

## 論文 ニューラルネットワークを用いた PC グラウトのレオロジー評価

宮川 洋一\*1・矢島 哲司\*2・勝木 太\*3

**要旨:** PC 構造物の耐久性に大きな影響を及ぼす PC グラウトの性能を把握するために、水セメント比、ノンブリーディングタイプの混和剤、さらにポリカルボン酸系及びナフタリン系の混和剤の添加率を変化させてレオロジー定数を測定し、配合条件、流動性、ブリーディング率のフレッシュ性状との関連性を実験的に検討した。またニューラルネットワークを用いることにより、PC グラウトの適正な配合を推定できることを明らかにした。

**キーワード:** PC グラウト、レオロジー定数、ニューラルネットワーク

## 1. はじめに

近年、PC グラウト充填不良による PC 構造物の劣化現象が明るみになりつつあり、英国では 1992 年にポストテンション方式による PC 構造物の建設が一時中断したほどである。我が国においても、今後 PC 鋼材の腐食に伴う劣化の可能性は否めない。このことから PC グラウトのシーズ内充填度向上のため、施工後の簡便な非破壊検査方法の確立とともに、PC グラウトそのものの性能向上が期待されている。

PC グラウトの要求性能としては、①ブリーディングが少ない、②材料分離がなく均一、③グラウト注入において適切な粘性がある等が挙げられる。従来は減水効果のある混和剤を主に用いていたが、1996 年の PC グラウト施工マニュアルの改訂によりノンブリーディングタイプの混和剤へと移行している。しかし、どちらのタイプの PC グラウトも水セメント比や混和剤添加率の配合条件が PC グラウトの流動性、ブリーディング率等にどのような影響を与えるのか完全に解明されていないのが現状である。

本研究では、従来タイプの PC グラウトも含め、ノンブリーディングタイプ混和剤、ナフタリン系高性能減水剤、そして近年開発されたポ

リカルボン酸系高性能 AE 減水剤を用い、それぞれの添加率を変化させることにより、混和剤の成分の違いによる PC グラウトのフレッシュ性状とレオロジー定数(降伏値と塑性粘度)との関係を実験により把握することを目的とした。さらに曖昧さを含むデータに対して有効とされるニューラルネットワークを用いて PC グラウトの性能評価・分析及び適正なレオロジー特性に基づく配合を推定し、その結果から得られた配合を用いて実構造物を想定したグラウト注入実験を行った。

## 2. 実験概要

## 2.1 フレッシュ性状試験

本研究において使用した材料を表-1に、既往の研究<sup>2)</sup>をもとに決定した配合条件を表-2に示す。各配合において、土木学会規準 JSCE-F531, F532 に準拠して、流動性試験(J<sub>14</sub>漏斗流下時間)、ブリーディング率試験を行った。練混ぜ時間に関しては、材料投入後低速で 30 秒間、その後ミキサやパドルに附着したセメントペーストをかき落とし低速でさらに 120 秒間練り混ぜた。

\*1 芝浦工業大学大学院 工学研究科建設工学専攻 (正会員)

\*2 芝浦工業大学教授 工学部土木工学科 工博 (正会員)

\*3 芝浦工業大学助教授 工学部土木工学科 工博 (正会員)

表-1 使用材料

材料	種類	記号	特性・主成分
セメント	普通ポルトランドセメント	C	密度3.16g/cm <sup>3</sup> 比表面積3300cm <sup>2</sup> /g
水	上水道水	W	
混和剤	高性能AE減水剤	SP	ポリカルボン酸系
	高性能減水剤	G	ナフタリン系
	ノンブリーディングタイプ混和剤	GS	セルロースエーテル系

表-2 配合条件(フレッシュ性状試験)

水セメント比 (%)	30~50の5水準 (SP)
	30~60の7水準 (G, GS)
混和剤添加率 <sup>注)</sup>	
SP	0.5~1.5の5水準
G	1.0, 2.0, 3.0の3水準
GS	0.5, 1.0の2水準
注): 混和剤添加率に関しては全てセメント重量×(%)	

## 2.2 レオロジー試験

レオロジー定数の測定は、B型粘度計を用いた(配合条件は表-3参照)。なお、セメントペーストのようなサスペンションでは降伏値及び塑性粘度が測定の際のせん断速度に依存するために、それぞれを「測定で用いたせん断速度による値」という意で「見掛けの」と定義し、以下本文中においても用いた。

表-3 配合条件(レオロジー試験)

水セメント比 (%)	35, 40, 45の3水準
混和剤添加率 <sup>注)</sup>	
SP	0, 1.0, 2.0の3水準
G	0, 1.0, 2.0の3水準
GS	0, 0.5, 0.75, 1.0の4水準
注): 混和剤添加率に関しては全てセメント重量×(%)	

## 3. 実験結果

### 3.1 フレッシュ性状試験結果

土木学会規準では水セメント比(W/C)を45%以下と規定しているが、本実験においては各種混和剤添加による特性の違いを幅広く把握するために規準外のW/Cについても実験を行った。図-1に各混和剤の添加率とJ<sub>14</sub>漏斗流下時間の関係を示す。図-1より、本実験の範囲内ではポリカルボン酸系(SP)、ナフタリン系(G)の高性能減水剤を添加した場合の流下時間は2~15(s)、セルロース系(GS)のノンブリーディングタイ

プの混和剤では5~56(s)の幅広い範囲を示した。またプレーンと比較すると、ポリカルボン酸系(SP)、ナフタリン系(G)は、各混和剤固有の特性であるセメント粒子分散効果によって、混和剤添加率の増大とともに流動性は上昇する傾向にあった。一方、セルロース系(GS)においては、添加率による違いがそれほど見られなかった。しかし、本実験で使用したどのタイプの混和剤においても水セメント比(W/C)が大きくなるほど、添加率の違いによる流下時間の差異はほとんど見られなくなる。これはJ<sub>14</sub>漏斗の性質上、高い流動性を示す範囲では流動性の微妙な違いを確認できないことが原因と考えられる。

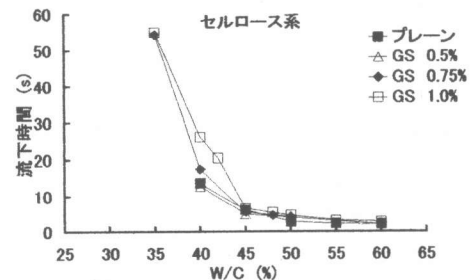
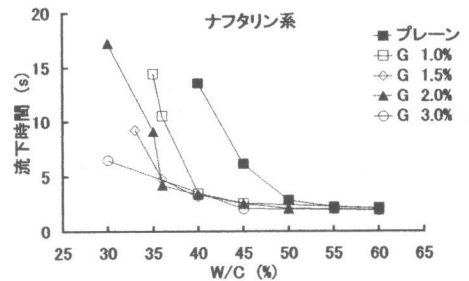
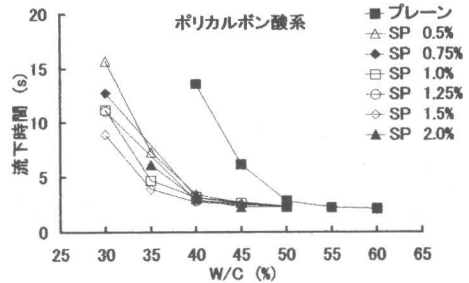


図-1 各種混和剤の流動性変化

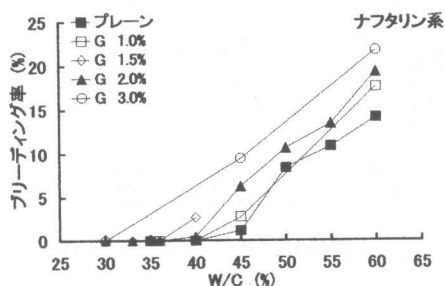
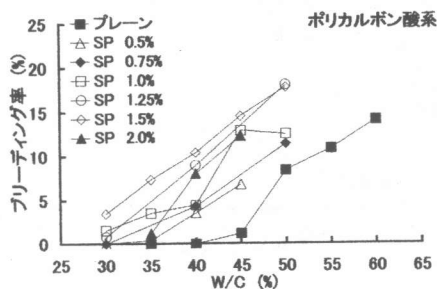


図-2 各種混和剤のブリーディング率変化

次にポリカルボン酸系(SP)、ナフタリン系(G)の高性能減水剤添加率とブリーディング率の関係を図-2に示す。なおブリーディング率の算出は土木学会規準に準拠した。

図-2より、ポリカルボン酸系、ナフタリン系の高性能減水剤ともに添加率の増加に従い、ブリーディング率は増大する傾向を示した。しかしポリカルボン酸系においては添加率2%のブリーディング率が1.5%のものを下回る結果となった。本実験において、ポリカルボン酸系では添加率が増加するに従い、材料分離が生じ、ブリーディング水とペーストとの境界が不明確になることが確認されており、これにより実験値に大きな誤差が生じた結果、下回ったと考えられる。なおセルロース系(GS)は、ブリーディングを抑えることが目的であり、実験においてもブリーディング率がほぼ0%であることが確認できた。

### 3.2 レオロジー試験結果

レオロジー定数である見掛けの降伏値、見掛けの塑性粘度と配合条件との関係を検討した。本実験の範囲内では、セルロース系(GS)を添加

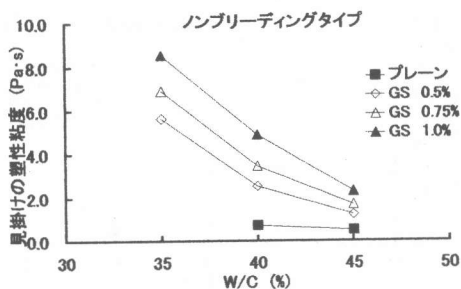
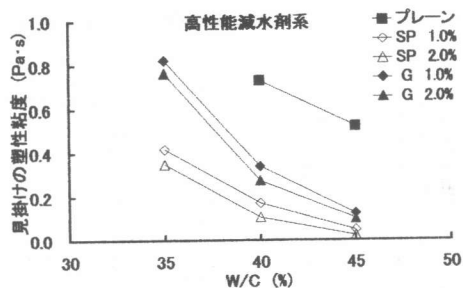


図-3 混和剤別の見掛けの塑性粘度

した場合のレオロジー定数は、ポリカルボン酸系(SP)、ナフタリン系(G)を添加したものの約10倍の値を示す結果となった(図-3、図-4)。

図-3に水セメント比(W/C)、混和剤添加率と見掛けの塑性粘度の関係を混和剤のタイプごとに示す。

図-3より、プレーンと比較すると、ポリカルボン酸系(SP)、ナフタリン系(G)を添加することにより見掛けの塑性粘度は減少している。なお水セメント比(W/C)が大きく、あるいは混和剤添加率が多くなるに伴いその値は減少する傾向を示した。一方、セルロース系(GS)添加の場合、増粘効果によって、プレーンと比べ、見掛けの塑性粘度は増加する。また水セメント比(W/C)が小さく、あるいは添加率が多くなるに伴い、見掛けの塑性粘度は増加する傾向を示した。

次に水セメント比(W/C)、混和剤添加率と見掛けの降伏値の関係を混和剤のタイプごとに図-4に示す。

図-4より、プレーンと比較するとポリカルボン酸系(SP)、ナフタリン系(G)を添加することに

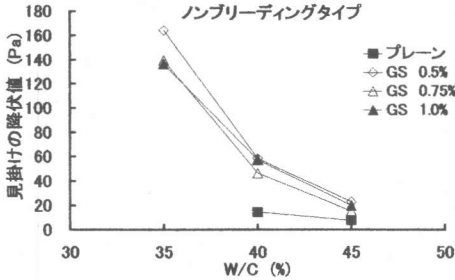
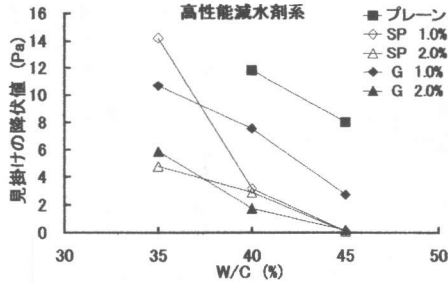


図-4 混和剤別の見掛けの降伏値

より、見掛けの降伏値は減少している。また水セメント比(W/C)が大きく、あるいは添加率が多くなるに伴い、その値は減少する傾向を示した。一方、セルロース系(GS)の場合は、水セメント比(W/C)が小さくなるに伴い、見掛けの降伏値は増加する傾向を示し、添加率0.5%において最大を示した。

### 3.3 フレッシュ性状との関連性

ここでは3.1のフレッシュ性状試験結果, 3.2の各混和剤別のレオロジー試験結果からレオロジー定数と  $J_{14}$  漏斗流下時間, プリーディング率との関連性を検討した。

まず図-5, 図-6 にレオロジー定数(見掛けの塑性粘度, 見掛けの降伏値)と流下時間の検討結果を示す。測定数が少ないため、相関性を検討することは出来なかったが、どの種類の混和剤も見掛けの塑性粘度, 見掛けの降伏値が増加するとともに流下時間が増大し、流動性が低下している傾向があると考えられる。

次にプリーディング率との関係を図-7, 図-8 に示す。図-7 より見掛けの塑性粘度が増加するほどプリーディング率は減少する傾向を示した。

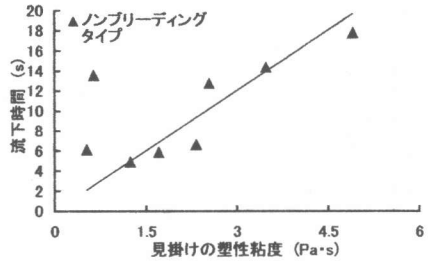
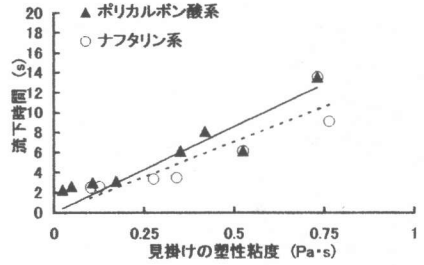


図-5 見掛けの塑性粘度と流下時間

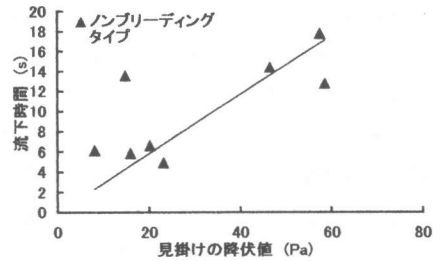
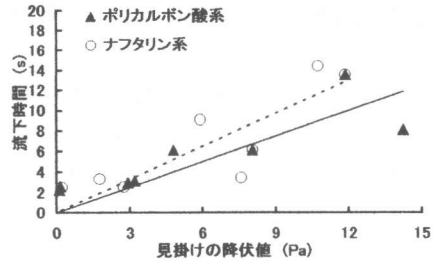


図-6 見掛けの降伏値と流下時間

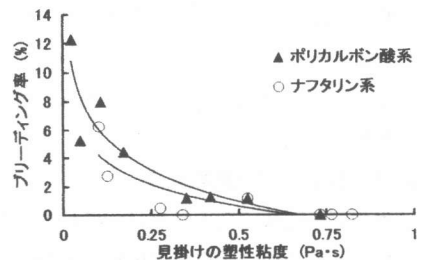


図-7 塑性粘度とプリーディング率の関係

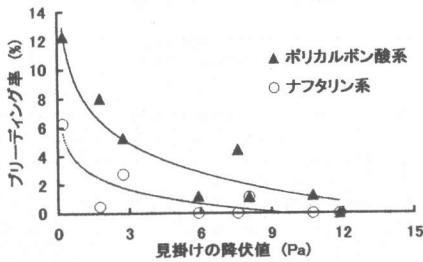


図-8 降伏値とブリーディング率の関係

また図-8 は見掛けの降伏値とブリーディング率の関係を示すが、これも見掛けの塑性粘度と同様の傾向を示した。

以上、レオロジー定数とフレッシュ性状の関連性を検討した結果から、流動性に関しては土木学会において規準値が特に決められていないため、ブリーディング率に着目した。高性能減水剤系においても、見掛けの塑性粘度が  $0.25\text{Pa}\cdot\text{s}$  以上、見掛けの降伏値では  $5\text{Pa}$  以上において、土木学会規準のブリーディング率 3% を満たす傾向が本実験の範囲内では認められた。

#### 4. ニューラルネットワークの構築

前章までの結果をふまえ、PC グラウトのフレッシュ性状をニューラルネットワークにより推定し、PC グラウトの適正配合の選定が可能か検討した。

##### 4.1 入・出力因子の検討

ネットワークの形状は入力層、中間層、出力層を有する 3 層階層型とし、入力項目は配合条件である水セメント比、3 種類の混和剤添加率、温度とし、出力項目はフレッシュ性状の  $J_{14}$  漏斗流下時間、ブリーディング率、見掛けの塑性粘度、見掛けの降伏値とした。

##### 4.2 実験結果と解析結果

図-9 にニューラルネットワークによる推定値と実験値を比較検討した結果の一例を示す。また表-4 に学習の精度を示すが、いずれの項目においても、比較的高い精度を示す結果となった。

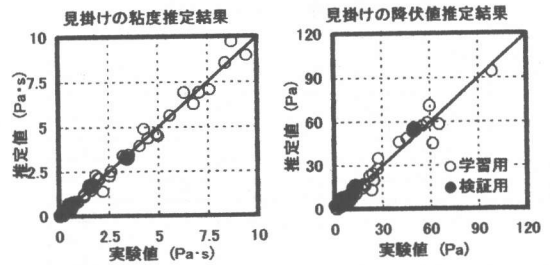


図-9 ネットワークの検討結果の一例

表-4 学習の精度

項目	平均二乗誤差		相関係数	
	学習用	検証用	学習用	検証用
流下時間(s)	0.6184	4.6104	0.9558	0.7501
ブリーディング率(%)	0.563	0.5004	0.9815	0.9826
膨張率(%)	1.0721	0.9145	0.9459	0.8481
見掛けの塑性粘度(Pa·s)	0.0735	0.0083	0.9886	0.9953
見掛けの降伏値(Pa)	15.9799	12.4841	0.9927	0.9953
平均二乗誤差: 出力値と実験値の差の二乗平均				

上記の精度で構築されたニューラルネットワークにより PC グラウトのフレッシュ性状推定を行った結果の一例を図-10 に示す。なお本実験では、PC グラウトの練上り温度を変化させたものについても検討を行ったが、ここでは温度  $20^\circ\text{C}$  に関するフレッシュ性状の推定結果を記述し、図中には土木学会規準におさまる領域を適正範囲として示した。この結果より、土木学会規準に定められている PC グラウトのフレッシュ性状を満足する適正な配合を推定できる可能性があると考えられる。

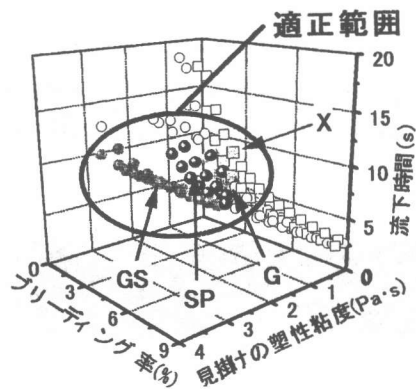


図-10 フレッシュ性状推定結果の一例

表-5 適正配合選定の一例

混和剤の種類	添加率 (%)	水セメント比 W/C (%)												
		35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45		
SP	0.25	○	○	○	○	○	○	○						
	0.5	○	○	○										
	0.75	○												
G	0.5				○	○	○	○						
	1.0				○	○	○							
	1.0													
GS	0.5							○	○	○	○	○	○	
	0.75								○	○	○	○	○	
	1.0									○	○	○	○	
X	0.5				○	○								
	1.0	○												

表-5の丸印は、図-10における適正範囲内にある配合を示したものである。表-5より、ポリカルボン酸系(SP)やナフタリン系(G)のように減水効果のある混和剤は、添加率を増やす場合には水セメント比(W/C)を小さくする必要があり、逆にセルロース系(GS)のように増粘効果を持つ混和剤では添加率の増加に従い、水セメント比を大きくする必要がある傾向がつかめる。このことから PC グラウトの適正な配合選定の際の一手法としてニューラルネットワークの適用性が確認された。またデータの傾向を反映したネットワークにより、流下時間、ブリーディング率、レオロジー定数のフレッシュ性状に与える影響要因を抽出が行える可能性があると考えられる。

4. 3 実構造物想定実験結果

ニューラルネットワークによるフレッシュ性状の推定結果を踏まえ、実構造物を想定して行ったグラウト注入実験のモデルを図-11に示す。配合はニューラルネットワークにより適正な配合をレオロジー定数に着目して、ノンブリーディングタイプの混和剤だけでなく、高性能減水剤の混和剤を使用した配合についても推定して実験を行った。

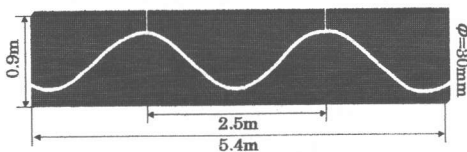


図-11 実構造物想定モデル

表-6 注入実験結果

配合番号	実験結果				
	流下時間(s)	ブリーディング率(%)	膨張率(%)	見掛けの降伏値(Pa)	見掛けの塑性粘度(Pa·s)
1	7.09	0	-1.29	14.891	1.4818
2	6.55	0	4.77	16.194	0.6937
3	9.17	0	5.6	5.4035	0.8694
4	3.96	0	1.04	5.4319	0.6228

1: W/C 44%, セルロース系ノンブリーディングタイプ混和剤(GS) 1%  
 2: W/C 32%, ナフタリン系高性能減水剤(G) 2.0%, アルミニウム粉末(AI) 0.0  
 3: W/C 33%, ポリカルボン酸系高性能AE減水剤(SP) 1%, AI 0.012%  
 4: W/C 45%, GS 0.75%+G 1.5%, AI 0.004%

表-6に配合条件と実験結果を示す。本実験結果及び目視において、内部に大きな材料分離及び空隙の発生は認められなかった。

今後の課題としては、ニューラルネットワークによる学習項目にミキサやポンプの性能といった機械的な項目を取り入れ、圧送性を考慮することが必要と考えられる。

5 まとめ

- (1) ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤、ナフタリン系高性能減水剤の見掛けの塑性粘度及び見掛けの降伏値は、添加率の増加にともない小さくなる傾向を示した。一方、セルロース系ノンブリーディングタイプ混和剤においては、添加率の増加にともない大きくなる傾向を示した。
- (2) PC グラウトのフレッシュ性状で構築されたニューラルネットワークにレオロジー定数を加えることによって、より実用的な適正配合を推定できる可能性が示された。

謝辞 本研究を実施するにあたり、芝浦工業大学卒論生 白井 龍氏、国土交通省中部地方整備局 大西 竜太氏に深く感謝致します。

参考文献

- 1) 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(改訂版)，1999
- 2) 大西 竜太：ニューラルネットワークを用いた PC グラウトの性状評価，芝浦工業大学修士学位論文，1999