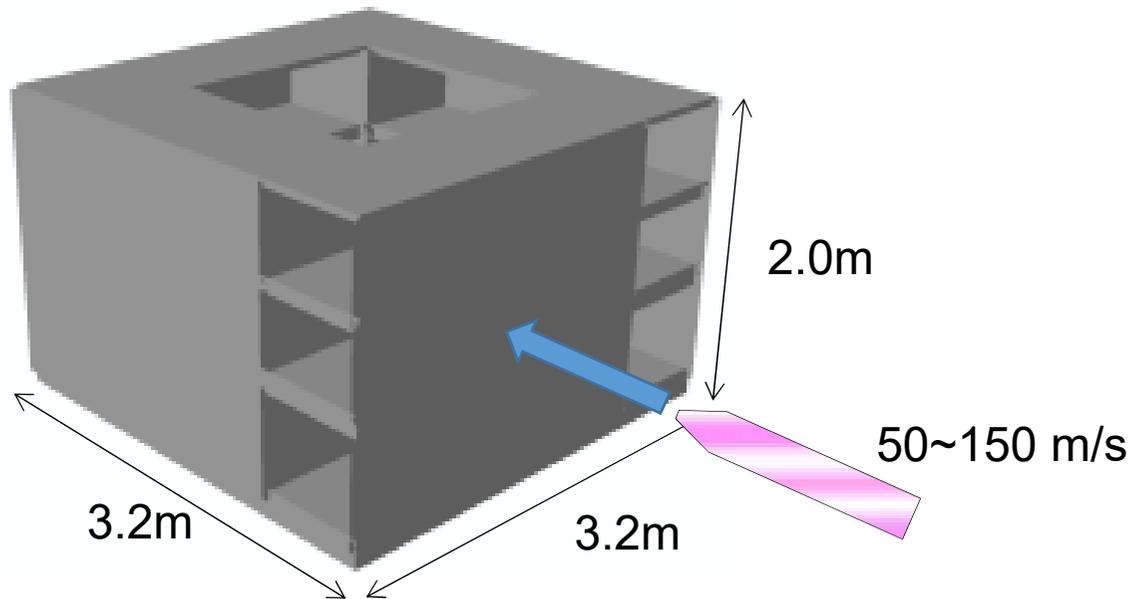
- ・衝突試験（床部）
- ・シミュレーション解析
- ・境界条件に係る予備試験、試験準備（2020年向け）
- ・衝突試験整理

2020年度

- ・境界条件に係る試験
- ・シミュレーション解析
- ・全体まとめ

衝突実験の概要

- 建屋衝撃挙動伝播に係る各種知見の取得
→ 大型飛翔体衝突実験の実施

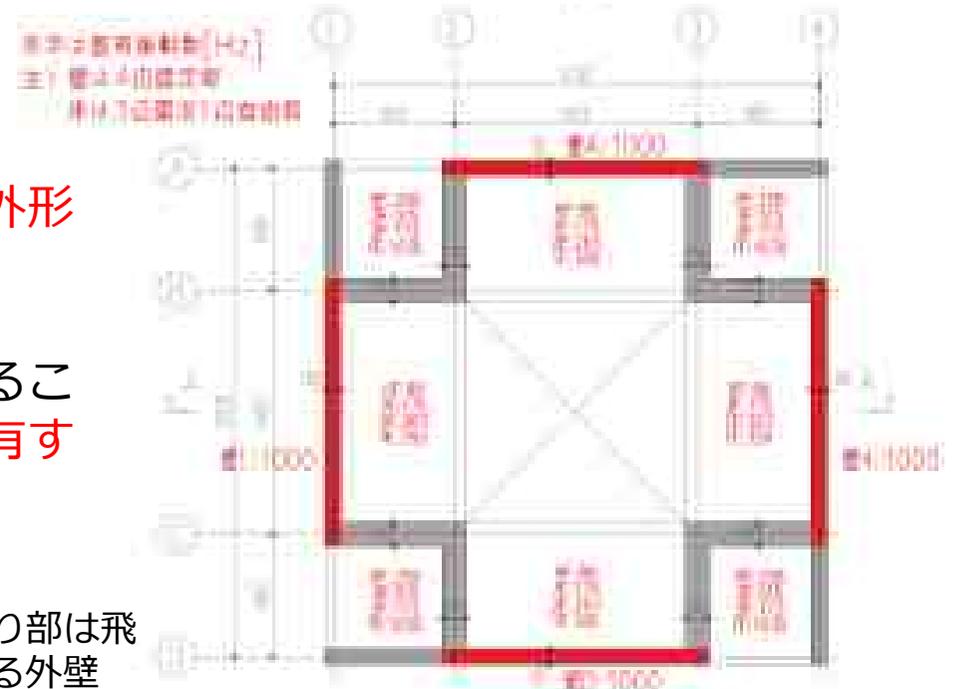


衝突実験イメージ

(発射可能な飛翔体の最大質量25kgを考慮)

模型構造物の考え方

- 模型構造物は研究目的から実物**建屋の外形寸法と質量の縮尺モデルを想定**
- 回転対称構造
- 内壁を設け、各階の床スラブ厚を変えることで、**様々な固有振動数の床スラブを有する**よう設計



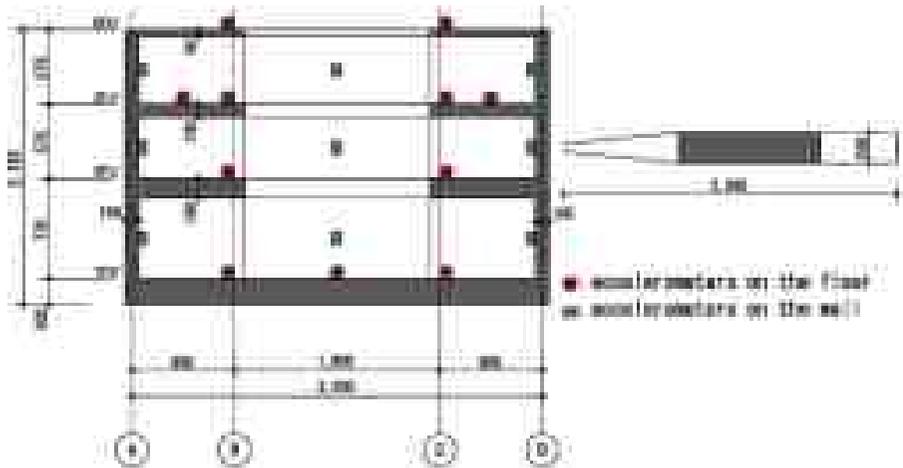
※平面図の赤塗り部は飛翔体が衝突する外壁

一般階の平面図

模型構造物の概要

項目	想定実物	模型構造物	相似比
外形寸法[m]	平面80×80 高さ50	平面3.2×3.2 高さ2.0	1/25
質量[ton]	314000	20.1	1/25 ³
床スラブ振動数[Hz]	20~40	500~1000	25

模型構造物の概要



飛翔体（質量25kg、直径0.24m）が速度50～150m/sで衝突する時を想定し壁厚を決定

剛飛翔体の衝突を想定した評価結果
 （貫通：Degen式、裏面剥離：Change式を用いて計算）

衝突速度 [m/s]	貫通限界壁厚 [cm]	裏面剥離限界壁厚 [cm]
50	9.2	21.5
100	16.7	34.1
150	23.6	44.8
200	29.9	54.3

【評価条件】

模型飛翔体：直径24cm，質量25kg，先端形状係数0.72

模型構造物：圧縮強度 = 30 N/mm²

床

場所	版厚[mm]	配筋	全鉄筋比 (%)
RF	50	1-D6@50	1.27
3F	100	1-D6@50	0.63
2F	150	2-D6@50	0.84
基礎版	200	2-D13@100	1.27

壁

場所	版厚[mm]	配筋	全鉄筋比 (%)
外壁	100	2-D6@50	1.27
内壁	150	2-D6@50	0.84

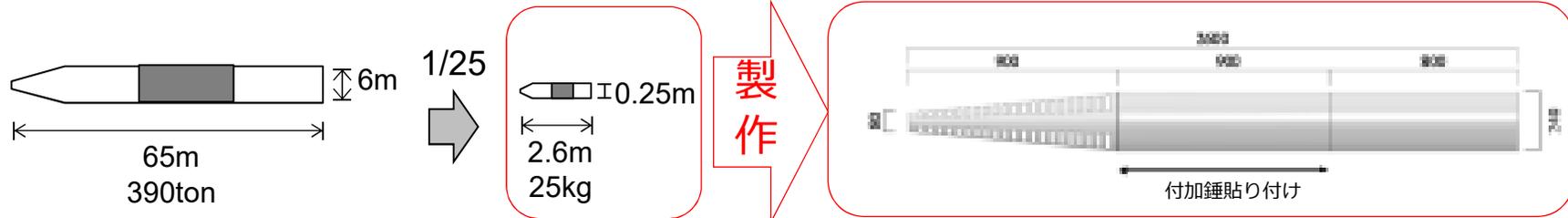
配筋ピッチは施工性を考慮して設定
 （ダブル配筋部材のかぶり厚は15mm）

模型構造物



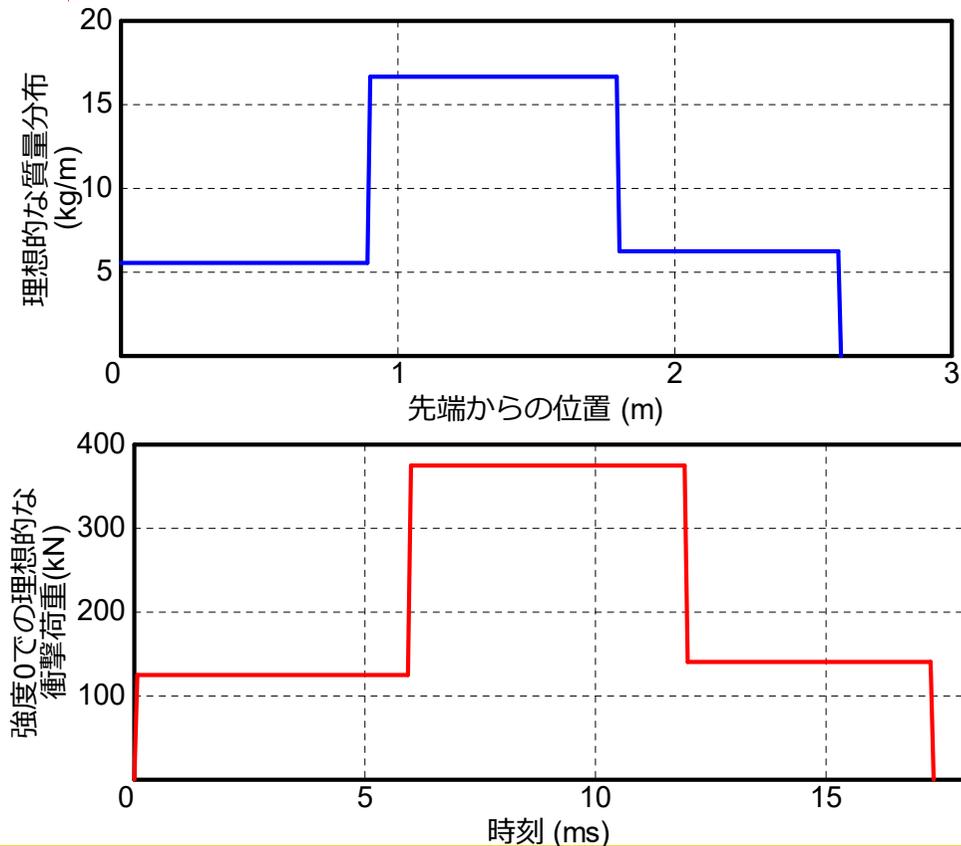
模型柔飛翔体の製作

飛翔体衝突実験の実施のために柔飛翔体を製作し、性能確認が必要



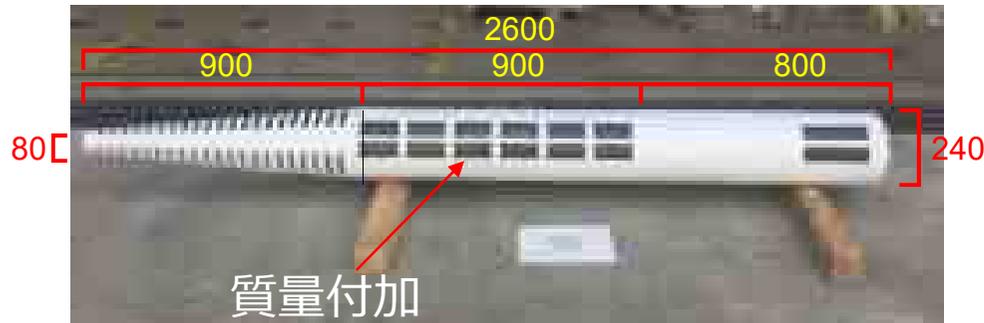
- ✓ 柔飛翔体は**低強度**で、衝突荷重は質量分布の影響を大きく受ける
- ✓ 既往の航空機衝突に関する研究で、燃料を満載した航空機の翼など**重い部分**が衝突する時に**衝撃荷重が大きくなる**
- ✓ 飛翔体**発射時の高加速度に耐える強度**が必要

剛飛翔体は、模型柔飛翔体と同じ、直径・質量として、衝突で飛翔体に変形しない構造とした。

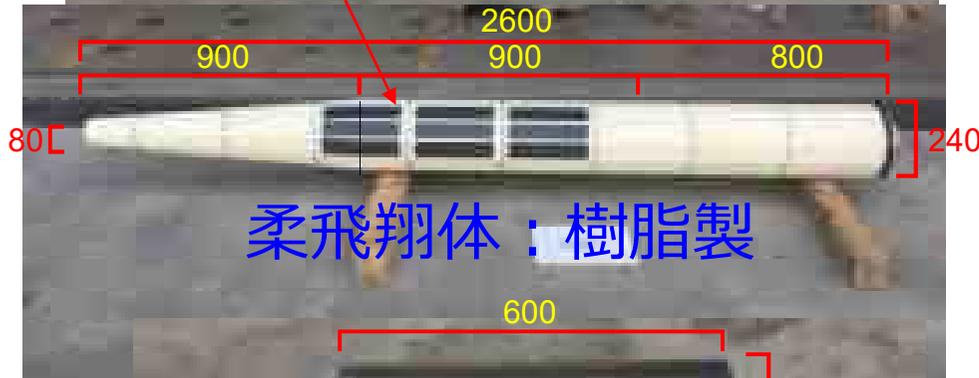


模型柔飛翔体および模型柔飛翔体の衝突荷重

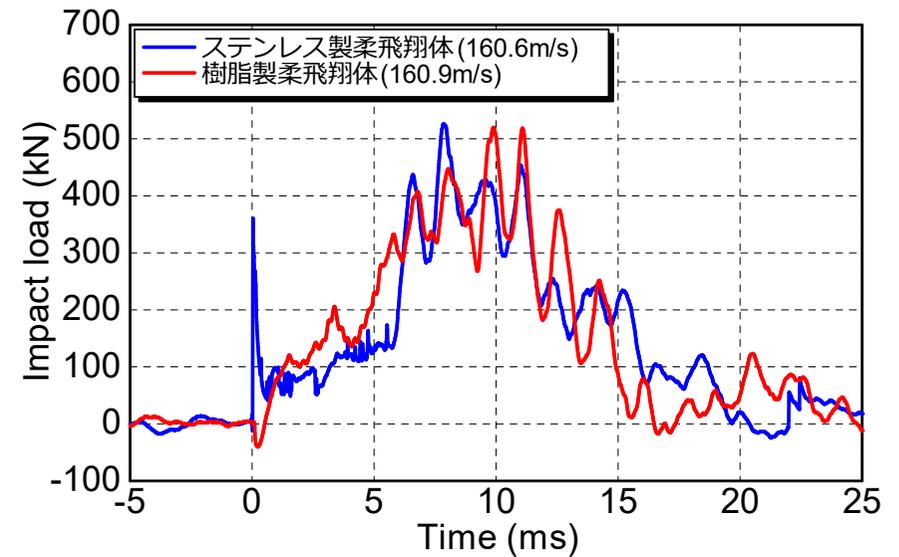
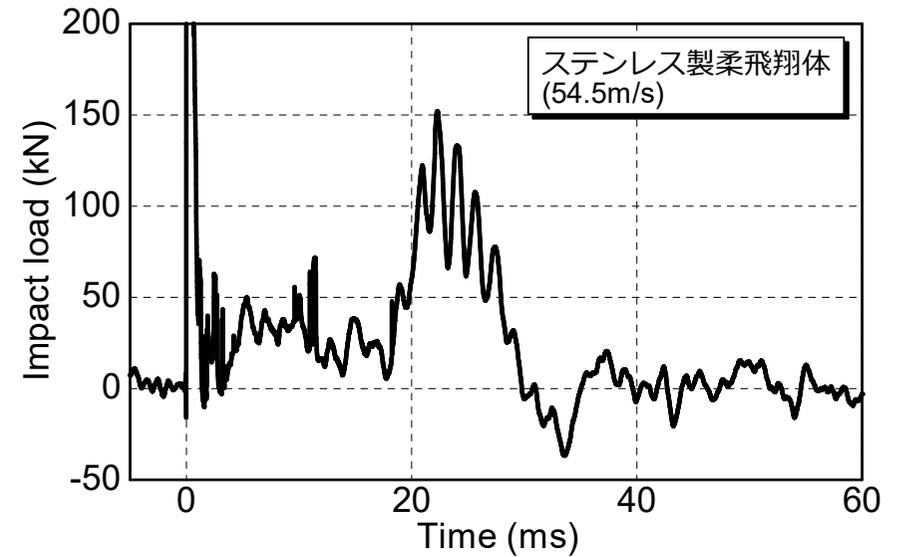
柔飛翔体：ステンレス製



柔飛翔体：樹脂製



剛飛翔体：アルミ製



実験条件

- 躯体構造物の各面に対する衝突実験を実施（1体の構造物に4回衝突）
- 衝突位置の剛性による応答の違いを確認

Test	衝突位置	目標速度[m/s]	飛行体
1	2F壁中央	50	柔（ステンレス製）
2	2F壁中央	150	柔（ステンレス製）
3	2F壁中央	150	柔（樹脂製）
4	2F壁中央	50	剛（アルミ製）
5	2F床部	50	柔（ステンレス製）
6	2F床部	150	柔（ステンレス製）
7	2F床部	150	柔（樹脂製）
8	2F床部	50	剛（アルミ製）

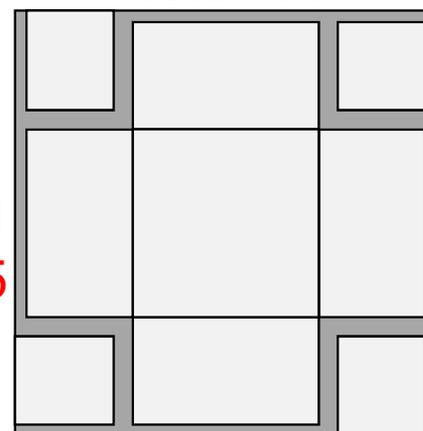
2018年度

2018年度実施の実験

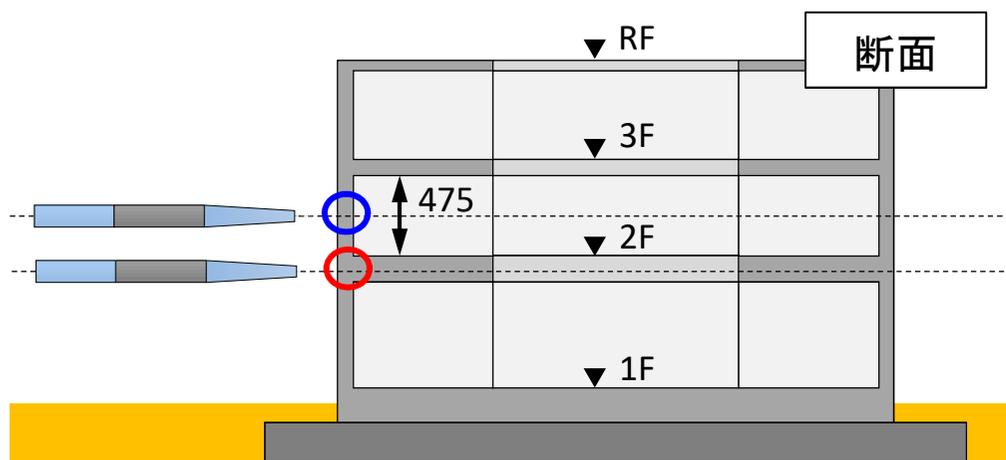
結果について報告する

2019年度

Test3 Test7

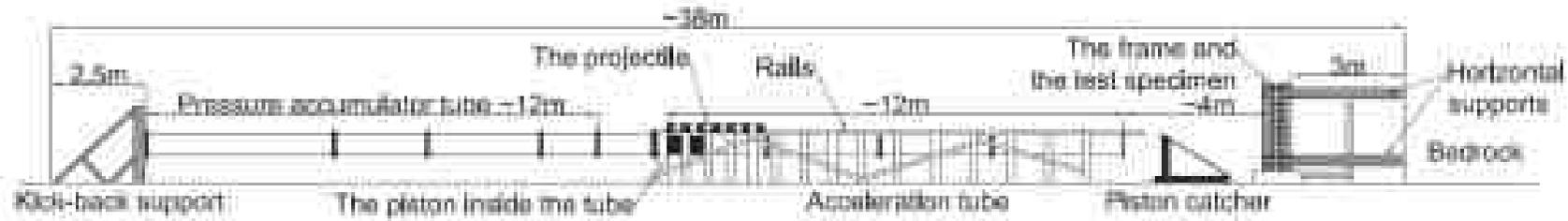


Test4 Test8



実験装置

衝突実験はフィンランド技術研究センター（VTT Technical Research Centre of Finland Ltd.）にて実施



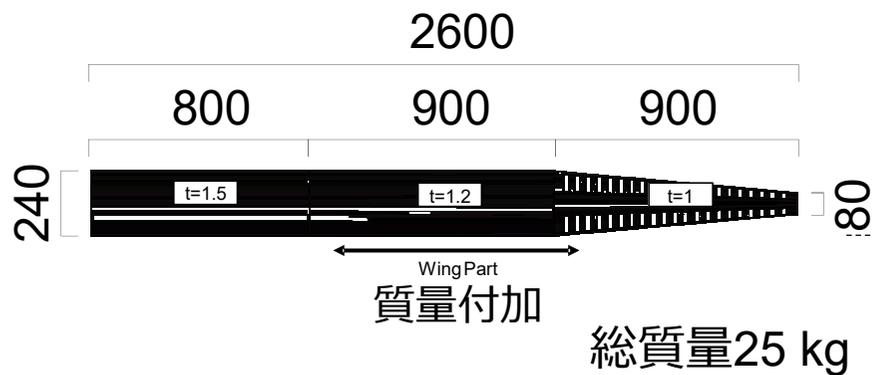
A.Vepsä, K.Calonius, A.Saarenheimo, S.Aatola, M. Halonen (2017) : Soft impact testing of a wall-floor-wall reinforced concrete structure, Nuclear Engineering and Design, No.311, pp.86-103.

実験時の実測衝突速度

ケース名	TEST1	TEST2	TEST3	TEST4
飛翔体種類	ステンレス製 柔	ステンレス製 柔	樹脂製 柔	鋼製 剛
目標衝突速度	50m/s	150m/s	150m/s	50m/s
実測衝突速度	52.2m/s	150.7m/s	146.5m/s	44.3m/s
衝突面位置	A通り外壁中央	D通り外壁中央	4通り壁中央	1通り壁中央

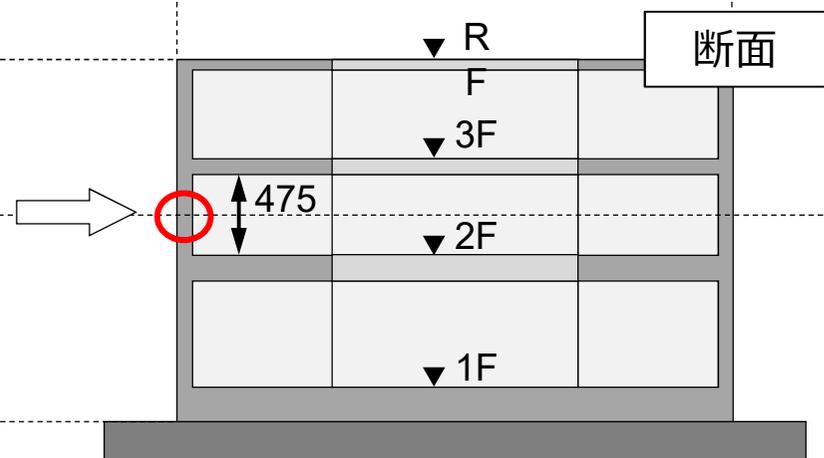
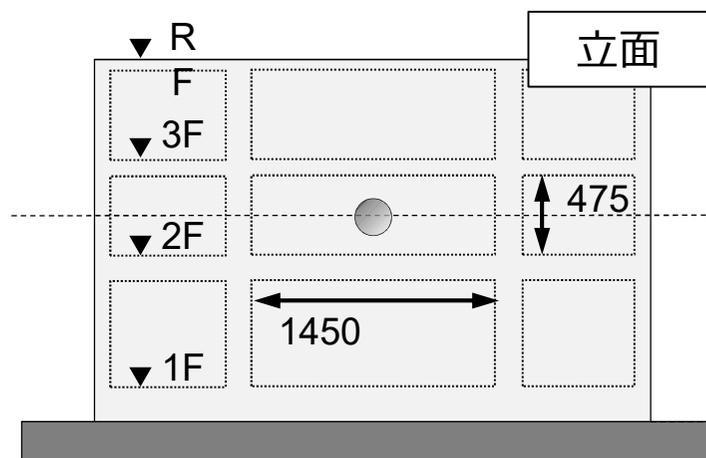
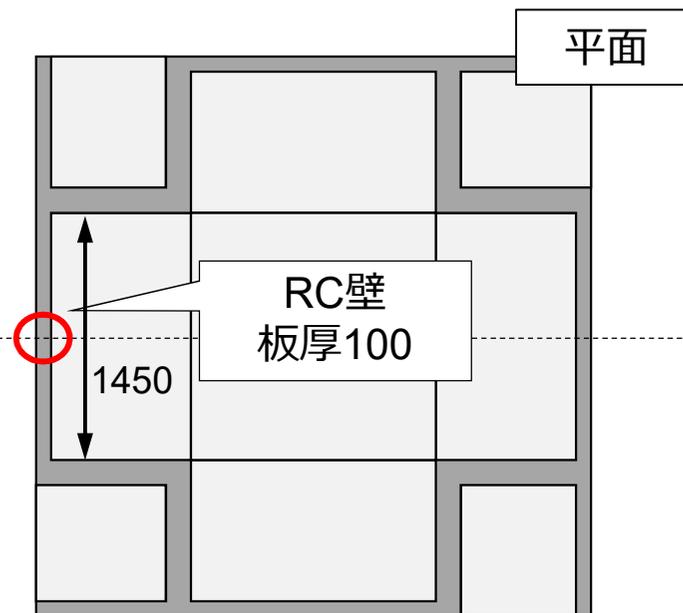
TEST 1 柔飛翔体 (ステンレス製)、50m/s

■ TEST 1 概要

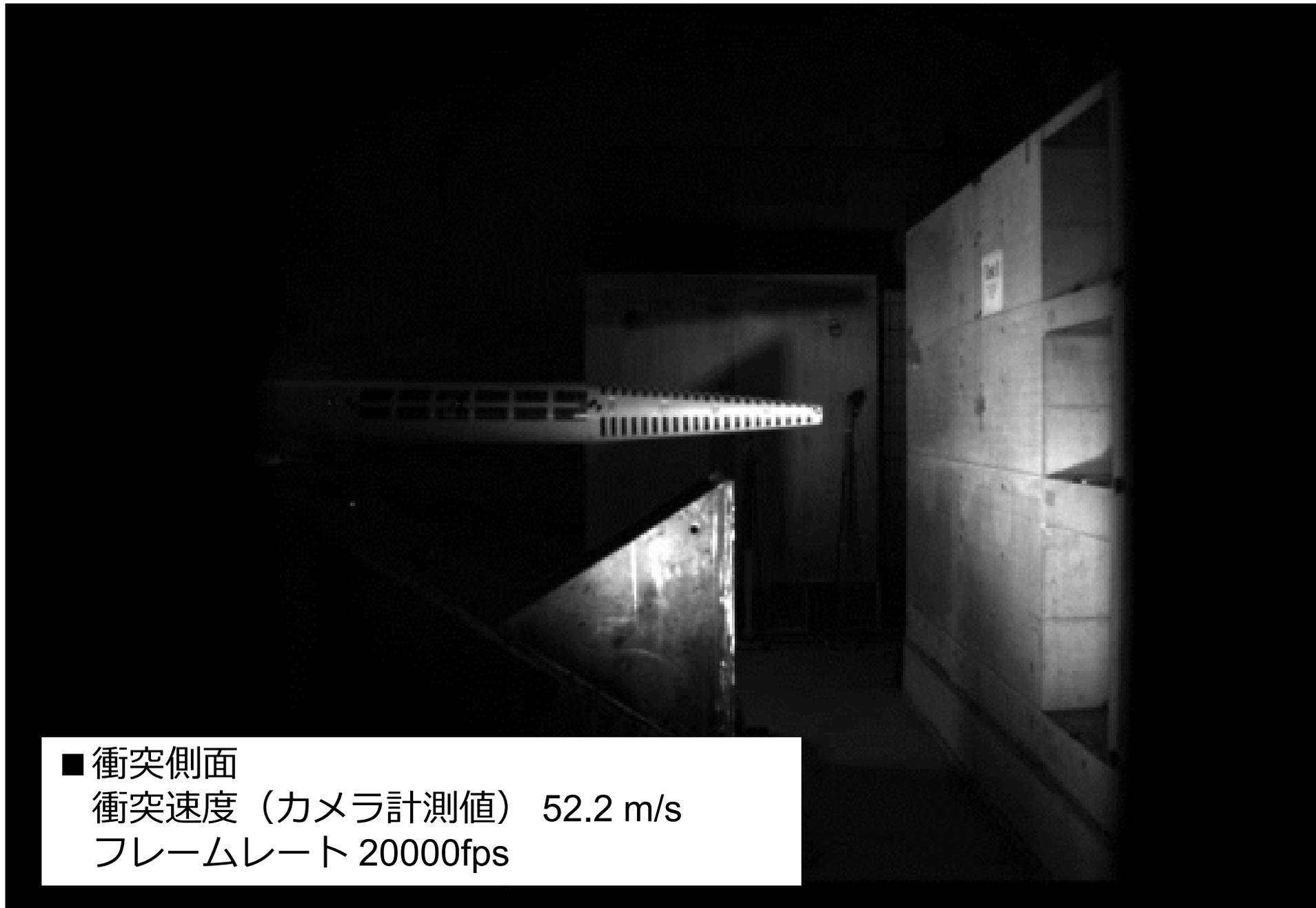


ステンレス鋼製 柔飛翔体
目標速度 50 m/s

衝突

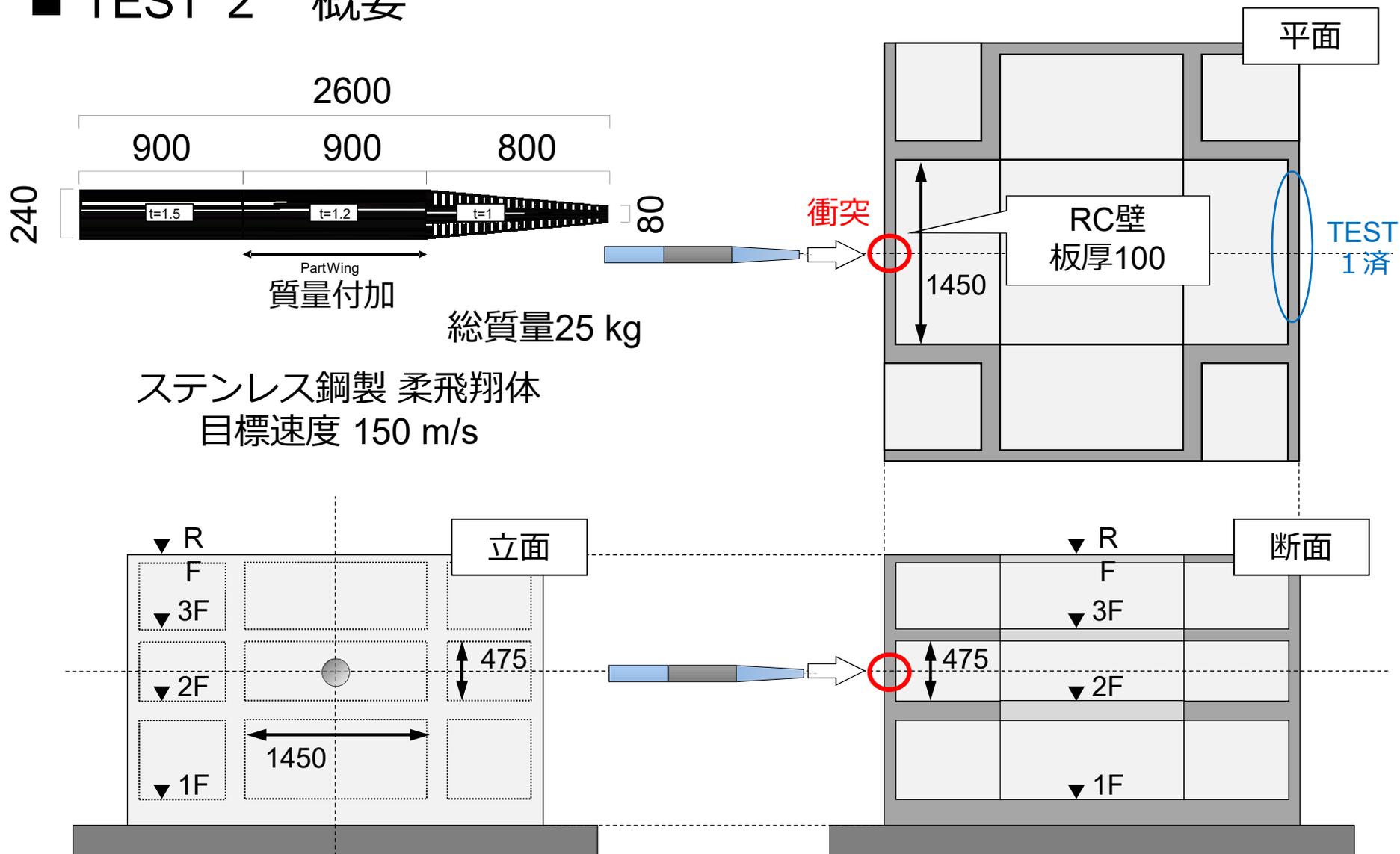


TEST1 柔飛翔体（ステンレス製）、50m/s

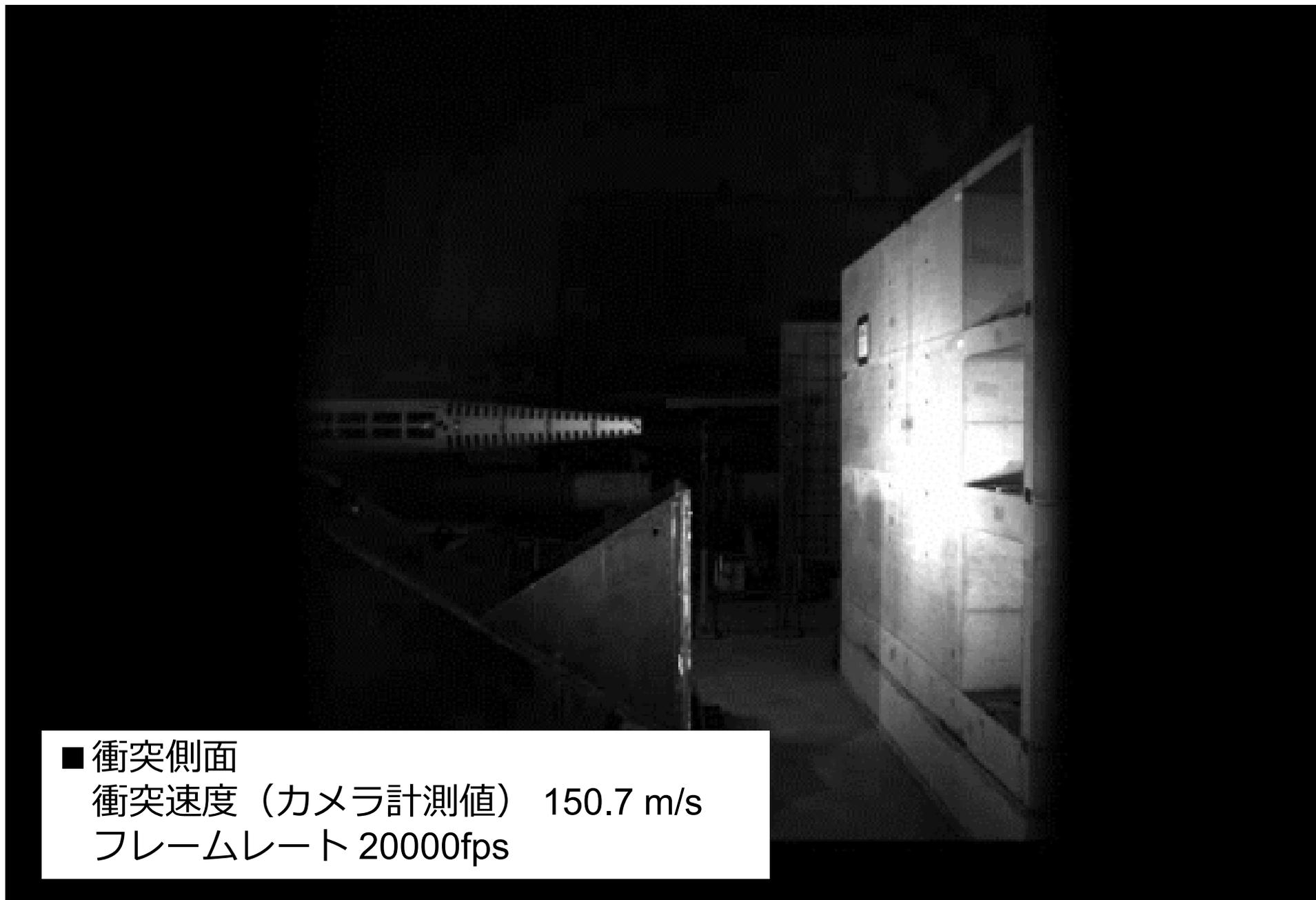


TEST 2 柔飛翔体（ステンレス製）、150m/s

■ TEST 2 概要



TEST 2 柔飛翔体（ステンレス製）、150m/s



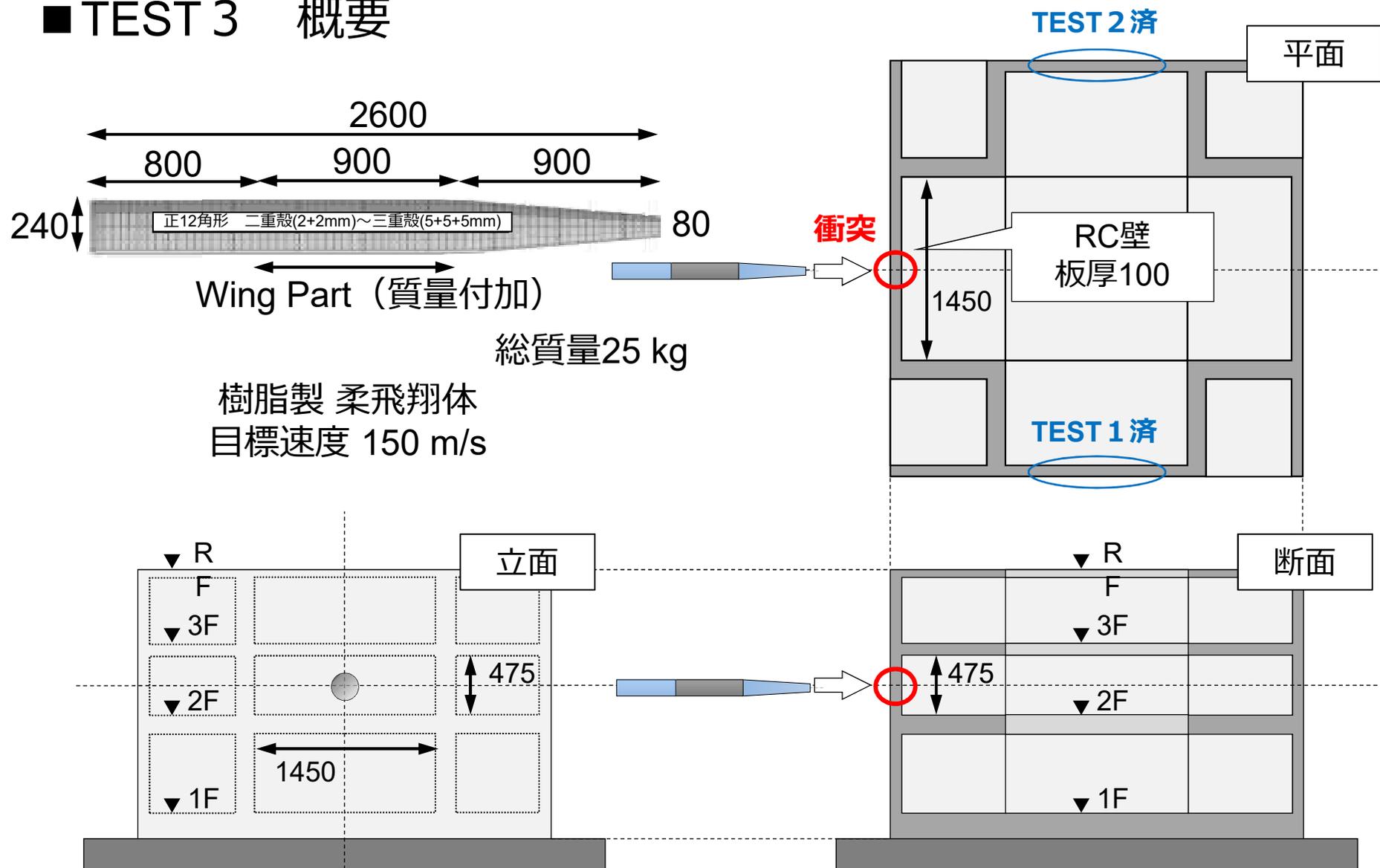
■ 衝突側面

衝突速度（カメラ計測値） 150.7 m/s

フレームレート 20000fps

TEST 3 柔飛翔体 (樹脂製)、150m/s

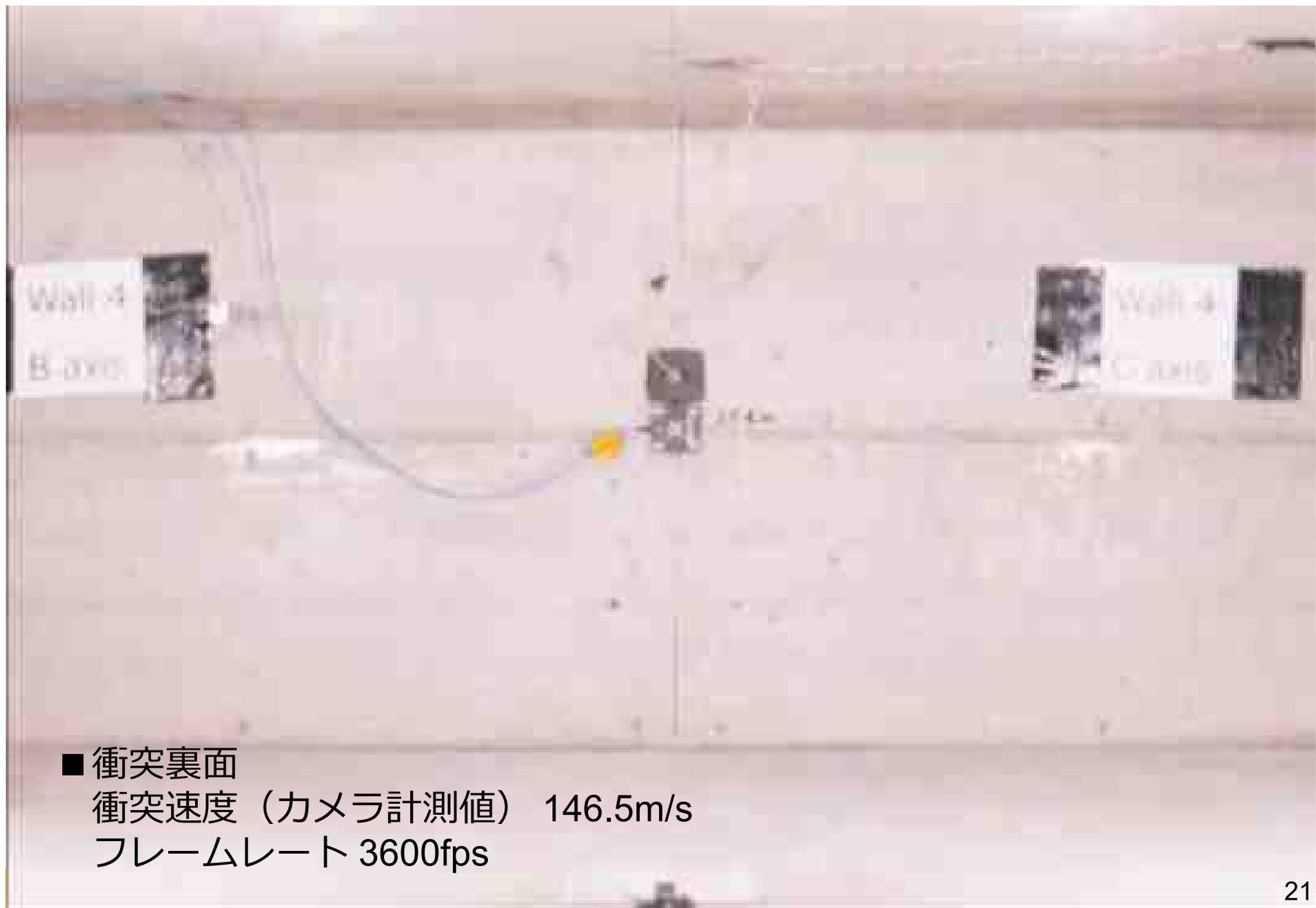
■ TEST 3 概要



TEST 3 柔飛翔体（樹脂製）、150m/s



TEST 3 柔飛翔体（樹脂製）、150m/s



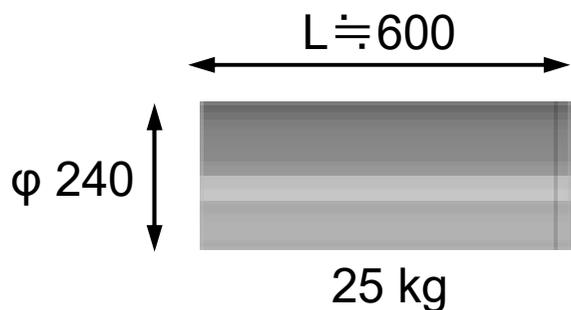
■ 衝突裏面

衝突速度（カメラ計測値） 146.5m/s

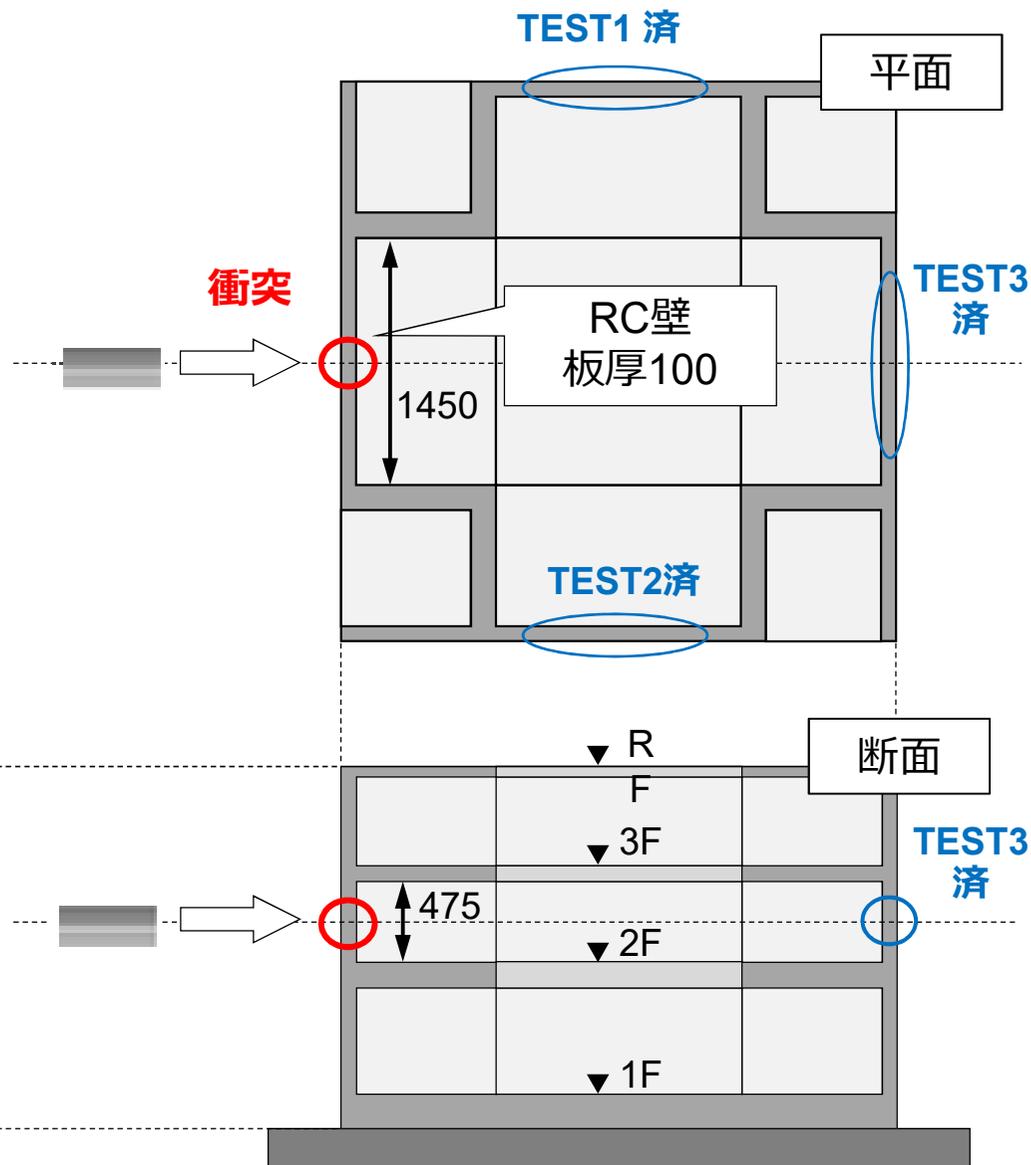
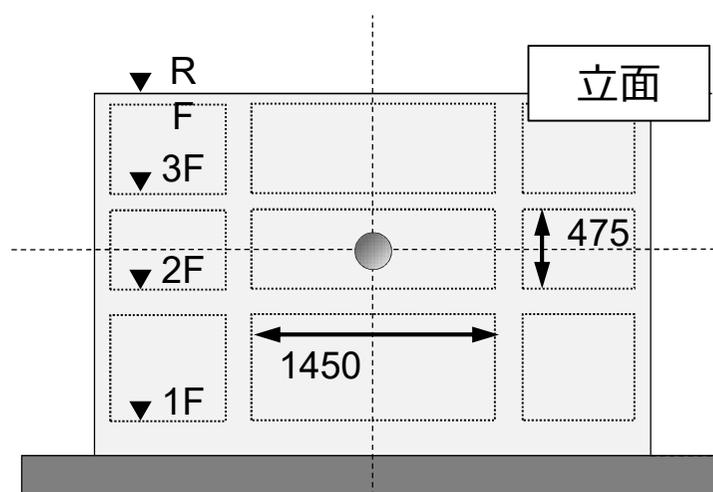
フレームレート 3600fps

TEST 4 剛飛翔体、50m/s

■ TEST 4 概要



アルミ合金製 剛飛翔体
目標速度 50 m/s



TEST 4 剛飛翔体、50m/s



■ 衝突側面

衝突速度 (カメラ計測値) 44.3 m/s

フレームレート 20000fps

TEST 4 剛飛翔体、50m/s



■ 衝突裏面

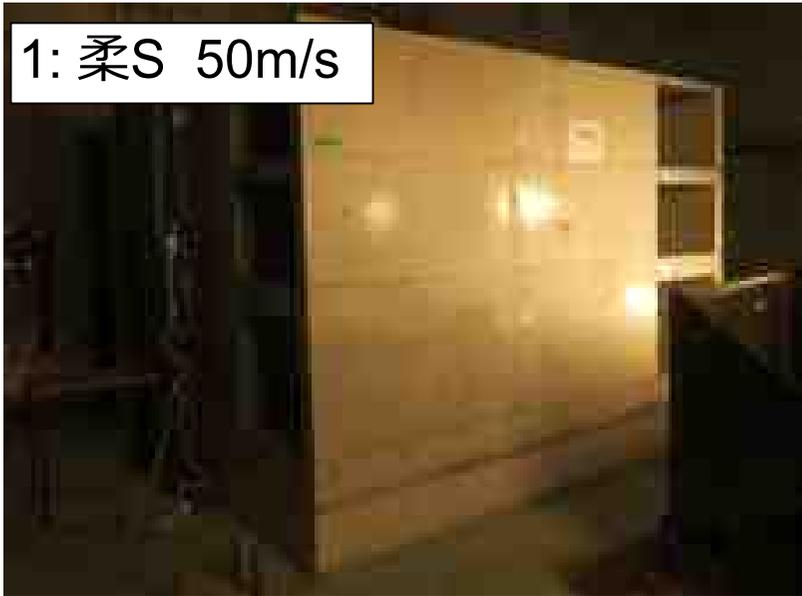
衝突速度 (カメラ計測値) 44.3 m/s

フレームレート 3600fps

実験結果の比較①

■ 実験後 全体

1: 柔S 50m/s



2: 柔S 150m/s



3: 柔R 150m/s



4: 剛 50m/s

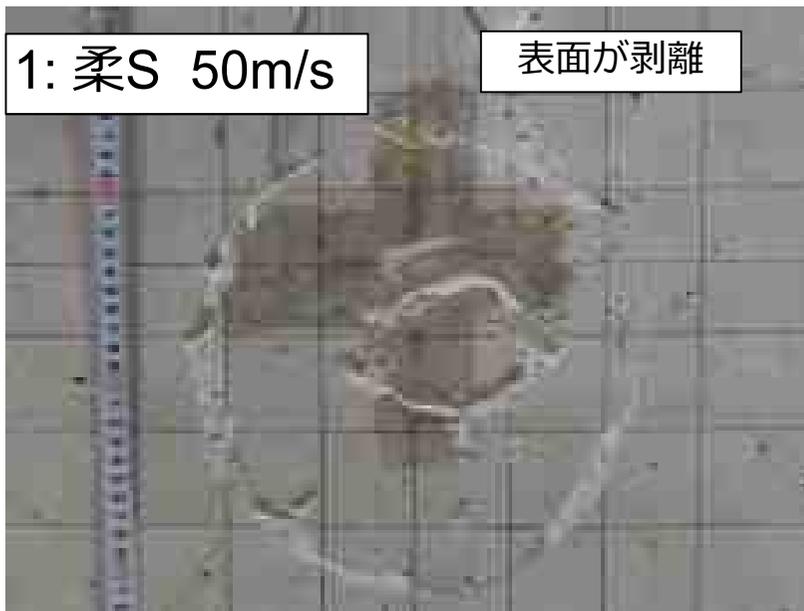


実験結果の比較②

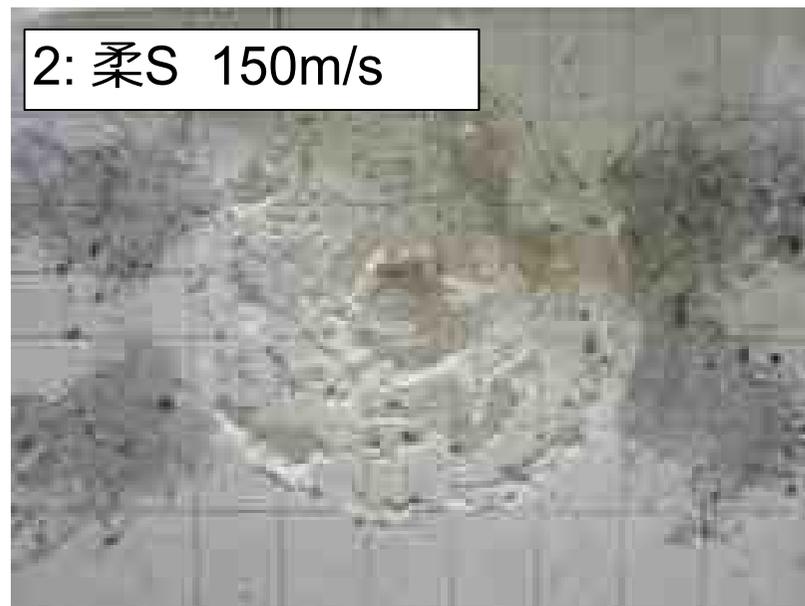
■ 実験後 衝突面

1: 柔S 50m/s

表面が剥離



2: 柔S 150m/s



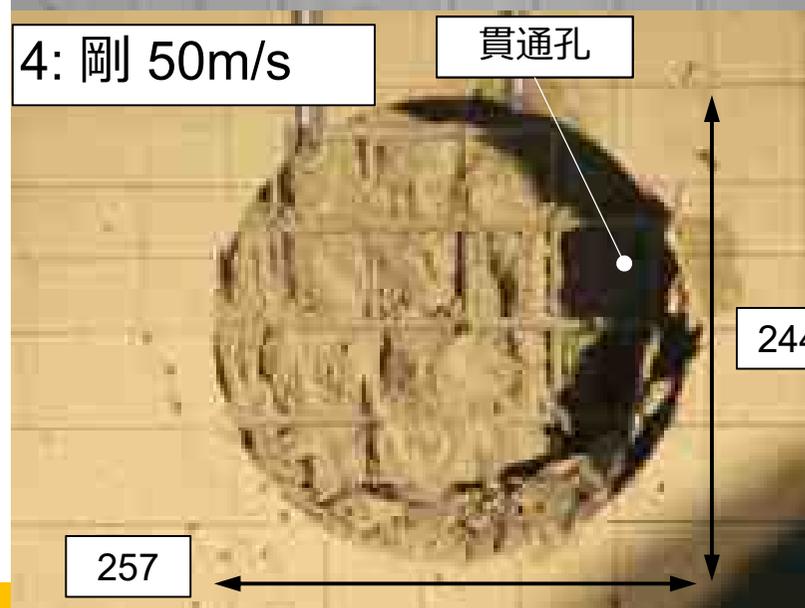
3: 柔R 150m/s

飛行体の破片



4: 剛 50m/s

貫通孔



実験結果の比較③

■実験後 裏面

1: 柔S 50m/s



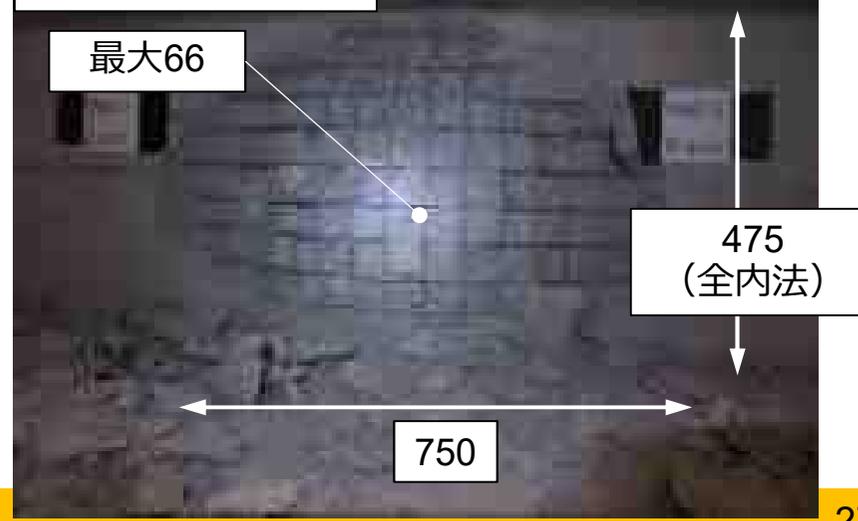
2: 柔S 150m/s



3: 柔R 150m/s



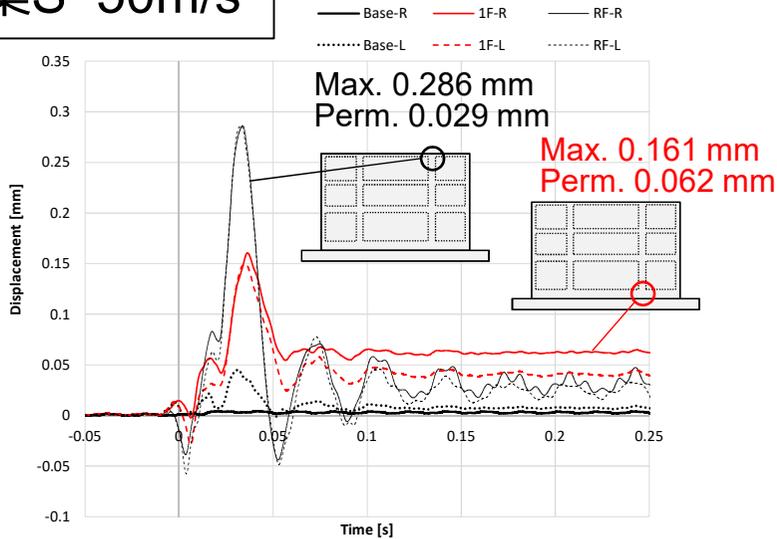
4: 剛 50m/s



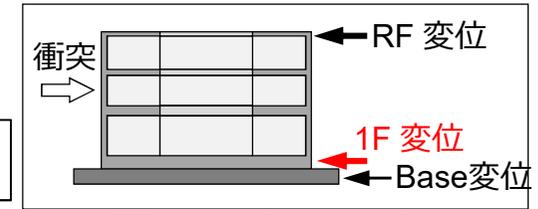
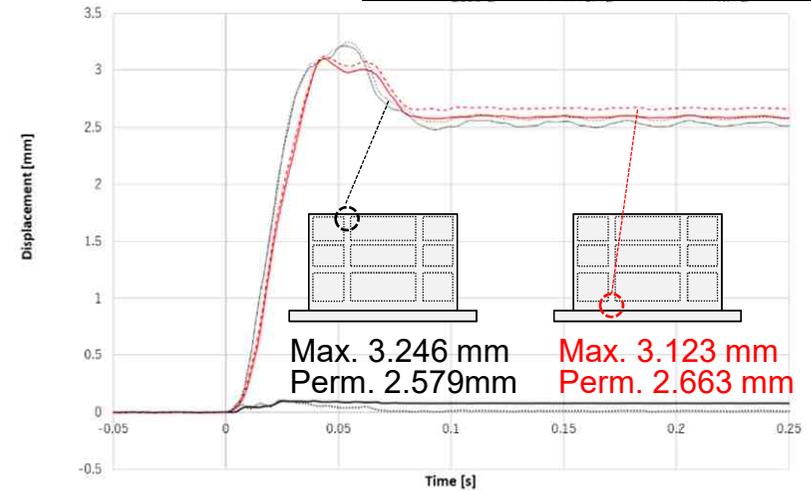
実験結果の比較④

■ 衝突反対側 壁面 変位

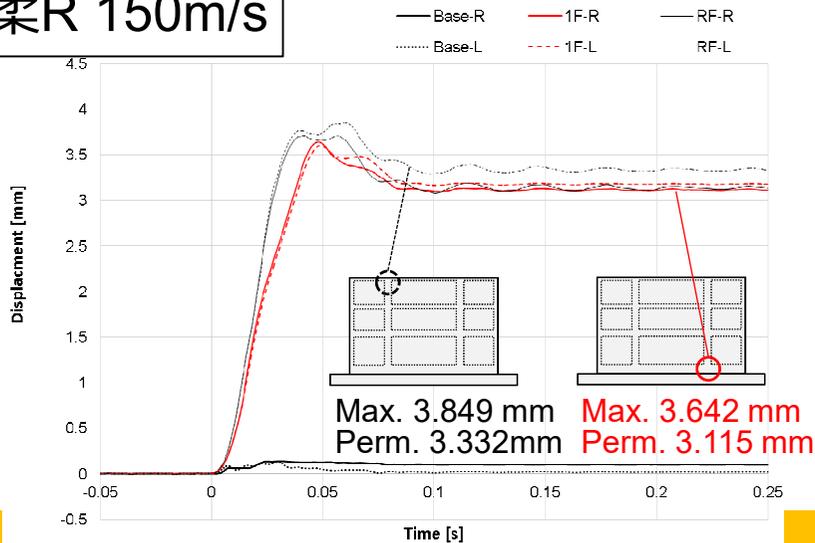
1: 柔S 50m/s



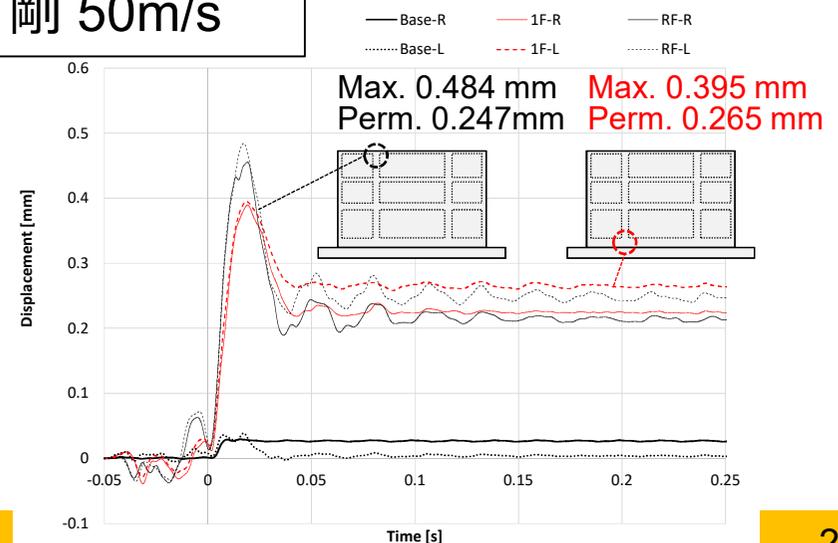
2: 柔S 150m/s



3: 柔R 150m/s

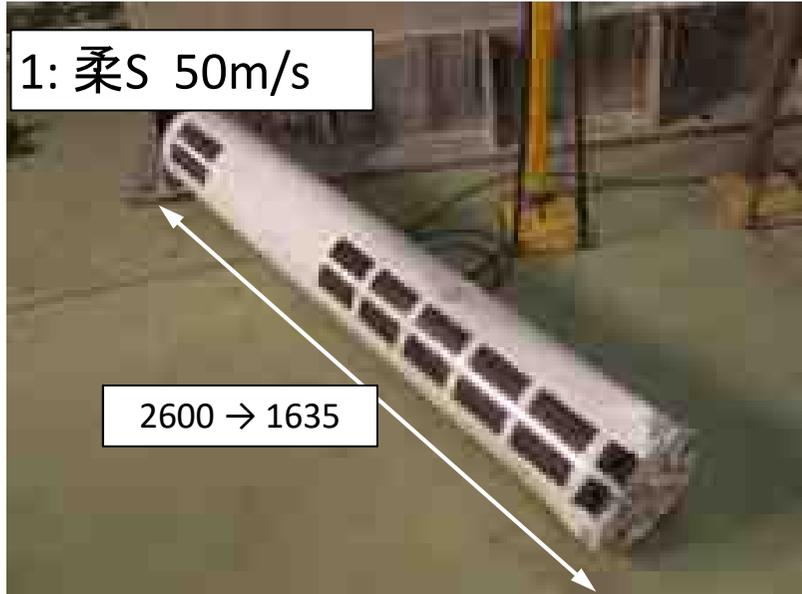


4: 剛 50m/s



実験結果の比較⑤

■ 実験後 飛行体



実験結果の比較⑥

■ 飛翔体の衝突面における位置および速度時刻歴⁵

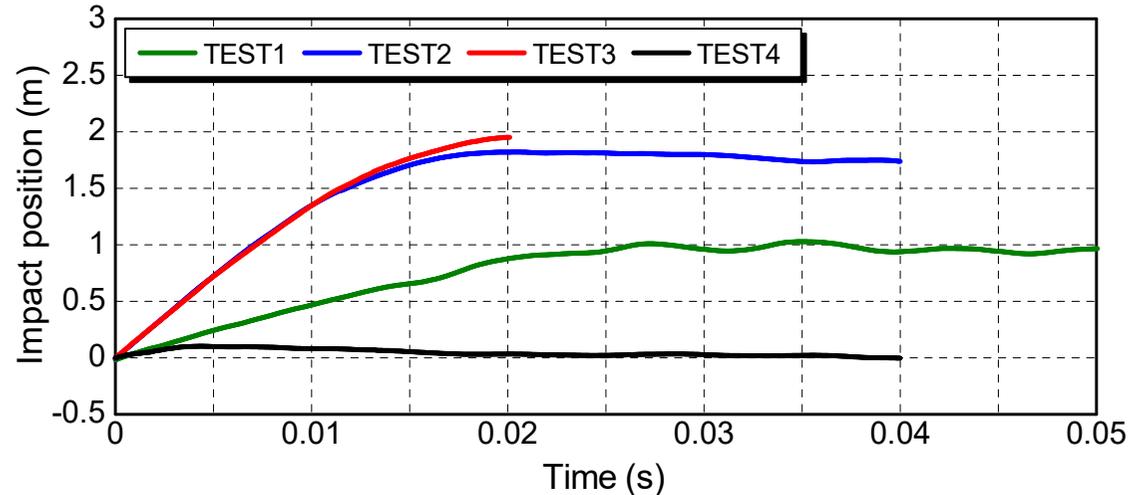
■ TEST-1では約1m損傷。約0.04sまでが衝撃作用時間。

■ TEST-2, TEST-3での飛翔体は同程度の損傷。衝撃作用時間は約0.02s。

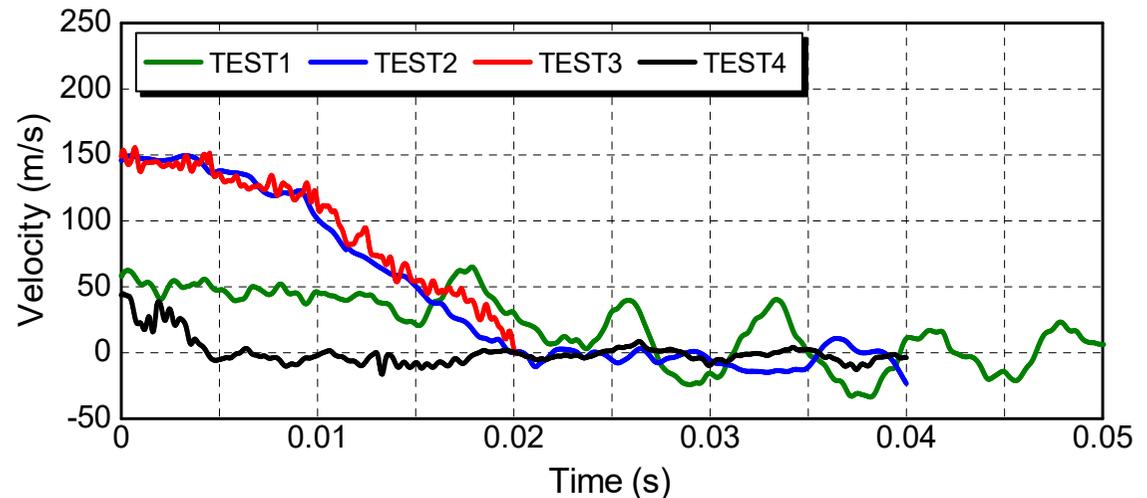
■ TEST-3では衝突時に高次振動が発生。

■ TEST-4では作用時間は短い。

TEST-1	S製柔	50m/s
TEST-2	S製柔	150m/s
TEST-3	樹脂製柔	150m/s
TEST-4	剛	50m/s



各時刻における模型飛翔体先端からの衝突面位置



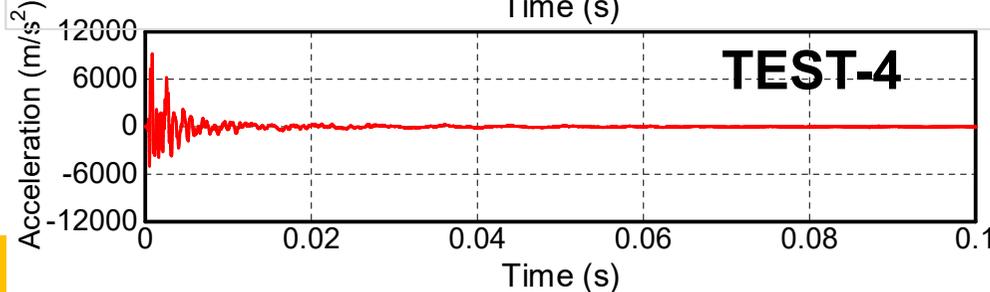
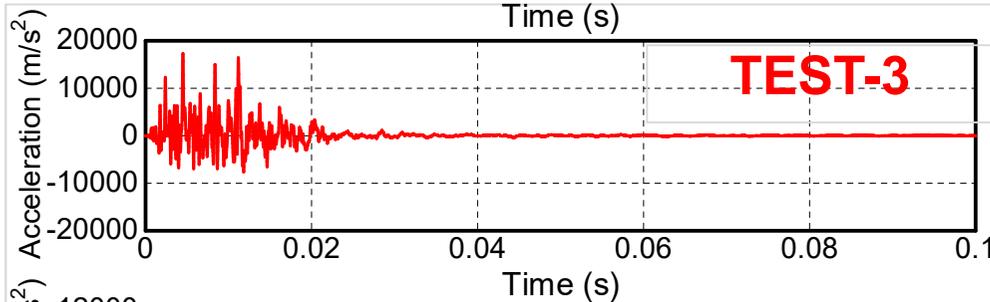
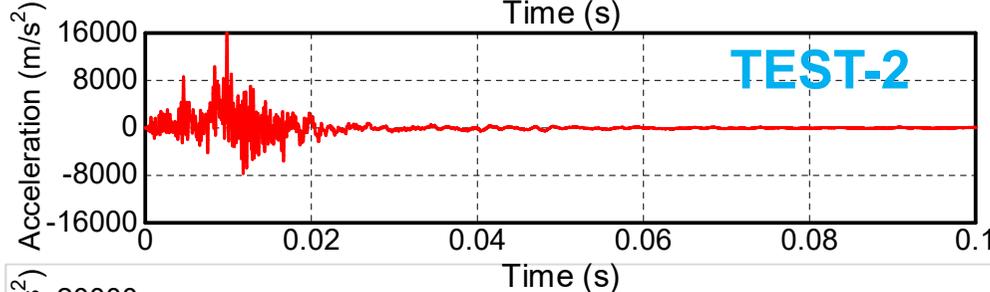
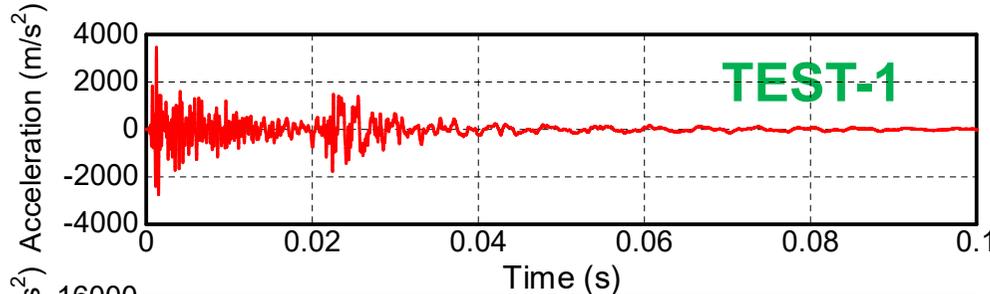
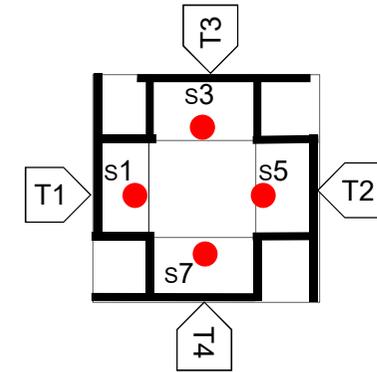
各時刻における模型飛翔体の速度

実験結果の比較⑦

■ 衝突面裏側3階床自由端中央での面外応答加速度時刻歴

使用機器 : PCB356A02 (4900m/s²、1.0-5000Hz)
 : PCB356B20 (49000m/s²、2.0-7000Hz)

波形処理 : バンドパスフィルタ (4~5000Hz)



■ TEST-1では、衝撃荷重が段階的に作用し、衝撃荷重の作用時間が長い。

■ TEST-2では、前1/3部の衝突の後、重い後部が衝突するのが読み取れる。

■ TEST-3では、パルス状の高次の加速度が生じた。

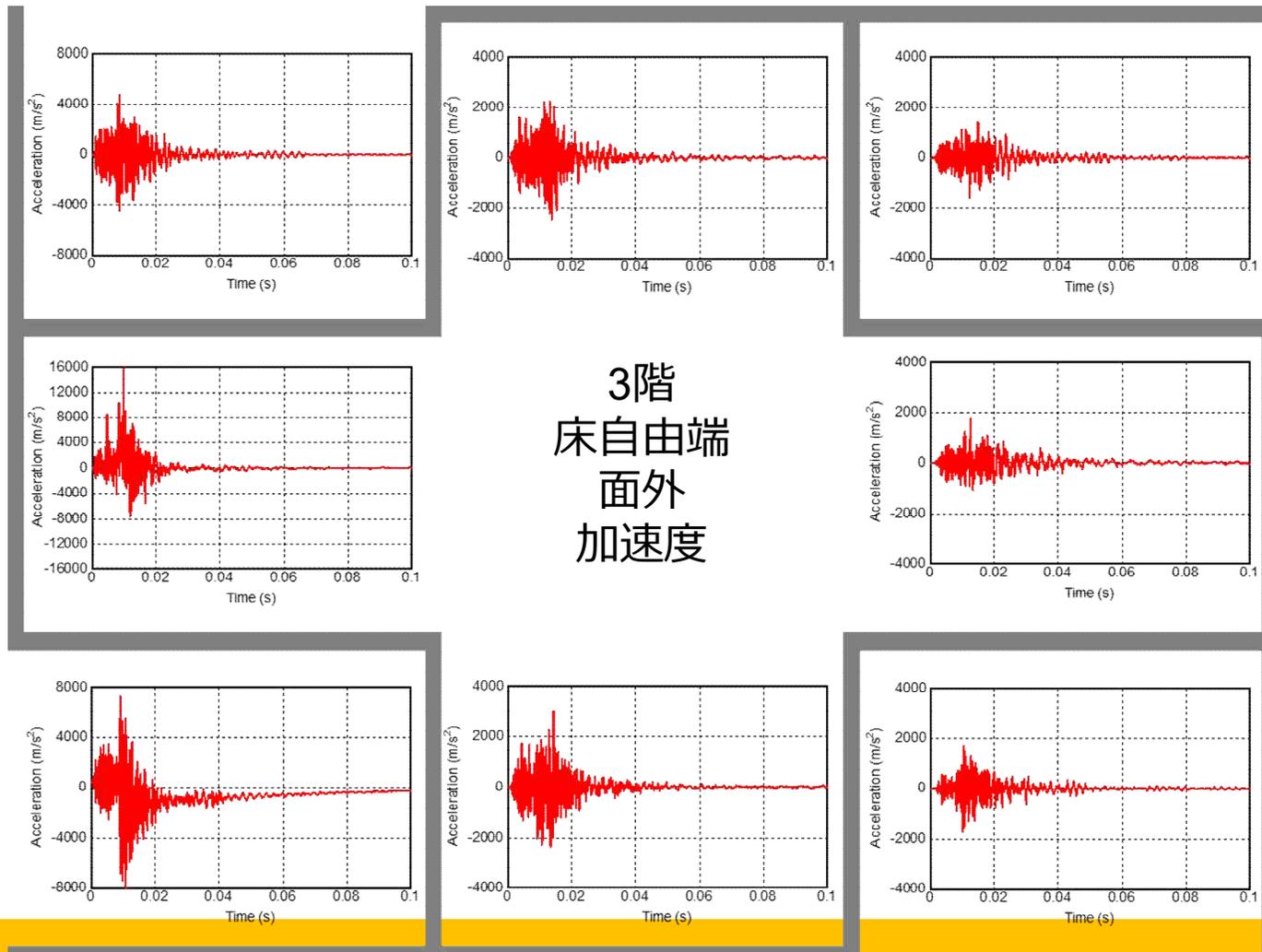
■ TEST-4では、衝撃荷重の作用時間は短く、急速に減衰した

TEST-1	S製柔	50m/s
TEST-2	S製柔	150m/s
TEST-3	樹脂製柔	150m/s
TEST-4	剛	50m/s

【加速度記録】 3階床自由端中央での面外応答加速度時刻歴⁵

- ほぼ同距離にある壁や床では、同程度の振幅。
- 衝突面から遠いほど、揺れ始めが遅れ、振幅が減少
- 壁と比べ床の振動時間は長い。

スチール製
飛翔体
150m/s
衝突方向



衝突実験のまとめおよび今後の予定

- ✓ 柔飛翔体50m/sでは躯体構造物の衝突面外壁は殆ど損傷せず、ステンレス製模型柔飛翔体150m/sでは裏面剥離しなかった。
 - ✓ 樹脂製柔模型飛翔体では裏面にひび割れが生じ小さな破片が落下した。
 - ✓ 剛飛翔体50m/sでは大きく裏面剥離したが、飛翔体は貫通しなかった。
 - ✓ ほぼ同距離にある壁や床では、同程度の振幅。
 - ✓ 衝突面から遠いほど、揺れ始めが遅れ、振幅が減少。
 - ✓ 壁と比べ床の振動時間は長い。
- 衝突速度、衝突物の剛性、衝突位置の剛性をパラメータに衝突実験を実施した。今後、実験結果の再現解析を実施する。実験結果の分析および解析結果から総合的に評価し、衝突解析における課題・注意点を整理する。

参考文献

1. 太田良巳, 山田和彦, 澤田祥平, 岡安隆史, 金子貴司, 日向大樹, 石木健士朗, 相馬和貴, 鈴木哲夫 (2018) : 飛翔体衝突による構造物内の衝撃伝播に関する基礎的研究 (その1: 全体計画概要), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東北), 20115, pp.229–230.
2. 山田和彦, 相馬和貴, 岡安隆史, 澤田祥平, 太田良巳 (2018) : 飛翔体衝突による構造物内の衝撃伝播に関する基礎的研究 (その2: 柔飛翔体の製作・試射), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東北), 20116, pp.231–232.
3. 二階堂雄司, 山田和彦, 澤田祥平, 金子貴司, 安本宏, 日向大樹, 太田良巳 (2019) : 飛翔体衝突による構造物内の衝撃伝播に関する基礎的研究 (その3: ステンレス製模型柔飛翔体の衝突実験), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北陸), 20126, pp.251–252.
4. 太田良巳, 山田和彦, 澤田祥平, 岡安隆史, 金子貴司, 日向大樹, 石木健士朗, 相馬和貴 (2019) : 飛翔体衝突による構造物内の衝撃伝播に関する基礎的研究 (その4: 樹脂製模型柔飛翔体と剛飛翔体の衝突実験), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北陸), 20127, pp.253–254.
5. 山田和彦, 澤田祥平, 金子貴司, 太田良巳 (2019) : 飛翔体衝突による構造物内の衝撃伝播に関する基礎的研究 (その5: 壁中央への衝突実験結果の比較), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北陸), 20128, pp.255–256.
6. 二階堂雄司, 山田和彦, 澤田祥平, 石木健士朗, 岡安隆史, 太田良巳 (2020) : 飛翔体衝突による構造物内の衝撃波伝播に関する基礎的研究 (その6: 床レベルへの衝突実験結果の概要) 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), 20169, pp.337–338.
7. 太田良巳, 山田和彦, 澤田祥平, 金子貴司, 相馬和貴, 安本宏 (2020) : 飛翔体衝突による構造物内の衝撃波伝播に関する基礎的研究 (その7: 床レベルへの衝突実験結果の比較) 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), 20170, pp.339–340.

本事業の成果を論文に取りまとめ、投稿していく予定である。