

論文 衝撃弾性波の応答特性を利用した PC グラウト充填評価に関する基礎的研究

富田 芳男^{*1}・岩波 光保^{*2}・大即 信明^{*3}

要旨：本研究は、衝撃弾性波の応答特性を利用してPCフレッシュグラウトの充填評価を行うための手法について検討を行ったものである。PC鋼棒をバネおよびダンパを用いてモデル化し振動解析を行うことにより、グラウトの充填程度と振動の減衰に相関があることが示された。このことを踏まえて衝撃弾性波測定を行った結果、特に1次の固有振動モードの減衰傾向に着目することにより、フレッシュグラウトの充填状況を的確に評価できることが明らかとなった。この場合、充填方向やグラウトの粘性が評価結果に及ぼす影響は小さかった。

キーワード：フレッシュグラウト、衝撃弾性波、モード解析、パワースペクトル、減衰

1. はじめに

ポストテンション方式のPC構造物において、シース管内部にグラウトを確実に充填することは、その性能を保証する上で極めて重要である。しかしながら、シース管内部のグラウト充填状況を外部から目視観察することはできないため、その評価は非破壊的な手法に頼らざるを得ない。現状では、削孔をとまなう局部破壊法やX線法などが有力な評価手法として採用されている¹⁾が、労力、コスト、安全面を考慮すると必ずしも満足のいく評価法であるとは言えない。そこで、簡便でかつ安価に測定を行うことができる衝撃弾性波を用いたグラウト充填評価手法²⁾が検討されるようになってきたが、グラウト充填状況と衝撃弾性波の応答特性の対応関係があまり明確でないことが問題点として残されている。

そこで本研究においては、シース管内部のグラウト充填状況を衝撃弾性波の応答特性に着目して評価する手法について検討を行った。特にグラウトがフレッシュな状態にあるときの評価法について検討を行うことにより、グラウト工事における施工管理段階での適用が可能となる。このようにグラウトがフレッシュな状態で充填の適否を評価することができれば、再注入など

の対策が容易であり、実用上極めて有効であると考えられる。また測定対象部材ごとにグラウト充填前の「初期値」を収集することができ、初期値からの変化に着目した評価を行えることもメリットの1つである。

検討に際しては、まず衝撃を受けるPC鋼棒の応答特性を把握するため、バネやダンパを用いたモデルにより、その振動現象に関する理論的な考察を行った。続いて、フレッシュグラウトの充填状況とPC鋼棒の応答特性の関係を実験的に調べるため、コンクリートとシース管の代わりに透明な塩ビ管を用いて、塩ビ管内部のグラウト充填状況を確認しながら衝撃弾性波の測定を行った。さらに、グラウト充填程度の異なるPC梁供試体に対しても同様な検討を行うことにより、実際のPC部材に対する本手法の適用可能性を確認した。

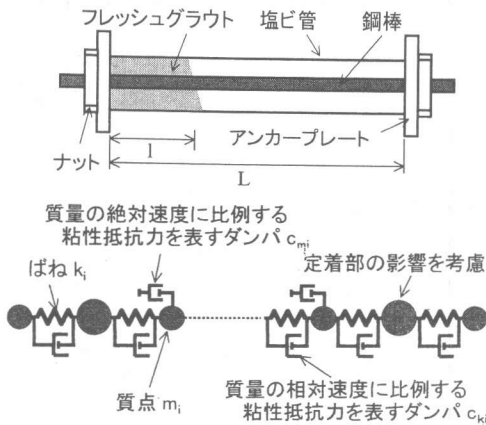
2. 衝撃を受けるPC鋼棒の振動解析³⁾

ここでは、衝撃を受けることにより生じるPC鋼棒の振動現象について理論的な考察を行い、これ以降の検討を行う上での基礎資料を得ることとした。

*1 東京工業大学大学院修士課程 理工学研究科土木工学専攻（正会員）

*2 東京工業大学大学院博士後期課程 理工学研究科土木工学専攻（正会員）

*3 東京工業大学教授 工学部開発システム工学科（正会員）



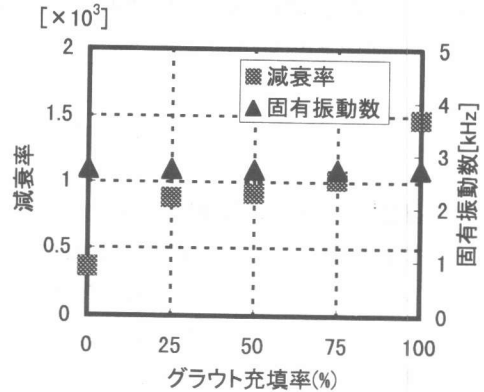
図－1 用いた供試体と解析モデルの概要

2. 1 解析モデル

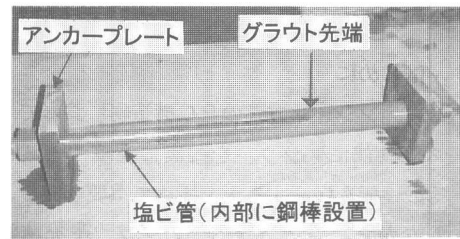
本研究では、P C 鋼棒を図－1 に示すようにモデル化し、衝撃を受けることにより生じる鋼棒の振動現象を解析した。図－1 において、左右から 2 番目の質点が大きくなっているのは、この部分に P C 鋼棒の定着具が存在することを考慮したためである。また振動を減衰させる役割を有するダンパには、質点の相対速度に比例した減衰を生じさせるものと質点の絶対速度に比例した減衰を生じさせるものの 2 種類を設定した。前者は、振動系内部に元来存在している減衰作用によるものであり、後者は、振動系外部（周囲の流体など）から受ける減衰作用によるものである。このようなモデルを対象として、各質点に関する運動方程式を立て、マトリクスの形で表すと、式(1)ようになる。

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{0\} \quad (1)$$

ここに、[M]：質量マトリクス、[C]：減衰マトリクス、[K]：剛性マトリクスである。[M]および[K]の要素は、鋼棒の幾何条件、ならびに密度や弾性係数から算出し、[C]については、実験により得られた代表的な振動波形との適合性を考慮して決定した。すなわち、グラウトを充填する前に得られた振動波形より、相対速度に比例する減衰係数（[C_r]）を、またグラウトが充填された後に得られた振動波形より、絶対速度に比例した減衰係数（[C_m]）を決定し、[C] = [C_r] + [C_m]



図－2 振動解析結果



写真－1 グラウト充填状況

とした。

上記の運動方程式から、モード解析手法により、解を求め、各固有振動モードの固有値 λ_i を算出した。この λ_i は、式(2)に示すように複素数であって、実数部分の絶対値が減衰率 σ_i 、虚数部分が減衰固有角振動数 ω_{di} である。

$$\lambda_i = -\sigma_i + \omega_{di} \cdot j \quad (j: \text{虚数単位}) \quad (2)$$

2. 2 解析結果

質点の絶対速度に比例した減衰を生じさせるダンパの数を変化させることにより、異なる「グラウト充填率（シース管全長に対するグラウト充填部分の長さの百分率、 $l/L \times 100$ ）」に対して、減衰率と固有振動数を解析した結果を図－2に示す。これらは、1 次の固有振動モードに関する結果であり、測定自体の容易さや測定結果の解釈の容易さを考慮して、本研究ではこれ以降においても、1 次モードの固有振動に着目することとした。この図によれば、グラウト充填率が変化しても固有振動数にはほとんど変化がみられないが、一方の減衰率はグラウト充填が進むにつれて増加していることがわかる。

以上より、衝撃弾性波の応答特性を利用して P C グラウトの充填評価を行うためには、衝撃により生じた振動波形の減衰程度に着目することが有効であることが示された。

3. 衝撃を受ける P C 鋼棒の応答特性に関する基礎的検討

3. 1 実験概要

2. で、グラウトが充填されることにより振動波形の減衰程度が変化することが示されたが、このことについて実験的に確認するため、透明な塩ビ管の内部に P C 鋼棒を配置した供試体を作製し、グラウト充填状況を確認しながら、衝撃弾性波の測定を行った。

(1) 供試体概要

図-1 に、用いた供試体の概要を示す。鋼棒長さは、60, 80, 120(cm)とし、鋼棒両側に 10cm ずつの定着長を設けているため、塩ビ管長さは、40, 60, 100 (cm)となる。塩ビ管の内径は 41mm であり、鋼棒には、直径 26mm の SBPR930/1080 を用いた。また、P C 鋼棒および供試体の設置条件は測定結果に影響をおよぼすと考えられるため、すべての測定において鋼棒はアンカープレートと非接触とし、供試体は厚さ 1cm のゴム板上に設置することとした。

用いたグラウトは、ノンブリーディングタイプのセメントペーストであり、 $W/C=0.45$ とし、増粘剤をセメント質量に対して 1.0%混和した。セメントには、普通ボルトランドセメントを用いた。写真-1 に、グラウト充填状況を示す。なお、グラウト充填長さ l は、鋼棒上部のグラウト充填長さと鋼棒下部のグラウト充填長さの平均値とした。

(2) 衝撃弾性波測定

上記供試体の鋼棒端部を直径 3cm、質量 118.9g の真鍮球を用いて作製した「振り子」により打撃し、P C 鋼棒に振動を与えた。振り子長さは 20cm、振り子高さは 2.7cm とした。この振動をもう一方の端部に設置した加速度計により測定し、グラウト充填状況と衝撃弾性波の応答特性

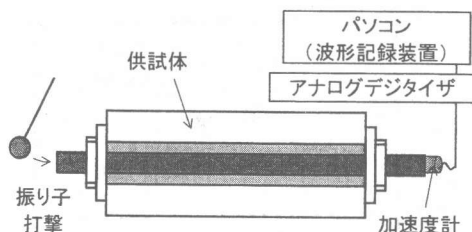


図-3 衝撃弾性波測定システム

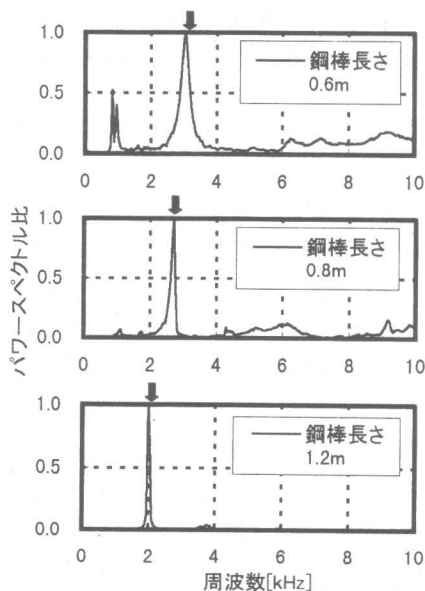


図-4 鋼棒長さが異なる場合のスペクトル

の関係を調べた。用いた測定システムを図-3 に示す。なお本研究で用いたようなグラウトの粘性であれば、上記の振り子打撃を与えても、グラウト先端の状況に変化が生じないことを目視により確認した。

このシステムにより検出された振動波形に対して高速フーリエ変換を施すことにより、振動波形のパワースペクトルを算出した。得られたパワースペクトルのうちで、1 次の固有振動モードに着目して、グラウト充填率の変化にともなうスペクトルピークの減衰傾向を調べた。

3. 2 実験結果および考察

(1) 供試体長さが異なる場合に関する検討

鋼棒長さが異なる塩ビ管供試体において、グラウト充填前に得られた振動波形のパワースペクトルを図-4 に示す。これより、鋼棒が長く

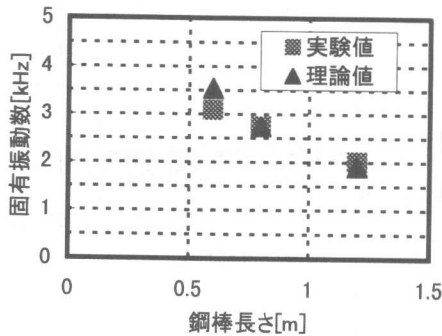


図-5 鋼棒長さと固有振動数の関係

なるにつれて、ピーク周波数が低下していることがわかる。

図-5に、実験で得られたピーク周波数と2.と同様の解析を行うことにより得られた1次モードの固有振動数を比較した結果を示す。これより、実験で得られたパワースペクトル中のピークは、P C鋼棒の1次モードの固有振動であることが示された。したがって、鋼棒長さが異なる場合、すなわち部材寸法が異なるような場合には、グラウト充填評価を行う上で着目すべき周波数範囲を変える必要があるといえる。

(2) グラウトの充填程度がP C鋼棒の応答特性に及ぼす影響

鋼棒長さが80cmの供試体に対して、グラウト充填率を0、50、100(%)と変化させた場合に得られたパワースペクトル分布を図-6に示す。これらのグラフにおける縦軸は、充填率0%の場合のピーク値をもって規準化してある(この値を「パワースペクトル比」と呼ぶこととする)。これより、グラウトが充填されるにつれて、1次モードのピークが減少していくことがわかる。これは、2.で述べたように、グラウト充填率の増加とともにグラウトの粘性による減衰が卓越するためである。図-7に、鋼棒長さが異なる場合のパワースペクトル比とグラウト充填率の関係を示す。これより、鋼棒長さにかかわらず、グラウト充填率が増加するとパワースペクトル比が低下している。また鋼棒長さが大きいほど、スペクトルの減衰が顕著になっている。これは、P C鋼棒が長くなるほど、グラウトが

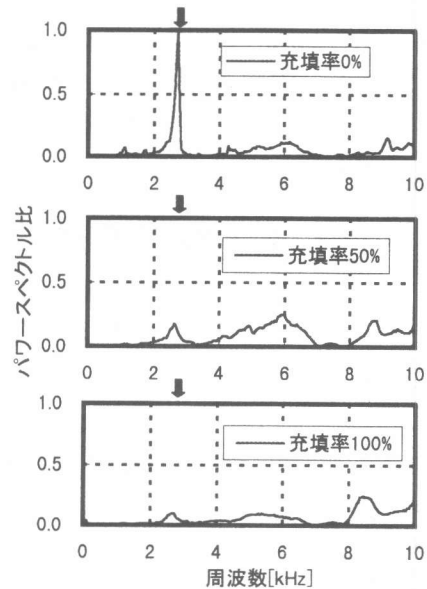


図-6 グラウト充填程度が異なる場合のパワースペクトル分布

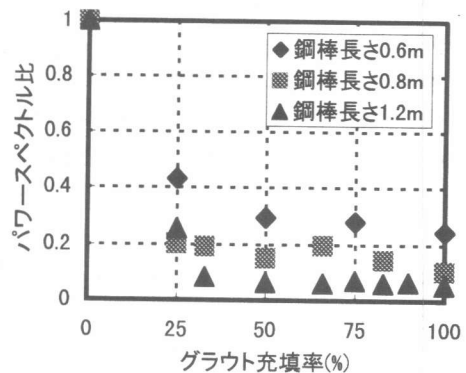


図-7 グラウト充填率とパワースペクトル比の関係(鋼棒長さ変化シリーズ)

鋼棒に接する領域が絶対的に大きくなり、鋼棒に働く粘性抵抗が大きくなるためと考えられる。なお、パワースペクトル比の値に多少のばらつきが見られるが、これはコンクリートの代わりに軽量の塩ビ管を用いていることから、振り子打撃により与えられる入射エネルギーの誤差を大きく反映してしまったことが原因と考えられる。

次に、グラウトが供試体の両側から充填する場合について検討を行った。なおここでは、良好にグラウトを充填するために、塩ビ管中央の上部に、直径1cmの空気穴を設けた。図-8に、

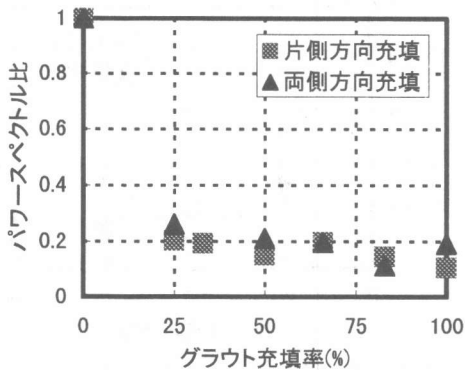


図-8 グラウト充填率とパワースペクトル比の関係 (充填方向変化シリーズ)

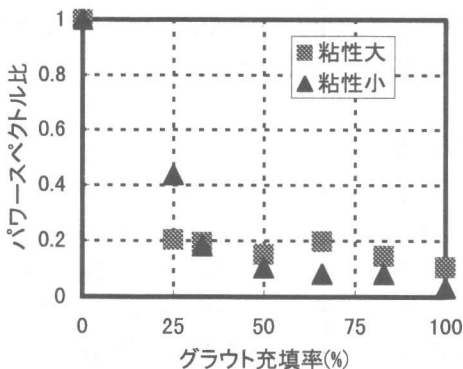


図-9 グラウト充填率とパワースペクトル比の関係 (粘性変化シリーズ)

鋼棒長さ 80cm の供試体に対して、グラウトを片側から充填した場合と両側から充填した場合のパワースペクトル比の変化を比較して示す。これより、充填方向によらず、グラウト充填率とパワースペクトル比の間に同様の関係が存在していることがわかる。これは、鋼棒がグラウトに接している長さが同じであれば、鋼棒が受ける粘性抵抗力も等しくなるためと考えられる。

(3) グラウトの粘性が P C 鋼棒の応答特性に及ぼす影響

P C 鋼棒の周囲にグラウトが存在することにより生じる粘性抵抗力の大きさは、グラウトの粘性に依存することが推測される。そこで増粘剤の量をセメント質量に対して 0.5%としたケースについても検討を行い、上記(2)の 1.0%の場合の結果と比較した。土木学会規準 (JSCE-F531) に準じて測定した J14 漏斗流下時間は、増粘剤量

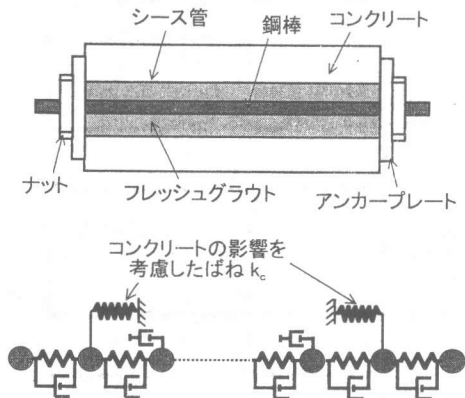


図-10 供試体と解析モデルの概要 (P C 梁供試体)

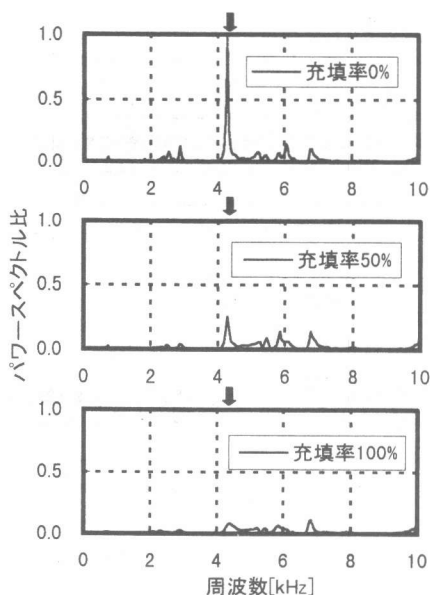
が 0.5%, 1.0% の場合、それぞれ 4.03 秒, 6.18 秒であった。両者のグラウト充填率とパワースペクトル比の関係を図-9 に示す。このように、粘性の大小にかかわらずパワースペクトル比の減少傾向に顕著な差は認められない。これは、本実験の範囲内での粘性の違いにより生じる抵抗粘性力の変化は、鋼棒がグラウトに接する面積の違いにより生じる粘性抵抗力の変化よりも小さかったためであると考えられる。

4. P C 梁供試体を用いたグラウト充填評価に関する検討

これまでの検討結果より、グラウト充填評価には、1 次の固有振動モードのパワースペクトルの減衰傾向に着目すればよいことが示された。ここでは、実際にポストテンション方式の P C 梁供試体を作製し、その充填程度を衝撃弾性波の応答特性を利用して評価することを試みた。

4. 1 実験概要

用いた供試体の概要を図-10 に示す。コンクリート部分の寸法は、20×20×60 (cm)である。シース管の内径は 38mm, 鋼棒の長さおよび直径は 80cm, 26mm である。供試体はゴム板上に設置した。また導入緊張力は、約 20kN とした。用いたコンクリートの配合は、 $W=173\text{kg/m}^3$, $W/C=0.47$, $s/a=0.44$ である。この供試体に対して、3. と同様の実験を行うことにより、衝撃にともなう P C 鋼棒の振動状況を測定した。



図－１１ グラウト充填率が異なる場合のパワースペクトル分布

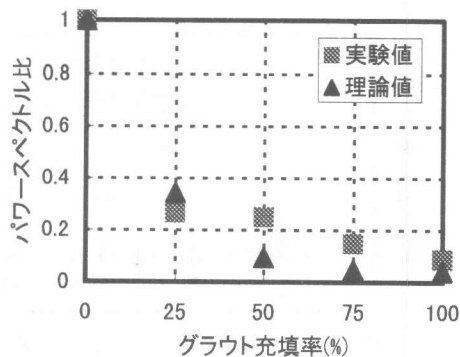
４．２ 解析概要

P C 梁供試体の場合についても、シース管内部の P C 鋼棒の振動解析を行うため、図－１０に示すようなモデルを設定して、２．の場合と同様にモード解析を行った。この際、コンクリートの存在を考慮するため、左右から２番目の質点に、固定端と連結させたパネを設置した。

４．３ 結果および考察

図－１１に、グラウト充填率が 0, 50, 100 (%)の場合に得られたパワースペクトル分布を示す。これによれば、周波数 4.2kHz 付近のピークが、グラウトの充填とともに減少していくことがわかる。これは、前章の塩ビ管を用いた実験結果と同様である。１次モードの周波数が、３．の場合よりも大きくなったのは、コンクリートの存在によるものであり、解析により得られた固有周波数とほぼ一致していた。図－１２に、グラウト充填率とパワースペクトル比の関係を解析値とあわせて示す。このように、P C 梁供試体においても、グラウト充填率の増加とともにパワースペクトル比が減少する傾向が認められ、解析値も同様の傾向を示した。

以上より、パワースペクトルにおける１次の



図－１２ グラウト充填率とパワースペクトル比の関係（P C 梁供試体）

固有振動モードの減衰に着目したグラウト充填評価手法が、実際の P C 梁部材に対しても適用可能であることが確認された。

５．まとめ

本研究において、衝撃弾性波の応答特性を利用した P C フレッシュグラウトの充填評価手法について検討を行った結果、P C 鋼棒の振動波形に対するパワースペクトルにおいて、１次の固有振動モードの減衰に着目することが、フレッシュグラウトの充填状況を評価する上で有効であることが実験的、解析的に示された。

しかしながら本評価手法は、導入緊張力、部材寸法・形状、衝撃の与え方などの影響を受けるものである。そこで今後は、これらの諸因子が評価結果に及ぼす影響についてさらに検討を進め、より普遍的な評価手法として発展させていく必要がある。また実大スケールの P C 部材に対しても本評価手法を適用し、実構造物に対する適用性についても検討したいと考えている。

参考文献

- 1) 藤井学・宮川豊章：P C グラウト充填状況の非破壊探査法，土木学会論文集，No.402/V-10，pp.15-26, 1989.2
- 2) 望月秀次ほか：P C 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
- 3) 長松昭男：モード解析入門，コロナ社，1994