

論文 弾性波によるPCグラウト充填状況および付着破壊調査法に関する実験的研究

榎園 正義^{*1}・谷倉 泉^{*2}・野島 昭二^{*3}

要旨 : PC 桁のシース内グラウトは, プレストレスを与えている PC 鋼材の腐食を防止するとともに, PC 鋼材との付着力を確保し, 導入プレストレスの伝達を図るものである。しかしながら, 実際の橋梁では, このグラウトの充填が十分であるか否か, さらに PC 鋼材とグラウトの付着状態を評価できる確実なモニタリング方法が存在しないのが現状である。本研究は, PC 桁供試体を用いた PC 鋼棒 (B 種 2 号) の疲労試験を対象として, 新たに考案した弾性波計測を利用した非破壊調査方法を適用し, グラウト充填の有・無および PC 鋼棒とグラウトの付着破壊状況の評価を試みたものである。その結果, 本手法が有効であることがわかった。

キーワード : PC 鋼棒, シース内グラウト, 付着破壊状況, 弾性波, 波面率, モニタリング

1. はじめに

ひび割れを有する PC 桁の疲労試験では, PC 鋼材の応力変動が大きい場合, PC 鋼棒とシース内グラウトの間で付着破壊が生じる。この PC 鋼棒とグラウト間の付着破壊の進行による付着力の低下は, PC 鋼棒の応力を増加させるだけでなく, ひびわれ開口幅の増大, 桁のたわみ増加として現れる。さらに, 繰返し载荷することによって付着破壊が定着部まで到達すると, そのねじ部で疲労破断を生じる可能性が高くなる。このため, 付着破壊の把握は, 载荷試験実施上の安全確保だけでなく, 構造物を維持管理するうえでも非常に重要である¹⁾。また, 現場の PC 構造物の調査によると, シース内の空隙 (充填不足) が劣化を促進する大きな原因となる報告²⁾もあり, シース内へのグラウトの注入は厳重な施工管理のもとで確実に行うことが重要である。

PC 橋におけるシース内のグラウトは, PC 鋼材の腐食防止, PC 鋼材との付着力の確保, 導入プレストレスの伝達が目的である。しかし, 現状ではこのグラウトの充填が十分であるかどうかということや, PC 鋼材とグラウトの付着状態の計測, モニタリングする調査方法については確実な手法が存在しない^{3)~5)}。

そこで本研究は, PC 鋼棒 (B 種 2 号 ϕ 32 SBPR 930/1180) を有す PC 桁供試体を用い, シース内グラウト充填の有・無の確認および载荷試験による PC 鋼棒とグラウトの付着破壊の進行をモニタリングする方法として, 弾性波による計測方法を考案し, その適用性を実験的に検討したものである。

鋼棒の一端に設置した発信センサ (振動子) に高周波パルスを入力して, 数十 kHz~数 MHz の広帯域の弾性波動 (超音波) を発生する⁶⁾。その弾性波が鋼棒の長手方向へと伝播する場合, 高い周波数の数 MHz の波動は指向性があるため直進し, 比較的低い周波数の数十 kHz~数百 kHz の波動は指向性がないため, 鋼棒の内部で反射を繰返し, 反対側に設置した受信センサ (振動子) で検知される。

このように, 弾性波動が鋼棒中を軸方向に伝播する場合, 鋼棒の伝播距離に応じて音圧 (波形の振幅) が低下する⁷⁾。また, 鋼棒の周囲が自由表面状態 (アンボンド部材) では, 図-1 (a) に示すように, 直進する波動 (P_1 : 縦波) の他に, 鋼棒の内部で反射を繰返して伝播する波動 (P_s) があり, これは, 音速の違いから速度分散を生じていくつもの波群となる。一方, 鋼棒の周囲が自由表面でない場合 (ボンド部材) は, 図-1 (b) に示すように, 鋼棒の側面との境界で反射を繰返す度に鋼棒の外へと波動の逸散を生じ, そのエネルギーは徐々に減衰すると考えられる。

すなわち, アンボンド部材 (グラウト無し) 中の PC 鋼棒は自由表面状態のため, 波動をほぼ完全に反射し, ボンド部材 (グラウト有り) 中の PC 鋼棒周辺では密着しているシース内のグラウトとの境界から反射波が徐々に吸収される。したがって, PC 鋼棒を伝播してきた弾性波動の受信波形の変化をとらえることができれば PC 鋼棒とグラウトの充填および付着の状況が観測できると考えられる。

2. 弾性波計測方法

2.1 原理

2.2 実験方法

供試体は図-2 に示すような PC 桁 (桁高さ 65cm,

*1 (社) 日本建設機械化協会 施工技術総合研究所 研究第二部 研究課長 (正会員)

*2 (社) 日本建設機械化協会 施工技術総合研究所 研究第二部 部長 (正会員)

*3 (株) 高速道路総合技術研究所 道路研究部 橋梁研究室 主任研究員 (正会員)

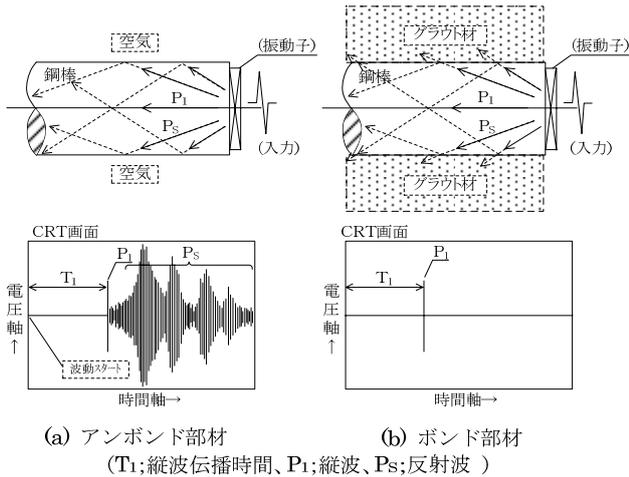


図-1 PC鋼棒を伝播する波動の受信波形

幅 50cm, 長さ 6.4m) で, 中央部下方にシース管を配置し, その中にφ32mmのPC鋼棒(B種2号φ32 SBPR 95/120)を1本セットした矩形断面のポストテンション方式のPC桁供試体(7体)である。PC鋼棒には52.8tf(×9.81kN)のプレストレスを導入し, その内1体は緊張力管理用のアンボンドとし, その他の6体はPC桁のシース内へグラウト材を注入した。コンクリートおよびグラウト材の配合を表-1, 表-2に, 圧縮強度を表-3に示す。なお, セメントは早強セメントを用いた。

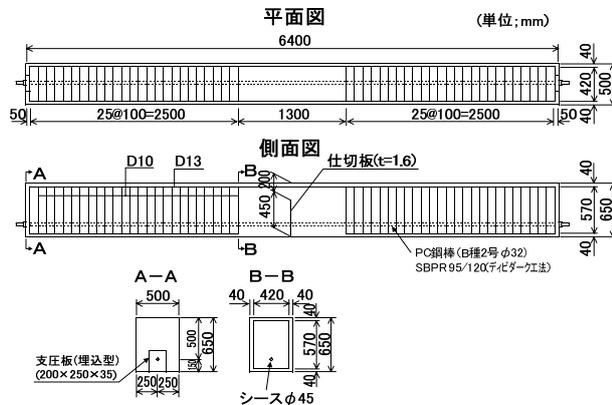


図-2 供試体の形状・寸法

表-1 コンクリート示方配合表

粗骨材の最大寸法 (mm)	スラブの範囲 (cm)	空気量の範囲 (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量(kg/m ³)				
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 NL-4000 C×2%
20	5±1.5	2±1	38	40	163	429	715	1081	8.58

表-2 グラウト材の配合

水セメント比 W/C (%)	混和剤 コンベックス208 (C×%)
38	1.2

表-3 コンクリート

およびグラウト材の強度			
コンクリート(N/mm ²)		グラウト材(N/mm ²)	
圧縮強度	弾性係数	σ_7	σ_{28}
* 86.7	* 3.94×10 ⁴	* 2,471	* 3,717
<備考>			
コンクリートの音速(φ15×30cm) *4790m/s			
*印は平均値			

載荷試験には, 容量 150tf (×9.81kN) の電気油圧式疲労試験機 (50tf, ×9.81kN) を用いた。載荷方法は, 図-3 に示すような荷重分配桁を用いた2点集中載荷による曲げ試験で, 疲労試験は下限荷重 206kN (PC鋼棒応力 $\sigma_{py} \times 0.75$ 相当) とし, 上限荷重は応力変動分を上乗せした荷重で, 繰返し速度は2~2.5Hzとした。

弾性波計測のシステム構成を図-4に示す。測定方法は, 各供試体の試験供用前と, 疲労試験中の任意の繰返し回数において測定を行った。伝播波動の観測は, 受信センサからの電気信号を直接 (生の波形) オシロ・スコープ (DC~20MHz) で受信して観察した。その受信波形の面積を計り, 波面率 (η ; $A_b/A_o \times 100\%$ A_b : ボンド部材の面積, A_o : アンボンド部材の面積) として整理した。

また, 波面率の変動分 ($\Delta \eta$) とは, 疲労試験時の下限荷重時の波面率 (η_L) と上限荷重時の波面率 (η_H) との差 ($\eta_H - \eta_L$) とした。

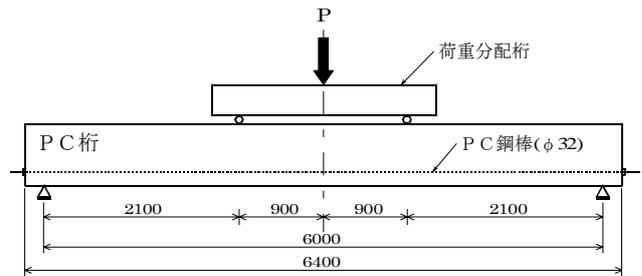


図-3 載荷方法

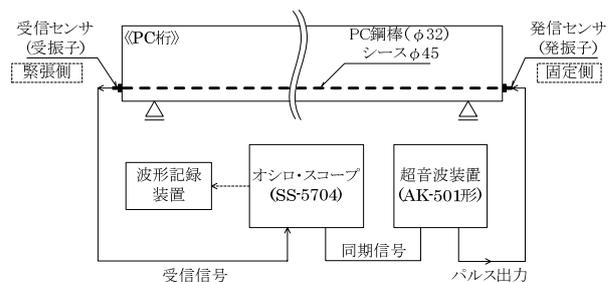


図-4 弾性波計測システムの構成

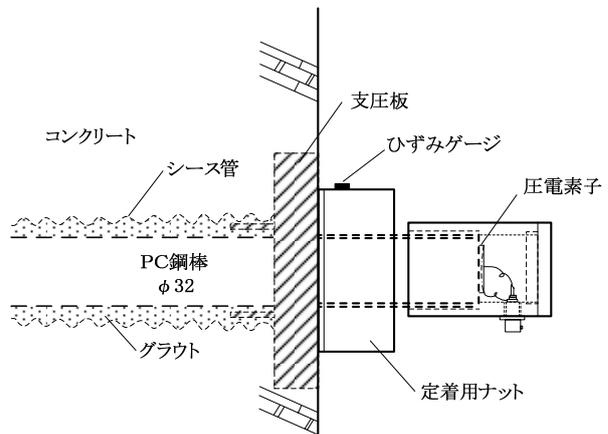


図-5 定着用ナットとひずみゲージ位置

なお、PC 鋼棒とグラウトとの付着破壊の確認は、図-5 に示す PC 桁の両端（固定側および緊張側）の定着用ナット（ディビダーク工法）に貼り付けたひずみゲージの値をモニターする方法で行った。

2.3 実験結果と検討

弾性波計測による PC 桁供試体の試験供用前、疲労試験および静的破壊試験時の波面率の算出結果と破断位置を表-4 に示す。なお、疲労試験時の波面率は、PC 桁の破壊に最も近い繰返し回数の値とした。

(1) シース内グラウト充填による影響

1) グラウト充填の有・無

シース内のグラウト有・無による、PC 桁供試体の受信波形の例を図-6 に示す。

ここで、緊張力管理用でグラウト材の充填無し（グラウト無し）の供試体 A は、鋼棒内では完全反射状態のため受信波形の振幅は大きく、初動の P₁ 波（PC 鋼棒の縦波伝播速度相当）と速度分散による後続の P_s 波成分が続いた波群となった。このグラウト無しの受信波形状態（図-6(a)）を波面率 100% とした。

一方、グラウト材を充填（グラウト有り）した供試体 B~G の試験前の受信波形（図-6(b)）は、P₁ 波（音速 5900m/s）のみであり、P_s 波の存在は全く認められなかった。これは、P_s 波が鋼棒内での反射を繰返す際に、鋼棒とグラウトの音響インピーダンスが比較的近いため、グラウトとの境界から徐々にエネルギーが吸収され、P_s 波の振幅が減衰したと考えられる。このように、グラウトが十分に充填されている場合は、波面率が 0.4~1.1% と著しく小さな値となり、容易に判別が可能であった。

2) グラウト材の充填による影響

図-7(a~c)は、グラウト注入直前のアンボンド状態の供試体 C におけるシース内へのグラウト充填時の影響について、弾性波計測を適用した受信波形例である。

波面率は、グラウト材の充填状況により、(a)グラウト無しの 100% から (b) 充填中の 33.5%、さらに (c) 完全にグラウトが充填された状態の 2.33% へと大きな変化が認められた。これは、充填されたグラウト材が PC 鋼棒に付着・硬化し始めたことから、伝播波動の減衰が増大したためと考えられる。また、波面率はグラウト材の硬化（材令）に伴って、図-8 に示すようにさらに 2% 程度減少する傾向を示した。

以上の結果から、PC 桁中のシース内のグラウト充填の有・無については、グラウトを充填する前後および硬化後において、鋼棒内の弾性波動の受信波形の変化として明瞭な形でその現象が把握できた。したがって、あらかじめキャリブレーションを行うことにより、グラウトの充填度の評価が可能と考えられる。

表-4 波面率と破断位置

供試体名 (応力振幅)	グラウト材の充填		波面率(%)		破断位置 (回数)
	有	無	グラウト状況調査 (試験前)	下限荷重~上限荷重 (繰返し回数)	
A(緊張力管理用) (0N/mm ²)	-	●	100 (アンボンド部材)	100(変動無し)	-
B (147N/mm ²)	●	-	- (途中から計測)	9.1(変動無し) (200万)	破断せず (200万)
C (294N/mm ²)	●	-	0.4	17.0~25.0 (1.6万)	定着部 (6.4万)
D (172N/mm ²)	●	-	0.5	約19 (33万)	定着部 (90.6万)
E (172N/mm ²)	●	-	1.1	8.6~10.1 (120万)	破断せず (120万)
F (294N/mm ²)	●	-	0.9	15.9~21.2 (6.2万)	定着部 (8.8万)
G (静的破壊試験)	●	-	0.5	15.2 (試験後)	コンクリート 圧縮破壊
備考	波面率(%)=Ab/Ao×100 ただし、Abはボンド部材の波形面積 Aoはアンボンド部材の波形面積				

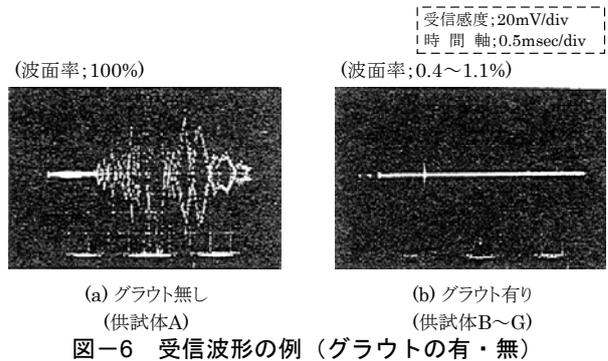


図-6 受信波形の例（グラウトの有・無）

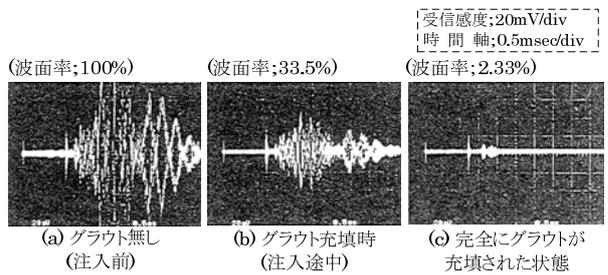


図-7 グラウトの充填による影響（供試体 C）

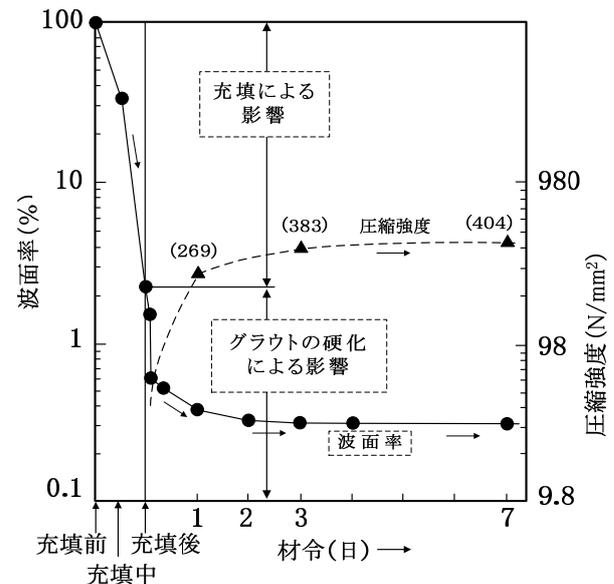


図-8 グラウトの充填および硬化による影響

(2) 付着破壊状況

弾性波計測による受信波形の例を、繰返し回数 (N) に応じて図-9 に示す。疲労試験開始前 (N=0) の受信波形は P₁ 波のみで、繰返し回数の増加に従って Ps 波成分が多く受信され、波面率や疲労試験時の下限荷重時～上限荷重時の波面率の変動 ($\Delta \eta$) が大きくなる傾向を示した。

1) 疲労試験 (供試体 ; B~F の 5 体)

< 定着部のひずみと繰返し回数との関係 >

各応力度での付着破壊状況を確実に把握する目的で設置した定着部 (ナット) のひずみ振幅と繰返し回数の関係を図-10 に示す。この図に示すように、繰返し回数の増加とともに PC 鋼棒とグラウトの付着破壊が進行し、最終的には定着用ナットの位置まで達したことを示している。その結果、定着部には荷重振幅による変動が伝播し、ひずみ振幅 (圧縮) が徐々に増加して、付着力が低下する傾向を示した。ただし、図-10 では両定着用ナット (緊張側と固定側) の付着破壊の進行状況 (ひずみ振幅) は必ずしも同一でないため、ひずみ振幅の大きい方を用いてプロットしたものである。

< 波面率と繰返し回数との関係 >

弾性波計測による波面率は、図-11 に示すように、繰返し回数とともに Ps 波成分が多く受信され、波面率が増加した。この状況は、図-10 のナットひずみからみた付着破壊の進行状況とほぼ一致しており、図-11 の波面率が 2% を超えた付近の繰返し回数から、図-10 の定着部のナットにはひずみ振幅が発生しており、両者には相関が見られる。

さらに、疲労試験の応力振幅が高い場合には、繰返し载荷による付着破壊の進行が早く、その影響が現れているものと考えられる。なお、PC 鋼材が破断せずに疲労試験を中止した供試体 B および E の受信波形には、除荷後も P₁ 波と Ps 波成分が観測され、繰返し载荷による付着破壊の影響が認められた。

< 波面率の変動分 >

表-4 に示す波面率の算定結果から、定着部で疲労破断した供試体 C (294N/mm², 6.4 万回) は、繰返し载荷時は波面率が 17.5 (下限荷重時) ~25% (上限荷重時) の範囲で変動し、その波面率の変動分 ($\Delta \eta$) は約 8% であった。また、供試体 F (294N/mm², 8.8 万回) は波面率が 15.9~21.2% で変動し、その波面率の変動分は約 5% と若干小さい。一方、1200 万回で破壊しなかった供試体 E (172N/mm²) は波面率が約 10% で、その変動分は 2% 以下とかなり変動が小さな結果であり、PC 鋼材の応力度 (荷重振幅) が高い程、波面率およびその変動分が大きい傾向がみられた。

さらに、疲労試験中 (供試体 ; E) の荷重振幅 (下限

～上限荷重) に対し、同一荷重時の定着部のひずみと波面率の変動分を詳細に計測した例を図-12 に示す。その結果、この図-12 および後述の図-16 に示すように波面率と定着部 (ナット) ひずみの挙動は良く一致していることが分かる。

2) 静的破壊試験 (供試体 ; G)

静的破壊試験を実施した供試体 G の定着部 (ナット) のひずみは、図-13 に示すように、PC 桁上縁コンクリートの圧縮破壊荷重 (405kN) の直前 (98%) で緊張側

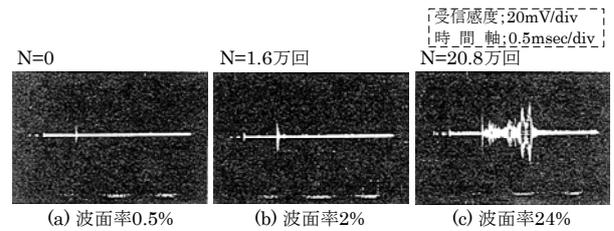


図-9 繰返し回数と受信波形の例 (付着破壊状況 ; 供試体 D)

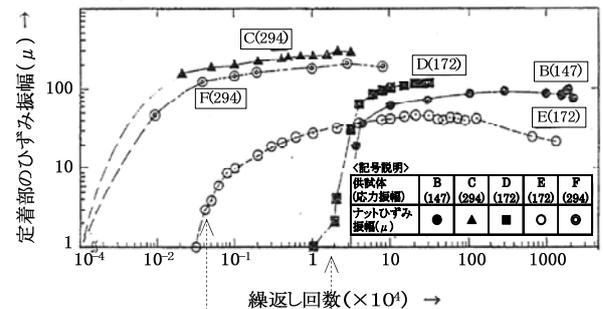


図-10 定着部 (ナット) のひずみと繰返し回数の関係

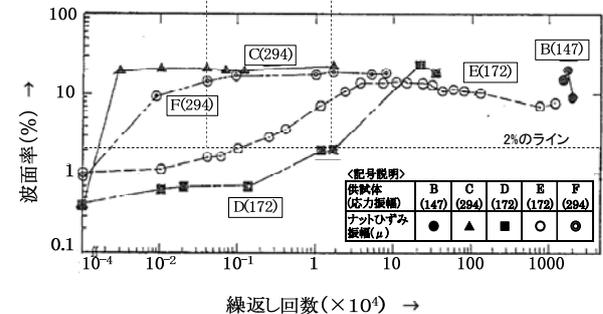
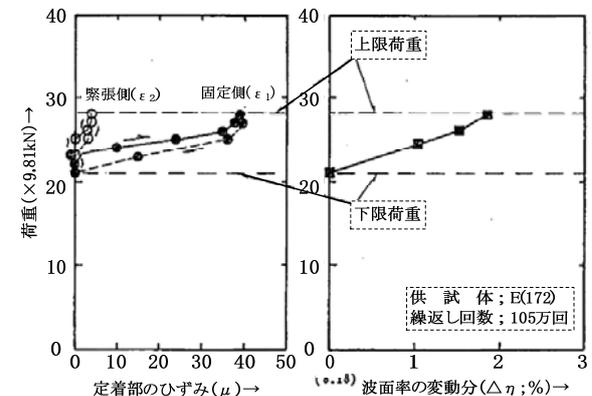


図-11 波面率と繰返し回数の関係



(a) 定着部のひずみ変化 (b) 波面率の変動分
図-12 荷重と定着部のひずみおよび波面率の関係

に -70μ 、圧壊直後(255kN一定保持状態)では、緊張側(-1280μ)と固定側(-1900μ)いずれも大きな圧縮ひずみが発生し、付着破壊が両定着部に達していることが認められた。

また、除荷重時(0kN)にはPC桁の変形回復とともに、両定着部のひずみは約 600μ 減少した。

一方、波面率の変化は図-14に示すように、Ps波成分(▲印)は破壊荷重の90%から波面率(Ps)が約0.01%から0.5%へと波面率が増加し、付着破壊の進行を示した。しかし、PC鋼棒の縦波であるP1波成分(●印)のみに着目すると、荷重の増加に対して、逆に波面率(P1)が小さくなった。これは、PC桁の変形(たわみ)が大きくなったため、主にPC鋼棒の屈曲による反射の影響でP1波に減衰を生じたものと考えられる。しかし、波面率(P1+Ps成分;□印)全体では圧壊直後に8.3%、除荷重後には15.2%とさらに増加しており、付着破壊の進行が認められた。

このように、波面率(P1+Ps成分)の増加はPC鋼棒とグラウトとの付着力の低下する現象を示しているものと考えられる。

3) 定着部の疲労破壊予知について

PC桁両端の定着部(ナット)に発生したひずみ振幅の累計(累積ひずみ; $\sum \epsilon_i \cdot ni$)と繰返し回数の関係を、図-15に示す。この図から、定着部のネジ部にて破壊する疲労寿命推定線図(ダメージライン)が求められた。このダメージラインは、固定側(ϵ_1)、あるいは緊張側(ϵ_2)のひずみの累計がラインの上側へ、先に達した方の定着部(ねじ部)で疲労破断を生じる可能性が高いことを示している。

ここで図-12(a), (b)から、ひずみ振幅($\epsilon_1 + \epsilon_2$)と波面率の変動分($\Delta \eta$)の関係を求めると、図-16に示すように定着部に生じるひずみ変化と波面率の変動分は比例する傾向がある($\epsilon \propto k \cdot \Delta \eta$)。このことから、弾性波計測によるPC鋼棒を伝播する波面率の変動分($\Delta \eta$)は、各々の定着部に生じる直接的な疲労損傷とは異なるが、定着部への平均的な損傷と考えられる。そこで、「付着破壊の係数」として $K(1/k)$ を定義し、各供試体毎に定着部の平均ひずみを求め、下式から波面率の累計に換算すると、波面率の変動($\Delta \eta$)から見た疲労破壊の可能性に関する図-17のダメージラインが推定される。ただし、ここでは、 K を一定と仮定した場合についてのみ換算した結果である。

波面率の変動分($\Delta \eta$)の累計 = $(\epsilon_1 + \epsilon_2) \times K \times N$
(%・万回)

ただし K : 付着破壊の係数 ($0.0437\%/ \mu$)

N : 繰返し回数 (万回)

ϵ_1 : 固定側の平均ひずみ (μ ; $\sum \epsilon_i \cdot ni/N$)

ϵ_2 : 緊張側の平均ひずみ (μ ; $\sum \epsilon_i \cdot ni/N$)

($\epsilon_1 + \epsilon_2$): 定着部の平均ひずみの和 (μ)

以上のことから、本研究で行った弾性波計測手法を用いれば、繰返し载荷時の付着破壊の進行で生じる波面率の変動分($\Delta \eta$)および定着部(ナット)のひずみ振幅の発生状況から、定着部の疲労破壊をある程度予知できるものと思われる。

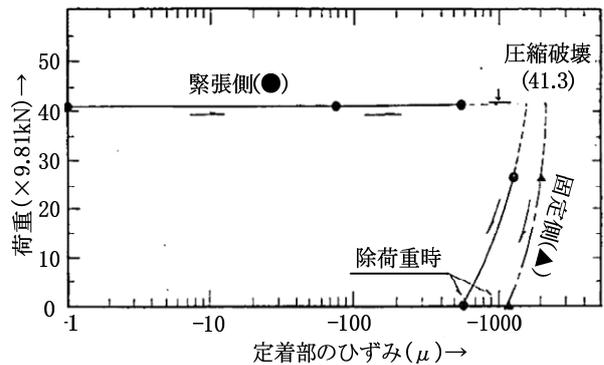


図-13 荷重と定着部のひずみの関係

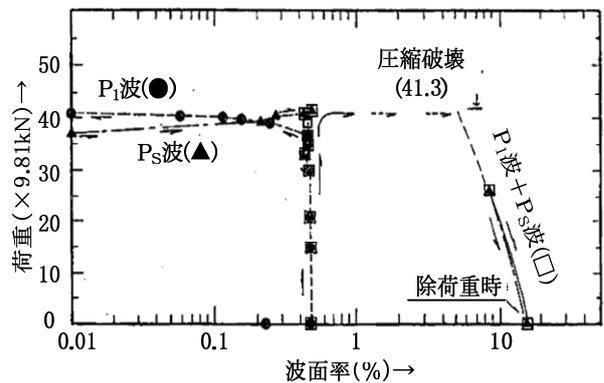


図-14 荷重と波面率の関係

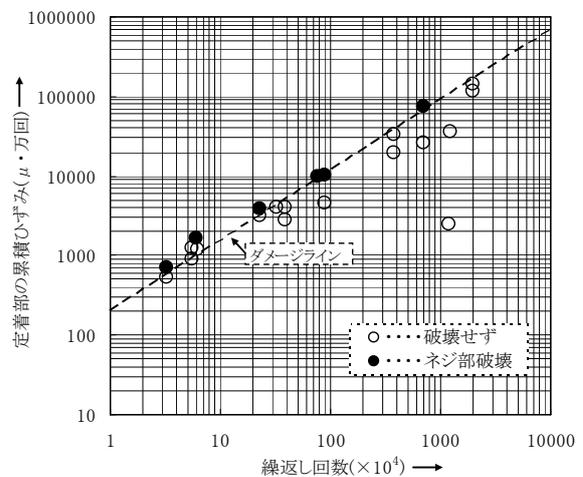


図-15 累積ひずみと繰返し回数の関係

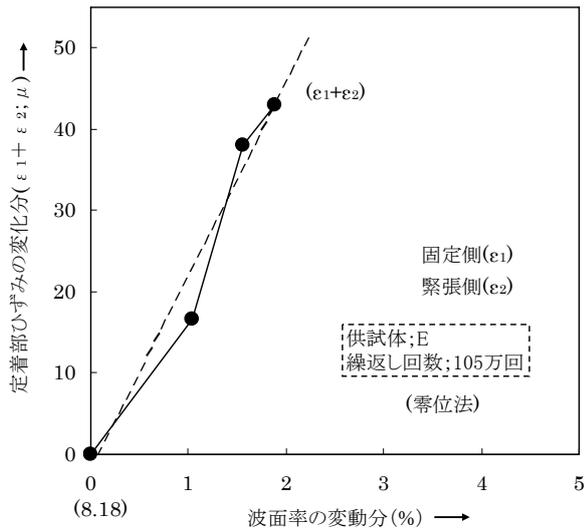


図-16 定着部のひずみと波面率の関係

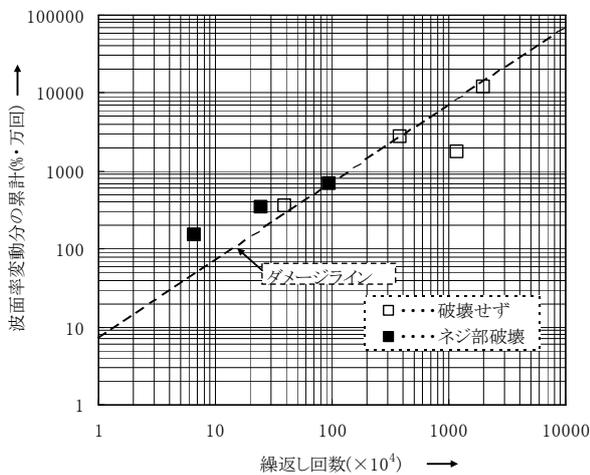


図-17 波面率変動分 ($\Delta\eta$) と繰返し回数の関係

3. 結論

本実験で得られた主な結果は、下記に示すとおりである。

- (1) PC 桁中の鋼棒 ($\phi 32$) に弾性波を入力し、PC 鋼棒を伝播してきた波動状況からシース内のグラウト充填の有・無をグラウトの硬化前・後で容易に検知することができた。
- (2) 付着破壊によって定着部 (ナット) に発生するひずみ振幅と波面率の変動分には相関が認められた。
- (3) PC 鋼棒とグラウトの付着破壊状況は、PS 波成分の存在 (発生) による波面率 (η) の増加から観測できた。

(4) 以上(1), (2)の弾性波計測方法は、繰返し载荷時はもちろんのこと、荷重保持状態、あるいは除 (無) 荷重時でも適用が可能である。

(5) 繰返し载荷によって生じる波面率の変動分 ($\Delta\eta$) および定着部 (ナット) のひずみ発生状況から、定着部の疲労破壊の予知が出来ることがわかった。

4. あとがき

本研究では、PC 桁中のシース管内のグラウトの充填状況や、PC 鋼棒とグラウトとの付着状況の調査および定着部の疲労破壊の予知に、弾性波計測の適用が可能であることを確認することができた。今後、本方法によるグラウト充填度や付着破壊状況等の評価については、受信波形をリアルタイムで処理できるハード面の改良を行うとともに、その波形解析を含めた弾性波計測の適用によるデータの蓄積等から、定量的な評価ができるように研究を進めていきたいと考えている。

参考文献

- 1) 鈴木計夫, 中塚侑, 榎本秀文: PRC 梁断面の履歴性質に関する解析的研究, セメント技術年報, 1981, pp.467~470
- 2) 倉内実: PC 鋼材の腐食, コンクリート工学, Vol.25, No.7, 1987.7
- 3) 尼崎省二, 鈴木健司: 応答関数によるコンクリートの品質管理について, 土木学会第 43 回年次学術講演会, 昭和 63 年 10 月, pp.430~431
- 4) 魚本健人, 首藤芳久: AE 計測によるプレストレストコンクリートのシース内グラウト充填度判定方法, 生産研究, Vol.39, No.4, 1987.4, pp.23~26
- 5) 藤井学, 宮川豊章: PC グラウト充填状況の非破壊探査法, 土木学会論文集, 第 402 号/V-10, 1989.2, pp.15~26
- 6) 安達経治, 金成昌美, 榎園正義: 弾性波によるボルトの緩み・疲労亀裂の検知および軸力測定に関する実験的研究, 非破壊検査, Vol.38, 1984.4
- 7) 鈴木紀生, その他: 超音波法によるケーブルの断線検出法, センサ技術, Vol.8, No.5, 1988.5, pp.33~37