

PC グラウトの流動性に関する試験システムの開発研究

山口 隆裕*1・広瀬 晴次*2・笹子 和弘*3・島根 征哉*4

1. 緒 言

土木学会のコンクリート標準示方書【施工編】¹⁾では、PCグラウトの流動性を流動性試験 (JSCE - F 531)²⁾ に準じて求める流下時間により設定となっている。しかしながら、試験により得られる流下時間は流動性を表す一つの指標にすぎず、これにより流動性のすべてを評価できるものではない。また、得られる流下時間は計測者の熟練度や個人差などによって真の値と大きく異なる恐れのあることが指摘されている。グラウトの流動性を的確に評価することは、グラウトの施工計画および硬化後の品質保証のために極めて重要である。

本研究は、流下時間を秤により機械的に精度良く計測するための試験システムの開発を行い、これを用いて実施した実験の結果を基にグラウトの流動性について論ずるものである。

2. 流動性試験システムの構成

写真 - 1 に開発した PC グラウト流動性試験システムを示す。図 - 1 には、その機器構成とデータの流れを示す。現在、流動性試験においては一般に JP 漏斗または J₁₄ 漏斗が用いられ、流下時間はその流出口を押さえていた指を離してからグラウト流が急激に細くなるまでのストップウォッチによる計測時間とされている。本システムは、このよう

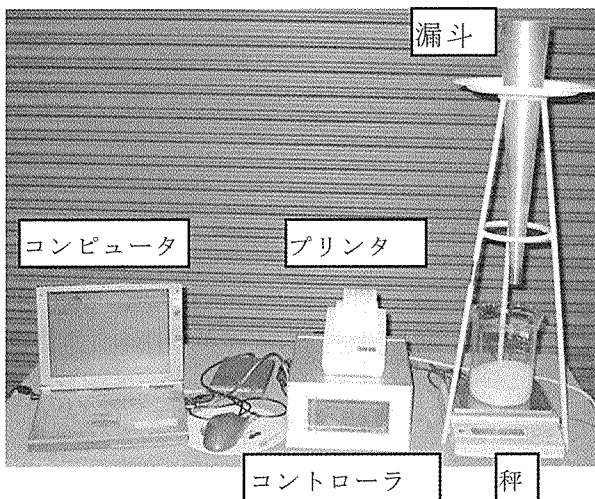


写真 - 1 グラウト流動性試験システム

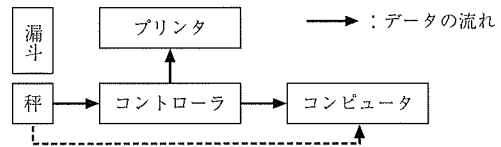


図 - 1 機器構成とデータの流れ

な流下時間の測定における個人的な判断の差から生じる人為的誤差を除くために、秤を用いてグラウトの流下質量と時間の関係を機械的に計測し、それから流下時間を求めるものである。

流下時間の測定に基本的に必要な機器は、現場での使用性を考慮し、漏斗、秤、コントローラの3点のみとした。秤には耐久性と経済性を重視してロードセル型のものを採用した。コントローラは組み込まれた時計機能により、流下質量と流下に要した時間の関係を求めるものである。現場での煩わしいコンピュータ操作を避け、人為的なエラーをなくすために小型のボックスユニットとして開発した。流下質量の任意の範囲を計測対象として設定でき、また、流下時間を推定する推定式の代入が行える。試験終了後には設定した範囲の質量が秤の上に落下開始から完了するまでの時間と推定流下時間が表示される。以降、この一定の質量が流下する時間を、土木学会の時計計測による流下時間に対応させて質量時間と記す。現場のみでの使用においては、計測対象とする質量の範囲と推定式は混乱をさけるために変更ができないようにして用いる。プリンタは質量時間と推定流下時間を機械的に記録するものであり、必要に応じてコントローラと接続できる。また、流下質量と時間の関係を記録し流動性に関して詳細な検討が行えるように、コンピュータを接続したシステムも容易に構築できるようにしている。この場合、コンピュータはコントローラと接続しても、コントローラを除き秤と直接接続しても良い。なお、現場でもコンピュータの使用が可能でその操作に堪能な技術者がいれば、コントローラを使用しない試験システムを用いても、当然のことながら何ら問題ない。

3. システムの特性

開発した流動性試験システムの特性の把握と初期設定のために、いくつかの予備試験を行った。グラウトの密度を 1.9 g/cm³ と仮定した場合、JP、J₁₄ 漏斗ともその計算上の容

*1 Takahiro YAMAGUCHI : FKK 極東鋼弦コンクリート振興 (株) 技術研究所

*2 Seiji HIROSE : FKK 極東鋼弦コンクリート振興 (株)

*3 Kazuhiro SASAGO : 興和コンクリート (株)

*4 Seiya SHIMANE : FKK 極東鋼弦コンクリート振興 (株) 機材センター

量は1200g程度である。実際にグラウトが漏斗からどの程度流下するのか確認した結果、A社製の高粘性タイプのグラウトにおいては、両漏斗とも時計での計測終了時で1050g程度、ほとんど落下しなくなった時点で1080g程度であった。この結果から、計測対象とする流下質量の範囲を50g～950gとした。計測開始を50gとしたのは、落下初期の衝撃の影響を避けるためであり、計測終了を950gとしたのは、できる限り広く範囲を設定した方が流下時間推定の精度上有利であり、通常のグラウトで落下質量が950g以下になることはないとの判断からである。逆に、950g以下となり計測不能となった場合、漏斗内に相当量の試料が塊状で残留しているなどの、グラウトとしての不適な状況とみなせる。

JP漏斗と試料として豊浦産旧標準砂（以降、旧標準砂と記す）を用いて、同じ条件での測定を5回行い試験システムの安定性確認と精度を求めた。JP漏斗から流下する旧標準砂の質量はおよそ850gであったので、測定範囲の最大設定値を800gとした。得られた実験結果の一覧を表-1に

表-1 旧標準砂による質量時間

流下質量 (g)	表示機器	質量時間 (秒)					平均 (秒)	標準偏差 (秒)
		1回目	2回目	3回目	4回目	5回目		
50～800	コントローラ	7.6	7.6	7.7	7.6	7.6	7.62	0.04
	コンピュータ	7.6	7.6	7.7	7.6	7.6	7.62	0.04
50～600	コントローラ	5.6	5.6	5.7	5.7	5.7	5.66	0.05
	コンピュータ	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	5.60	0.00
50～400	コントローラ	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.60	0.00
	コンピュータ	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.60	0.00
50～200	コントローラ	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.60	0.00
	コンピュータ	1.5	1.6	1.6	1.6	1.6	1.58	0.04

示す。秤は耐久性を重視しロードセル型としたため、1秒間での可能計測回数は2回程度であった。表に示される秒数はその間を線形補間して求めた値である。コンピュータに示される測定時間とコントローラに示されるそれとはほぼ等しく、懸念された機器間のタイムラグも生じず両機器とも安定したデータの得られることが確認できた。また、JP漏斗は旧標準砂が1秒間にほぼ100g流下する形状となっていることが示された。

得られた質量時間における標準偏差の最大値は0.05秒であり極めて小さく、本システムの精度は±0.1秒となることが確認できた。

4. 流下時間と質量時間の関係

流下時間と本システムで得られる質量時間との関係を求めるために、JP漏斗またはJ₁₄漏斗を用いての比較試験を行なった。混和剤には、A社製の高粘性型でノンブリーディングタイプのもを使用した。水セメント比は、広い範囲での流下時間との関係を求めるために意図的に43%～55%まで1%ごと13段階に変化させた。流下時間の計測は同時に5人で行ったが、J₁₄漏斗を用いての計測では水セメント比47%においては5人とも、48%においては4人がグラウトの流下終了時点を手で判断できず、流下時間を計測でき

なかった。J₁₄漏斗を用いての流下時間の計測結果には、人為的誤差が大きく含まれる恐れのあることが再確認された。

図-2に流下質量と流下する時間との関係を示す。旧標準砂の場合線形関係を示し、グラウトにおいては、粘性が高いほど、また、漏斗内の残存グラウト量が少なくなるほど非線形性が強まり、曲率の大きくなることが明確に示されている。なお、土木学会方式での流下時間の測定は、流下質量が1000gを超えた残存グラウト量が極めて少なくなった点で行われていることになる。

実験より得られた土木学会方式の流下時間と質量時間の一覧を表-2に示す。流下時間は5人の平均値である。図-3にはJP漏斗における流下時間と質量時間の関係を示す。両時間の関係は線形となり図に示す一次式で表すことができた。相関係数は、0.999となり強い相関を示している。これにより、開発した試験システムにより機械的に精度良く5人での測定による平均流下時間を推定できることが明らかとなった。

図-4に、JPとJ₁₄漏斗それぞれにおける水セメント比ごとの、5人の流下時間測定値に対する標準偏差を示す。流下終了の見極めがJ₁₄漏斗より容易なJP漏斗においても、流下時間が25秒を越える高粘性域では標準偏差の大きくなる傾向が見られる。5回の計測値から求めた前述の質量時間の標準偏差と一概には比較できないが、これまでの結果

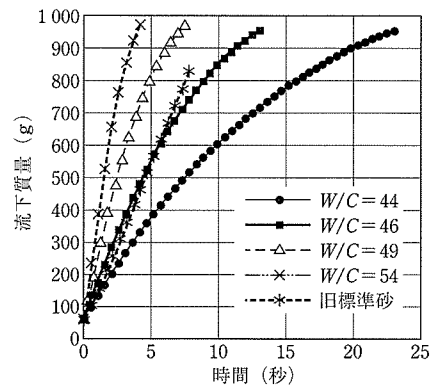


図-2 流下質量と時間の関係(1)

表-2 流下時間と質量時間の比較

No.	W/C (%)	流下時間 (秒)		質量時間 JP (秒)
		JP	J ₁₄	
1	43	54.1	22.7	35.3
2	44	34.9	19.3	22.5
3	45	25.4	14.8	15.6
4	46	18.6	10.4	12.7
5	47	14.3	—	10.0
6	48	12.8	—	8.8
7	49	9.7	6.0	7.0
8	50	8.2	5.3	5.9
9	51	6.7	4.8	4.9
10	52	6.0	4.4	4.8
11	53	5.8	4.2	4.6
12	54	5.0	3.7	3.9
13	55	4.5	3.6	3.6

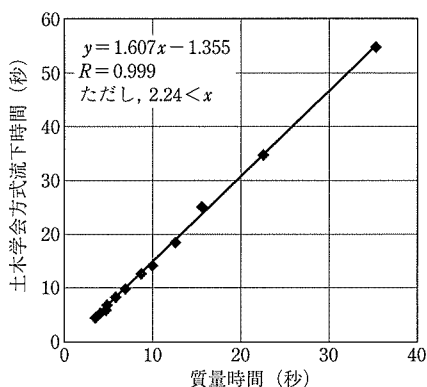


図 - 3 流下時間と質量時間の関係

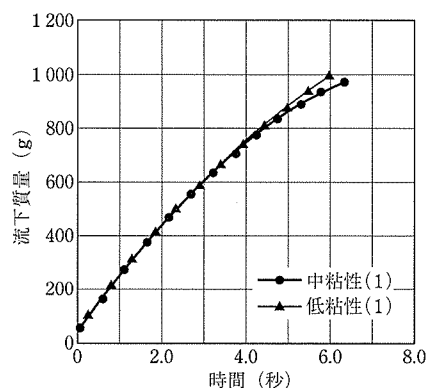


図 - 5 流下質量と時間の関係(2)

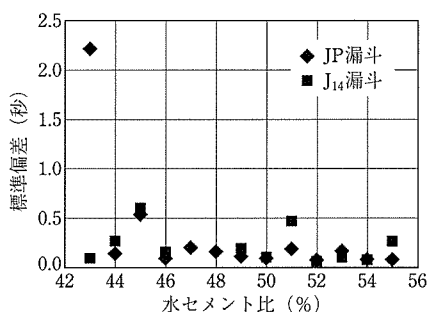


図 - 4 標準偏差

も含めて総合的に評価すると本システムにより求める質量時間の方が学会方式の流下時間より、低粘性から高粘性まで精度の良い安定したデータが得られるものと推察できる。

5. グラウトの流動性と混和剤

混和剤の粘性特性とグラウトの流下時間との関係を明らかにすることを目的として、開発したシステムを用いて流動性試験を行った。混和剤には、4章で示したA社製のものより若干粘性が小さいB社製のものとそれよりさらに粘性の小さいC社製のものを用いた。ここでは、便宜上A社製を高粘性、B社製を中粘性、C社製を低粘性と示す。また、中粘性のW/Cは45%、低粘性の水粉体比は32%と規定されており、J₁₄漏斗での流下時間は気温20℃で、中粘性が5.5秒、低粘性が3.5秒程度と示されたものである。試験より得られた結果の一部を表-3に示す。表中の(1)と(2)は練り混ぜ後の経過時間が異なることを示している。流下時間は4人の平均値でJP漏斗による値である。

図-5に質量時間がほぼ等しくなった中粘性(1)と低粘性(1)の流下質量と時間の関係を示す。

表 - 3 混和剤とグラウトの流下時間

	流下時間	質量時間	推定値	
			体積時間	推定値2
(秒)				
中粘性(1)	8.7	6.0	8.3	9.1
中粘性(2)	11.7	7.3	10.4	11.1
低粘性(1)	10.0	5.5	7.5	9.5
低粘性(2)	6.9	4.0	5.1	6.9

注：推定値は図3に示される式によって、推定値2は図7に示される式によって求められた推定流下時間である。

図に示されるように、両流動性能はほぼ等しく流下質量800gを超える辺りからわずかに差が生じている程度であり、質量時間もこれに対応して中粘性6.0秒に対して低粘性は5.5秒となっている。しかしながら、表-3に示されているように時計計測による学会方式の流下時間は、低粘性の方が逆に1.3秒大きくなっている。このような相反する結果が生じた原因としては、土木学会の試験方法が流下体積を基準とした方法であることと、混和剤によりグラウト密度が異なっていたためと考えられる。実験で用いたグラウトの密度は、W/Cが異なるためW/C45%の場合の高粘性と中粘性が約1.9g/cm³、低粘性が約2.1g/cm³であった。

本試験システムでは、これまで流下質量と時間の関係を求めてきたが、密度を考慮してこれを流下体積と時間の関係に変換することは容易である。図-6に図-5の関係を、

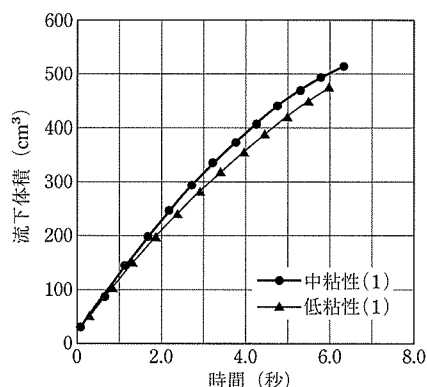


図 - 6 流下体積と時間の関係

流下体積と時間の関係に変換して示す。図-5と図-6を比較すれば分かるように、体積を基準とするのか質量を基準とするのかによりグラウトの流動性能の評価が若干異なってくる場合がある。各グラウトの密度差を考えれば、体積を基準とするのが妥当であるが、練り混ぜた実感としては質量を基準とした方が流動性能を妥当に表しているように思われた。グラウトの流動性能を表す指標として何が最も妥当であるかは、実際の注入施工時の流動性能と本試験システムで得られる流下質量または流下体積と時間の関係を求めていくことにより明らかになるものと考えられる。

表-3に示されるように、混和剤によりグラウトの粘性

特性および密度が異なると、4章で求めた質量を基準とした推定式(図-3参照)からは精度良く学会方式の流下時間を求められないことになる。そこで、図-3における流下質量と学会方式流下時間の関係を25 cm³~500 cm³の一定の体積が落下する時間との関係に変換したものを図-7に示す。以降、この一定の体積が流下する時間を体積時間と記す。図-7中の推定式を用いて体積時間から求めた推定

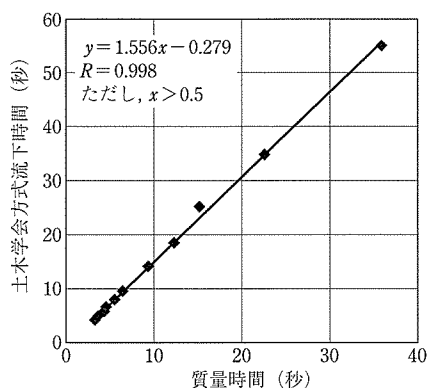


図-7 流下時間と体積時間の関係

流下時間を表-3に推定値2として示すが、密度の影響を受けずに土木学会方式の流下時間とほぼ対応した結果となっている。この結果からも、土木学会の試験は、体積を基準とした方法であることが再確認されたわけであるが、計測終了時となるグラウト流が急激に細くなるまでに漏斗から流下するグラウトの量が粘性特性によって異なった。すなわち、粘性が小さいほどグラウトが漏斗に付着する量は少なく、その分流量の多くなる傾向が見られ、今回の混和剤においては、低粘性の方が高粘性より約100g多く流下した。このことは、土木学会の手法では流下質量と共にグラウトの密度によっては流下体積も計測時においてつねに一定であるとは保証されておらず、測定した流下時間は流動性の指標とはなり得ない恐れのあることを示している。

本システムで求められる質量または体積時間は、漏斗へのグラウトの付着量に影響を受けずに機械的に安定して得られるため、今後、これを基に流下時間を推定するのではなく、質量時間または体積時間そのものを流動性の指標とすることがより合理的と考えられる。ヨーロッパの基準(EN 445)に示される流動性試験³⁾においては、流下時間の測定は漏斗容量約1800 cm³のうち一定量1000 cm³が流下するまでの時間となっている。写真-2にEN 445で示されている漏斗と1000 cm³の容器を用いての流動性試験の状況を示す。流出口の内径は10 mmであり、JP漏斗での流下時間と比較すると、EN 445方式のほうが低粘性の場合で約5倍、高粘性の場合で約6倍の時間を要した。旧標準砂は3秒でほぼ100g流下し、JP漏斗の約3倍の時間を要することがわかった。

一方、質量時間がほぼ同じでも粘性特性が異なる場合がある。その流下質量と流下する時間の関係の一例を図-8に示す。この図から明らかなように、混和剤が異なるグラウトの流動性を定量的に評価する場合には、質量時間ある



写真-2 ヨーロッパ基準の漏斗

いは体積時間のようなある1点だけの評価では不十分であり、流下曲線の特徴を表す何らかの指標も組み合わせて行なうことが必要となる。たとえば、各曲線を2次の近似式で表すと次のようになる。

高粘性 w/c 54 : $y = -32.0x^2 + 357x + 42.0$

低粘性 (2) : $y = -16.4x^2 + 291x + 43.2$

高粘性 w/c 49 : $y = -11.8x^2 + 213x + 42.5$

中粘性 (2) : $y = -7.6x^2 + 178x + 50.7$

図-8と得られた式から判断すると、グラウトの粘性特性を定量的に評価するには、各式の2次と1次の項の両数値を指標とすれば良いものと思われる。すなわち、2次の項の絶対値が大きくなり1次の項の値が小さくなるほど、高粘性でポンプの圧送性は低下することになる。水に近づけば、それらの値は逆となる。グラウトの理想とする粘性特性は、グラウトのダクトへの充填性能、ポンプ圧送性能、および硬化後の品質とこれら近似式の値との関係を求めることにより、定量的に示されるものと考えられる。

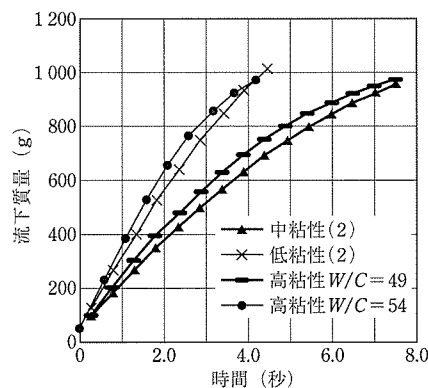


図-8 流下質量と時間の関係(3)

6. 結 論

本研究の範囲内で得られた結果をまとめると以下のとおりとなる。

①秤を用いたグラウトの流動性試験システムを開発する

ことができた。開発したシステムは、操作が簡便な現場用と、コンピュータを組み込んだ研究用どちらにも対応可能である。

- ②開発した試験システムにより求めた質量または体積時間と土木学会方式の流下時間との関係は線形となり、相関係数 0.998~0.999 の強い相関を示した。
- ③土木学会で規定する時計計測終了時でのグラウトの流下総量は混和剤の粘性特性により異なり、結果としてそれにより求められた流下時間は流動性の指標とはなり得ない恐れのあることが示された。
- ④一定の量が流下する時間を計測する本システムでの質量または体積時間は、漏斗へのグラウトの付着量に影響を受けずに機械的に安定して得られるため、今後、これを基に学会方式の流下時間を推定するのではなく、質量または体積時間そのものを流動性の指標とすることがより合理的と考えられる。
- ⑤コンピュータを組み込んだ試験システムにより、グラウトの流下質量と時間あるいは流下体積と時間の関係

を統計的に処理し、流動性能を定量的に評価することが可能となった。この試験方法は、高流動コンクリートをも含めた流動性試験における一つのブレイクスルー的な手法になるものと期待できる。

謝 辞

研究を行うにあたり、群馬大学の辻幸和教授より御指導を賜った。また、システムの開発には、関東メジャー(株)の鈴木 隆氏より多大な協力を得、混和剤の一部はオリエンタル建設(株)より御提供いただいた。ここに、深甚の謝意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会, 2002年制定コンクリート標準示方書 [施工編], 2002.3
- 2) 土木学会, 2002年制定コンクリート標準示方書 [規準編] 土木学会規準, 2002.3
- 3) EUROPEAN STANDARD, EN 445, 1996

【2002年5月10日受付】



刊行物案内

プレストレストコンクリートの 新たな発展—21世紀—

第30回 PC 技術講習会

(平成14年2月)

頒布価格(会 員): 5,000円(送料500円)

(非会員): 6,000円(送料500円)

社団法人 プレストレストコンクリート技術協会