

論文 電磁パルス法によるプレテンション PCT 桁橋の横締め PC 鋼材破断検知に関する基礎的研究

鈴木 真^{*1}・王 斌傑^{*2}・寺澤 広基^{*3}・鎌田 敏郎^{*4}

要旨：本研究では、プレテンション PCT 桁における横締め PC 鋼材の破断を非破壊で検知する手法として、電磁パルス法に着目し、その適用性に関して解析的および実験的な検討を行った。その結果、ダイヤフラム近傍における横桁横締め PC 鋼材に対して、横桁側面から鋼材を加振し、同じく横桁側面において弾性波の受信を行う場合は、破断の有無を検知することは難しいことが明らかとなった。一方、定着部から 1m 程度に渡ってグラウト未充填があり、ダイヤフラム近傍において破断している状態であれば、ダイヤフラムの背面から計測を行うことにより、PC 鋼材の破断が検知できる可能性が示唆された。

キーワード：電磁パルス法、横締め PC 鋼材、破断、ダイヤフラム、非破壊検査

1. はじめに

プレテンション方式のプレストレストコンクリート T 桁（以下、PCT 桁と称す）は、施工現場へ運搬され、架設された後に横締め PC 鋼材により一体化を図られる。横締め PC 鋼材は、最外に位置する主桁（以下、耳桁と称す）のウェブ側面に定着するため、耳桁側面に図-1 に示すダイヤフラムを施工し、定着具をコンクリート内に埋設して防錆を図っている。ダイヤフラムの一例を図-2 に示す。

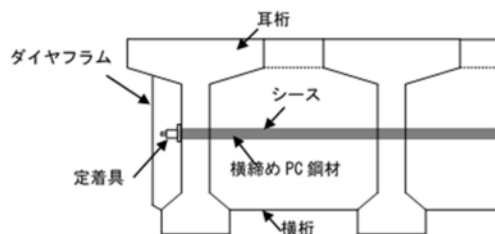


図-1 ダイヤフラムの概要

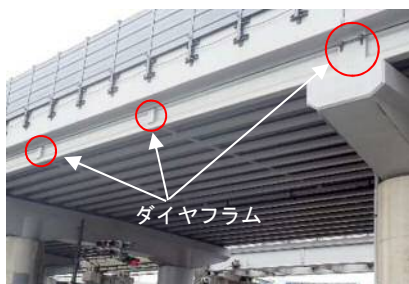


図-2 ダイヤフラムの一例

このダイヤフラムにおいて、漏水に起因する変状事例が多数報告されている。ダイヤフラムの変状事例を図-3 に示す。

3 に示す。

図-3(a) は中間横桁部に、図-3(b) は端部横桁部に設置されたダイヤフラムである。図-3(a) によれば、ダイヤフラムの背面（主桁ウェブとの境界面）を介して、下端から漏水に伴うエフロレッセンスが発生していることがわかる。これは橋面からの雨水等が、打設孔を介してダイヤフラム背面に浸入したことに起因する。また、図-3(b) によれば、ダイヤフラム内に水が浸透し、内部の鋼材が腐食したことによる錆汁が漏出していることがわかる。



(a) 中間横桁部 (b) 端部横桁部

図-3 ダイヤフラムの変状事例

PCT 桁橋の施工において、ダイヤフラムのコンクリート打設は、主桁架設、横組工の施工が完了した後に行われる。よって、主桁製作時において、図-4 に示すように耳桁の上フランジにあらかじめ 100mm×100mm 程度の打設孔を設け、この孔を介してコンクリート打設を行うことが一般的である。上記の打設孔の大きさが比較的小さいために、コンクリート打設に対する作業性が低下し、ダイヤフラムに締固め不良が発生しやすくなるうえに、打設孔の止水処理が満足に行われなかった場合には、

*1 西日本高速道路エンジニアリング関西（株） 構造技術部 博士（工学）（正会員）

*2 大阪大学大学院工学研究科 地球総合工学専攻 博士前期課程

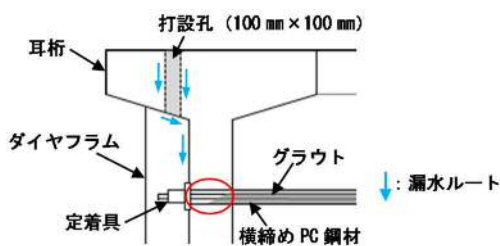
*3 大阪大学大学院工学研究科 地球総合工学専攻 助教 博士（工学）（正会員）

*4 大阪大学大学院工学研究科 地球総合工学専攻 教授 博士（工学）（正会員）

ダイヤフラム内へ水が浸透し、埋設されている鋼材が腐食する原因になる¹⁾。特に定着具近傍（図-4 中の赤丸部）ではグラウト未充填が発生しやすく、PC 鋼材の腐食さらには破断に至る可能性がある。PC 鋼材の破断は横桁の耐荷性能の低下はもとより、上部工の一体性を喪失させることになる。

上記のような PC 鋼材の破断は、外観目視により確認することが難しい。そこで、筆者らは非破壊検査法の一つである電磁パルス法に着目した。この電磁パルス法では、構造物の表面近傍で励磁コイルにパルス状の大電流を流すことにより、コンクリート内部にある磁性体を非接触で振動させることが可能である²⁾。これにより発生した弾性波をコンクリート表面に設置した振動センサにより受信・分析することで、横締め PC 鋼材の破断の有無を把握できるのではないかと考えた。ただし図-5 に示すように、実構造物の横桁側面から電磁パルス法を適用する場合、励磁コイルを想定される破断位置近傍に配置することが難しくなる。

過去の研究において、励磁コイルを計測対象箇所直上ではなく、一定の距離を離して計測を試みた事例はない。想定される破断位置から、励磁コイル中心までの最短距離は $L=250\text{mm}$ 程度となるが、構造物の状況によっては、励磁コイルを必ずしも最短距離で配置することができるとは限らない。上記より、図-5 を再現した供試体および解析モデルによる入出力位置に着目した実験および解析を行い、コンクリート部材を削孔することなく横締め PC 鋼材の破断の有無を検出する手法について検討を行った。



※赤丸部は定着具近傍において、グラウト未充填が発生しやすくなる箇所を示す。

図-4 漏水ルートの概要

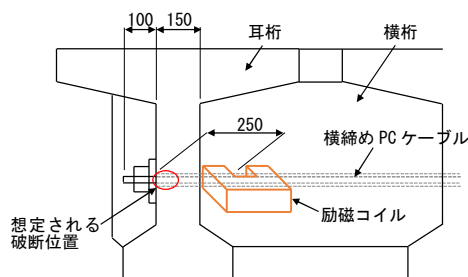
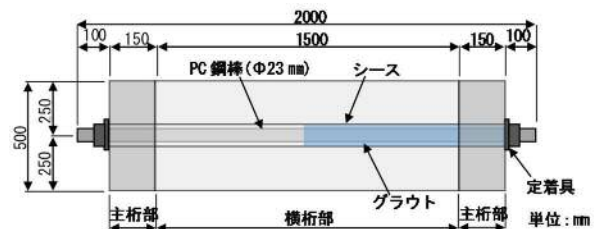


図-5 励磁コイルの配置

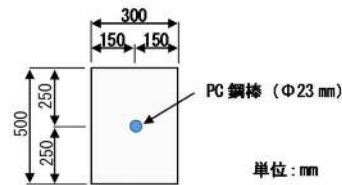
2. コンクリートによる拘束下にある PC 鋼材の振動特性に着目した実験的検討

2.1 実験の概要

本実験では、横締め PC 鋼材がコンクリートおよびグラウトによる拘束を受けている状態において、PC 鋼材の破断の有無が、電磁パルス法により加振された PC 鋼材の振動特性に与える影響を確認することを目的とした。ここでは、幅 300mm × 高さ 500mm × 長さ 1800mm のコンクリート供試体を 2 体製作した。供試体は実構造物を想定し、中央部（長さ 1500mm ）は横桁、両端部（長さ 150mm ）は主桁を模擬し、コンクリートの強度（材令 28 日）はそれぞれ 30.5N/mm^2 、 41.1N/mm^2 とした。供試体の概要を図-6 に、供試体の設置状況を図-7 に示す。



(a) 側面図



(b) 断面図

図-6 供試体の概要

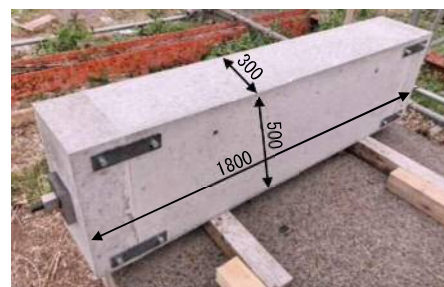


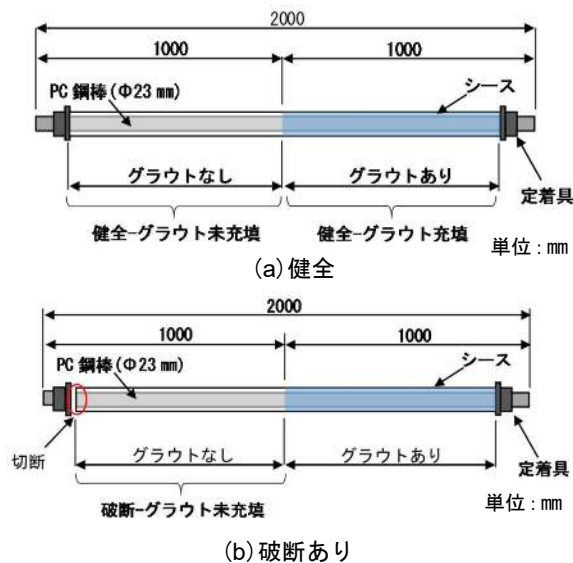
図-7 供試体の設置状況

2 体の供試体には、鋼製のシース（内径 $\phi 34\text{mm}$ 、長さ 1800mm ）を供試体の下端から 250mm 、側面から 150mm の位置に埋設し、その中に長さ 2000mm の PC 鋼棒（ $\phi 23\text{mm}$ ）を挿入した。さらに、グラウトの有無による影響を確認するために、長さ方向にシース長の $1/2$ （ 900mm ）はグラウトを充填し、片方の $1/2$ （ 900mm ）は充填しないようにした。

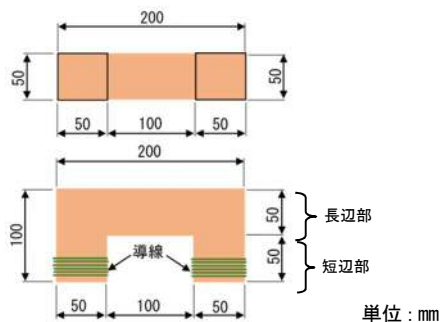
2 体の供試体のうち、1 体は切断加工を行わずに健全な状態を模擬し、他の 1 本は破断した状態を模擬して、

PC 鋼棒の端部から 100mm の位置で切断した。なお、PC 鋼棒端部には、定着具（ナット、アンカープレート）をセットした。計測ケースは、①健全－グラウト充填（健全を再現した供試体のグラウト充填部）、②健全－グラウト未充填（①と同じく健全を再現した供試体のグラウト未充填部）、③破断－グラウト未充填（PC 鋼棒の破断を再現した供試体のグラウト未充填部）とした。なお、グラウトが充填されている状態では、PC 鋼棒の腐食、破断は発生し難いため、破断－グラウト充填のケースは実験対象としていない。各供試体に埋設したシースおよび PC 鋼棒の設置状況を図－8 に示す。

励磁コイルの概要を図－9 に示す。励磁コイルの巻き数は 6 ターンとし、電源電圧は 600V とした。また、計測間隔は $1\mu\text{s}$ 、計測点数は 50000 点とした。計測時には、供試体側面から短辺部下端を 1～2mm 程度離すように配置した。振動センサには 15kHz～100kHz の間に応答感度を有し、特に 25kHz～80kHz の間では感度特性が比較的フラットな AE センサを使用した。計測時には AE センサを両面テープで供試体側面に接着した。計測装置の外観を図－10 に示す。



図－8 PC 鋼棒の設置状況



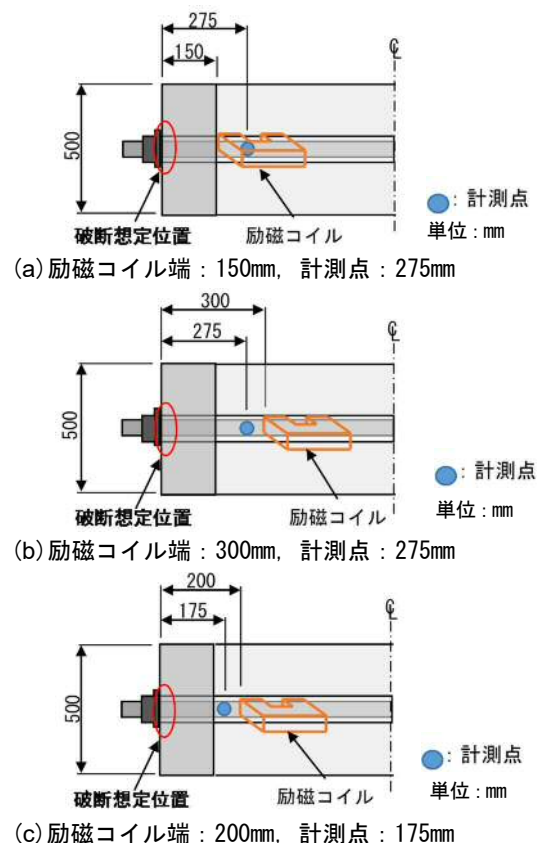
図－9 励磁コイルの外形寸法



図－10 計測装置の外観

各ケースに対して、励磁コイルおよび AE センサの配置を 3 つのパターンで計測した。各パターンにおける入出力点の位置を図－11 に示す。

図－11 (a) は、励磁コイルを図－11 中に示す破断想定位置になるべく近づけるために、励磁コイル端を主桁ウェブ側面に接触するように配置した状況を想定した。励磁コイル端を供試体端から 150mm 離れた位置に、AE センサを励磁コイルの中央に配置した。図－11 (b) は図－11 (a) に対して計測点を同じ位置とし、破断想定位置から離れた位置で PC 鋼棒を加振させることを目的として、励磁コイル端を供試体端から 300mm 離れた位置に配置した。図－11 (c) は、図－11 (b) に対して励磁コイルと AE センサの間隔を保持したまま可能な限り主桁側に近づけた場合を想定し、AE センサを供試体端から 175mm の位置に配置した。



図－11 計測箇所（側面図（半面））

2.2 実験結果および考察

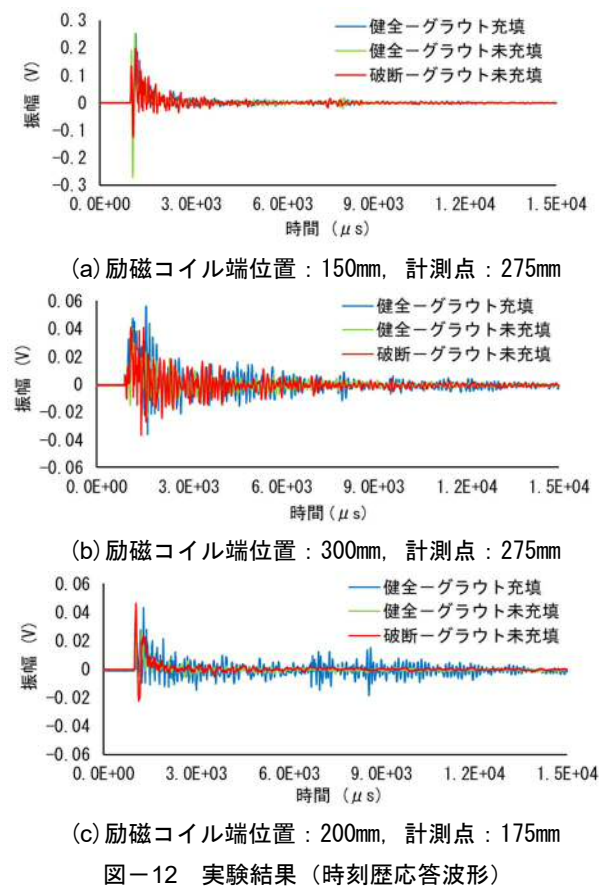
計測は各パターンとも3回ずつ行い、再現性を確認した後に計測した時刻歴応答波形の中からノイズの少ない波形を選定し、さらに15000 μ sまでのデータを抽出した。計測結果を図-12に示す。

図-12より、図-12(b)および図-12(c)に対して、入出力点が比較的近い図-12(a)の最大振幅値が5倍程度大きくなっていることがわかる。

図-12(a)については、破断-グラウト未充填の波形の減衰が、健全-グラウト充填および健全-グラウト未充填の波形に対してやや緩やかに見えるものの、三者の波形に大きな相違が見られず、この結果からPC鋼棒の破断の有無を把握することは難しい。

図-12(b)については、健全-グラウト充填の最大振幅値がやや大きいものの、図-12(a)と同様に3ケースの波形に大きな相違が見られず、PC鋼棒の破断の有無を把握することは難しい。

図-12(c)については、3ケースの波形の最大振幅値にほぼ相違はなく、PC鋼棒の破断の有無を把握するに至らない。健全-グラウト充填が他の波形と比較して減衰がやや小さく、継続時間も長くなっていることがわかる。これはグラウト未充填の場合、PC鋼棒の破断の有無に関わらずPC鋼棒からの振動がコンクリート表面に伝播し難くなるためと考えられる。



上記より、横桁側面から計測を行う場合、グラウト充填の有無の影響が大きく、PC鋼棒の破断の有無を検知することは難しいことがわかった。

3. 計測位置に着目した解析的検討

3.1 解析の概要

本解析は、計測点をダイヤフラムの背面にすることで横締めPC鋼材の破断の有無を識別することが可能か否かを確認することを目的として実施した。

解析モデルは、図-13に示すように前項2で示した供試体（健全、破断あり）に対してダイヤフラムを模擬した部材を設定し、PC鋼棒を定着させた状態を再現するために、ダイヤフラム内にPC鋼棒の端部（長さ100mm）をコンクリートに付着させるように設定した。解析モデル図を図-14に示す。

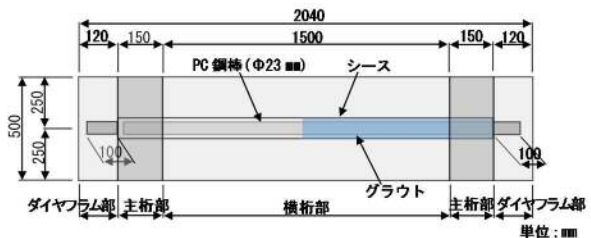


図-13 解析モデルの概要

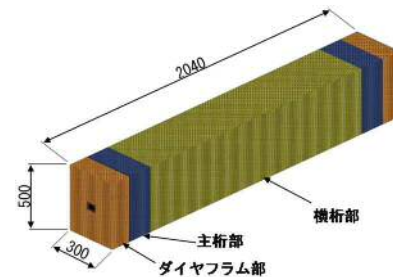


図-14 解析モデル図

PC鋼棒の破断を想定した解析モデルについては、ダイヤフラムおよび主桁の境界面において、PC鋼棒を不連続にして5mmの空間を設けた。解析は、まず実験結果との比較検証を行うために、図-11(a)と同様の入出力位置に設定して実施した。また、物性値を表-1に、解析に使用した入力波形を図-15に示す。入力位置は図-11(a)と同様とし、計測位置を図-16に示すように、ダイヤフラム背面のPC鋼棒の位置に設定した。

表-1 物性値

		密度 (g/cm ³)	弾性係数 (MPa)	ポアソン 比
コンクリート	主桁部	2.3	3.3×10^4	0.2
	横桁部・ダイヤフラム部	2.3	3.0×10^4	0.2
グラウト		1.8	2.3×10^4	0.2
シース・PC鋼棒		7.9	2.0×10^5	0.3

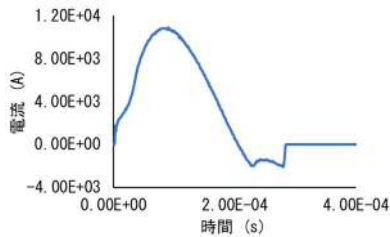


図-15 入力波形

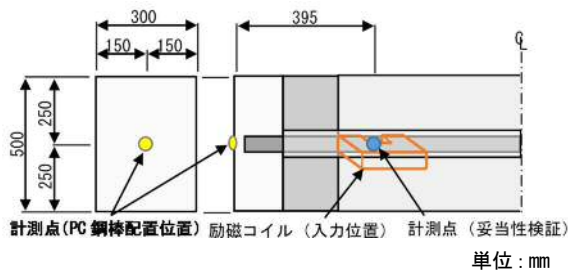


図-16 入力出力位置（断面図－側面図（半面））

3.2 解析結果および考察

実験結果との比較検証結果を先行して記す。図-11(a)と同様の入出力位置において、解析を行った結果を図-17に示す。図-12(a)および図-17を一概に比較することは難しいが、3 ケースとも入力直後において最大振幅値を示し、その後次第に減衰していく傾向は同様であるといえる。

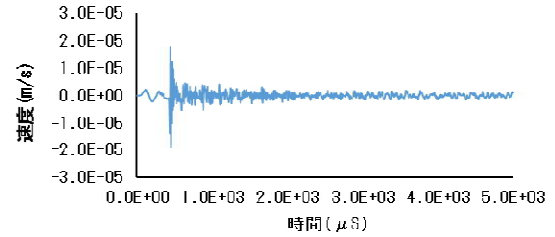
また、評価指標の一つとして、波形エネルギーを適用した。波形エネルギーは、時刻歴波形における各時刻の振幅値の2乗和であり、式(1)により算出することができる³⁾。

$$E = \sum_{i=1}^{n=10000} y_i^2 \quad (1)$$

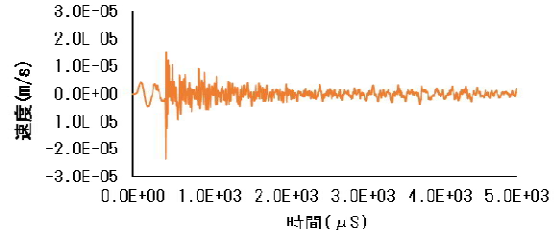
ただし、 E は波形エネルギー、 y_i は時刻 i における時刻歴波形の振幅値である。

前項2に記した実験結果および本解析結果から、波形エネルギーを算出した結果を図-18に示す。解析結果（図-18(b)）において、波形エネルギーは健全－グラウト未充填（ $2.25 \times 10^{-8} \text{m}^2/\text{s}^2$ ）に対して、破断－グラウト未充填（ $2.26 \times 10^{-8} \text{m}^2/\text{s}^2$ ）が比較的近似する結果となったが、実験結果（図-18(a)）に対して健全－グラウト充填、健全－グラウト未充填、破断－グラウト未充填の順に波形エネルギーが大きくなる傾向は同様であることから、本解析は妥当であると言える。

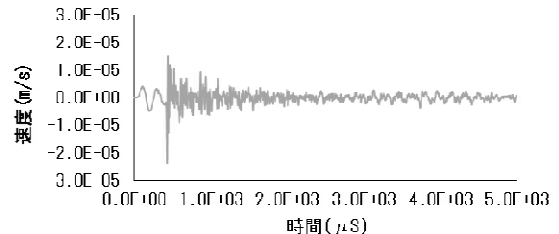
図-16に示す計測パターン（ダイヤフラム背面から計測）に対する解析結果（時刻歴応答波形）を図-19に示す。健全－グラウト充填（図-19(a)）に対して健全－グラウト未充填（図-19(b)）は、ほぼ同様の波形を示すことがわかる。また、上記2パターンの解析結果に対して、破断－グラウト未充填（図-19(c)）では、最大振幅値が



(a) 健全－グラウト充填

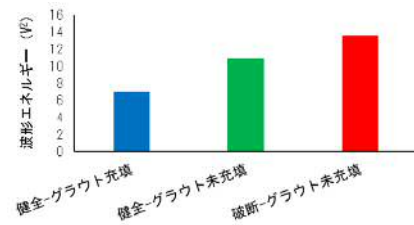


(b) 健全－グラウト未充填

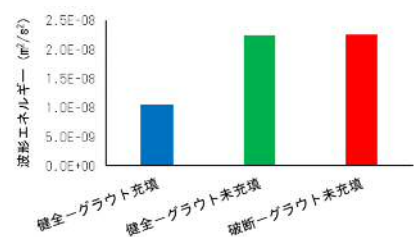


(c) 破断－グラウト未充填

図-17 解析結果（妥当性検証）



(a) 実験結果



(b) 解析結果

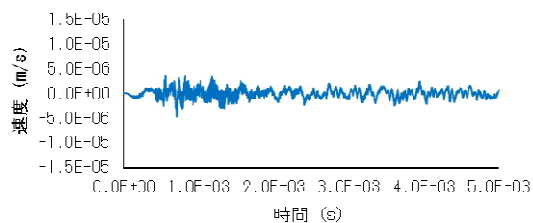
図-18 波形エネルギー（妥当性検証）

大きくなることわかる。

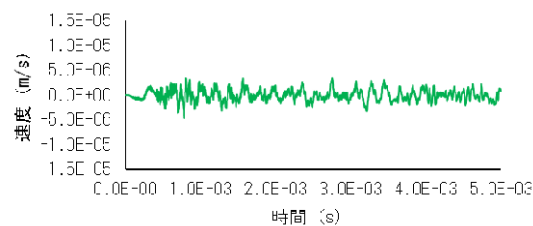
この原因を以下に考察する。PC 鋼棒が健全な場合は、グラウトの有無に関わらず長さ方向に PC 鋼棒の 1/2 にグラウトが充填されており、グラウトが充填されていない部位においては PC 鋼棒の端部がダイヤフラムに固定されている。これにより、PC 鋼棒を加振させたとしても振動が抑制される。しかし、PC 鋼棒が破断している場合は、グラウトで固定されている部分を起点として、破断

部先端が自由端となり、健全の状態よりも大きく振動したと推測することができる。

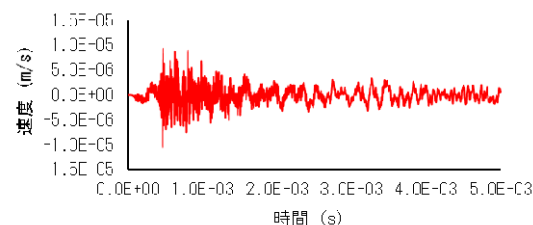
各解析結果から波形エネルギーを算出した結果を、図-20に示す。図-20より健全-グラウト充填の波形エネルギー ($3.87 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}^2$) に対して破断-グラウト未充填の波形エネルギー ($1.30 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}^2$) は、約3.4倍の大きさになっていることがわかる。このことから、定着部から1m程度に渡ってグラウト未充填があり、ダイヤフラム近傍においてPC鋼材が破断している状態であれば、波形エネルギーを評価指標とすることで、電磁パルス法



(a) 健全-グラウト充填



(b) 健全-グラウト未充填



(c) 破断-グラウト未充填

図-19 解析結果（時刻歴応答波形）

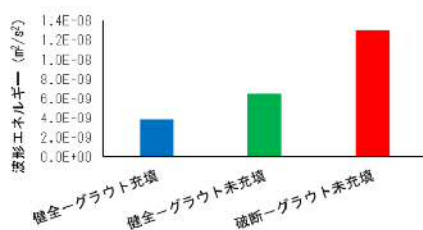


図-20 波形エネルギー（解析結果）

により横桁横締め PC 鋼材の破断を検出することができると可能性が示唆された。

上記より、PC 鋼材の破断を想定したケースにおいて、グラウト未充填部の長さを小さくしていけば、加振した PC 鋼材の応答振動も比例して小さくなり、図-19に示した3ケースの時刻歴応答波形を識別できなくなることが想定される。よって、電磁パルス法を適用して PC 鋼材の破断を検知する場合、1m 程度のグラウト未充填区間が必要になると考えられる。

4. まとめ

本研究において得られた知見を以下に示す。

- (1) 電磁パルス法を適用し、ダイヤフラム近傍に発生する横締め PC 鋼材の破断検知において、横桁側面から PC 鋼材を加振し、同じく横桁側面において弾性波の受信を行う場合は、破断の有無を検知することは難しい。
- (2) 一方、定着部から1m程度に渡ってグラウト未充填があり、ダイヤフラム近傍において破断がある状態であれば、ダイヤフラムの背面から計測を行うことにより、PC 鋼材の破断が検知できる可能性が示唆された。

謝辞

本論文を取りまとめるにあたり、ご協力いただいた大阪大学大学院の中尾優文君および小間健右君に心より謝意を表します。

参考文献

- 1) PC 構造物の維持保全（PC 橋の予防保全に向けて）、社団法人プレストレスト・コンクリート建設業協会、pp.54-62, 2010.3
- 2) 鈴木真, 安井和也, 寺澤広基, 内田慎哉, 鎌田敏郎：上面増厚後に再劣化した RC 床版の変状状況の非破壊評価手法、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.19, pp.641-646, 2019.10
- 3) 木村貴圭, 内田慎哉, 宮田弘和, 鎌田敏郎：電磁パルス法による接着系アンカーあと施工アンカー固着部の非破壊検査手法に関する実験的検討、日本コンクリート工学会年次論文集, Vol.36, No.1, pp.2116-2121, 2014.7