

PC橋のグラウト充填の確認方法に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 19～平 21

担当チーム：橋梁構造研究グループ

研究担当者：木村嘉富、田中良樹、中村英佑、
宮田弘和

【要旨】

プレストレストコンクリート構造物のシース内のグラウト未充填部分が残ることがある。未充填部分を放置しておく、PC 鋼材の耐久性に問題があり、構造物の耐荷力が低下する恐れがある。また、第三者被害を生じる恐れもある。新設構造物の施工管理、検査方法、既設構造物の点検方法の確立と対策が求められている。本研究は、道路橋を対象とし、グラウト未充填部分の検出方法や未充填部分への再充填方法についてとりまとめ、適用範囲を明らかにした。非破壊検査によりグラウト未充填箇所の特が困難な場合等には、予防保全的に補強対策が実施される。本研究では連続繊維シートを用いた補強工法に着目し、その補強対策の耐衝撃安全性を実験により確認した。さらに、補強対策が有する安全度を、衝撃吸収エネルギー量により評価するための基礎的検討を行った。キーワード：プレストレストコンクリート、グラウト、PC 鋼材、未充填、再充填

1. はじめに

プレストレストコンクリート橋(以下、PC 橋)のグラウトは、部材コンクリートと PC 鋼材の一体化を確保し、PC 鋼材を腐食から保護する役割を担っているため、シース内に密実に充填する必要がある。シース内にグラウトの未充填部が残されている場合には、雨水等の侵入により PC 鋼材の腐食、さらには破断や突出に繋がる恐れもあり、PC 橋の耐荷性能の低下だけでなく第三者被害を引き起こす可能性がある。特に PC 橋の横締めで使用されている PC 鋼棒は、PC 鋼より線に比べて破断時の突出の可能性が高いとされている。既設 PC 橋を適切に維持管理していくためには、グラウトの充填度を正確に検査し、必要に応じてグラウトを再充填する手法を確立することが不可欠である。本課題では、グラウトの充填度を確認するための非破壊検査手法の適用方法と精度について検討した。さらに、グラウト未充填部分の検出方法や未充填部分への再充填方法についてとりまとめ、適用範囲を明らかにした。

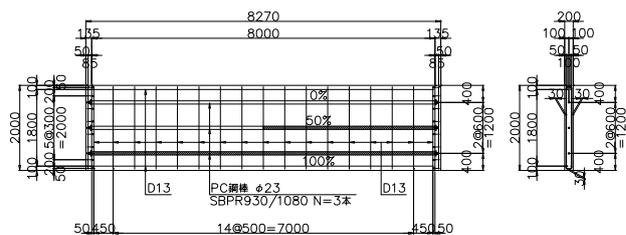
また、未充填部分を放置しておく、PC 鋼棒が腐食等により破断する恐れがある。そのため、PC 鋼棒が破断した場合の突出可能性について、グラウト未充填部を有する PC 鋼棒を用いた実物大の床版供試体を製作し、PC 鋼棒を切断することにより確認する実験を行った。非破壊検査によりグラウト未充填箇所を特定することが困難な場合等には、予防保全的に補強対策が実施される。本稿では、連続繊維シー

トを用いた補強工法に着目し、補強対策の耐衝撃安全性を確認するため、実物大供試体を製作し衝撃実験を行った。さらに、補強工法が衝撃に対して有する安全度を、衝撃吸収エネルギー量を用いて評価するための算定式を提案することを目的とした基礎的検討を行った。

2. 衝撃弾性波法に関する実験的検討¹⁾

2.1 弾性波伝播特性に着目した充填度確認実験

既設 PC 橋の横締めで使用されている PC 鋼棒を対象として、グラウトの充填度を確認するための非破壊検査手法の適用方法と精度について検討した。非破壊検査手法としては、従来から検討が行われている衝撃弾性波法^{2) 3) 4) 5)}を採用し、グラウト充填度の異なる PC 供試体を用いて精度を検証した。特に、測定者の違いによる弾性波伝播速度のばらつきや入出力波の波形形状、周波数特性に着目して検討を行った。



図一 供試体の形状（保護コンクリート設置有）

2. 2 実験概要

図-1に供試体の形状、表-1にコンクリート配合を示す。道路橋示方書⁹⁾のA活荷重の作用するポストテンション方式PC単純T桁橋の横締めで使用されているPC鋼棒を想定し、600mm間隔で3本のPC鋼棒(SBPR930/1080、 ϕ 23mm)を配置した。プレストレスは、PC鋼棒の初期引張応力度が780N/mm²となるように導入した。グラウトの充填度は0、50、100%の3水準とし、50%のものについてはPC鋼棒の軸方向の片側のみにグラウトを充填した。

2. 3 測定方法

図-2に、保護コンクリートを設けた供試体の測定方法の概略を示す。保護コンクリートを設けた供試体では、PC鋼棒直上の保護コンクリート側面を打撃して弾性波を入力し、打撃点近傍に設置したAEセンサーで入力波、もう一方の端部の保護コンクリート側面に設置したAEセンサーで出力波を取得した。打撃には直径15mmの鋼玉を使用し、AEセンサーは140kHz共振型のものを用いた。

2. 4 実験結果及び考察

図-3に、測定結果の一例を示す。測定開始から16msecまでのマクロな出力波形に着目すると、グラウトが全く充填されていないPC鋼棒では、グラウトが部分的もしくは完全に充填されているPC鋼棒に比べて波形の振幅の立ち上がりが急であり、弾性波

の到達までに要した時間が短くなった。グラウトの充填されていないPC鋼棒ではグラウトによる拘束が無く、減衰の影響が小さい状態で弾性波が伝播したためと考えられる。測定開始から16msecまでのマクロな波形の比較では、部分的もしくは完全にグラウトが充填されているPC鋼棒の出力波の波形形状の違いは比較的小さいように思われた。ところが、立ち上がりから4~4.5msecまでの詳細な波形形状に着目すると、グラウトの充填度が低いほど、同一時間内に計測された波の数が多いことがわかる。すなわち、出力波形をマクロに比較するとグラウトが部分的もしくは完全に充填されているPC鋼棒を区別することが困難となるが、立ち上がり直後の詳細な波形形状を比較すると、定性的にグラウト充填度の違いを区別することができる可能性がある。グラウ

表-1 コンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				
		W	C	S	G	混和剤
49.0	42.5	148	302	785	1072	2.718

最大粗骨材寸法25mm、スランプ10cm、空気量4.5%、早強セメント使用、材齢28日の圧縮強度37.1kg/m²



図-2 測定方法の概略

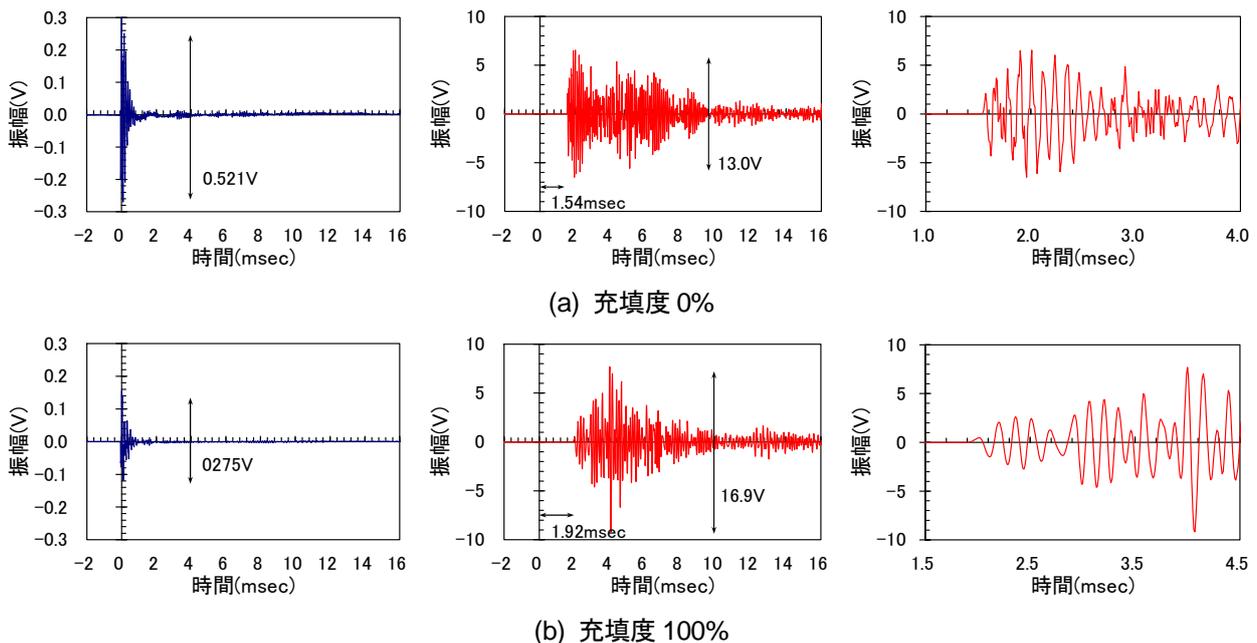
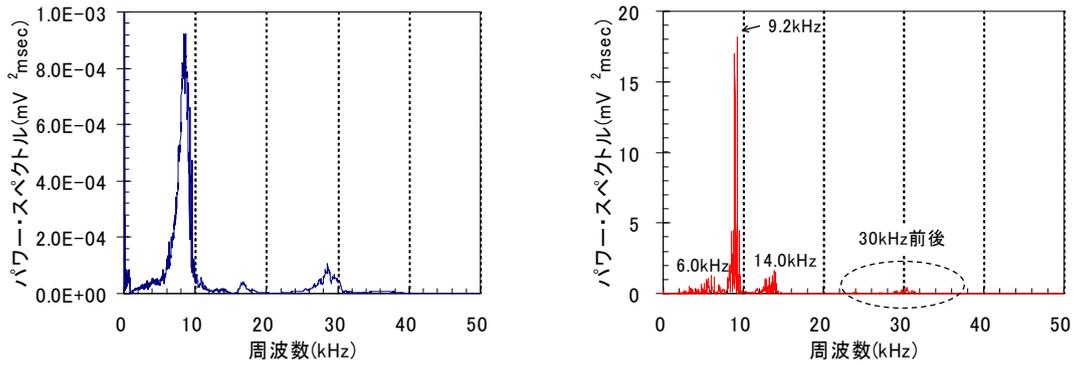
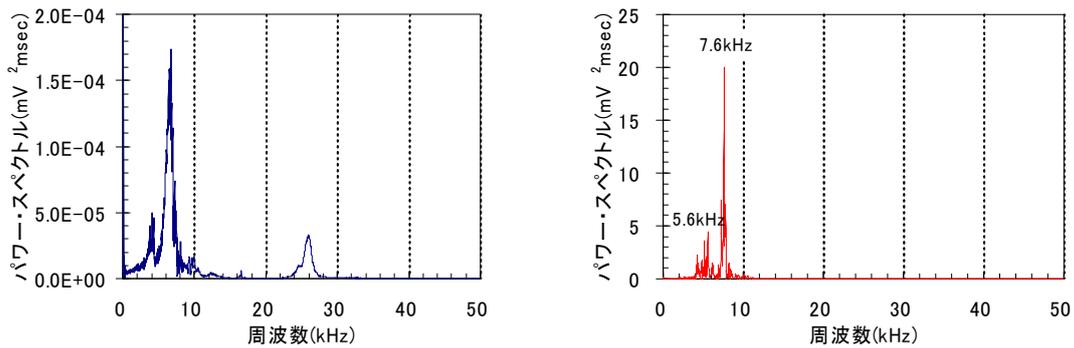


図-3 入出力波の波形(保護コンクリート設置有、左：入力、中：出力、右：出力(拡大図))

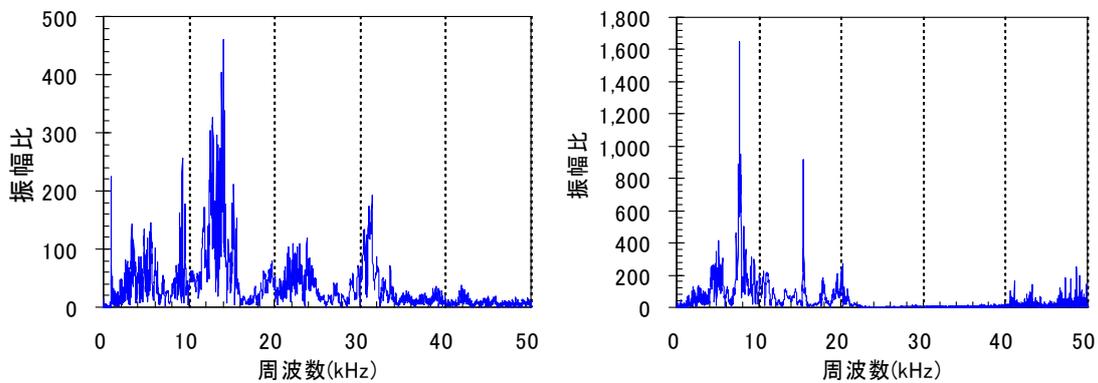


(a) 充填度 0%



(b) 充填度 100%

図-4 弾性波の周波数特性(保護コン設置有, 左: 入力波, 右: 出力波)



(a) 充填度 0%

(b) 充填度 100%

図-5 パワー・スペクトルの振幅比(保護コン設置有)

ト充填度の低い場合にはインピーダンス特性が均質であるPC鋼棒を弾性波が伝播するため高周波成分が減衰しにくいのに対し、グラウト充填度の高い場合には複合材料であるグラウトもしくはコンクリート中を弾性波が伝播するため高周波成分が散乱による減衰を生じやすかったためと考えられる。弾性波の減衰特性に着目してグラウト充填度を推定する際には、高周波成分に注意を払う必要があると考えられる。

また、取得した弾性波波形のFFT(高速フーリエ変換)解析を行い、グラウト充填度と弾性波の周波数特

性の関係を比較する。図-4に、図-3で示した弾性波のFFT解析を行った結果を示す。今回の測定では、弾性波の入力を手動で行ったため、入力波の周波数特性には多少のばらつきが見られたが、5~10kHzと25~30kHzの成分が卓越する傾向にあった。一方、出力波に着目すると、部分的あるいは完全にグラウトが充填されている供試体では、5kHz前後と10kHz前後の周波数成分が卓越していたが、グラウトが充填されていない供試体では、これらに加えて15kHz前後と30kHz前後の周波数成分も確認することができる。また、保護コンクリートを設置していない供

試体においても同様の結果が得られた。すなわち、今回の実験の範囲では、グラウトが全く充填されていない場合には高い周波数の成分も確認されるが、部分的もしくは完全にグラウトが充填されている場合には5~10kHz程度の低い周波数の成分が卓越する傾向にあると考えられる。

図-5に、図-4に示したパワー・スペクトルの振幅比(出力/入力)を示す。グラウトが全く充填されていない供試体では、他の供試体と比較して30kHz前後の振幅比が大きくなった。また、グラウト充填度が低いほど周波数の高い領域の振幅比が大きくなる傾向にあった。

また、プレストレスの導入量が異なる場合、シース内の空隙に水を入れた場合、PC鋼棒の長さが異なる場合の弾性波伝播速度に着目した測定を次章において実施した。ここでの測定には次章の図-8に示す諸元の供試体を用いた。

シース内の空隙に水を入れた場合の弾性波伝播速度を図-6に示す。ここでは、グラウトを全く充填していない状態の鋼棒を対象として、初期引張応力度780N/mm²のプレストレスを導入した状態で、水を入れていない場合(水充填度0%)、水でシース内の空隙の半分を満たしている場合(水充填度50%)、水でシース内の空隙の全てを満たしている場合(水充填度100%)の3ケースの測定を行った。いずれの場合においても、弾性波伝播速度は概ね等しくなったため、シース内の空隙への水の浸入が弾性波伝播速度に及ぼす影響は小さいと考えられる。水にはグラウトのようにPC鋼棒を伝播する弾性波を減衰させるほどの拘束効果がなかったためと考えられる。

次に、検査対象のPC鋼棒の長さが異なる場合の弾性波伝播速度の測定結果を比較する。ここでは本実験で測定を行った供試体(大型供試体とする)と、これと同時に製作した小型供試体(3m×0.3m×0.3m、PC鋼棒径φ17mm、シース径φ26mm)の測定結果を比較する。いずれも同じ配合のコンクリートを用いたものであり、鋼材比もほぼ等しい。各供試体で得られた弾性波伝播速度とグラウト充填度の関係を図-7に示す。どちらの供試体においてもグラウト充填度が高いほど弾性波伝播速度が遅くなり、この傾向は小型供試体よりも大型供試体で顕著である。既往の測定結果では、グラウトが完全に充填された状態での弾性波伝播速度は、6mの床版供試体²⁾で約4500m/s、18.3mのはり供試体³⁾で3700~3900m/sであった。測定対象となるPC鋼棒が長くなり弾性波の伝

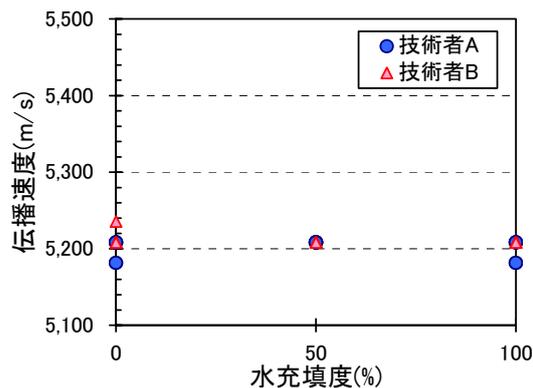


図-6 水の充填度と弾性波伝播速度

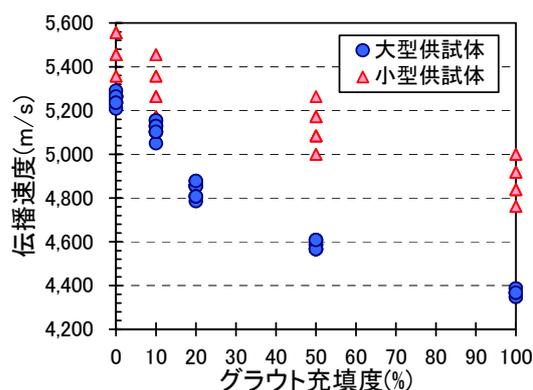


図-7 各供試体の弾性波伝播速度

播経路が長くなるほど弾性波の減衰程度が大きくなったためと考えられる。また、大型供試体と比べて小型供試体では弾性波伝播速度のばらつきが大きくなった。これは、小型供試体のPC鋼棒の長さが大型供試体の3/10倍と小さく、出力波の立ち上がり時間の読み取りの差が弾性波伝播速度の大小に大きな影響を及ぼしたためと考えられる。以上のことを踏まえると、検査対象とするPC鋼棒の長さが異なるような場合には、計測間隔の設定に配慮するとともに、グラウト充填度に応じた弾性波伝播速度を一義的に決定することが困難となるため、特定の閾値を設けてグラウト充填度を判定するのではなく、対象となるPC鋼棒の弾性波伝播速度を複数回測定して相对比较することが必要である。

2. 5 衝撃弾性波法による検査のまとめ

周波数特性に着目すると、グラウトが全く充填されていない場合には周波数の高い成分と低い成分を確認することができたが、部分的もしくは完全に充填されている場合には周波数の低い成分のみが卓越した。また、グラウトが全く充填されていないPC鋼棒は、出力波形の特徴から検出することが可能と考えられる。出力波の立ち上がり直後の波形を比較す

ることで、グラウト充填度の違いを定性的に推定できる可能性がある。

弾性波伝播速度を評価指標とすることでグラウト充填度を推定できた。グラウト充填度が低いほど弾性波伝播速度は速くなった。シース内の空隙への水の浸入が弾性波伝播速度に及ぼす影響は比較的小さく、実用化にあたってはこれを無視できる可能性があると考えられる。また、検査対象とするPC鋼棒の直上で測定を行うことで、より正確な検査が可能となる。ただし、弾性波の伝播特性は検査対象となるPC鋼棒の長さの影響を受けるため、弾性波伝播速度に着目してグラウト充填度を推定する際には、弾性波の計測間隔に留意するとともに複数のPC鋼棒の測定結果を相対比較する必要があると考えられる。

3. X線透過法に関する実験的検討⁷⁾

3.1 X線透過法に着目した充填度確認実験

従来から検討が行われ、実施工での採用例もあるX線透過法に着目し、種々の条件を変化させたグラウト充填度の異なる供試体を用いて適用精度を検証した。

3.2 供試体形状

供試体形状を図-8に示す。供試体は、けた長10m、けた高1mのもの2体である。PC鋼材にはPC鋼棒(SBPR930/1080、 $\phi 26\text{mm}$)を使用し、シースには鋼製のスパイラルシース($\phi 35\text{mm}$)を使用した。プレストレスはPC鋼棒の初期引張応力度が $780\text{N}/\text{mm}^2$ となるように導入し、PC鋼棒の定着部はコンクリートで保

護せずに露出させたままとした。グラウトの充填度は10% (鋼棒C)、20% (鋼棒B)、50% (鋼棒D)、100% (鋼棒A) の4水準とし、10、50%については軸方向片側の端部のみ、20%については軸方向両側の端部を10%ずつ充填した。この充填度は、シース内の空隙に対するグラウト注入量で規定したものであり、PC鋼棒がグラウトで覆われた長さや面積を示すものではない。

3.3 検査方法

X線透過法による検査方法の概略を図-9に示す。X線撮影中は放射線量をサーベイメーターで管理し、管理区域は半径5mとした。本実験で使用した供試体では、下縁にPC鋼棒を並列に配置していたため、供試体真横からの撮影では撮影対象としているPC鋼棒ともう一方のPC鋼棒が重なりグラウトの充填度を検査することが困難となる可能性があった。このため、本実験では、X線発生装置を約20~30度傾け、斜め方向からX線を透過させて撮影を行った。また、斜め方向から撮影することでコンクリート中の透過距離が300mmを超えたため、撮影に用いるX線フィルムは、画像のデジタル処理が可能なイメージングプレートを使用した。

3.4 X線透過法によるグラウト充填度評価

X線透過法による撮影結果を図-10に示す。ここでは、グラウトが完全に充填された鋼棒A、未充填部を有する鋼棒B、グラウトが全く充填されていない鋼棒Cの撮影結果を示す。これらの図において、シ

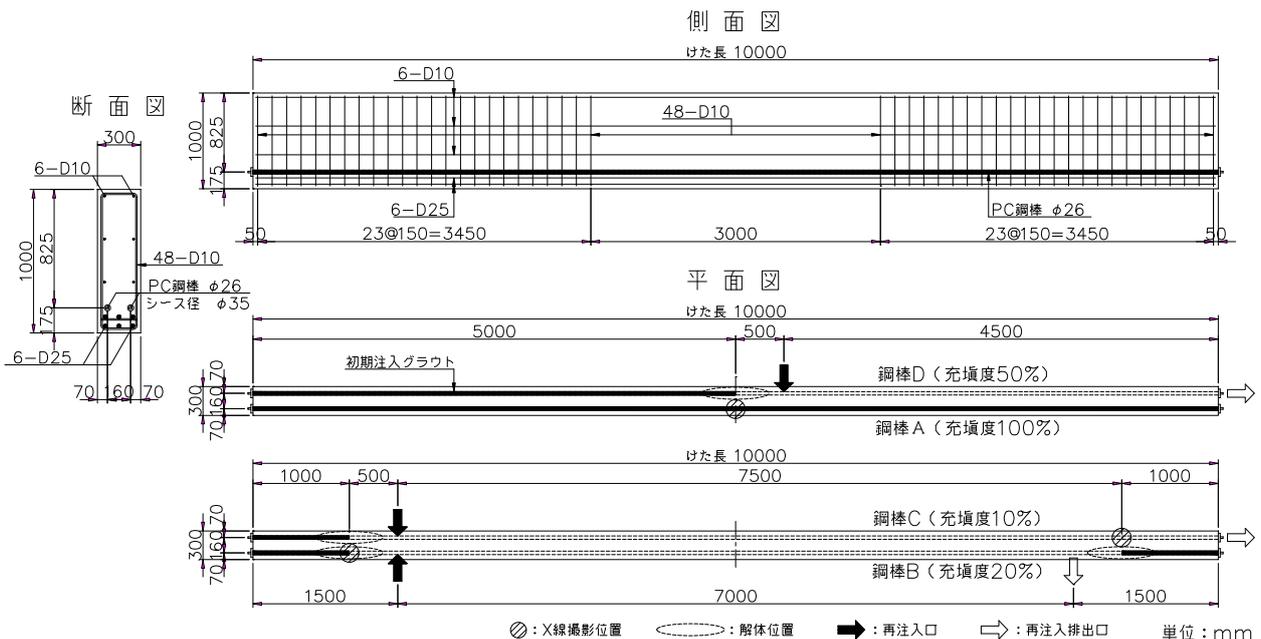


図-8 供試体形状

ース内で白い影になっている部分が充填部であり、黒い影になっている部分が未充填部である。グラウトが完全に充填されている鋼棒Aでは、鋼棒とシース表面までの領域が上下とも白い影となっており、グラウトが確実に充填されていたことを確認できる。一方、未充填部を有する鋼棒Bでは、PC鋼棒と上側のシース表面までの領域に黒い影が見られ、下側のシース表面までの領域に白い影が見られたため、PC鋼棒の上側で未充填部の存在を確認できる。本実験では粘性の比較的低いグラウトを使用したため、充填部と未充填部の境界付近でグラウトの先流れが生じていたことを示していると考えられる。グラウトを充填していない鋼棒Cでは、鋼棒の上下両側のシースに黒い影が見られ、グラウトが全く充填されていなかったことを確認できる。

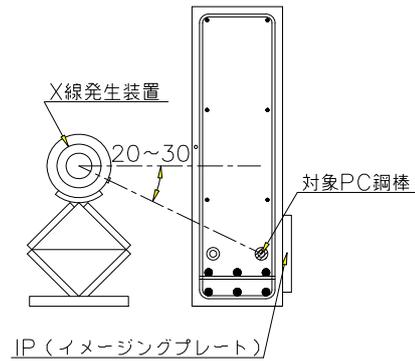


図-9 X線撮透過法による検査方法の概略

3.5 X線透過法による検査のまとめ

X線透過法による検査では、グラウトの充填部と未充填部を視覚的に正確に把握できることを確認した。ただし、部位や部材厚さなど適用範囲に制限があることに注意が必要である。

4. グラウトの再注入に関する基礎的検討⁷⁾

4.1 実験概要

前章の図-8に示す供試体を用いて、グラウトの未充填部へのグラウト再注入を行い、再注入工法の適用性について検討した。コンクリートとグラウトの配合を表-2、3に示す。グラウトは、セメント系ノンブリーディングタイプの低粘性型グラウトを使用した。本実験では、最初に充填度を調整して注入したグラウト（以下、初期注入グラウト）と後述する未充填部に再注入したグラウト（以下、再注入グラウト）を判別するため、再注入グラウトにセメント質量に対して1%の着色用顔料を混入して着色した。材料試験結果は所定の基準値⁸⁾を満足し、着色用顔料の混入が再注入グラウトの物性に与えた影響はほとんど無かったと考えられる。

4.2 グラウト再注入の方法

衝撃弾性波法とX線透過法による測定を行った後、未充填部へのグラウト再注入を行った。再注入作業に必要な注入・排出口については、図-8に示すように、鋼棒Bでは注入口と排出口を、鋼棒Cと鋼棒Dでは注入口をかぶりコンクリートおよびシースを削孔して設けた。保護コンクリートを設置していな

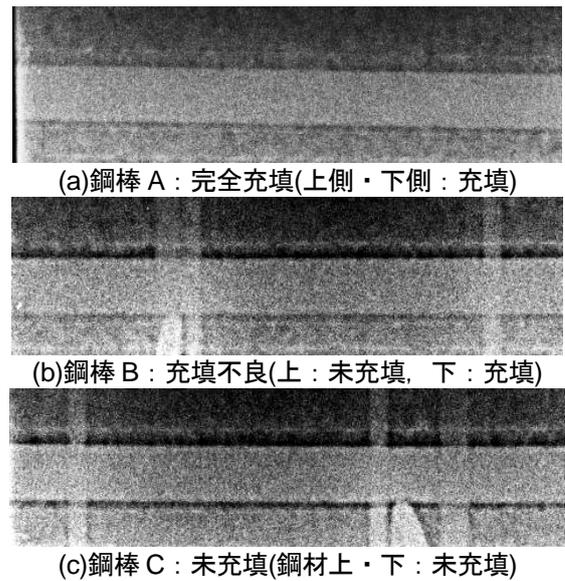


図-10 X線透過法による撮影結果

表-2 コンクリート配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
		W	C	S	G	混和剤
43	44	160	372	780	1001	1.67

※最大粗骨材寸法 20mm, スランプ 9cm, 空気量 4.0%, 中庸熟セメント使用, 材齢 28 日の圧縮強度 48.7N/mm²

表-3 グラウト配合

W/C (%)	使用量 (C×%)	単位量 (kg/m ³)		
		W	C	混和剤
45	1.0	587	1305	13.05

※普通ポルトランドセメント使用, 混和剤はセメント質量の 1% を添加

かったため、これら以外の注入・排出口は、PC鋼棒の定着版にあらかじめ設けていたグラウト孔を使用した。

実施工における削孔処理では削孔時にPC鋼材に損傷を与えることを避けるためウォータージェット工法を採用することが推奨されているが⁹⁾、本実験ではコンクリートドリルを用いて簡易に削孔を行った。ただし、PC鋼棒に損傷を与えないよう、ドリル

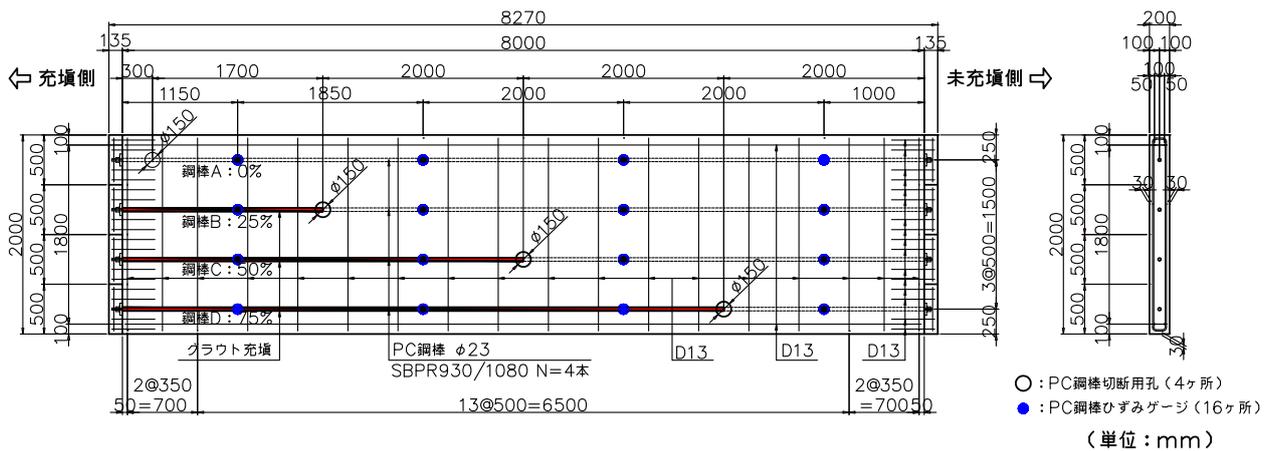


図-14 供試体の形状

図-14に供試体の形状を示す。道路橋示方書⁶⁾のA活荷重の作用するポストテンション方式PC単純Tげた橋の横締めで使用されているPC鋼棒を想定し、500mm間隔で4本のPC鋼棒(SBPR930/1080、φ23mm)を配置した。プレストレスはPC鋼棒の初期引張応力度が780N/mm²となるように導入し、シースは鋼製のスパイラルシース(φ35mm)を用いた。グラウト充填度は0、25、50、75%の4水準(グラウト未充填部のPC鋼棒の長さ：8、6、4、2m)とし、充填度に応じて供試体の片側端部からグラウトを注入した。充填部と未充填部の境界位置のシース内の空隙にはスポンジを詰め、所定のグラウト充填度を確実に再現できるようにした。また、充填部と未充填部の境界位置の直上にPC鋼棒を切断するための円形孔(φ150mm)を設けた(図-15参照)。PC鋼棒の切断は、円形孔内において、ディスクグラインダーを用いて行った。表-4、5にコンクリートとグラウトの配合を示す。PC鋼棒を切断した後、PC鋼棒の突出の有無および突出長さ、保護コンクリートの損傷状況を記録した。

5. 3 実験結果及び考察

図-16に、切断後の供試体の状況を示す。4本のPC鋼棒はいずれもグラウト未充填側の供試体端部の保護コンクリートを貫通し、外部に突出した。PC鋼棒とPC鋼棒先端に取り付けたナットが突出し、支圧板は保護コンクリートの内部に留まったままであった。表-6に、突出したPC鋼棒の長さ(突出エネルギーの計算値)を示す。突出長さはPC鋼棒切断後に供試体端部から突出したPC鋼棒の長さを測定し、突出エネルギーは式(1)¹¹⁾より求めた。

$$U = \frac{P_e^2 l}{2E_p A_p} \quad (1)$$



図-15 PC鋼棒切断用の円形孔

表-4 コンクリート配合(供試体本体)

W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				
		W	C	S	G	混和剤
47.0	42.0	153	326	762	1,061	2.608

※最大粗骨材寸法 25mm, スランプ 7.5cm, 空気量 3.9%, 早強ポルトランドセメント, 切断試験日の圧縮強度 45.2N/mm²

表-5 グラウト配合

W/C (%)	使用量 (C×%)	単位量(kg/m ³)		
		W	C	混和剤
42.0	1.0	570	1,358	13.6

※普通ポルトランドセメント, 混和剤はセメント質量1%を添加 切断試験日の圧縮強度 53.5N/mm²

ここで、U：PC鋼棒の突出エネルギー(kN・m)、Pe：PC鋼棒の有効プレストレス力(kN)、l：PC鋼棒の破断位置からの長さ(今回の試験では切断位置から未充填側の供試体端部までの距離、m)、Ep：PC鋼棒の弾性係数(N/mm²)、Ap：PC鋼棒の断面積(mm²)とする。

グラウト充填度75%のPC鋼棒を切断した際には、PC鋼棒の飛散を防ぐための防護壁を供試体から約500mmの位置に設けていたため、突出したPC鋼棒が防護壁に激しく衝突して正確な突出長さを測定できなかった。このため、その他のPC鋼棒では防護壁を

離れた位置に設置して突出長さを測定できるようにした。グラウト充填度75%以外のPC鋼棒の突出長さを比較すると、グラウト充填度が低いほど突出長さが大きくなる傾向にあった。同様に、突出エネルギーもグラウト充填度が低いほど大きくなった。切断位置から供試体端部までのグラウト未充填部のPC鋼棒が長いほど突出エネルギーが大きくなり、実際のPC鋼棒の突出長さも大きくなったと考えられる。また、いずれのPC鋼棒も全長が外部に突出することはなく、一部は供試体のシーす内に留まったままであった。ただし、今回の試験では切断前後のPC鋼棒のひずみを計測するためにひずみゲージを設置しており、PC鋼棒の突出時にひずみゲージの保護テープやリード線が支圧板と支圧板のPC鋼棒孔で接触したため、突出長さが短くなったとみられる。実際のPC橋ではこのような障害が無い場合、PC鋼棒の突出長さは今回の試験の結果よりも大きくなる可能性が高い。

図-17に、保護コンクリートの損傷状況を示す。いずれの場合もグラウト未充填側の保護コンクリートにはPC鋼棒の突出と同時に激しい損傷が生じ、かぶりコンクリートが剥落した。破壊形態は、PC鋼棒先端を起点とするコーン状であった。各保護コンクリートの両側面でも剥落が生じたが、これは保護コンクリートを分離するための目地を保護コンクリート同士の間に入れていたためと考えられる。また、コンクリート片(直径約20mm)が飛散した後に地表面に静止した位置と供試体までの水平方向距離は、最大で約26mであった。実際のPC橋でPC鋼棒が破断した場合には、PC鋼棒自体の突出だけでなく、保護コンクリートの剥落、飛散により第三者被害につながる可能性があることを示唆している。

5. 4 突出確認試験まとめ

グラウト未充填部が端部から 2m 以上存在する場合、充填部と未充填部の境界近傍の未充填側で PC 鋼棒を切断すると、PC 鋼棒は保護コンクリートを貫通して外部に突出した。PC 鋼棒の切断位置から端部までのグラウト未充填部の区間が長いほど、PC 鋼棒の突出長さも大きくなった。保護コンクリートの損傷形態は PC 鋼棒の先端を起点としたコーン状であり、コンクリート片が飛散することが確認された。

前述の非破壊検査に関する検討結果を踏まえ、本実験で製作した供試体諸元相当の床版に対する非破壊検査を想定するとき、X線透過法による検査が可



図-16 切断後の状況

表-9 PC 鋼棒の突出長さと突出エネルギー

グラウト充填度(%)	75	50	25	0
突出長さ(mm)	—※	1,775	4,100	5,780
突出エネルギー(kN・m)	1.32	2.63	3.94	5.24

※約 500mm に防護壁を設置したため測定不能。500mm 以上

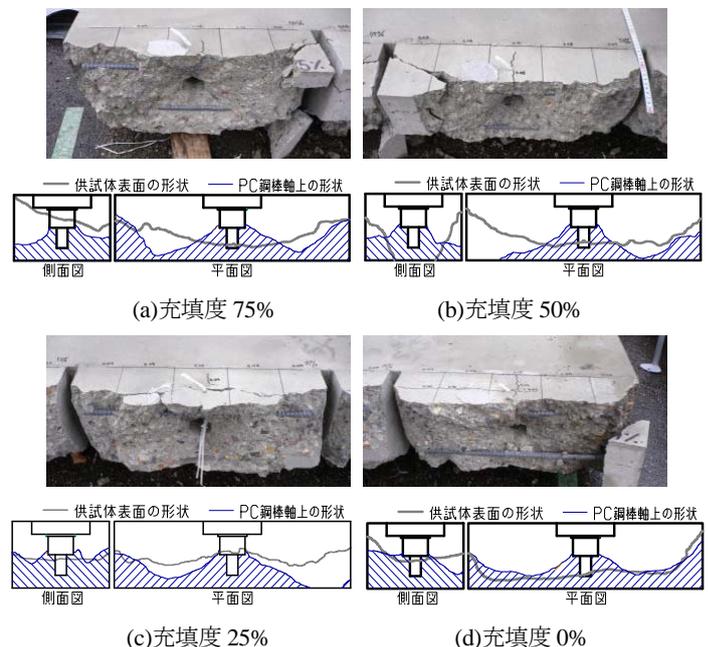


図-17 保護コンクリートの損傷状況

能な場合にはグラウトの未充填部を特定することができるものと考えられる。一方で、衝撃弾性波法による検査を行う場合、部分的なグラウト未充填部の存在を特定するためには、出力波形の周波数特性や弾性波伝播速度に関して複数の PC 鋼棒の測定結果を相対比較することなどによる慎重な判断が求めら

れることに注意が必要である。

6. PC鋼棒突出防止対策に関する基礎的検討

6.1 検討概要

前章の検討結果より、グラウトの未充填箇所が存在する場合、腐食等に起因しPC鋼棒が破断すると、PC鋼棒は保護コンクリートを貫通して外部に突出するとともに保護コンクリートの一部が飛散することがわかった。グラウト未充填箇所への対策としては、前述で検討したように非破壊検査方法により未充填箇所を特定したうえでグラウト再注入工法による対策を行うことが有効であると考えられる。一方で、グラウト未充填箇所の特定が困難な場合があること等の理由から、コンクリート片の落下対策を最優先として対策を行うことも考えられ、旧道路公団等においては後者の観点でこれまでに対策が実施されてきたところである。例えば文献12)のように、横締めPC鋼棒に対する突出防止対策に関する技術資料に基づき、繊維シートによる補強を基本とした各種の突出防止対策が実施されている。PC鋼棒の種別や長さ、対策箇所形状に着目した実験がなされ、実物大供試体によりPC鋼棒が突出しないこと及びコンクリート片が落下しないことを検証することにより、対策の仕様や適用限界が決定されている。ここで、横締めPC鋼棒の破断時の突出エネルギー量は、5.3にも示すとおりPC鋼棒のひずみエネルギーを用いて評価することが可能である。ところが、抵抗側である繊維シートによる衝撃吸収エネルギー量に着目した実験は行われていない。また、既往の検討¹²⁾においては、実験により突出しないことが確認された

対策の安全度を、衝撃作用側であるPC鋼棒のひずみエネルギーを用いて評価しており、必ずしも対策が有する衝撃に対する真の安全度を定量的に評価できているとはいえない。このことから、突出防止対策が衝撃に対して有する安全度を、抵抗側の衝撃吸収エネルギー量により評価を行う観点から、突出防止対策の応答性状や衝撃吸収メカニズムを把握するため、実物大衝撃実験による基礎的検討を行った。

6.2 実験概要

本稿では、基本的な衝撃応答性状の把握を目的とするため、対象とする突出防止構造は、図-18に示す対策のうち端部横桁に対して繊維シートによる補強を行う、最も単純な平面形状のタイプに着目した。繊維シートは、アラミドナイロン繊維シートを用いるもので、PC鋼棒の直近かぶりコンクリート部分には、応力分散させるため帯鋼板を設置することが標準的な構成となっている。帯鋼板の機能は、かぶり部分のコンクリートで受けたPC鋼棒の衝撃力を広く分散かつ荷重強度を低減させて繊維シートに伝達

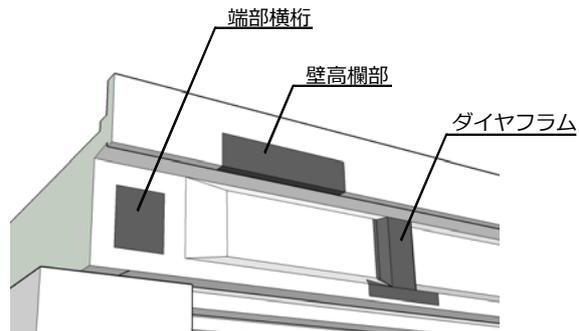


図-18 突出防止対策の例

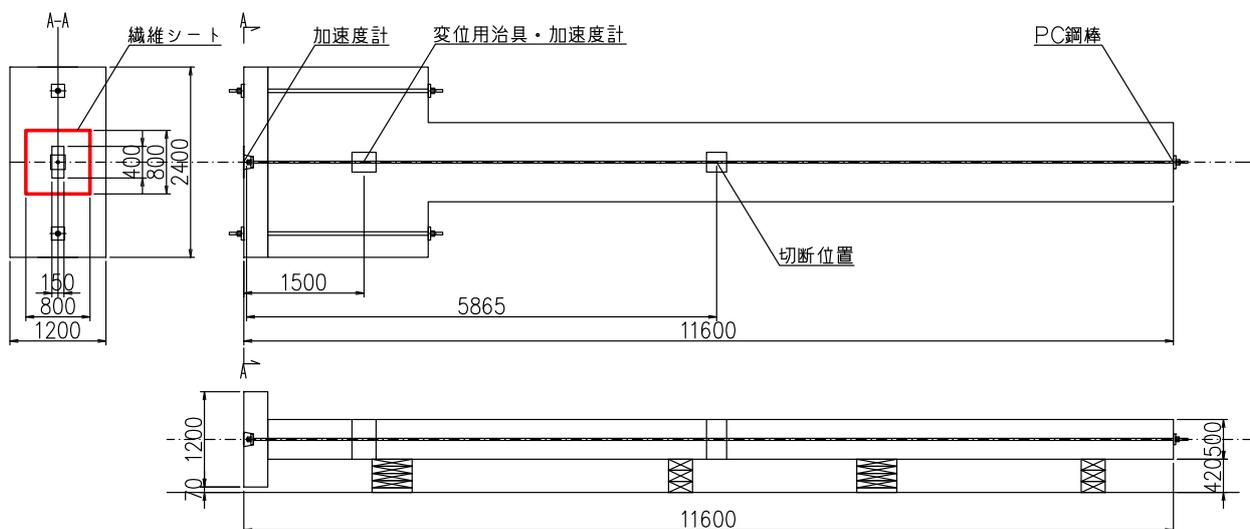


図-19 供試体形状及び測定内容

させるものである。従って、帯鋼板は多少の塑性変形は許容するものの、突出するPC鋼棒が貫通することを防止する能力をもつことが必要である。また、第3者被害防止の観点から、かぶりコンクリートの飛散を防止するため、繊維シートの剥離を限定的な範囲にとどめることによりコンクリート片の落下を防ぐという性能が要求される。したがって、本研究ではこれらの性能を有することを確認するため、グラウト未充填としたPC鋼棒を配置した実物大供試体を製作し、PC鋼棒を切断し突出させることによる衝撃実験を行い、定着端部に対して補強した突出防止対策の性能の検証を行うこととした。また、突出防止対策に用いる繊維シートの衝撃応答性状を把握するため、繊維シートのひずみ応答値の計測を行った。さらに、繊維シートの表面中央位置での加速度を計測し、繊維シートに作用する最大衝撃力を推定した。ここで、繊維シート補強構造は、かぶり部分のコンクリートと帯鋼板、繊維シートでPC鋼棒の突出による衝撃力を吸収する構造であるが、主に繊維シートによる吸収量が大きいと考えられるため、本検討においては、帯鋼板とかぶりコンクリート部による影響は無視することとした。

6.3 供試体形状及び測定内容

図-19に、実物大衝撃実験における供試体形状及び測定内容の概略を示す。本実験では、PC鋼棒による横桁横締め長さが6m程度となる中小規模の道路橋に対する補強を行う場合を想定した。PC鋼棒はB種2号φ26(SBPR930/1180)を用い、緊張力は $0.7\sigma_{pu}$ 相当の緊張力を導入した。また、グラウト充填を全く行わないことで、突出エネルギーが最大となる最も不利な条件とすることとした。供試体はPC鋼棒により横締めされた横桁部材とその定着端部を模擬したもので、定着端部に対し連続繊維シートを用いた突出防止対策を実施した。本実験の供試体諸元を表-7に示す。補強に用いた繊維シートの物性を表-8に示す。端部コンクリート配合を表-9に示す。

測定項目は、突出するPC鋼棒の速度及び加速度、繊維シート表面のひずみ及び中心部の加速度の応答波形とした。突出するPC鋼棒の加速度を計測するため、PC鋼棒には測定レンジ $\pm 100,000\text{m/sec}^2$ の加速度計を設置した。また、図-20に示す変位計測用治具2個でPC鋼棒を挟むように固定し、コーン形状に設置された治具に対して任意の固定点との鉛直方向の距離変化を計測することによって、PC鋼棒の突出方向

表-7 供試体諸元 (4体)

PC 鋼棒	突出鋼棒長 (m)	緊張力 (kN)	突出エネルギー (kN・m)
B種2号	5.865	390~414	4.29~4.83

表-8 アラミドナイロン繊維シート材料試験結果

繊維種別	繊維目付 (g/m ²)	引張強度 (N/mm)	破断伸度 (%)
アラミド	270	401	3.48
ナイロン	405	187	27.72

表-9 コンクリート配合(端部供試体)

W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				
		W	C	S	G	混和剤
38.5	39.8	154	400	697	1,064	4.00

※最大粗骨材寸法 25mm, スランプ 8cm, 空気量 4.5%, 早強ポルトランドセメント, 切断試験日の圧縮強度 45.5N/mm²

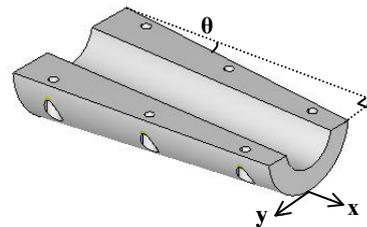


図-20 変位計測用治具

の速度や加速度を換算して求められるようにした。つまり、図-20のx軸をPC鋼棒の突出方向とし、y軸上に設定した任意の固定点と治具との距離変化 Δy を計測することによって、突出方向の距離変化 Δx は $\Delta y / \tan \theta$ で表され、突出速度及び突出加速度はそれぞれの時間変化により算出した。変位計にはサンプリング周期 $10\mu\text{sec}$ のレーザ変位計を用いた。繊維シートの表面ひずみを計測するため、ひずみ限界20%の塑性域ひずみゲージを用いた。アラミド繊維方向には、供試体水平方向に11箇所設置し、ナイロン繊維方向には、供試体鉛直方向に9箇所設置した。各測定項目に関する応答波形は、波形収録装置を用いて測定開始から10,000msec経過時まで0.1msecごとに計100,001点を記録した。

6.4 最大衝撃力の推定

PC鋼棒の突出により繊維シートに作用する最大衝撃力の推定を行う。いま、定着端部を補強した供試体において、PC鋼棒の突出によって発生する衝撃

力の波形を正弦半波であると仮定すると、次式によりあらわせる。

$$P = P_a \sin \frac{\pi}{T} t \quad (2)$$

ここで、 P_a ：衝撃力の最大値(N)、 T ：衝撃力の作用時間(sec)とする。

いま、PC鋼棒が切断され緊張力が解放されることにより繊維シート部に力積が作用するものと仮定すると、力積が運動量変化に等しいことにより、次のように表せる。ここで、 m ：突出部（いまはPC鋼棒と定着ナット）の質量、 v ：突出部の速度とすると、

$$mv = \int_0^T P dt \quad (3)$$

一方、衝撃力波形は前述の仮定に基づき式(2)のように示されることにより、

$$\begin{aligned} \int_0^T P dt &= \int_0^T P_a \sin \frac{\pi}{T} t dt \\ &= \frac{2T}{\pi} P_a \end{aligned} \quad (4)$$

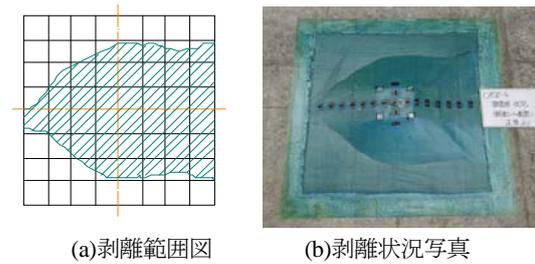
以上により、PC鋼棒の突出による最大衝撃力は

$$P_a = \frac{\pi}{2T} mv \quad (5)$$

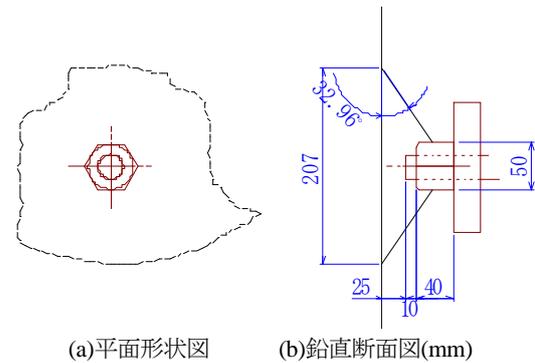
となる。突出防止対策を実施した実物大実験においては、PC鋼棒の突出によってかぶりコンクリートとPC鋼棒が一体となって繊維シート部に力積が作用すると仮定することで、繊維シートに作用する最大衝撃力の推定が可能である。

6. 5 実験結果及び考察

図-21に衝撃実験後の繊維シート剥離状況の一例を示す。いずれの供試体においても、繊維シートの破断は確認されず、鋼棒の貫通は見られなかった。一方で、図-21(a)斜線部に示すように、繊維シートの剥離範囲が端部にまで至っている場合が一部の供試体で見られ、かぶりコンクリート片の落下を完全には防止できない結果となるものもあった。剥離範囲が端面に達していない側は、コンクリート面で剥離している状況であったが、反対に端面に達した側には下地処理に用いたプライマーが剥離面に残っている状況であった。また、帯鋼板の長辺方向であるア



(a)剥離範囲図 (b)剥離状況写真
図-21 繊維シート剥離状況の例



(a)平面形状図 (b)鉛直断面図(mm)
図-22 かぶりコンクリート部コーン破壊状態の例

ラミド繊維方向に、より大きな衝撃力が伝達されると考えられる。本実験で対象とした補強部位は端横桁であり、橋脚天端の縁端距離は橋軸直角方向にある程度の余裕があることにより、仮にコンクリートが落下しても問題にならないのが一般的であると思われる。ただし、橋軸直角方向に対する縁端距離が十分に無いなどの場合には注意が必要であり、本実験において設定したPC鋼棒長、導入緊張力等の条件を想定した突出防止対策を実施する際には、アラミド繊維方向の付着面積を大きくすることや繊維シートの端部処理を工夫するなどの別途検討が必要であると考えられる。

かぶりコンクリート部のコーン破壊状況の一例を図-22に示す。コーン破壊面と鉛直面のなす角度は図-22では約33度であり、他の供試体においても概ね30～33度の値を示す結果となった。本稿においては、かぶりコンクリート部のコーン破壊による衝撃吸収の影響は無視することとしたが、より厳密に吸収エネルギーを評価する場合には、前述の角度を参考にできると考える。

図-23に、PC鋼棒の突出変位に関する時間変化を示す。ここでは、測定された変位変化の値を6次の多項式曲線（相関係数 $|r|=0.999$ ）で近似したものを示している。0.012sec時点で最大点となり、これ以降は突出方向変位が減少していることがわかる。最大点以降のPC鋼棒の挙動としては、鋼棒が押し戻さ

れたこと、もしくは鋼棒が突出方向面外にずれたこと等が考えられるが、いずれにせよ突出防止対策の抵抗作用によりPC鋼棒の突出が防止されたものと判断できる。したがって、0.012sec時の最大点を、PC鋼棒の突出による衝撃現象が完了した時点とし、衝撃作用時間は11msecと考えられる。

図-24に、PC鋼棒の突出速度に関する時間変化を示す。これは前述の突出変位の近似曲線を微分して求めたものである。ここで、鋼棒のひずみエネルギーが運動エネルギーに変換されると仮定して算出した速度は約19m/secであるが、得られた値は0.006sec時点で最大8.3m/secと異なる値となっている。定着端部が固定された状態で鋼棒の緊張力が解放されるため、測定位置により速度値が異なると考えられるが、その分布は不明である。今回の実験においては定着端部から約1.5mの位置で計測しており、力積を考える場合には、実測変位の時間変化から求めた速度最大値8.3m/secを用いることとする。式(5)により最大衝撃力を推定すると、前述の衝撃作用時間と最大速度値、突出部質量24.4kgから、約28.9kN程度が作用していると考えられる。

図-25に、PC鋼棒の突出加速度に関する時間変化を示す。これは図-24の速度関数を微分して求めたものである。約0.006secの前後で加速度の符号が逆転しており、PC鋼棒の挙動としては、前半部は鋼棒切断により緊張力が解放されることに伴い突出し、後半部においては繊維シートにより突出とは逆方向の抵抗作用を受けていると考えられる。加速度のピーク値としては、突出方向を正として0.003sec時の約2,300 m/sec²である。ここで、先ほど速度波形から推定した最大衝撃力から質量を除いて求まる加速度は約120 m/sec²であるが、図-25の波形におけるどの時点の値であるかを明確に読み取ることは困難である。したがって、最大衝撃力を推定するためには、PC鋼棒の加速度ではなく速度に着目した方が評価しやすいことがわかった。また、別途検討により、繊維シート表面の中心部に設置した加速度計の計測値を用いる等の方法により、推定した最大衝撃力の妥当性について検証することができればよいものとする。

なお、本実験においては繊維シート表面のひずみ値を精度よく測定することができなかった。繊維シートに発生する応力の最大値や時間変化を把握することができれば、突出防止対策の耐衝撃性を評価する上で必要となるPC鋼棒の突出による衝撃力と繊維シートに発生する力の関係が明らかとなるが、こ

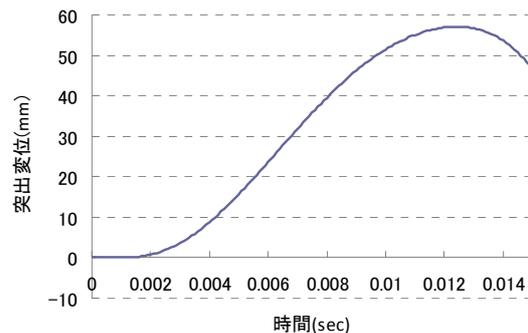


図-23 PC鋼棒突出変位（近似曲線）

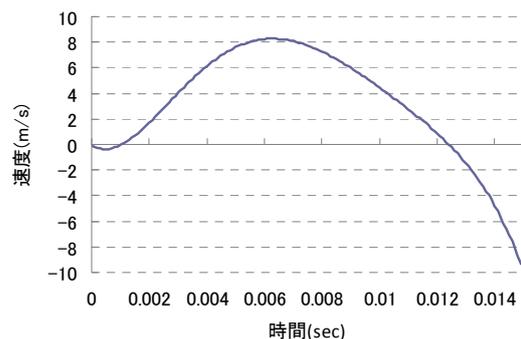


図-24 PC鋼棒突出速度（変位微分値）

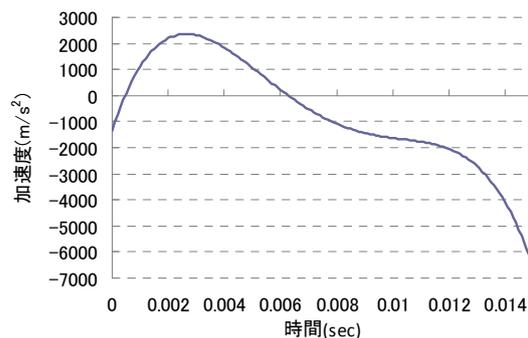


図-25 PC鋼棒突出加速度（速度微分値）

これらの検討は今後の課題としたい。

6.6 衝撃吸収エネルギーに関する考察

本稿で想定しているPC鋼棒突出による衝撃現象においては、前節6.5の結果から、衝撃作用時間が微小であることがわかった。したがって、衝撃吸収エネルギー量を、繊維シートの付着剥離エネルギーと、繊維シートの弾性変形で消散されるひずみエネルギーの和で表せるものとする。

$$U_A = G_f + \sum_T U_t \quad (6)$$

ここで、 U_A ：衝撃吸収エネルギー、 G_f ：繊維シートの付着剥離エネルギー、 U_t ：時間 t における繊維シートの弾性ひずみエネルギー、 T ：衝撃作用時間とす

る。上式(6)における右辺第2項が繊維シートの弾性変形で消散されるひずみエネルギーの和を表す。

まず、繊維シートの付着剥離エネルギーは、文献13)を参考に、接着界面せん断剥離を対象とした単位面積当たりの剥離エネルギー式を用いて次のように表される。

$$G_f = \int_0^{\delta_n} \tau d\delta \quad (7)$$

ここで、 τ ：繊維シートとコンクリート界面の付着応力、 δ ：繊維シートとコンクリートの相対変位である。具体的な数値の算出はここでは省略するが、文献13)を参考に、繊維シート物性値及び繊維シート付着試験における剥離開始時の荷重から、付着剥離エネルギー G_f を算出できる。

次に、繊維シートにより消散される弾性ひずみエネルギーを示す。

$$\sum_T U_t = \int_0^T U_t dt \quad (8)$$

ここで、ある時間 t における繊維シートの弾性ひずみエネルギー U_t は次式で表される。

$$U_t = \frac{1}{2} \iint \sigma_x \varepsilon_x + \sigma_y \varepsilon_y + \gamma_{xy} \tau_{xy} dx dy \quad (9)$$

本実験の突出防止対策に用いる繊維シートは、アラミド繊維とナイロン繊維とが直交する方向に編みこまれた複合繊維シートであるため、繊維シートの応力とひずみの関係を直交異方性弾性問題として扱うものとする。また、繊維シートが衝撃を受け剥離することで3次元の挙動を示すが、繊維シートの応力分布は2次元であることから、

$$\sigma_z = \tau_{yz} = \tau_{zx} = 0 \quad (10)$$

であるときの平面応力状態で考えると、2次元直交異方性弾性体の構成方程式として次のように表すことができる。

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix} = s' \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s'_{11} & s'_{12} & 0 \\ s'_{12} & s'_{22} & 0 \\ 0 & 0 & s'_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} \quad (11)$$

$$\text{ここで、 } s' = \begin{pmatrix} \frac{1}{E_x} & -\frac{\nu_{xy}}{E_x} & 0 \\ -\frac{\nu_{xy}}{E_x} & \frac{1}{E_y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{xy}} \end{pmatrix}$$

E_x ：アラミド繊維の弾性定数、 E_y ：ナイロン繊維の弾性定数、 G_{xy} ：横弾性係数、 ν_{xy} ：ポアソン比である。式(11)を式(9)に代入すると、

$$\begin{aligned} U_t &= \frac{1}{2} \iint \left\{ \sigma_x (s'_{11} \sigma_x + s'_{12} \sigma_y) \right. \\ &\quad \left. + \sigma_y (s'_{12} \sigma_x + s'_{22} \sigma_y) \right. \\ &\quad \left. + \tau_{xy} (s'_{66} \tau_{xy}) \right\} dx dy \\ &= \frac{1}{2} \iint \left\{ s'_{11} \sigma_x^2 + 2s'_{12} \sigma_x \sigma_y \right. \\ &\quad \left. + s'_{22} \sigma_y^2 + s'_{66} \tau_{xy}^2 \right\} dx dy \\ &= \frac{1}{2} \iint \left\{ \frac{\sigma_x^2}{E_x} - \frac{2\nu_{xy}}{E_x} \sigma_x \sigma_y \right. \\ &\quad \left. + \frac{\sigma_y^2}{E_y} + \frac{\tau_{xy}^2}{G_{xy}} \right\} dx dy \end{aligned} \quad (12)$$

次に、繊維シートに発生する応力を考える。厳密には、衝撃作用時間に応じて応力が変化するとともに剥離範囲が広がり、かつ直交異方性のため剥離範囲は楕円形になると考えられる。しかし、本稿では、衝撃現象が微小時間であることと式の簡略化を考慮し、応力のみが時間変化することとした。つまり、剥離範囲の時間変化を考えないこととし、 $t=0$ 時点から半径 R の円形範囲で繊維シートが応力負担するものとした。ある時間 t における衝撃力は、

$$F(t) = \sigma_r(t) \cdot 2\pi R \cdot t_f \quad (13)$$

ここで、 $\sigma_r(t)$ ：時間 t における繊維シートに作用する法線方向の応力、 R ：剥離範囲の半径、 t_f ：繊維シート厚さである。応力を次式とし、

$$\begin{aligned} \sigma_x(t) &= \sigma_r(t) \cdot \cos \theta \\ \sigma_y(t) &= \sigma_r(t) \cdot \sin \theta \end{aligned} \quad (14)$$

上式(14)により式(12)を極座標変換すると、

$$\begin{aligned}
U_t &= \frac{1}{2} \iint_{XY} \left\{ \frac{\sigma_x^2}{E_x} - \frac{2\nu_{xy}}{E_x} \sigma_x \sigma_y \right. \\
&\quad \left. + \frac{\sigma_y^2}{E_y} + \frac{\tau_{xy}^2}{G_{xy}} \right\} dx dy \\
&= \frac{1}{2} \iint_{R\theta} \left\{ \frac{\sigma_r^2}{E_x} \cos^2 \theta - \frac{2\nu_{xy} \sigma_r^2}{E_x} \sin \theta \cos \theta \right. \\
&\quad \left. + \frac{\sigma_r^2}{E_y} \sin^2 \theta + \frac{\tau_{xy}^2}{G_{xy}} \right\} r dr d\theta \quad (15)
\end{aligned}$$

上式を式(8)に代入すると、繊維シートで消散される弾性ひずみエネルギーは次式で表せる。

$$\sum_T U_t = U_t|_x + U_t|_{xy} + U_t|_y + U_t|_\tau \quad (16)$$

ここに、

$$U_t|_x = \frac{1}{2} \iiint_{TR\theta} \frac{\sigma_r^2}{E_x} \cos^2 \theta \, r dr d\theta dt$$

$$U_t|_{xy} = -\frac{1}{2} \iiint_{TR\theta} \frac{2\nu_{xy} \sigma_r^2}{E_x} \sin \theta \cos \theta \, r dr d\theta dt$$

$$U_t|_y = \frac{1}{2} \iiint_{TR\theta} \frac{\sigma_r^2}{E_y} \sin^2 \theta \, r dr d\theta dt$$

$$U_t|_\tau = \frac{1}{2} \iiint_{TR\theta} \frac{\tau_{xy}^2}{G_{xy}} \, r dr d\theta dt$$

前節6.5の衝撃実験で計測された繊維シート中央部の加速度応答波形から、繊維シートに発生する衝撃力 $F(t)$ の波形を図-23及び次式(17)のように仮定する。

$$F(t) = F_{\max} \cdot \sin \frac{\pi}{T} t \cdot \left(1 - \sin \frac{\pi}{2T} t \right) \quad (17)$$

ここで、 F_{\max} ：繊維シートに発生する最大衝撃力で

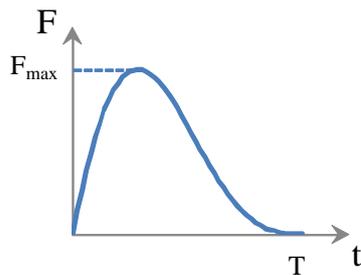


図-41 仮定した衝撃力波形

ある。

上式(17)と式(13)により表される繊維シート応力 $\sigma_r(t)$ を式(16)に代入する。ここで τ_{xy} を無視できるとし、定積分を解くと、繊維シートで消散される弾性ひずみエネルギーは次式で表される。

$$\sum_T U_t = \frac{3T \cdot F_{\max}^2}{64\pi} \left(\frac{1}{E_x \cdot t_{fa}^2} + \frac{1}{E_y \cdot t_{fn}^2} \right) \quad (18)$$

ここで、 t_{fa} 、 t_{fn} ：アラミド、ナイロン繊維シート厚さである。アラミドナイロン繊維シートの材料物性値をそれぞれ、アラミド繊維の弾性定数 E_x を $1.2 \times 10^5 \text{N/mm}^2$ 、ナイロン繊維の弾性定数 E_y を $2.2 \times 10^3 \text{N/mm}^2$ 、アラミド繊維シート厚さ t_{fa} を 0.173mm 、ナイロン繊維シート厚さ t_{fn} を 0.333mm とし上式に代入すると、式(18)の括弧内で表される繊維シート物性値の項が算出される。このとき、アラミド繊維とナイロン繊維が負担するエネルギーの割合はおよそ1:15となることから、弾性ひずみエネルギーの負担においては低弾性率のナイロン繊維の寄与が大きいといえる。

6.7 衝撃実験結果及び衝撃吸収エネルギーに関する考察のまとめ

アラミドナイロン繊維シートを用いた突出防止対策の補強効果を検証した結果、PC鋼棒は貫通せず、繊維シートの剥離は部分的な範囲にとどまり、かつ繊維シートの破断は見られないことが確認できた。ただし、本実験においては繊維シートの剥離範囲が端部に至る結果となる場合があったため、端横桁部において橋脚天端の縁端距離が橋軸直角方向に余裕が無い等の場合には、かぶりコンクリート片の落下に対する注意が必要である。また、PC鋼棒の突出により繊維シートに作用する最大衝撃力を、力積が運動量変化に等しいことにより推定した。なお、本実験では、繊維シート応力や表面の加速度に関する精度よい計測結果が得られなかったことから、正弦半波と仮定した衝撃力波形の妥当性や、衝撃力と衝撃により繊維シートに発生する力との関係については確認できていない。

連続繊維シートを用いる突出防止対策の耐衝撃安全度を衝撃吸収エネルギー量により評価するための検討を行った。その結果、突出防止対策の衝撃吸収エネルギーを、繊維シートの付着剥離エネルギーと、衝撃作用時間に消散される弾性ひずみエネルギーの和として定式化することを示した。このうち、繊維

シートの弾性ひずみエネルギーは、繊維シートに発生する最大衝撃力、衝撃作用時間、繊維シート物性値により算出できることがわかった。ここで、弾性ひずみエネルギーを負担させる観点では、弾性率が低い材料を用いる方が望ましいと考えられる。

7. まとめ

本研究課題では、道路橋を対象としグラウト未充填部分の検出方法や未充填部分への再充填方法についてとりまとめ、その適用範囲に関する検討を行った。また、第三者被害防止の観点で実施される既往の突出防止対策の安全度を評価するため、実物大供試体実験により衝撃応答性状を明らかにし、衝撃吸収エネルギー量により安全度を評価するための理論式構築に向けた基礎的検討を行った。その結果、以下の知見を得た。

- 1) 衝撃弾性波法によるグラウト充填の検査では、出力波形の特徴や周波数特性に着目するとグラウトが全く充填されていないPC鋼棒は検出可能と考えられる。また、出力波の立ち上がり直後の波形を比較することや弾性波伝播速度に着目することで、グラウト充填度の違いを定性的に推定できる可能性がある。このとき、検査対象とするPC鋼棒の直上で測定を行うことで、より正確な検査が可能となる。
- 2) 衝撃弾性波法による検査では、弾性波伝播速度を評価指標とするとき、プレストレス導入量とシース内の空隙への水の浸入が弾性波伝播速度に及ぼす影響は比較的小さく、実用化にあたってはこれを無視できる可能性がある。ただし、弾性波の伝播特性は検査対象となるPC鋼棒の長さの影響を受けるため、弾性波伝播速度に着目してグラウト充填度を推定する際には、弾性波の計測間隔に留意するとともに複数のPC鋼棒の測定結果を相対比較する必要がある。
- 3) X線透過法によるグラウト充填の検査では、グラウトの充填部と未充填部を視覚的かつ正確に把握できることを確認した。ただし、対象部位や部材厚さなど適用範囲に制限があることに注意が必要である。
- 4) 再注入工法を適用した後のPC鋼棒をシースごと解体した結果、本実験で製作したグラウトの十分な再充填性を確認することができた。また、グラウトを再注入した後のPC鋼棒の弾性波伝播速度は、グラウトが当初から完全に充填されているPC鋼棒と同程度となった。グラウトの再注入が適切に実施されたか否かを判断する際にも、弾性波伝播速度は有効な評価指標となり得ると考えられた。

5) PC鋼棒をグラウト未充填部で切断することにより、PC鋼棒が破断した場合の突出可能性について検討した結果、グラウト未充填部が端部から2m以上存在する場合、充填部と未充填部の境界近傍の未充填側でPC鋼棒を切断すると、PC鋼棒は保護コンクリートを貫通して外部に突出した。また、PC鋼棒の切断位置から端部までのグラウト未充填部の区間が長いほど、PC鋼棒の突出長さも大きくなった。

6) 連続繊維シートを用いた突出防止対策により補強した実物大供試体の衝撃実験を行った結果、本研究で対象としたアラミドナイロン繊維シートを用いた端横桁部の突出防止対策については、PC鋼棒は貫通せず、繊維シートの剥離は部分的な範囲にとどまり、かつ繊維シートの破断は見られないことが確認できた。ただし、本実験においては繊維シートの剥離範囲が端部に至る結果となる場合があったため、端横桁近傍における橋脚天端の縁端距離が橋軸直角方向に余裕が無い等の現場に適用する場合には、かぶりコンクリート片の落下に対する注意が別途必要であると考えられる。

7) PC鋼棒の突出により連続繊維シートに作用する最大衝撃力を、力積が運動量変化に等しいことにより推定した。また、連続繊維シートを用いた突出防止対策の耐衝撃安全度を、衝撃吸収エネルギー量を用いて評価するための基礎的な算定式を示した。

参考文献

- 1) 中村英佑、竹内祐樹、渡辺博志：弾性波伝播特性に着目した PC グラウト充填度の確認方法に関する基礎的研究、第 17 回プレストレスコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集、pp.385-390、2008
- 2) 鎌田敏郎、浅野雅則、川嶋雅道、内田慎哉、六郷恵哲：弾性波による PC グラウト充填評価手法の実構造物への適用、土木学会論文集 E、Vol.62、No.3、pp.569-586、2006
- 3) 葛目和宏、前野裕文、森下宣明、塚田卓、梅原秀哲：打音振動法による PC グラウト充填度評価について、コンクリート構造物の補修、補強、アップグレード論文報告集、Vol.6、pp.393-400、2006
- 4) 斎藤宏行、尼崎省二：衝撃弾性波法による PC グラウト充填評価に関する研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.22、No.1、pp.373-378、2000
- 5) 望月秀次、本間淳史、上東泰：PC グラウトの施工技術の現状と非破壊検査による点検、コンクリート工学、Vol.34、No.6、pp.4-13、1996

- 6) 日本道路協会：道路橋示方書（Ⅰ共通編・Ⅲコンクリート橋編）・同解説、2002
- 7) 竹内祐樹、中村英佑、渡辺博志、木村嘉富：PCグラウトの充填度評価と再注入に関する基礎的研究、第18回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集、pp.365-370、2009
- 8) プレストレスト・コンクリート建設業協会：PCグラウト&プレグラウトPC鋼材施工マニュアル、2006
- 9) 日本道路公団 試験研究所、プレストレスト・コンクリート建設業協会：PC橋の耐久性能の向上技術に関する研究 共同研究報告書、2003
- 10) 中村英佑、竹内祐樹、渡辺博志、木村嘉富：プレストレストコンクリート橋の横締めPC鋼棒の突出確認試験、第18回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集、pp.375-378、2009
- 11) 吉田幸司、鳥取誠一、新田耕司：横締め鋼棒の突出防止法、第11回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集、pp.527-530、2001
- 12) 首都高速道路株式会社：横締めPC鋼棒突出防護工技術資料、2007
- 13) 土木学会：連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強指針、2000