

PC鋼材突出に対する緊張防護板の実験

報告書

令和3年2月

(一社) プレストレスト・コンクリート建設業協会
施工安全委員会 施工部会

アラミド繊維体をコアとする緊張防護板の検討実験結果の報告

1. はじめに

1) 経緯

平成25年度のPC基幹技能者研修におけるエポキシ樹脂被覆PC鋼材の破断実験において、破断したPC鋼より線（被覆、1S12.7）が一般的な緊張防護板（市販品の緊張プロテクター）を貫通し、数m後方へ飛翔する事象が発生した。

この危険な事案に端を発し、本部施工部会において平成26年度より緊張防護板の検証活動を行うこととした。

2) 取り組み

緊張防護板の検証活動として、平成26年度より現在に至るまで最適な防護板の提案に向けて様々な検討を重ね、平成27年7月にはエポキシ樹脂被覆PC鋼より線を使用して2種類の緊張防護板（合板および市販品）について検証実験を行った。（写真-1参照）

次にこの実験結果を踏まえ最適な緊張防護板を具現化するためにまずは緊張防護板に使用する材料の検討を行い、平成28年6月にはアラミド繊維体をコアとする緊張防護板の検討実験（プレ実験）を実施した。（写真-2参照）

そして、この度このプレ実験結果に基づき緊張防護板の仕様を決定し、その緊張防護板の性能を評価するためのPC鋼材射出実験を行うに至った。



写真-1 検証実験（合板および市販品）

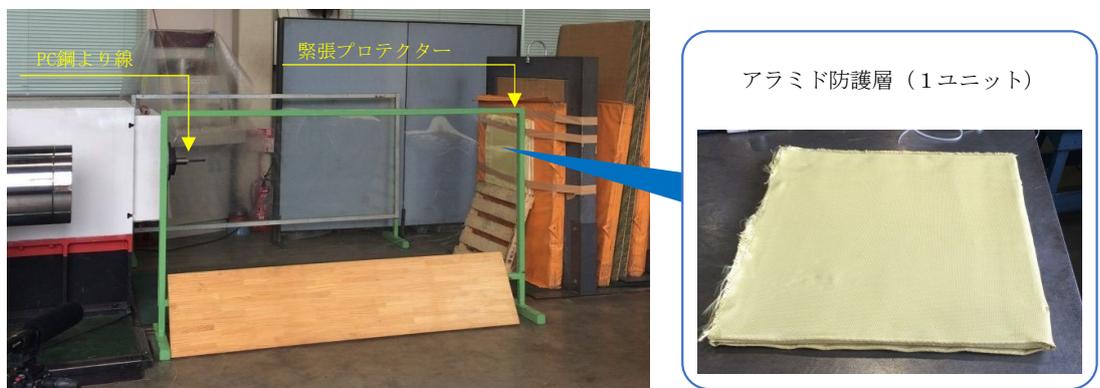


写真-2 検証実験（プレ実験）

2. 概要

1) 実験方法

緊張ジャッキを用いてPC鋼より線（付着型ECFストランドおよび裸線）を破断射出し、緊張防護板（アラミド繊維体をコアとする緊張防護板および市販品）について、その性能を確認する。

2) 実験月日

令和2年10月14日（水）

3) 実験場所

F K K極東鋼弦コンクリート振興株式会社

平塚機材センター

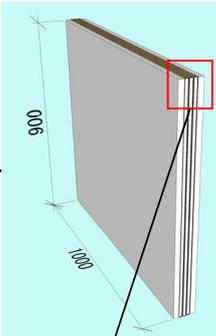
4) 衝突体（PC鋼より線）の仕様

① 種類： 1 S 1 2. 7 mm （付着型ECFストランド）
1 S 1 2. 7 mm （裸線）

② 鋼材長： 4.8m（固定間距離≒4.2m）

5) 実験対象物（緊張防護板）の仕様

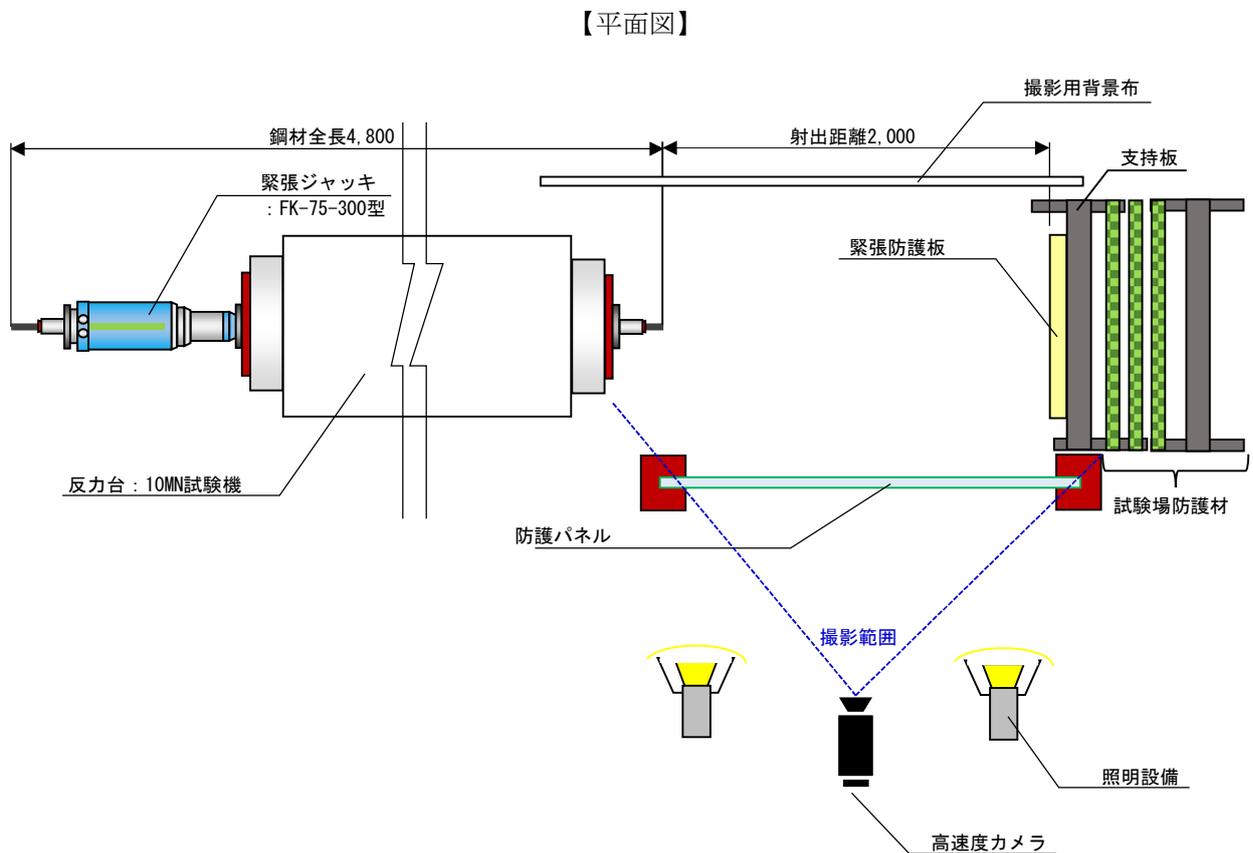
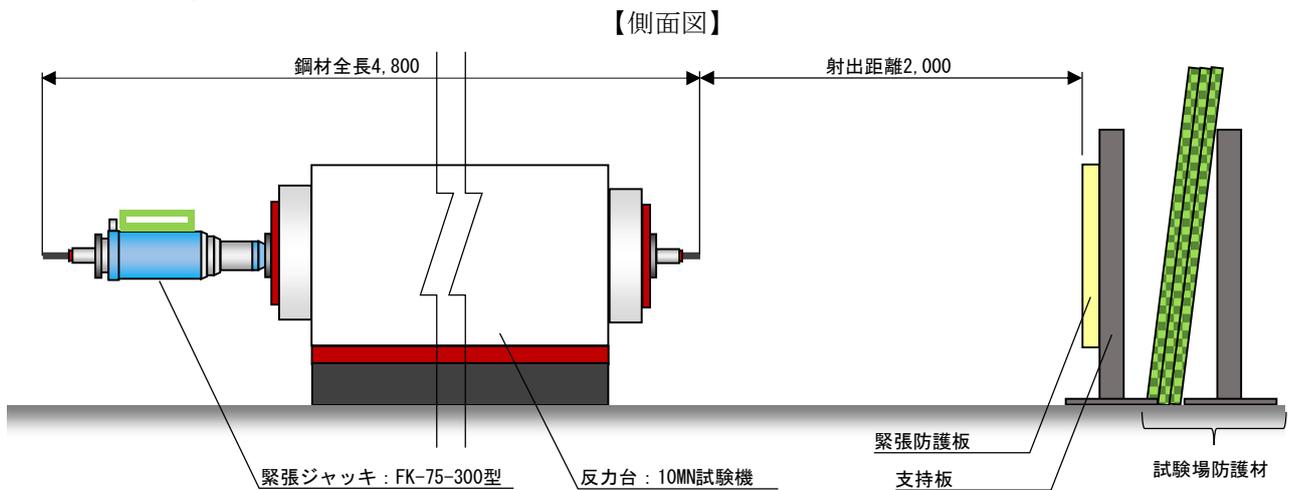
本体サイズ： H 9 0 0 × W 1 0 0 0 × t 7 0

	構造	概要
案1	①エペラン（38倍） 20mm ②アラミド繊維5層 10mm 【芯材有】 ③アラミド繊維5層 10mm 【芯材有】 ④アラミド繊維5層 10mm 【芯材有】 ⑤エペラン（38倍） 20mm	<ul style="list-style-type: none"> ・プレ実験に基づく仕様 ・アラミド繊維体：15層 
案2	①エペラン（38倍） 20mm ②アラミド繊維4層 10mm 【芯材有】 ③アラミド繊維4層 10mm 【芯材有】 ④アラミド繊維4層 10mm 【芯材有】 ⑤エペラン（38倍） 20mm	<ul style="list-style-type: none"> ・案1の廉価版 ・アラミド繊維体：12層
案3	①ニードフルマット 10mm ②エペラン（38倍） 20mm ③アラミド繊維5層 10mm 【芯材有】 ④アラミド繊維5層 10mm 【芯材有】 ⑤エペラン（38倍） 20mm	<ul style="list-style-type: none"> ・案1の廉価版 ・アラミド繊維体：10層 ・ニードフルマット（合繊不織布）を1層使用 
従来品	①エペラン 20mm ②キャッチシート ③エペラン 15mm ④キャッチシート ⑤エペラン 15mm ⑥キャッチシート ⑦エペラン 20mm	<ul style="list-style-type: none"> ・緊張プロテクター ・従来の緊張防護板 
案4	①エペラン（38倍） 30mm ②アラミド繊維8層 10mm 【芯材無】 ③エペラン（38倍） 30mm	<ul style="list-style-type: none"> ・追加 ・緩衝材の間に芯材無しでアラミド繊維シートを8層重ねた構造

6) 実験の種類

実験NO.	緊張防護板の仕様				PC鋼材の仕様	
1	案1	アラミド	15 層	芯材有	1S12.7	ECF
2	案2	アラミド	12 層	芯材有	1S12.7	ECF
3	案3	アラミド	10 層	芯材有	1S12.7	ECF
4	案1	アラミド	15 層	芯材有	1S12.7	裸線
5	案2	アラミド	12 層	芯材有	1S12.7	裸線
6	案3	アラミド	10 層	芯材有	1S12.7	裸線
7	従来品	緊張プロテクター	1 枚		1S12.7	裸線
8	案4	アラミド	8 層	芯材無	1S12.7	裸線
9	案4	アラミド	8 層	芯材無	1S12.7	ECF

7) 実験要領図



8) 実験状況



写真-1 試験場全景

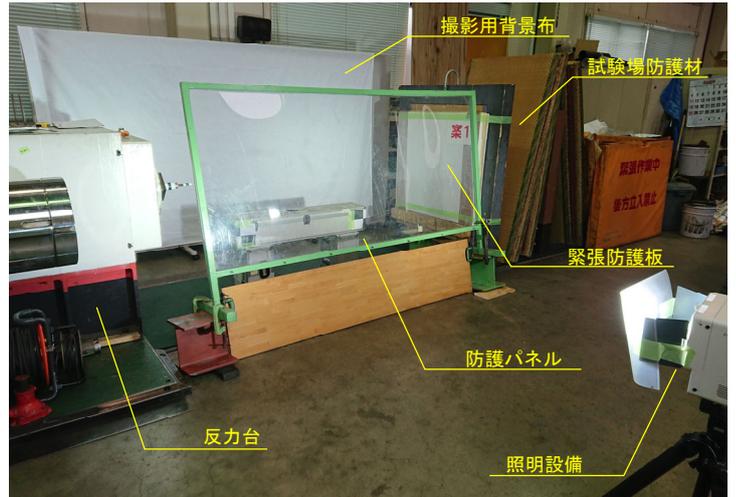


写真-2 撮影箇所状況



写真-3 緊張側状況

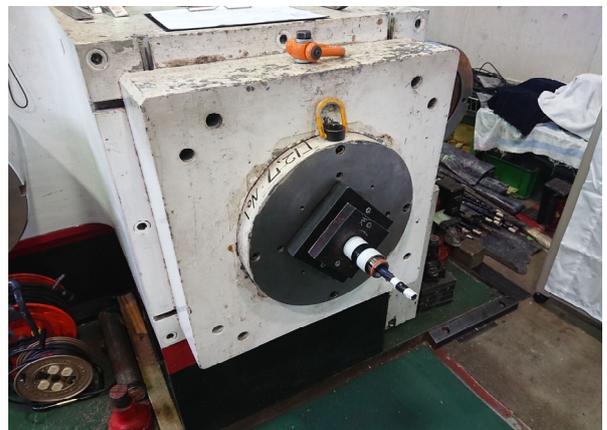


写真-4 射出側状況



写真-5 緊張側防護状況



写真-6 高速度カメラ配置状況

9) PC鋼材飛翔速度の計測

① 計測方法： 高速度カメラを用いてPC鋼より線の突出時の動きを撮影

② 計測対象： 3試験

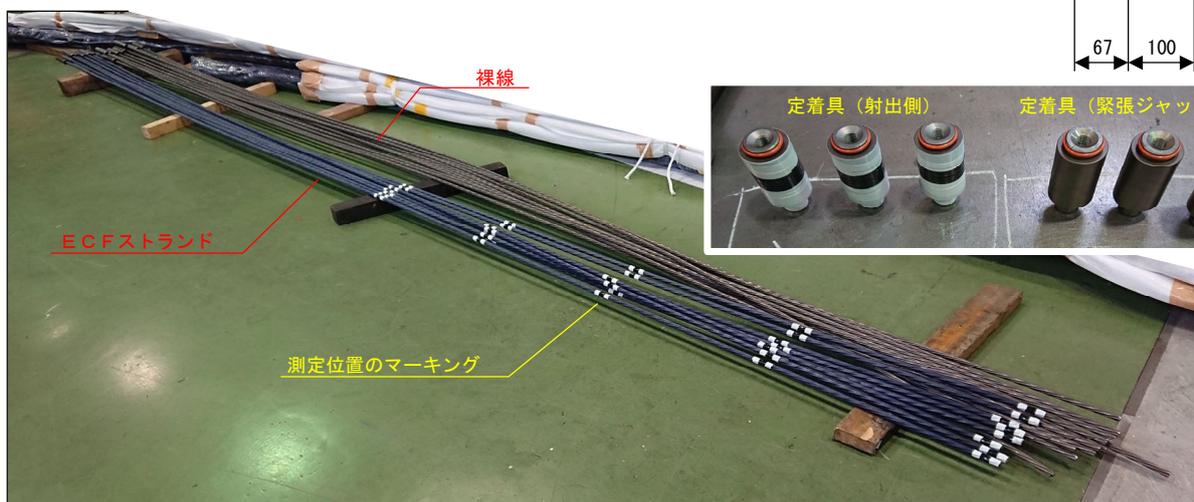
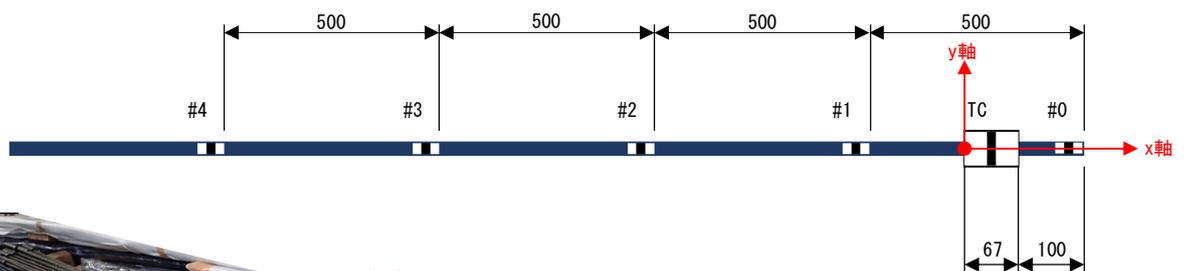
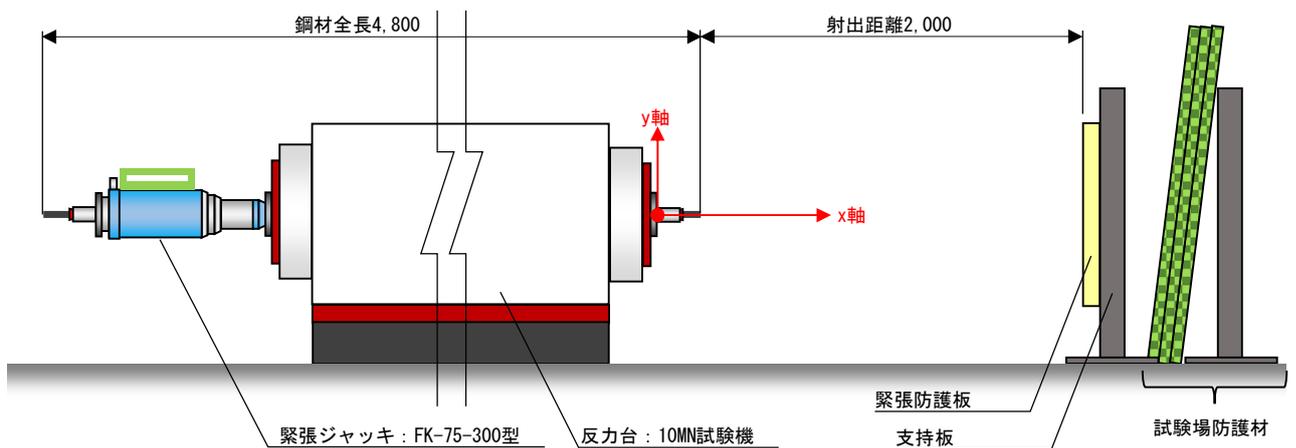
試験NO.	試験条件	
	衝突体 (PC鋼より線)	試験対象物 (緊張防護板)
1	付着型ECFストランド	案1 アラミド15層
2		案2 アラミド12層
3		案3 アラミド10層

③ 計測装置： 高速度カメラ FASTCAM Mini AX200 モノクロモデル [株フォトロン製]
フルフレーム 1,024x1,024ピクセル
照明 メタルハライドランプ HVC-UL [株フォトロン製]

④ 解析ソフト： 動画解析ソフトウェア TEMA [株フォトロン製]

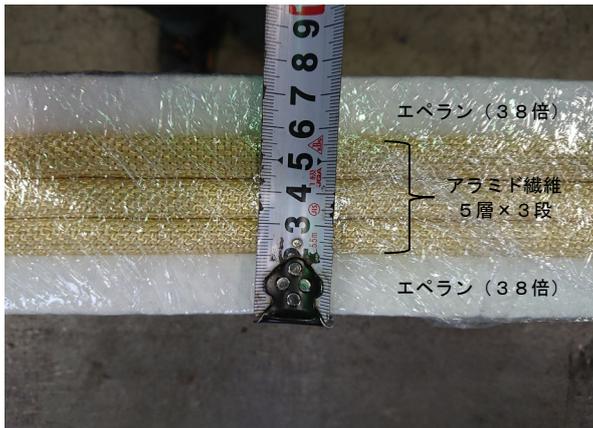
⑤ 撮影条件： 撮影速度 4,000FPS

⑦ 計測概要： PC鋼より線に測定点の位置をマークし、高速度カメラによる撮影により測定点の軌跡を計測し、解析を行う。



3. 使用材料写真（衝突体：緊張防護板）

案1



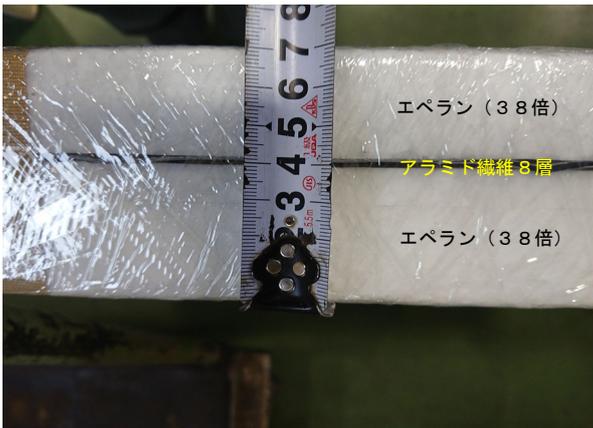
案2



案3



案4



3. 実験結果

1) PC鋼材の破断荷重

実験NO.	破断時圧力計示度	破断荷重	備考
1	17.7 Mpa	209 kN	※緊張ジャッキ (FK-75-300型) の受圧面積 117.8 cm ²
2	17.6 Mpa	207 kN	
3	17.5 Mpa	206 kN	
4	16.8 Mpa	198 kN	
5	16.7 Mpa	197 kN	
6	16.9 Mpa	199 kN	
7	16.6 Mpa	196 kN	
8	17.5 Mpa	206 kN	
9	16.7 Mpa	197 kN	

2) 貫通の有無

実験NO.	PC鋼材貫通の有無	PC鋼材の挙動
1	アラミド5層まで貫通	PC鋼材の跳ね返り 大 定着具ウェッジ飛散しながら防護板に衝突後、さらに跳ね返り飛散
2	アラミド2層まで貫通	PC鋼材の跳ね返り 中 定着具ウェッジ飛散しながら防護板に衝突後、さらに跳ね返り飛散
3	アラミド2層まで貫通	PC鋼材の跳ね返り 小 定着具ウェッジ飛散しながら防護板に衝突後、さらに跳ね返り飛散
4	すべて貫通	PC鋼材のよりがばらけて貫通 定着具ウェッジ飛散しながら防護板に衝突後、さらに跳ね返り飛散
5	すべて貫通	PC鋼材のよりがばらけて貫通 定着具ウェッジ飛散しながら防護板に衝突後、さらに跳ね返り飛散
6	すべて貫通	PC鋼材のよりがばらけて貫通 定着具ウェッジ飛散しながら防護板に衝突後、さらに跳ね返り飛散
7	すべて貫通	PC鋼材のよりがばらけて貫通 定着具ウェッジ飛散しながら防護板に衝突後、さらに跳ね返り飛散
8	すべて貫通	PC鋼材のよりがばらけて貫通 定着具ウェッジ飛散しながら防護板に衝突後、さらに跳ね返り飛散
9	すべて貫通	PC鋼材のよりがばらけずに貫通 定着具ウェッジ飛散しながら防護板に突き刺さる

3) 緊張防護板の貫通状況

次頁に試験NO. 1～9までの緊張防護板の貫通状況写真を添付する。



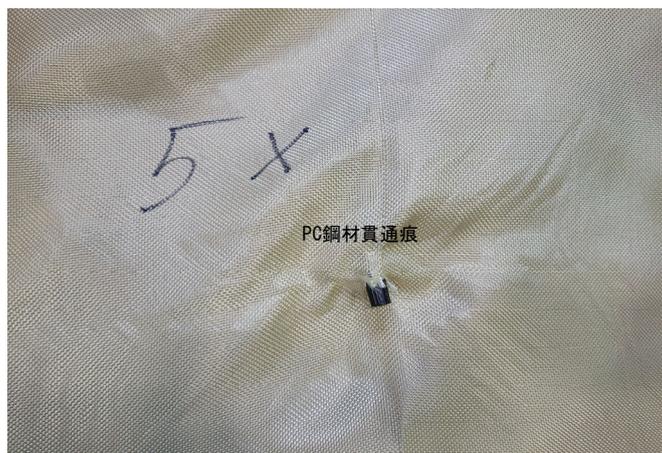
防護板 表側



防護板 裏側



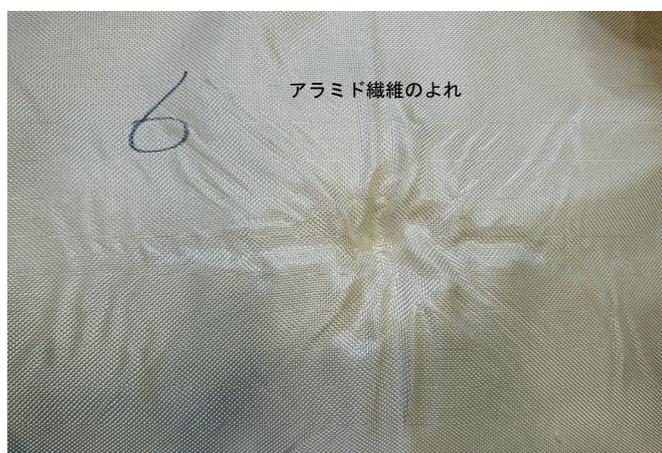
エペラン (表側)



アラミド5層目



エペラン (裏側)



アラミド6層目



破断射出後のPC鋼材



防護板 表側



防護板 裏側



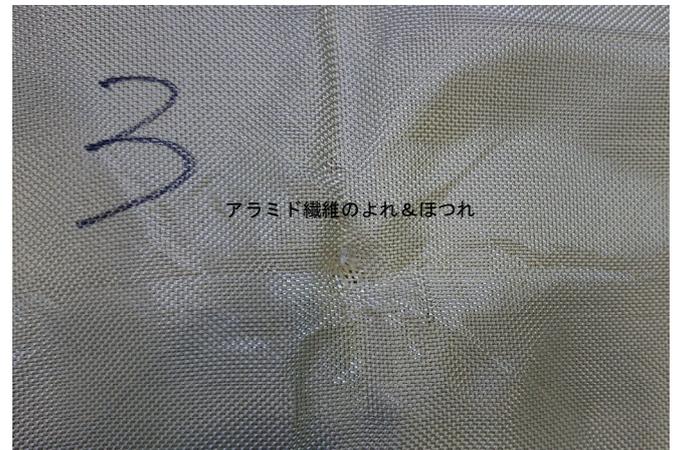
エペラン (表側)



アラミド2層目



エペラン (裏側)



アラミド3層目



破断射出後のPC鋼材

NO. 3



防護板 表側



防護板 裏側



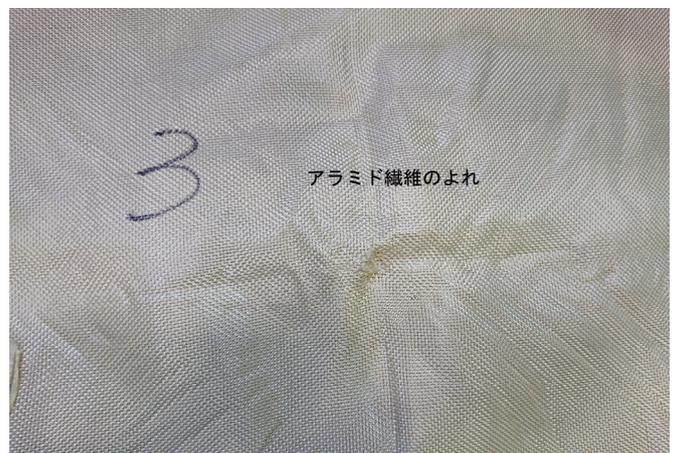
ニードフルマット



アラミド2層目



エペラン (表側)



アラミド3層目



エペラン (裏側)

NO. 4



防護板 表側



防護板 側面



破断射出後のPC鋼材

NO. 5



防護板 表側



防護板 側面

NO. 6



防護板 表側



防護板 側面

NO. 7



防護板 表側



防護板 側面

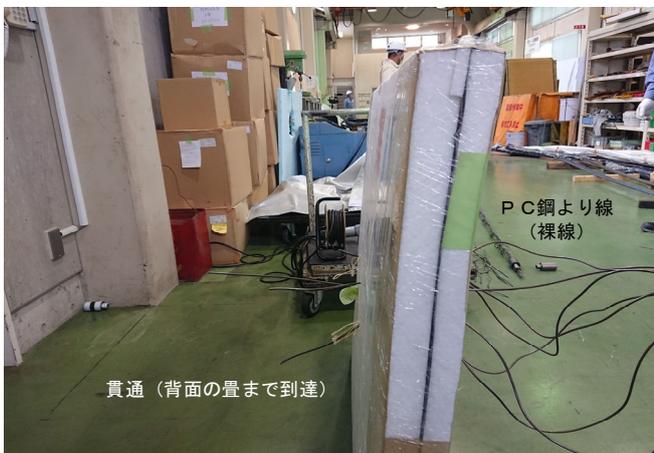
NO. 8



防護板 表側



防護板 裏側



防護板 側面



防護板 表側



防護板 側面



アラミド1層目



アラミド8層目

4) P C鋼材飛翔速度の測定結果

- P C鋼材が緊張防護板に衝突するまで ($x=2,167\text{mm}$) の時間 (約40ms) 内では、各測定点のx位置の時間変化はほぼ直線的な変化を示すことから、この傾きからx方向の鋼材突出速度 (v_x) を求めた。その結果、P C鋼より線の飛翔速度は 50~52 m/s 程度であった。表-1に P C鋼材飛翔速度、図-1に各測定点 (#0~#4) のx位置の時間変化のグラフを示す。

表-1 P C鋼材飛翔速度

試験NO.	#0	#1	#2	#3	平均
1	51.1	51.6	51.7	51.9	51.6
2	50.8	51.4	51.5	51.6	51.3
3	49.3	49.8	50.1	50.2	49.9

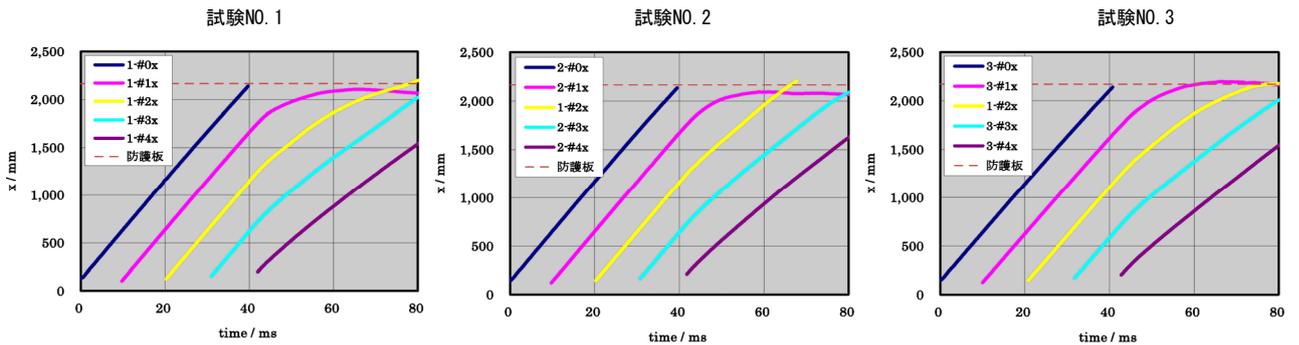


図-1 各測定点 (#0~#4) のx位置の時間変化

- P C鋼材衝突後、測定点 #1は急速に減速し、約65ms時点でx位置の最大値に達し、その後x位置はほぼ変化していない。これは、防護板の手前で停止したことを示している。
- P C鋼材突出から約44ms 経過後から測定点 #1~#4 のy位置に P C鋼材の曲がりによる大きな変化が認められた。各測定点 (#0~#4) のy位置の時間変化のグラフを図-2に、各測定点 (#0~#4) の速度 (v_x) の時間変化のグラフを図-3に示す。

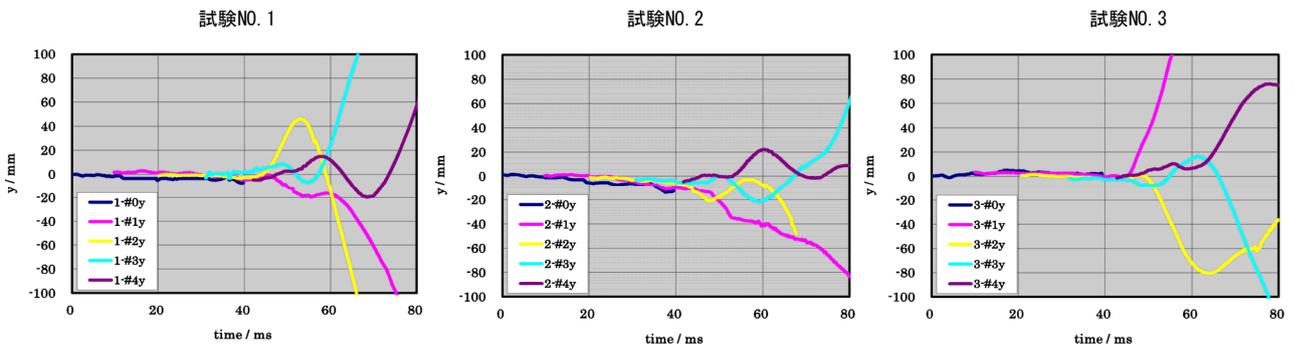


図-2 各測定点 (#0~#4) のy位置の時間変化

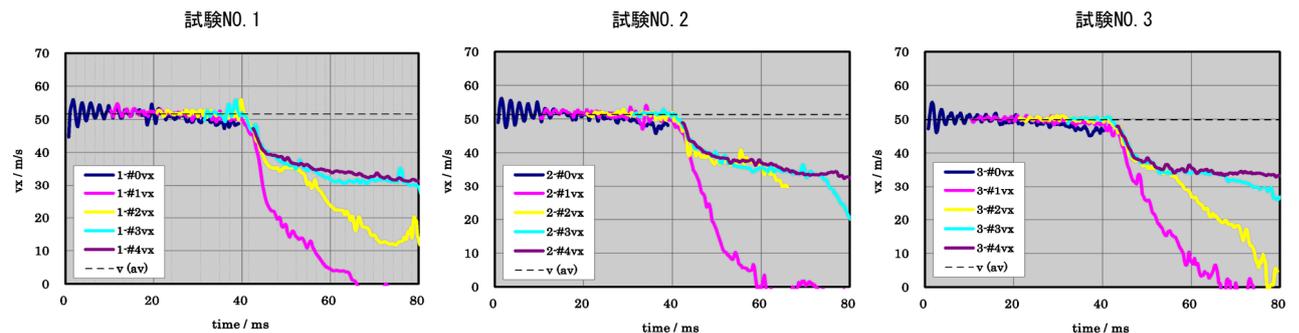


図-3 各測定点 (#0~#4) の速度 (v_x) の時間変化

- P C鋼材先端部のx位置推定値における速度をグラフ化し、そのグラフよりP C鋼材の緊張防護板（厚み80mm）侵入後の速度を求めた。その結果、防護板厚さ侵入後の鋼材速度は 46～48 m/s であった。（「表-2 緊張防護板侵入後の鋼材速度（推定値）」参照）
 P C鋼材先端部のx位置推定値（ x' ）における各測定点の速度（ v_x ）を図-4および図-5に示す。

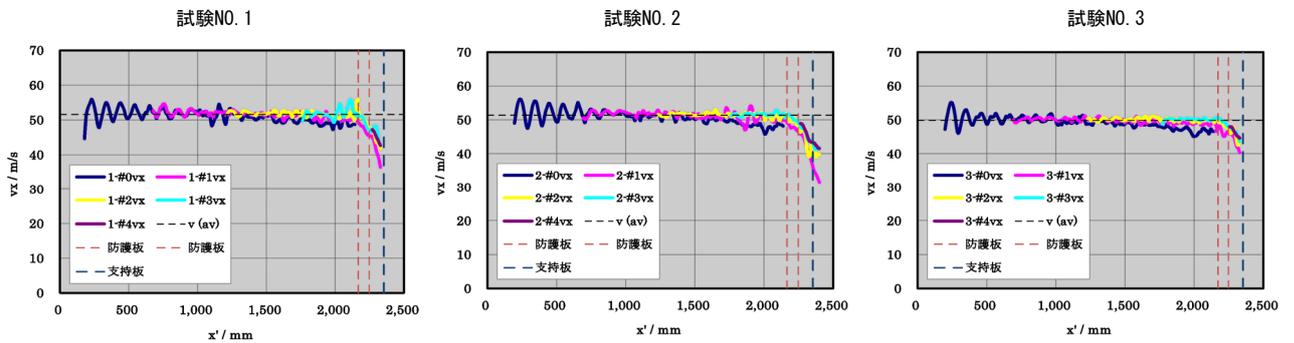


図-4 先端部のx位置推定値（ x' ）における各測定点の速度（ v_x ）変化

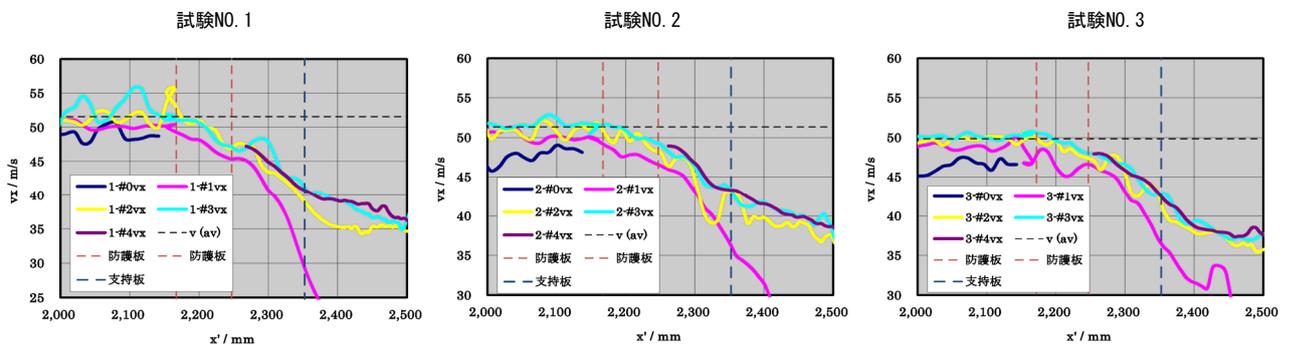


図-5 先端部のx位置推定値（ x' ）における各測定点の速度（ v_x ）変化[防護板付近の拡大]

表-2 緊張防護板侵入後の鋼材速度（推定値）

試験NO.	防護板厚 [実測値] (mm)	P C鋼より線飛翔速度(m/s)					減衰量 ① - ②
		衝突前 平均①	防護板侵入後				
			#1	#2	#3	平均②	
1	75	51.6	45.5	47.0	47.0	46.5	5.1
2	73	51.3	46.5	48.0	49.0	47.8	3.5
3	70	49.9	46.0	47.0	48.0	47.0	2.8

- P C鋼材の緊張防護板侵入前・後の鋼材速度から鋼材の運動エネルギーおよびエネルギー減衰量を求めた。その結果、エネルギー減衰量の値は、No. 1～No. 3 それぞれ、0.9 kJ、0.6kJ、0.5kJ であった。（「表-3 鋼材の運動エネルギーおよびエネルギー減衰量」参照）

表-3 鋼材の運動エネルギーおよびエネルギー減衰量

試験NO.	防護板厚 [実測値] (mm)	運動エネルギー(kJ)		
		衝突前 平均①	防護板侵入後 平均②	減衰量 ① - ②
1	75	4.9	4.0	0.9
2	73	4.9	4.3	0.6
3	70	4.6	4.1	0.5

鋼材重量を 3.72 kgとして算出。

5) 高速度カメラによる撮影記録

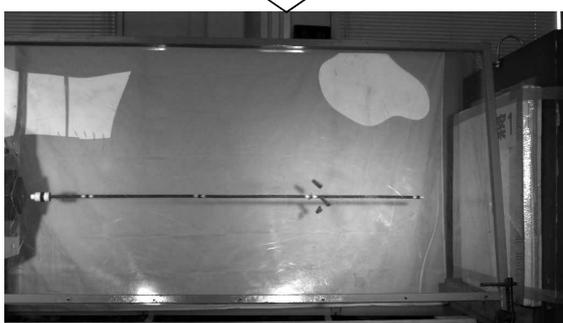
① 試験N0.1のP C鋼材射出状況

動画再生クリック
<https://youtu.be/WYKY-v-afU8>

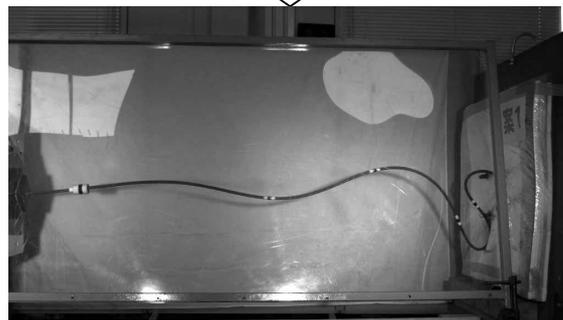
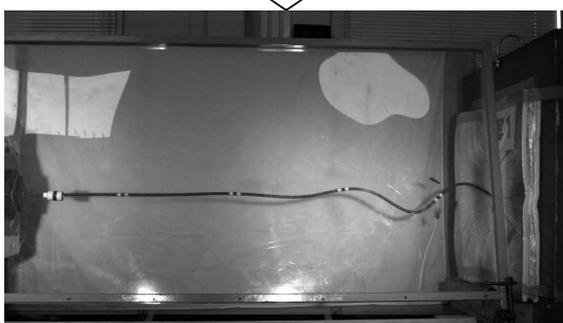
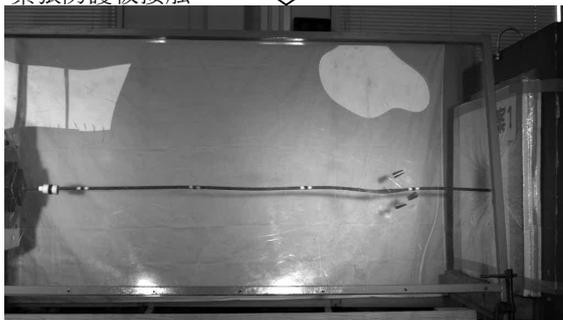
P C鋼材射出前



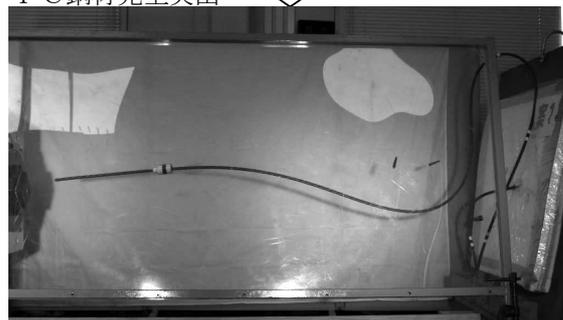
P C鋼材射出開始



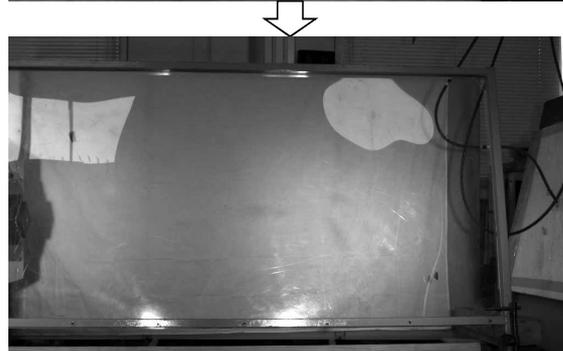
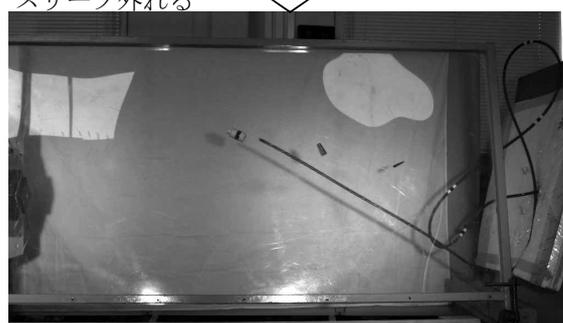
緊張防護板接触



P C鋼材完全突出



スリーブ外れる

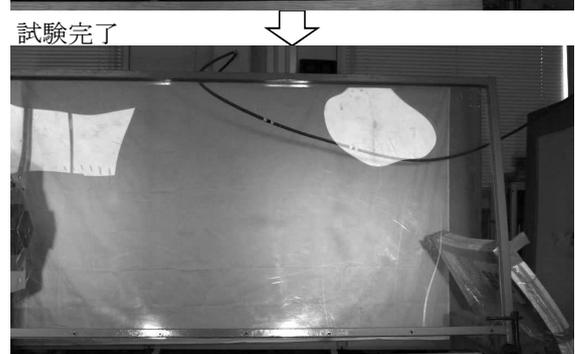
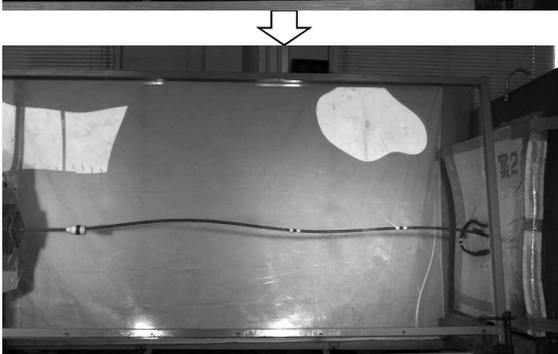
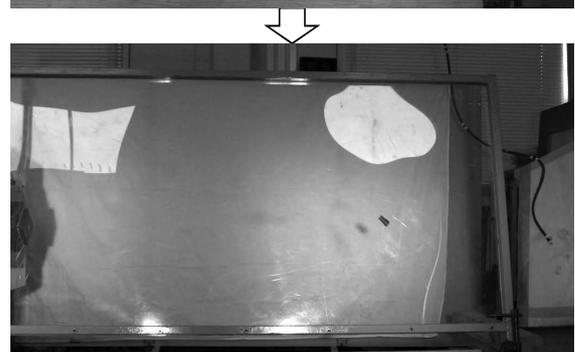
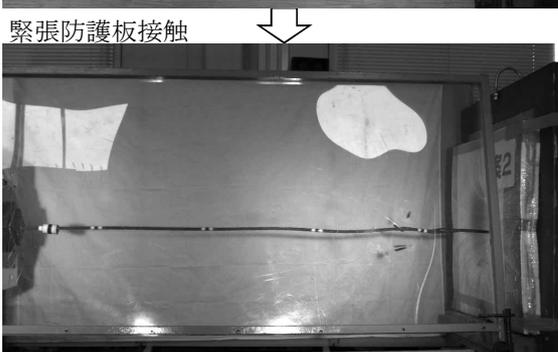
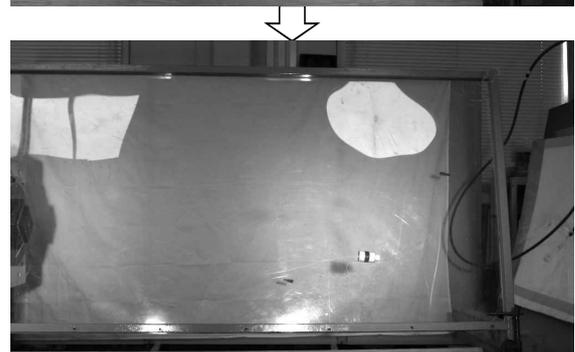
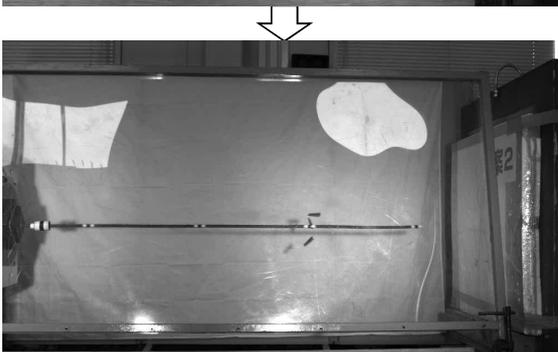
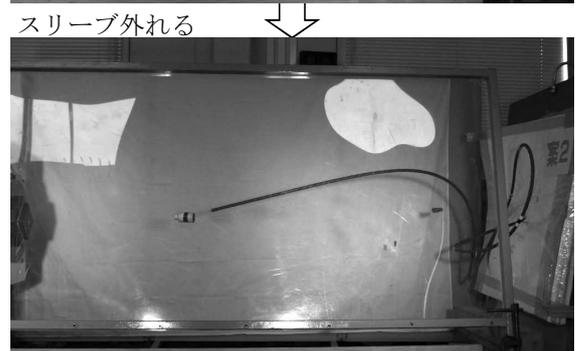
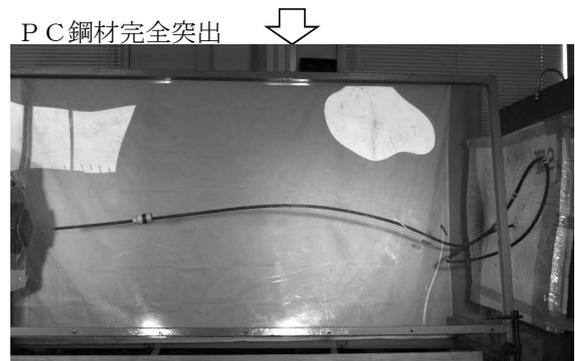


試験完了



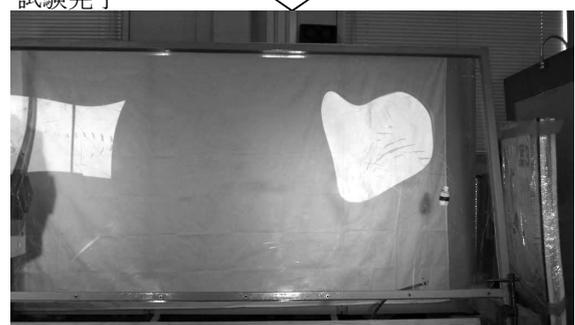
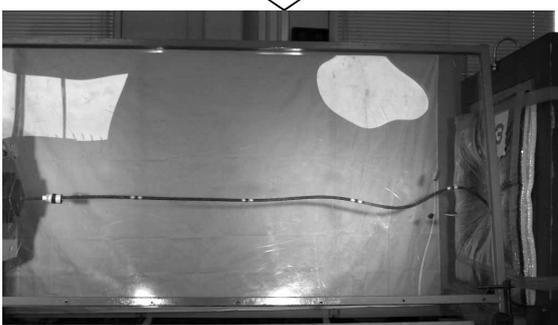
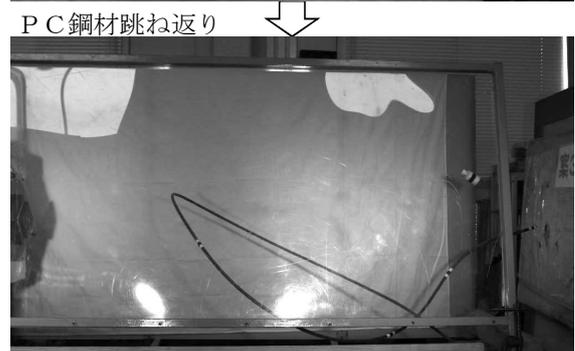
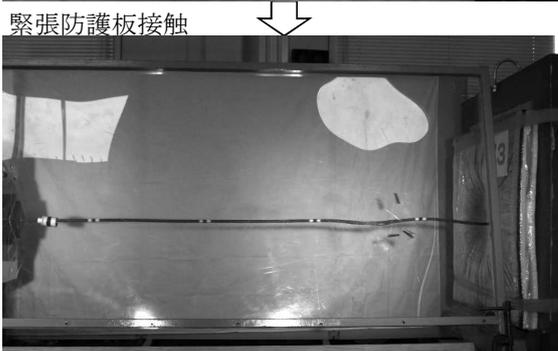
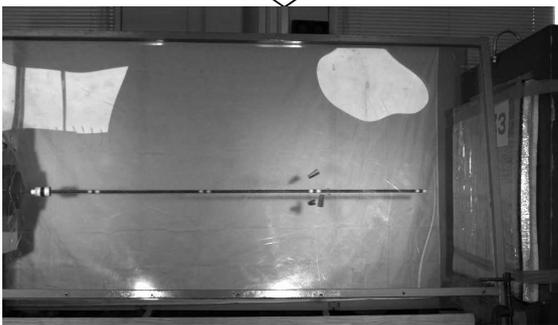
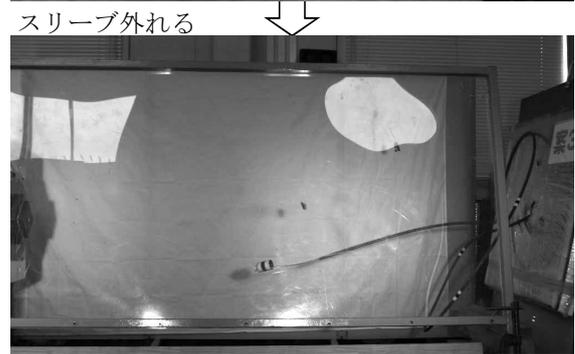
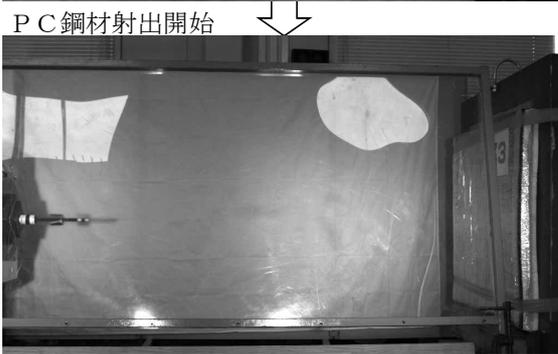
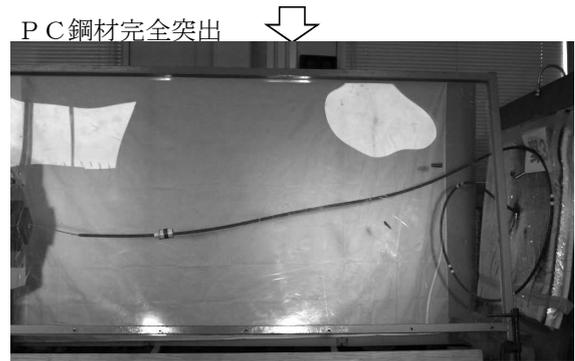
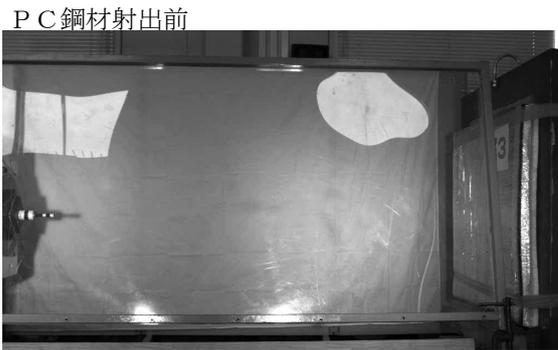
② 試験N0.2のP C鋼材射出状況

動画再生クリック
<https://youtu.be/iE9Y6GyJ4Xg>



③ 試験N0.3のP C鋼材射出状況

動画再生クリック
<https://youtu.be/Op7nZks0rbM>



4. まとめ

1) 衝突体[裸線のPC鋼材]における緊張防護板の性能評価

PC鋼材が裸線の場合、PC鋼材先端がばらけながら飛翔して緊張防護板に衝突した。先端が断面積の小さい素線の形状で衝突したPC鋼材は緊張防護板を貫通した後、試験場防護材の畳1枚に到達(突き刺さった状態)して静止した結果となった。

PC鋼材がばらけた状態(先端が素線の状態)で衝突したことで、緊張防護板に接触する断面積が小さいため突き刺さり貫通したが、衝撃力が分散されているため防護板侵入後は運動エネルギーが防護板に吸収され試験場防護材の間で静止した。

実験に使用したすべての緊張防護板において、PC鋼材は貫通したが許容範囲内で先端が静止したことから、緊張防護板としての十分な性能を有していると思われる。

2) 衝突体[ECFストランドのPC鋼材]における緊張防護板の性能評価

ECFストランドの場合、PC鋼材全体がエポキシ樹脂でコーティングされているためPC鋼材先端がばらけることなくそのままの状態緊張防護板に衝突した。(写真-1参照)

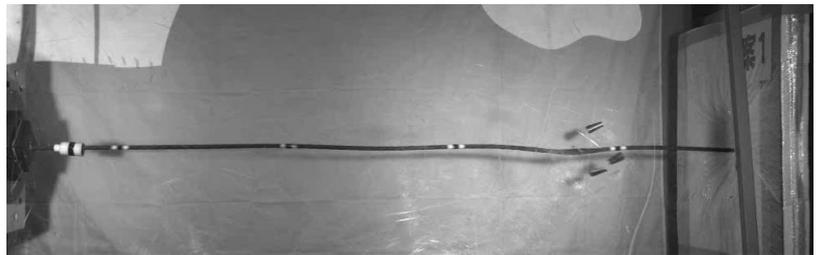


写真-1 PC鋼材衝突直後状況

アラミド繊維体を芯材に巻き付けた構造をコアとした緊張防護板(案1~3)においては衝突イメージ図(図-1)のように衝撃を変形により吸収しアラミド繊維体数層を貫通した後、緊張防護板表面にPC鋼材が湾曲しながら衝突した結果となった。PC鋼材全体の衝突状況を写真-2に示す。

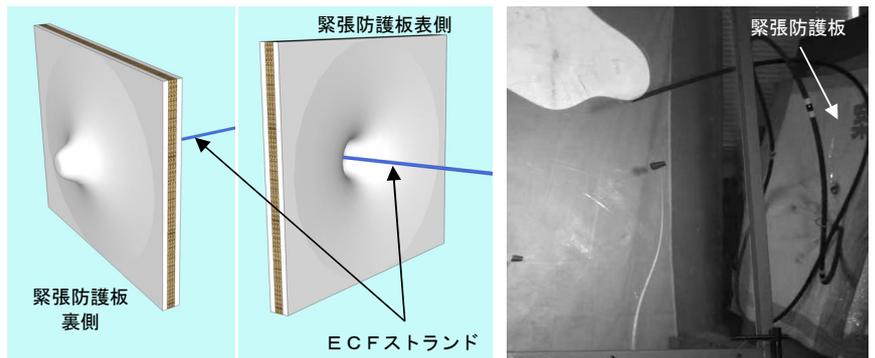


図-1 衝突イメージ図

写真-2 PC鋼材衝突状況

緊張防護板の案1~3における鋼材の衝突前後の速度および運動エネルギーの減衰量は、アラミド層数に比例した結果となった。(表-1および図-2参照)

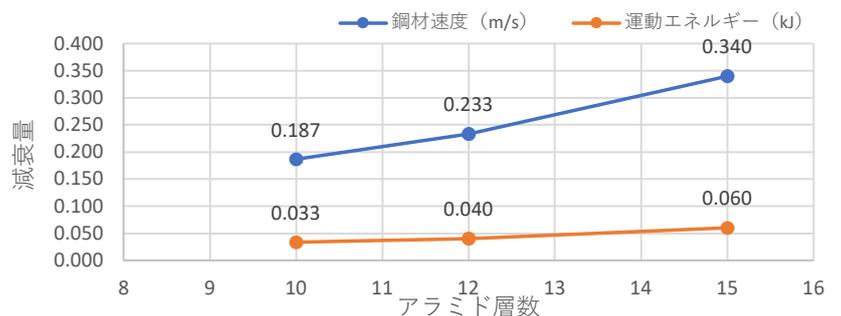


図-2 アラミド層数と鋼材速度および運動エネルギーの減衰量

表-1 緊張防護板種類と鋼材速度および運動エネルギーの減衰量

防護板の仕様					減衰量			
					鋼材速度 (m/s)		運動エネルギー (kJ)	
					衝突前後	1層当り	衝突前後	1層当り
案1	アラミド	15層	芯材	3層	5.1	0.340	0.9	0.060
案2	アラミド	12層	芯材	3層	3.5	0.233	0.6	0.040
案3	アラミド	10層	芯材	2層	2.8	0.187	0.5	0.033

芯材無しでアラミド繊維体を重ね合わせた構造をコアとした緊張防護板（案4）においては緊張防護板を貫通した後、試験場防護材の畳に突き刺さり、そこでP C鋼材が大きく変形した結果となった。（写真-3参照）

この結果から、芯材がある場合とない場合ではP C鋼材の衝撃吸収力に大きな差があり、緊張防護板の性能向上において、アラミド繊維体をコアとする場合は芯材を使用することにより飛躍的に性能が上がるのがわかった。

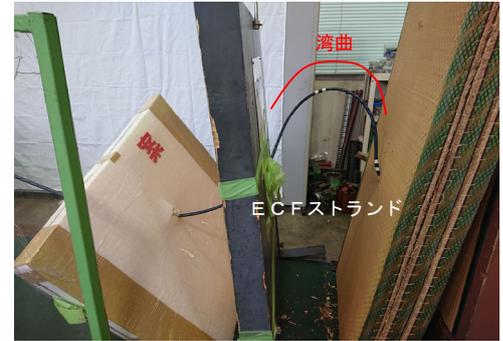


写真-3 P C鋼材衝突状況

案1～4までの緊張防護板種類別の貫通層および原価比を表-2に示す。

表-2 貫通層数および原価比

緊張防護板の仕様				貫通層数	原価比
案1	アラミド	15 層	芯材有	5 / 15	1.0
案2	アラミド	12 層	芯材有	2 / 12	0.8
案3	アラミド	10 層	芯材有	2 / 10	0.7
案4	アラミド	8 層	芯材無	8 / 8	0.5

アラミド繊維体の層数が多いほど原価が高くなる（表-2参照）が、案1～3の実験の結果から今回のアラミド繊維体の層数の範囲内であれば結果に大きな差がないことから、最も安価である案3が最適な緊張防護板として推奨する。

3) 注意事項

緊張防護板に衝突したP C鋼材の尻手が反力台を抜け出た後は、尻手の拘束がなくなるので暴れた状態となり危険な状態となる。

P C鋼材射出と同時に定着具（ウェッジ）が後方に飛散し、さらに防護板衝突後に跳ね返って飛散する場合（緊張防護板にウェッジが突き刺さって固定されない場合）があることから、十分な注意が必要である。

E F C ストランドを衝突させた場合のP C鋼材およびウェッジの挙動を撮影した写真を写真-4、5に示す。

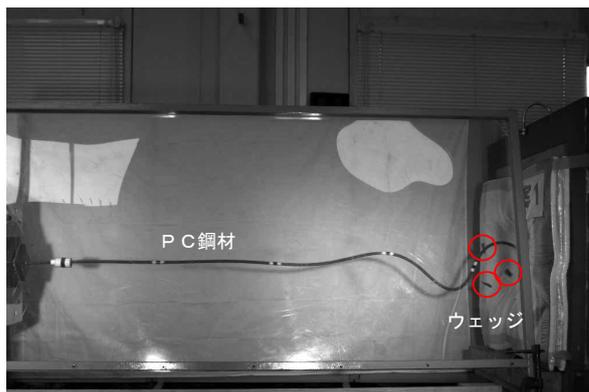


写真-4 ウェッジ衝突直前状況



写真-5 ウェッジ跳ね返り状況