

論文 タンピング試験におけるワーカビリティの簡易評価方法の検討

石井 佑大^{*1}・宇治 公隆^{*2}・上野 敦^{*3}

要旨：コンクリートのワーカビリティを、特別な装置を用いることなく、現場で簡易に評価する方法について検討した。ワーカビリティが材料分離抵抗性と流動性の2つの要因で決まるものと考え、それらの指標が必要となる。本研究では、スランプ試験をもととして材料分離抵抗性と流動性を表す方法を考えた。その結果、材料分離抵抗性はスランプ試験後のコンクリートをタンピングした際の、試料上部の円形の有無と相関があること、また、流動性はスランプ試験後のコンクリートをあるスランプフローまで広げるためのタンピング回数で表現できる可能性があることが明らかとなった。

キーワード：ワーカビリティ, 材料分離抵抗性, 流動性

1. はじめに

コンクリートのワーカビリティは、多くの要因から定まる定性的なものであるが、コンクリートの材料分離抵抗性と流動性は、ワーカビリティに顕著に影響する要因と考えられる。従来からコンクリートのワーカビリティは、スランプ試験によって間接的に評価されてきたと考えられるが、本来この試験方法は降伏値を評価しているものである¹⁾。すなわち、スランプ試験では、ワーカビリティに影響する要因の中で、特に、材料分離抵抗性の評価はできない。近年ではフライアッシュやスラグ細骨材など、コンクリート用の材料が多様化してきているため、同一のスランプであっても流動性や材料分離抵抗性が異なるコンクリートが多く存在する。このため、これまでは経験的に要求されたスランプを満たせば、ある程度は材料分離抵抗性を満足し、施工に供することができたが、今後は、このような考え方が困難になると考えられる。

本研究では、ワーカビリティに影響する材料分離抵抗性と流動性を評価する方法について、簡易的な手法を検討した。コンクリートの材料分離抵抗性と流動性を評価する試験方法はいくつか提案されているが^{2) 3)}、本研究では、現場での試験を想定し、容易に入手できる器具を用いる簡易試験方法を提案することを目的としている。

2. 実験概要

2.1 タンピング中のコンクリートの変形

コンクリートのワーカビリティを簡易に調べるため、これまでもスランプ試験後の試料側面やスランプ板を叩き、コンクリートの変形を観察することが行われている¹⁾。また藤代氏らは、高さ10cmの改良スランプコーンをを用いたスランプ試験後に、試料に衝撃を加えることで、

表-1 計測項目と方法

測定項目	方法等
スランプフロー	スランプコーン引き上げ時、スランプフロー250, 300, 350, 400, および450mm時で以下の項目について計測を行う。
スランプ	各スランプフロー時のスランプを計測する。
上部円形直径	各スランプフロー時に試料上部の円形の有無を調べる。また、その直径を計測する(図-1参照)。
タンピング回数	質量1.2kgの木製の棒を高さ50cmからスランプ板の4隅に順に自由落下させてタンピングを行う(図-2参照)。各スランプフローに達するために必要なタンピング数を記録する。

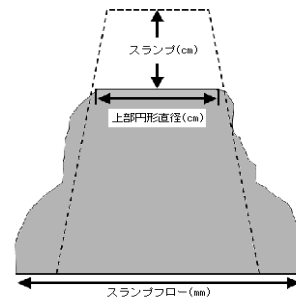


図-1 計測項目

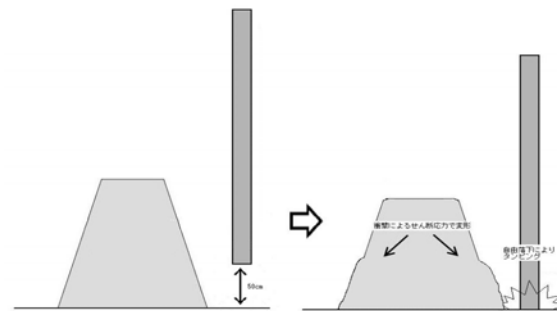


図-2 タンピング試験模式図

*1 東京都立大学 工学部土木工学科 (正会員)

*2 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科 都市基盤環境工学専攻教授 (正会員)

*3 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科 都市基盤環境工学専攻准教授 (正会員)



スランプコーン引き上げ時



300mm 時



400mm 時

写真-1「良好」に分類されるコンクリートの形状



スランプコーン引き上げ時



300mm 時



400mm 時

写真-2「崩壊」に分類されるコンクリートの形状

定量的に粘性を評価できることを指摘した²⁾。しかし、新たな試験器具を用いることは、その試験方法を現場に広く普及させるために障害となる。そこで本研究では、従来のスランプコーンを用いたまま、試料の変形過程における状態を定量的に表現できる指標について考えた。

本研究では、タンピングにより変形する試料のスランプフローが所定の値となった時の、試料の形状に関する寸法などを計測することとした。具体的な計測項目を表-1 および図-1 に示す。このように、計測する項目を明確に定めることにより、従来の手法の測定者の主観による差を小さくするとともに、タンピングに伴う試料の変形性状を定量化することができるものと考えた。

計測項目のうち、試料上部の円形の有無は材料分離抵抗性の指標になると考えた。これは次に述べる理由による。コンクリートの材料分離をモルタルと粗骨材の分離とすると、材料分離抵抗性は、コンクリートの塑性粘度によって支配的な影響を受けると考えられる。全体として塑性粘度の大きなコンクリートの場合、衝撃を加えた際に、試料の上部は粘性の影響が卓越し変形を起こさず、試料の下部のみが変形することとなる。しかし、塑性粘度が小さければ試料は上部でも変形し、この結果、試料上面の円形を保持しなくなる。このようなことから、試料上部の円形の保持性によって、材料分離抵抗性を評価できるものと考えた。

また、流動性を、所定のエネルギーを加えたときの流動の程度と考えると、与えられるエネルギーに不明確な要素があるものの、所要のスランプフローとなるためのタンピング回数は、ある程度は流動性を示す指標となるものと考えられる。

本研究におけるタンピング試験方法を図-2 に模式的

表-2 目視による評価の分類⁴⁾

形状	説明
良好	十分な材料分離抵抗性を有し、タンピングの際、試料全体が一体となって変形する。
崩壊	セメント量の少ないコンクリートは材料分離抵抗性が不十分であり、タンピングによる衝撃を加えると変形の過程で崩壊する。
分離	粗骨材量の多いコンクリートは材料分離抵抗性が不十分であり、衝撃を加えるとモルタルまたはペーストのみ流動する。

表-3 使用材料

材料	記号	品質
セメント	C	普通ポルトランドセメント 密度 3.16g/cm ³
細骨材	S	吸水率 1.93% 密度 2.68g/cm ³ 粗粒率 2.47 実積率 64.1% 単位容積質量 1.69g/cm ³
粗骨材	G	吸水率 1.00% 密度 2.68g/cm ³ 粗粒率 6.81 実積率 57.9% 単位容積質量 1.54 g/cm ³
AE 減水剤	Ad	リグニンスルホン酸化合物 とポリオール複合体

に示す。

2.2 タンピング中の試料の形態

タンピングを受けるコンクリートは、その粘性によって、変形時の形状が異なることは容易に想像できる。本研究では、タンピング過程における試料の変形の形態に基づき、既往の文献⁴⁾を参考に、目視によって、コンクリートの変形形態を表-2 に示す 3 パターンに分類することとした。なお、今回の検討では「分離」の形態を示

表-4 示方配合

No.	水セメント比 W/C(%)	細骨材率 s/a(%)	目標スランブ SL(cm)	目標空気量 Air(%)	単位量(kg/m ³)				Ad
					W	C	S	G	(C×%)
1	40	36.1	8.0	4.5	167	418	635	1123	0.35
2		42.6			175	438	733	987	0.30
3		44.1			175	438	759	961	0.35
4	50	36.1			165	330	664	1174	0.35
5		40.1			167	334	734	1095	0.35
6		44.1			173	346	795	1007	0.35
7	60	36.1			170	283	673	1191	0.35
8		40.1			170	283	748	1116	0.35
9		44.1			171	285	821	1039	0.45
10	50	36.1	12.0		170	340	656	1160	0.35
11		40.1			173	346	723	1080	0.35
12		44.1			175	350	792	1003	0.35

表-5 タンピング試験結果

No.	W/C(%)	s/a(%)	スランブフロー	初期	250mm	300mm	350mm	400mm	450mm	評価
1	40	36.1	上部円形直径 (cm)	9.5	9.5	9.3	9.5	× ^{注1)}	×	良好
			スランブ (cm)	8.5	13.0	16.5	19.0	22.0	23.5	
2		42.6	上部円形直径	10.5	10.8	10.5	10.8	10.8	×	良好
			スランブ	7.0	10.5	14.0	17.5	20.0	22.0	
3		44.1	上部円形直径	10.5	10.5	10.8	10.3	— ^{注2)}	×	良好
			スランブ	7.0	10.5	14.5	18.0	21.0	23.0	
4	50	36.1	上部円形直径	—	—	×	×	×	×	崩壊
			スランブ	7.5	14.0	17.5	19.0	20.5	21.5	
5		40.1	上部円形直径	11.5	10.5	11.0	×	×	×	良好
			スランブ	8.5	12.5	17.0	20.0	22.0	22.5	
6		44.1	上部円形直径	11.5	10.5	10.3	—	×	×	良好
			スランブ	8.0	13.5	17.5	20.5	22.0	24.0	
7	60	36.1	上部円形直径	16.5	×	×	×	×	×	崩壊
			スランブ	9.0	15.0	17.0	計測不可			
8		40.1	上部円形直径	16.0	18.5	×	×	×	×	崩壊
			スランブ	7.5	12.5	16.5	18.0	21.5	22.0	
9		44.1	上部円形直径	11.0	10.5	10.0	—	×	×	良好
			スランブ	7.0	14.0	18.0	20.0	23.0	24.0	
10	50	36.1	上部円形直径	19.0	×	×	×	×	×	崩壊
			スランブ	10.5	15.5	19.0	19.0	22.0	22.5	
11		40.1	上部円形直径	11.8	—	—	—	×	×	良好
			スランブ	12.5	17.5	18.5	20.5	23.0	24.0	
12		44.1	上部円形直径	11.3	10.5	11.0	11.0	—	×	良好
			スランブ	13.0	17.0	20.0	20.5	22.0	24.0	

注1) ×はタンピング過程のコンクリート試料の上面に円形を保持していないことを表している。

注2) —は円形は保持しているが直径の計測を行っていないことを示している。

注3) 計測不可は崩壊が進行したため、計測が不可能であったことを表している

す配合は存在しなかったため、「良好」と「崩壊」の2パターンについて考えることとする。写真-1は「良好」な状態のコンクリートの一例を、写真-2は「崩壊」の状態のコンクリートの一例を示したものである。写真-1、

写真-2 はそれぞれ左からスランブコーン引き上げ時、スランブフロー300mm および 400mm のときの試料の形状を示している。

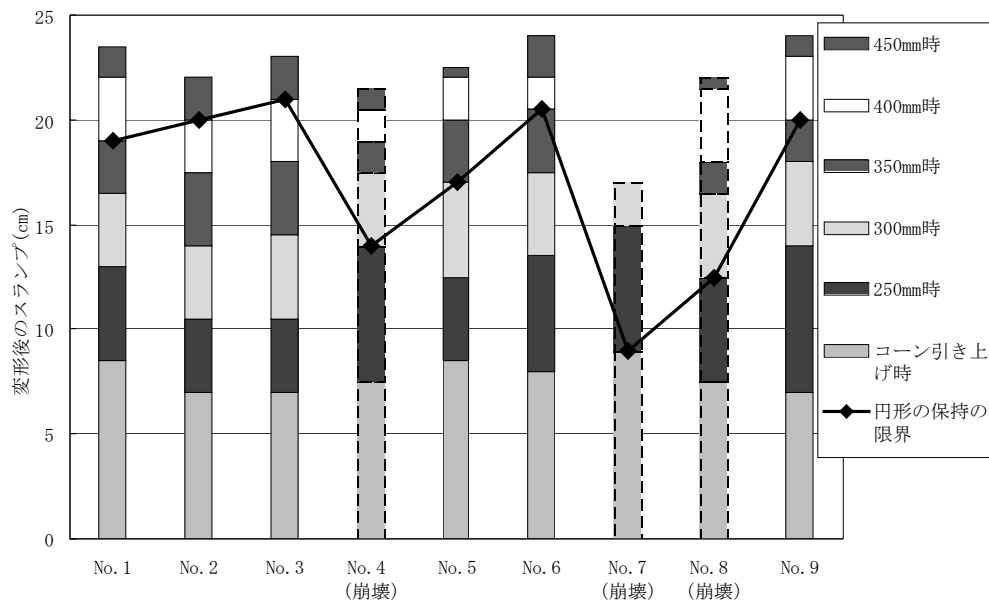


図-3 タンピングによるスランプの進行と円形保持

2.3 使用材料および配合

使用材料は表-3 に示すとおりであり、一般的なコンクリート用の材料を想定した。コンクリートの配合は表-4 に示すとおりであり、目標スランプを 8cm または 12cm とし、水セメント比を 40～60% に、また細骨材率を 3 水準に変化させることにより、強制的にコンクリートの粘性を変化させ、計 12 配合のコンクリートを作製した。なお、スランプは基本的にコンクリートの単位水量で調整することとした。

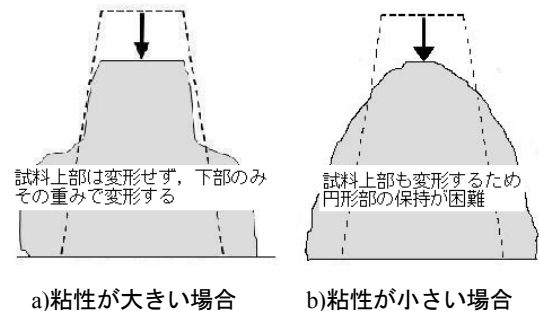


図-4 粘性による変形の差

3. 結果および考察

3.1 タンピング試験

(1) 材料分離抵抗性

タンピング試験による計測結果と、目視による判定結果を表-5 に示す。表中の「×」は所定のスランプフロー時のコンクリート試料上面が円形を保持していないことを表している。「－」は円形を保持しているが、直径の計測は行わなかったことを表す。また「計測不可」は崩壊が進行したため、計測できなかったことを表している。

目視では、No.4, No.7, No.8, No.10 のコンクリートが「崩壊」となり、それ以外では「良好」と判断された。スランプフローを示している。また破線のグラフは目視による評価が「崩壊」となったことを表す。図-3 より、タンピング過程の試料上面に円形部が存在すると、目視で No.9 では、タンピングによる衝撃を加えてスランプフローンピング過程でのスランプの進行状態を示す。図中のを増大させても試料上部の円形を保持するのに対し、「崩壊」と判断された No.4, No.7, No.8 では早い段階で

図-3 に目標スランプを 8cm としたコンクリートの、タ折れ線グラフは各配合の円形消失時のスランプまたはこの円形がなくなることがわかる。この結果はコンクリートの粘性の差によるものと推測される。材料分離抵抗性の大きいコンクリート、すなわち粘性の大きいものは、衝撃を加えた際に、試料の上部がほとんど変形を起こさず、下部から変形していく。これは、試料上部では、コンクリートの粘性による影響が、せん断力を卓越し変形できないが、試料下部ではせん断力が大きくなるため、流動することによって考えられる。このため、粘性の小さなものは、試料上部でも変形し、円形を保持することができないものと考えられる。粘性の大小による変形の違いを図-4 に模式的に示す。このように考えると、タンピング過程でのスランプと円形保持性によって材料分離抵抗性が評価できる可能性があるものと考えられる。本試験の結果、スランプ 8cm 程度のコンクリートをタン

表-6 各フロー時のタンピング回数

No.	初期	250mm	300mm	350mm	400mm	450mm
1	0	9	21	31	46	57
2	0	4	10	19	30	41
3	0	5	13	23	33	48
4	0	15	30	35	43	58
5	0	5	11	17	27	37
6	0	5	10	15	23	33
7	0	5	12	—	—	—
8	0	4	8	11	18	24
9	0	9	15	21	30	40
10	0	9	23	30	43	53
11	0	5	7	11	16	23
12	0	5	10	11	16	25

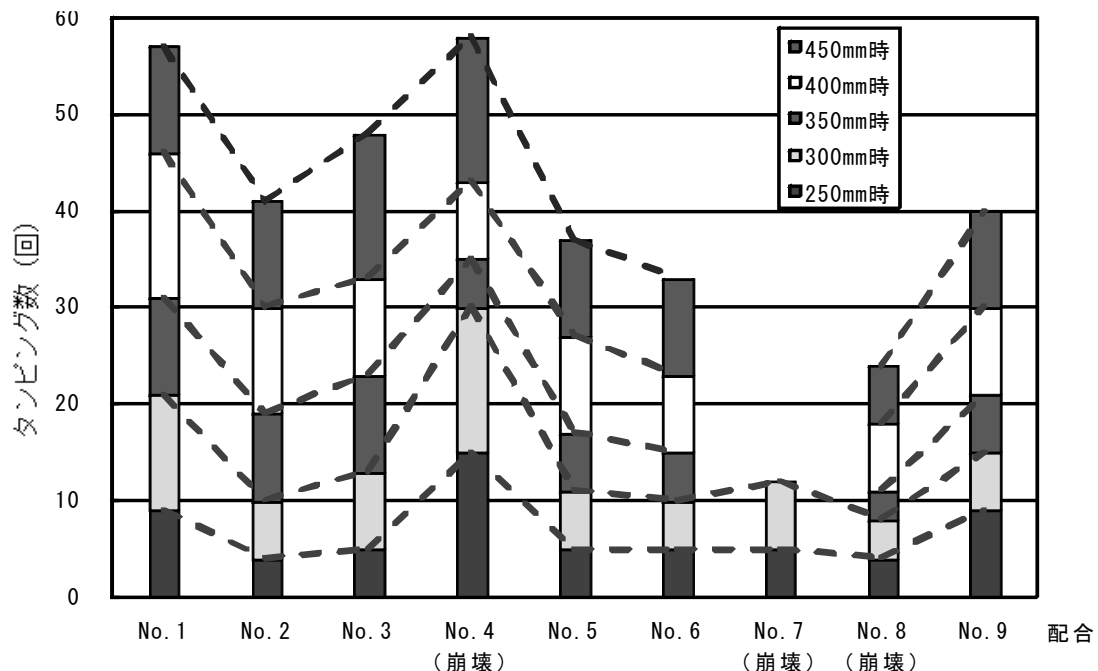


図-5 各スランプフロー時のタンピング回数

ピングしてスランプを 15cm 程度とした時に、上部の円形を保っているならば、材料分離抵抗性の高いコンクリートであると判断できる。

(2) 流動性

タンピング試験における各スランプフローとするためのタンピング回数を表-6 に、目標スランプ 8cm とした No.1～9 の配合の、各スランプフロー時のタンピング回数を図-5 に示す。表-6 の 250mm～450mm はスランプフローを表す。図-5 から、所定のスランプフローに到達するタンピング回数は、配合によって異なることがわかる。タンピング 1 回により与えられるエネルギーがほぼ同程度であると仮定すると、タンピング回数は、変形

のしやすさ、すなわち流動性を表す指標になり得るものと考えた。ここで、外山らの研究⁵⁾によれば、流動性を最大とするための最適細骨材率は、以下の式(1)で表すことができる。

$$s/a_{opt} = e_g / ((1 + \alpha)e_s + 1 + e_g - \beta) \quad (1)$$

ここで、 s/a_{opt} ：最適細骨材率

e_g ：粗粒子だけの場合の間隙比

e_s ：細粒子だけの場合の間隙比

α, β ：実験定数

ここで、間隙比 e とは粒子体積に対する間隙体積のことをいい、以下の式(2)で表す。

$$e = v / (s + g) = (1 - \gamma) / (T / \rho) \quad (2)$$

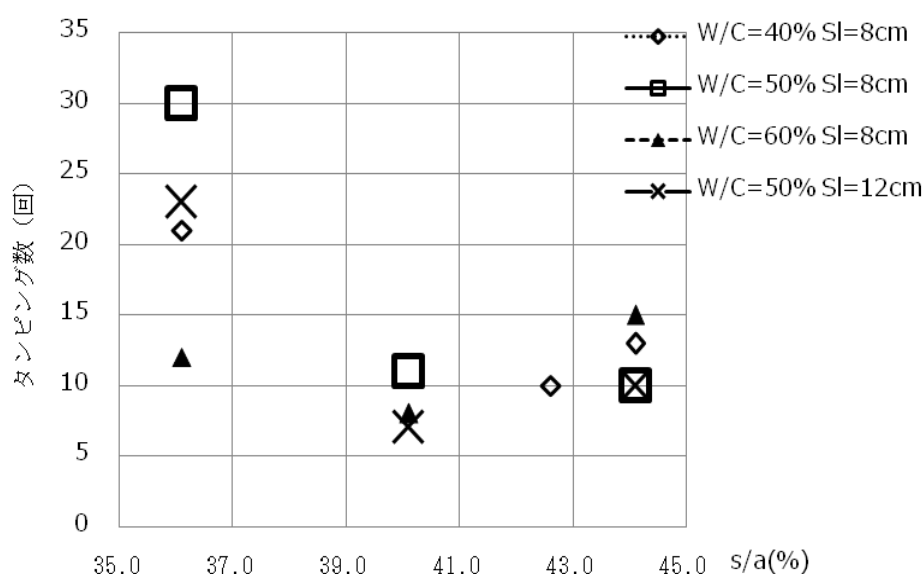


図-6 s/a と 300mm 時のタンピング回数

ここで、e：間隙比

v：空隙体積

s：細粒子の総粒子体積(cm^3)

g：粗粒子の総粒子体積(cm^3)

γ ：骨材の実積率

T：単位容積質量(g/cm^3)

ρ ：骨材の密度(g/cm^3)

実際には、この方法によって求められた細骨材率を、4～5%増加させた値が最適細骨材率となることが提案されている。この手法を適用すると、本研究に用いたコンクリートにおける最適細骨材率は、41.0%となる。なお、最適細骨材率の計算においては、 α 、 β の実験定数は不明のため、外山らの研究により示されている $\alpha=0.261$ 、 $\beta=0.581$ を用いた。

図-6 に一例として 300mm 時の、細骨材率と所定のスランブフローとなるタンピング回数の関係を示す。いずれの水セメント比の場合でも、細骨材率が 40%近辺で、タンピング回数が減少することがわかり、流動性が良好となっていることがわかる。なお、他のスランブフロー値の場合も同様の傾向となった。本試験での必要なタンピング回数が最小となる s/a は、上述の理論式により算出された最適細骨材率と同程度であり、所定のフローとなるためのタンピング回数をもととして、コンクリートの流動性のある程度評価できる可能性があることがわかる。

4. まとめ

本研究ではコンクリートのワーカビリティを簡易に評価するため、ワーカビリティを流動性と材料分離抵抗性

の 2 つの指標で決まるものとし、それぞれの簡易測定方法について検討した。

本研究で得られた成果を以下に示す。

- 1) スランブ試験後に、スランブ板に衝撃を与える、ワーカビリティの評価法を提案した。
- 2) 材料分離抵抗性は、タンピングによる試料上部の円形保持により評価できる可能性がある。スランブ 8cm 程度のコンクリートではタンピングによるスランブが 15cm 程度の時、試料上部の円形を保っていれば、良好な材料分離抵抗性を有していると判断できる。
- 3) 流動性は所定のスランブフローに達するためのタンピング回数で評価できる可能性がある。

参考文献

- 1) 村田二郎，國府勝郎，辻幸和：新訂第六版コンクリート工学（1）施工，彰国社刊，pp95-102，2003.4
- 2) 藤代勝ほか：フレッシュコンクリートの粘性評価手法に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，pp1073-1078，2006.6
- 3) 土木学会，施工性能にもとづくコンクリートの配合設計・施工指針（案），pp57-75，2007.3
- 4) 坂本淳ほか：高スランブコンクリートのプラスチック性の評価方法に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.1，pp1203-1208，2004.6
- 5) 外山和仁，國府勝郎，上野敦，宇治公隆：細，粗骨材の実積率に基づく最適細骨材率の選定方法，第 62 回年次学術講演会講演概要集，pp141-142