

コンクリートの分離抵抗性に関する 簡易な定量的評価方法の開発

分離抵抗性の定量的な評価手法の開発により充填不良を回避

梁 俊^{*1}・丸屋 剛^{*1}・坂本 淳^{*1}

Keywords : slump , compaction completion energy , segregation resistance , beating test , slump flow

スランプ, 締固め完了エネルギー, 分離抵抗性, 叩き試験, スランプフロー

1. はじめに

コンクリートのワーカビリティは、コンシステンシーと分離抵抗性を含む多くの要因から定まると考えられる。従来からコンクリートのワーカビリティは、コンシステンシーの評価方法であるスランプ試験によって間接的に評価されてきた¹⁾。骨材や混和剤の種類が少なかった時代には、コンクリートの分離抵抗性に影響する要因が少なかったことで、スランプ試験により求められたコンシステンシーにより、ワーカビリティの間接的な評価が可能であったが、良質な骨材が枯渇化したことや多種多様な混和材の利用促進など、コンクリート用材料が多様化されたことと混和剤の多機能化により、スランプ試験だけでコンクリートのフレッシュ性状を評価することは難しくなっている。

同一のスランプであっても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とが報告されている²⁾。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。

コンクリートのフレッシュ性状を評価する試験方法はいくつか提案されているが^{2), 3), 4), 5), 6)}、ほとんどが新たな装置を使用する方法で現場での検査方法としては普及しにくい問題が存在する。

現場では、スランプ試験後、スランプ板を叩いて、コンクリートの変形状態を観察することでコンクリートの分離抵抗性を判断することが多いが、定量的な評

価には至っていない。石井ら⁷⁾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したが、試料の変形状態と分離抵抗性との関係についての定量的な評価方法の提案には至っていない。本研究では、スランプが5～15cmであるコンクリートを対象として、締固め完了エネルギーの観点から、スランプ試験後の試料をスランプフローが47cmになるまで空気量測定時に使用するハンマーでスランプ板を叩いた後、コンクリート試料上面の円形の有無を確認することによりコンクリートの分離抵抗性を評価する簡易方法を提案した。

2. 締固め完了エネルギーの評価方法

本研究は、コンクリートの分離抵抗性に関してコンクリートの締固め完了エネルギーの観点から検討を行ったものである。コンクリートの締固め完了エネルギーを測定する試験装置を図-1に示す。本装置は逆回転偏心モータ2台を備え、一定振幅により振動する振動台、データを記録するためのコンピュータ、振動台の振動数



図-1 締固め試験装置

Fig.1 Examination device

*1 技術センター 土木技術研究所 土木構工法研究室

を変化させて加速度を調節するための制御盤の3点から構成されている。測定の手順としては初めに、直径が24cmの試験容器の中でスランプ試験を行い、振動台にセットして振動をかける。その際に試料の上面の沈下量と振動台の加速度、振動数を記録する。

コンクリートの締固め性は、コンクリートのコンシステンシーに応じた締固め前における型枠中のコンクリートの見掛けのかさ密度から、コンクリートの配合の理論密度に至る変形の容易さを表すものと考えることができる。そこで、締固めの程度は、円筒容器中の試料の最も高い部分を高さとする円筒体積に対するコンクリート試料の真の体積の比として捉え、これを締固め度 γ と定義する。締固め度 γ は式(1)により表すことができる⁶⁾。

$$\gamma = \frac{M/\rho_0}{Ah} \times 100\% = \frac{H_0}{h} \times 100\% \quad (1)$$

ここに、 γ ：締固め度(%), H_0 ：示方配合から計算される単位容積質量まで締め固められた時の試料の高さ(mm), h ：任意の締固め時間における試料の高さ(mm), M ：試料の質量(kg), ρ_0 ：示方配合から算出される試料の単位容積質量(kg/L), A ：円筒容器の底面積(mm²)

変形進行曲線を式(2)に示す。なお、式中の各係数は図-2の模式図に対応する。

$$\gamma = C_i + (C_f - C_i) \left[1 - \exp(-bE_t^d) \right] \quad (2)$$

ここに、 γ ：締固めエネルギー E_t におけるコンクリートの締固め度(%), C_i ：初期締固め度(%), C_f ：締固めエネルギーを無限大とした時の達成可能な締固め度(%), b, d ：実験定数

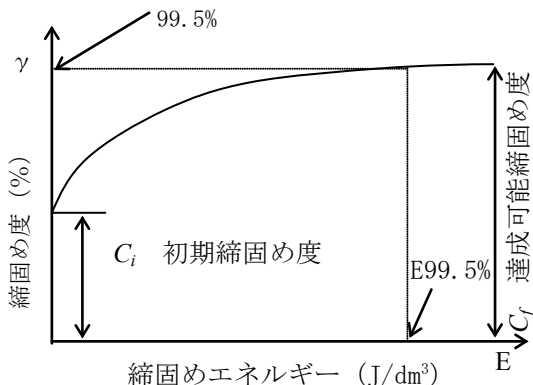


図-2 変形進行曲線の模式図

Fig.2 Schematic view of the transform progress curve

一方、締固めエネルギーは式(3)により求めることができる⁸⁾。

$$E_t = \frac{\rho_0 \alpha_{\max}^2}{4\pi^2 f} t \quad (3)$$

ここに、 E_t ： t 秒間にコンクリートが受ける締固めエネルギー(J/L), t ：振動時間(s), $\alpha_{\max}$ ：最大加速度(m/s²), f ：振動数(s⁻¹), ρ ：試料の単位容積質量(kg/L)

本研究では、締固めを終了してもよいとされる締固め度を、締固めが十分になされたと思なしてよい99.5%と設定し、図-2に示すように締固め度99.5%までに与えられたエネルギーを締固め完了エネルギー(E99.5%)と定義した⁹⁾。

3. 使用材料およびコンクリートの配合

水セメント比を55%、単位水量を155kg/m³、細骨材率を40.5%に設定して目標スランプが8cm、目標空気量が4.5%の表-1に示す標準配合を選定した。使用材料を表-2に示す。

表-1 コンクリートの標準配合

Table 1 The standard mix design of the concrete

配合	W/C (%)	s/a (%)	単 位 量 (kg/m³)					AE 減水剤 C×%
			水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G		
						G1	G2	
標準	55	40.5	153	278	769	452	673	0.25

表-2 使用材料

Table 2 The materials

種類		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	千葉県君津産山砂：表乾密度 2.65g/cm ³ ，吸水率 1.56%
粗骨材	G1	青梅産石灰碎石 (G _{MAX} 13mm)： 表乾密度：2.66g/cm ³ ，吸水率 0.60%
	G2	青梅産石灰碎石 (G _{MAX} 20mm)： 表乾密度：2.65g/cm ³ ，吸水率 0.60%
混和剤 (Ad)		AE 減水剤 (標準型)，AE 剤

4. 締固め完了エネルギーを受けたコンクリートの流動状態に関する検討

標準配合のもとに、細骨材率、水セメント比、スランプなどを変化させ、フレッシュ性状が相違するさまざまな配合を選定し、各配合の締固め完了エネルギーを計測した。その後、各配合に対して沈下板と沈下板固定用フレームを外した振動台の上でスランプ試験を行い、図-3 に示すように、各配合の締固め完了エネルギーに相当する振動エネルギーを与えて振動後のスランプとスランプフローを求めた。与えるエネルギーは振動時間で制御した。振動台の振動数は 35Hz、加速度は 13.5m/s^2 である。

計測した各配合の締固め完了エネルギーと振動台の振動数、コンクリートが受ける加速度を式(3)に入力して本実験で使用した振動台を用いて締固め完了エネルギー

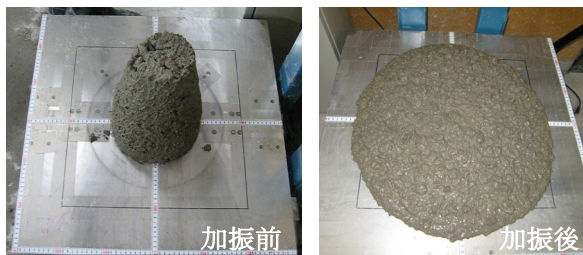


図-3 加振前後の試料の状態例

Fig.3 State of the sample before and after being given vibration

ギーを与える場合の振動時間を計算した。測定結果および各配合の締固め完了エネルギーを表-3 に示す。同表が示すように、コンクリートのフレッシュ性状の変化によりコンクリートの締固め容易さを示す締固め完了エネルギーは相違して、変動の幅は $0.8\sim 11.4\text{J/dm}^3$ になっている。この幅を加振時間で示すと 3.2～32.2 秒である。

各配合の加振時間とスランプ、スランプフローの関係図を図-4 に示す。同図が示すように、締固め完了エネルギーの大きさを示す加振時間が 3.2～32.2 秒の大き

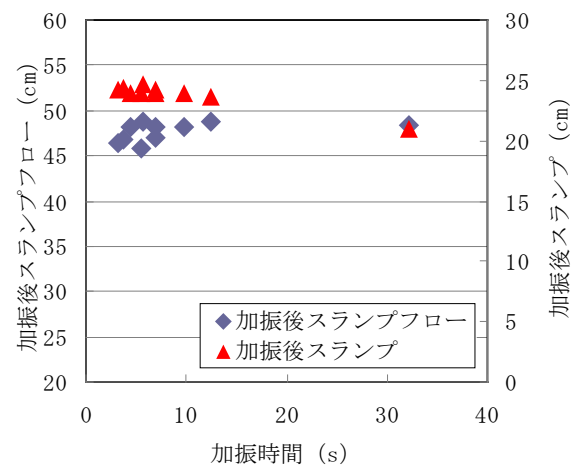


図-4 加振後のコンクリート試料のスランプおよびスランプフロー

Fig.4 The slump and the slump flow after being given vibration

表-3 コンクリートの配合および各種測定結果

Tabel 3 Mix design of the concrete and the results of the tests

配合	目標スランプ (cm)	W/C (%)	s/a (%)	単 位 量 (kg/m³)					AE 減水 剤 C×%	スラン プ(cm)	締固め完了エ ネルギー (J/dm³)	加振時 間 (s)	加振後 (cm)	
				W	C	S	G1	G2					スランプ フロー	スラン プ
標準	8	55	40.5	153	278	769	452	673	0.25	8.5	1.66	5.5	45.8	24.7
s/a の 変更		55	35.0	153	278	665	494	735	0.25	10.7	2.60	8.1	49.0	24.0
			45.0		278	855	418	622	0.25	10.5	1.73	5.7	48.8	24.5
W/C の 変更		30	40.5	153	510	690	406	604	0.25	0.3	11.4	32.2	48.3	21.0
		40			383	734	431	642	0.25	5.2	4.16	12.4	48.7	24.0
		50			310	741	443	664	0.25	7.3	2.16	6.9	46.9	24.0
		60			258	760	452	679	0.25	7.5	2.17	6.9	48.1	24.3
スラン プ変更	8	55	55	153	278	1045	342	509	0.25	8.9	1.27	4.5	48.2	24.0
	5	55	40.5	149	271	776	456	679	0.25	4.7	3.23	9.8	48.1	23.9
	12		40.5	162	295	741	441	662	0.25	11.2	1.03	3.8	46.7	24.4
	15		44.5	165	300	817	405	607	0.25	16.7	0.80	3.2	46.5	24.3

い幅で変動してもコンクリート試料の加振後のスランプとスランプフローはほぼ一定であり、スランプフローは 47cm、スランプは 24cm 前後になっている。このことは、配合が相違しても、締固め完了エネルギーを受けたコンクリート試料のスランプフローは一定になることを示している。

コンクリートの締固め完了エネルギーは、型枠中のコンクリートの見掛けのかさ密度から、コンクリートの配合の理論密度に至る変形の容易さを表すものである。したがって、コンクリートの密度の細かな差を考慮しない場合、締固め完了した型枠中のコンクリートの形は同じ寸法である。スランプフロー47cm の試料の形をスランプとスランプフローで示すことができると考えた場合、型枠がない場合でもコンクリートの試料は締固め完了エネルギーを受けることで同じ形になったことを図-4 および表-3 のデータが示している。

したがって、スランプが 5~15cm であるコンクリートにおいて、叩きの回数と叩きに使用した道具に関係なく、スランプ試験後の試料をスランプフローが 47cm になるまで叩くのに使用されたエネルギーを締固め完了エネルギーとして見なすことができる。

締固め完了エネルギーの定義からわかるように、締固め完了エネルギーはコンクリートを締め固めるのに必要な最小のエネルギーである。コンクリートを締め固めるためには少なくとも締固め完了エネルギー以上のエネルギーを与えなければならない。したがって、スランプ板を叩いてコンクリート試料のスランプフロ

ーが 47cm になるまで、つまり締固め完了エネルギーを受けるまでに図-5 が示すような崩れ、分離、水跡などが発生する場合には、材料分離抵抗性が不足した配合であると判断することができる。

5. 叩き後の試料形状による分離抵抗性評価方法の検討

前章での検討結果より、スランプ試験後の試料をスランプフローが 47cm になるまで叩いて崩れなどの有無を確認することで締固め完了エネルギーを受けるまでのコンクリートの分離の有無を判断できることが明らかになった。しかし、47cm になるまで叩いて崩れなどがない配合であっても施工に最適な配合であるとは言いきれない。したがって、最適な配合を判断する方法を検討する必要がある。石井ら⁷⁾は、叩き試験後、試料上部の円形の有無がコンクリートの分離抵抗性を判定する指標になりえると指摘している。

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、モルタル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。塑性粘度の大きなモルタル組成であるコンクリートの場合、叩きによって衝撃を加えた際に、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⁵⁾。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られる。

そこで、コンクリートの分離抵抗性を定量的に評価するため、スランプ試験後の試料のスランプフローが 32, 37, 42, 47, 52cm になるように、空気量測定時に使用するハンマーでスランプ板を叩き、スランプフローの変化に伴う上面円形の変化を観察した。標準配合を用いて叩きを行った後の写真を一例として図-6 に示す。



図-5 叩き試験後分離の一例

Fig.5 The segregation after the beating test



図-6 叩き試験による試料上面の円形変化状態（標準配合）

Fig.6 The circular change of the top surface of the sample by the beating test

実験で使用したコンクリートの配合は、現実的な配合選定の過程を想定して、つぎのように選定した。まず、細骨材率の変化を想定して、前章で選定した標準配合をもとに、W/C 一定で s/a を 43.5, 42.0, 40.5, 39.0, 37.5% に変化させた配合を用いて試験を行った(表-4, 1-1))。なお、粗骨材の噛合せの影響を避けるために粗骨材の量は一定にした。細骨材の体積の変化をペーストの体積で補充することで、モルタルの粘性を変化させた。

次に、単位水量を調整して、W/C 一定で s/a を 43.5, 42.0, 40.5, 39.0, 37.5% に変化させた各配合のスランプを 8~10cm に合わせた配合を用いて再び同じ実験を行った(表-4, 1-2))。配合および実験結果を表-4 に示

す。

W/C 一定で s/a を 43.5, 42.0, 40.5, 39.0, 37.5% に変化させた配合の実験結果を図-7 に、スランプを合わせた配合の実験結果を図-8 に示す。叩き後の試料上面の円形ありを 1, 円形なしを 0 とし、スランプフローの変化に伴う試料上面の円形の有無を示した。また、試料が崩れて円形の有無を判断できない場合も 0 にした。図-7 が示すように、標準配合は、スランプフローが 47cm になるまで上面の円形を保持するが、52cm になると円形がなくなる。それに対して、s/a を小さくして標準配合に比較して分離傾向になっている配合は、スランプフローが 47cm になる前に円形がなくなる。逆に、s/a を大きくした配合は、スランプフローが

表-4 コンクリートの配合および叩き試験の結果

Table 4 Mix design of the concrete and the results of the beating test

配合	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					AE 減水剤	スラン プ (cm)	叩き試験後スランプフロー (cm)				
			W	C	S	G1	G2	C×%		32	37	42	47	52
								上径		上径	上径	上径	上径	
標準	55	40.5	153	278	769	452	673	0.25	9.0	12.3	12.0	11.3	12.8	無
1-1) 粗骨材量, W/C 一定で s/a を変更	55	43.5	129	235	875	448	672	0.25	0.0	10.0	崩れ	崩れ	崩れ	崩れ
		42.0	141	256	824				3.5	10.0	9.0	9.8	10.0	10.5
		39.0	164	298	728				18.4	26.3	29.7	無	無	無
		37.5	175	318	682				21.2	26.4	27.5	無	無	無
1-2) 1-1) に対して単 位水量を修正してス ランプ 8～10cm に調 整	55	43.5	155	282	822	427	636	0.25	8.2	9.5	9.4	9.7	10.3	10.1
		42.0	155	282	794	439	653		9.5	11.7	11.8	13.2	14.3	無
		39.0	150	273	746	466	694		9.5	13.9	14.3	12.8	無	無
		37.5	148	269	720	486	715		9.7	11.2	12.0	無	無	無
2-1) 細・粗骨材量一 定で C の増減でペー ストの粘性変更	62	40.5	159	258	754	450	675	0.25	12.0	18.0	17.1	無	無	無
	58		156	268					9.7	11.1	11.6	11.6	無	無
	52		150	288					8.0	9.5	11.0	10.9	12.3	14.1
	49		147	298					5.0	10.0	9.8	10.8	10.9	11.5
2-2) 2-1) に対して各 単位量を調整してス ランプを 8～10cm に 調整	62	40.5	151	244	767	458	687	0.25	8.2	11.2	11.1	無	無	無
	58		152	262	762	454	681		8.5	12.0	13.6	15.2	無	無
	52		150	288	754	450	675		8.0	9.5	11.0	10.9	12.3	14.1
	49		153	312	744	443	665		8.7	9.2	9.7	11.3	12.0	12.6
水+20 kg/m ³	—	40.5	173	282	752	448	672	0.25	20.4	24.9	無	無	無	無
水+15 kg/m ³	—		168						18.5	19.9	無	無	無	無
水+10 kg/m ³	—		163						17.9	20.2	24.3	無	無	無
水+5 kg/m ³	—		158						14.9	18.4	22.2	23.5	無	無
水-15 kg/m ³	—		138						7.9	10.0	9.5	9.2	9.4	10.5
水-10 kg/m ³	—		143						5.0	10.1	9.4	9.5	9.7	10.6
水-5 kg/m ³	—		148						4.3	9.7	9.4	9.3	9.3	10.4

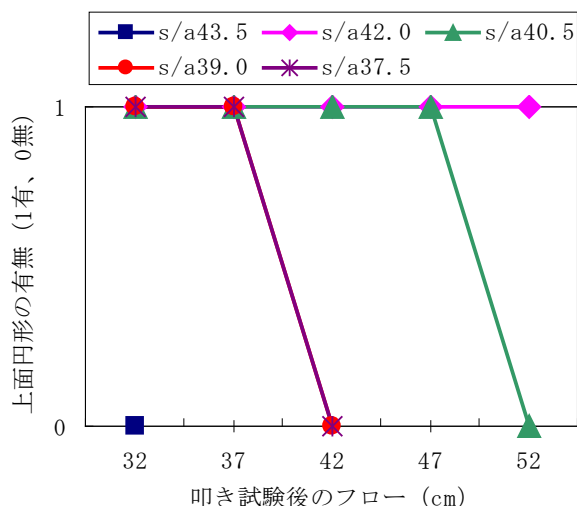


図-7 W/C一定で s/a を変化させた場合の実験結果

Fig.7 The result of experiment by the change of s/a With W/C uniformity

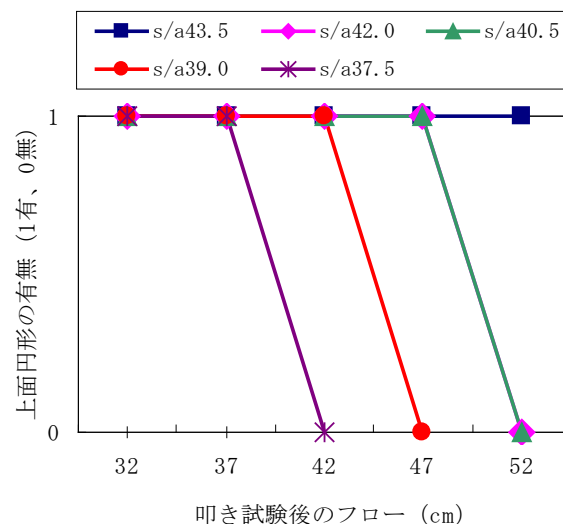


図-8 W/C一定で s/a を変化させた場合の実験結果 (スランプ 8cm に合わせた後)

Fig.8 The result of experiment by the change of s/a With W/C uniformity (After matched slump with 8cm)

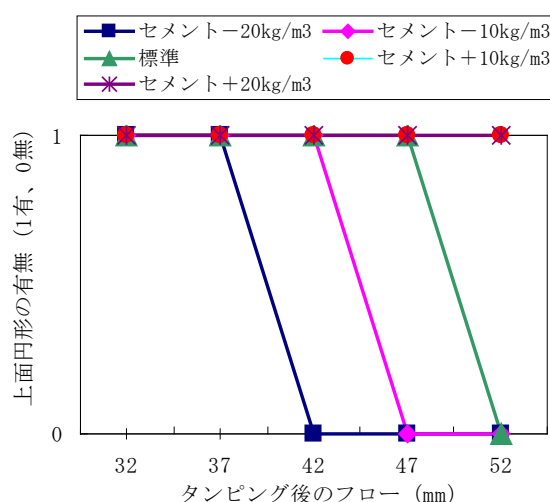


図-9 ペーストの粘性が変化された場合の試験結果

Fig.9 The result of experiment by change of the viscous

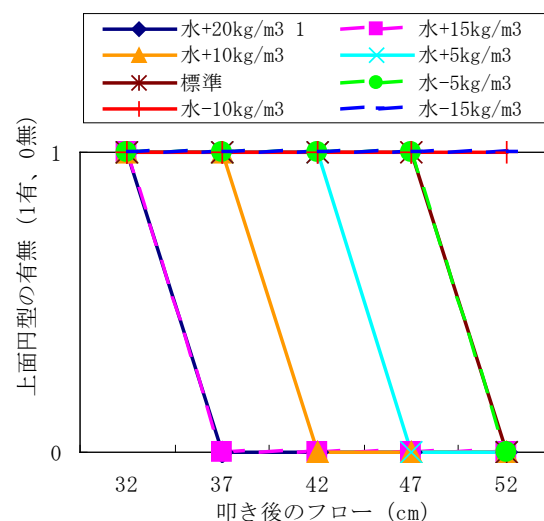


図-10 単位水量の増減された場合の試験結果

Fig.10 The result of experiment by change of unit weight of water

47cm を超えても上面の円形は保持されている。すなわち、標準配合は締固め完了エネルギーを受けるまでは上面の円形を保持するが、締固め完了エネルギー以上のエネルギーを受けると円形はなくなることを意味する。また、s/a を大きくした配合はスランプフローが 47cm を超えても円形がなくなりますが、分離傾向の配合は締固め完了エネルギーを受け終わる前に円形がなくなる。単位水量を調整してスランプを合わせても同じ結果になることを図-4 が示している。スランプ試験後の試料をスランプフローが 47cm まで叩いて試料上

面の円形の有無を確認することで、コンクリートの s/a の変化による分離抵抗性の変化を評価できることを示している。

ペーストの粘性の変化の影響を確認するため、標準配合をもとに、細骨材率、粗骨材の量を一定にして、単位セメント量を±10、±20 kg/m³ 増減した配合を用いて、同じようにスランプ試験後の試料のスランプフローが 47cm になるまで叩き試験を行った (表-4、2-1))。配合および試験の結果を表-4 および図-9 に示す。同図に示すように、セメントの量が増えてペーストの

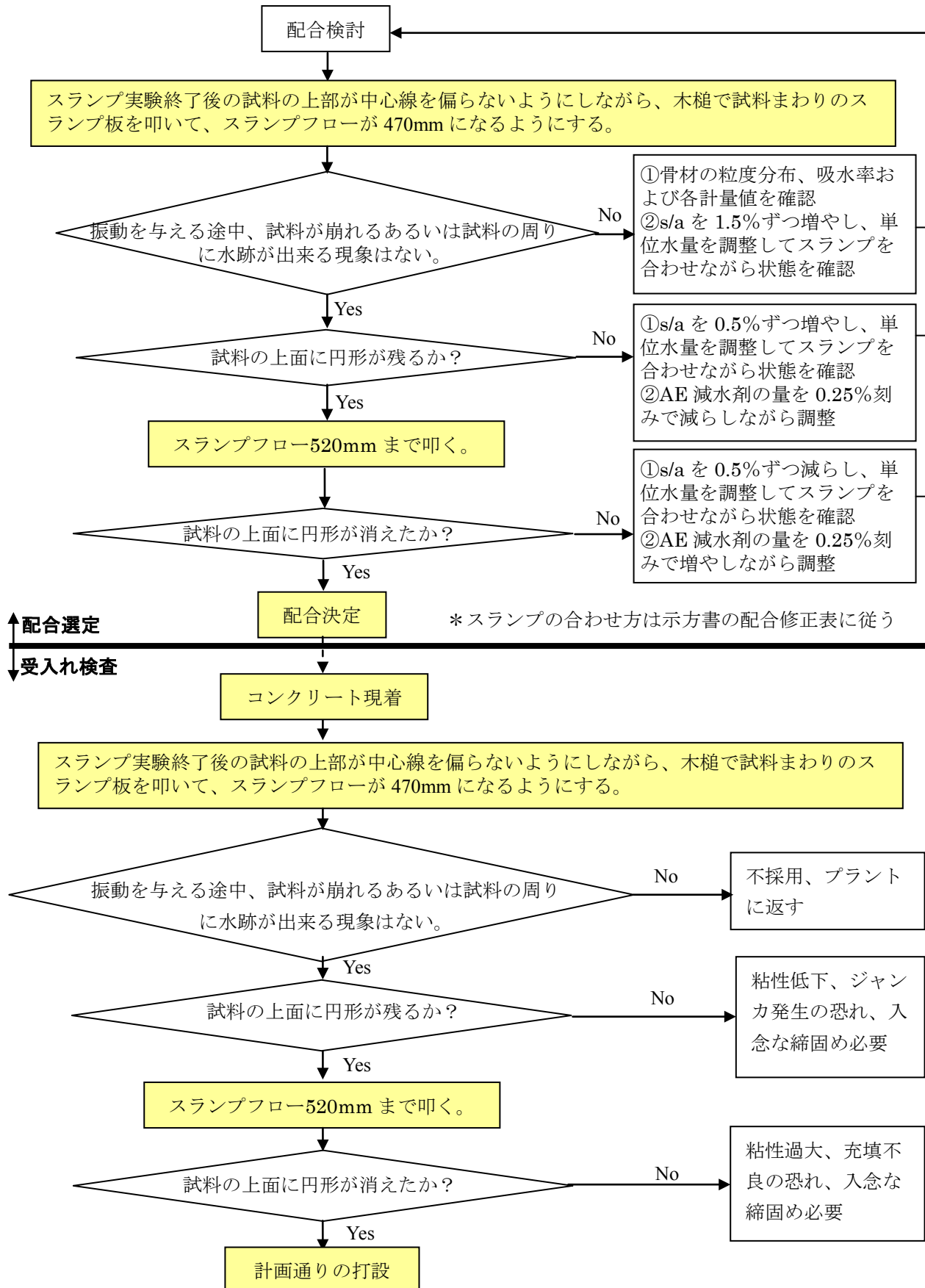


図-11 叩き試験のフロー

Fig.11 The flow of the beating test

粘性が大きくなった配合はスランプフローが 47cm を超えても試料上面の円形を保持するが、セメントの量を減じてコンクリートの粘性が小さくなった配合はスランプフローが 47cm になる前に試料上面の円形がなくなる。表-4 のデータからわかるように、単位水量を調整してスランプを 8~10cm に調整しても実験の結果には変化がない(表-4, 2-2))。ペーストの粘性の変化もこの評価方法で評価できることを示している。

単位水量が変動した場合の影響を確認するため、標準配合のコンクリートに対して、 ± 5 , ± 10 , ± 15 , $+20\text{kg/m}^3$ 相当の水量を故意に増減して、試料上面の円形の有無を確認した。配合および試験の結果を表-4 および図-10 に示す。同図に示すように、水を 5kg/m^3 減らした配合は標準配合と同じようにスランプフロー47cm まで試料上面の円形を保持しているが、加水によりコンクリートの粘性を低減した配合はスランプフロー 47cm になる前に試料上面の円形がなくなっている。また、水を 10kg/m^3 以上減らしてコンクリートの粘性が増えた配合はスランプフローが 47cm を超えても試料上面の円形が存在していることがわかる。したがって、単位水量の変化が 5kg/m^3 以上であればコンクリートの粘性の変化をこの方法で評価できることを示している。

6. 本試験方法の現場への適用

本試験方法を用いて、コンクリートの分離抵抗性を確認し、コンクリートの施工性能を判断することができる。配合選定時と受け入れ検査時の適用方法を図-11 のフローに示す。

7. まとめ

本研究では、スランプ試験後の試料をスランプフローが 47cm になるまで空気量測定時に使用するハンマーでスランプ板を叩き、上面円形の有無を観察することでコンクリートの材料分離抵抗性を評価する方法を

検討した結果、以下のことが明らかとなった。

- (1)スランプ試験後のコンクリート試料に締固めエネルギーに相当するエネルギーを与えると、スランプフローは 47cm 程度まで広がる。したがって、スランプフロー47cm まで広がるまでに受けたエネルギーが締固め完了エネルギーであると考えられる。
- (2)スランプ試験後の試料をスランプフロー47cm まで叩いた後の試料上面の円形の有無からスランプが 5~15cm であるコンクリートの材料分離抵抗性の程度を判断できると考えられる。円形が残らなければ材料分離抵抗性が低い。

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, pp.95-102, 2003.4
- 2) 日本コンクリート工学協会: 施工の確実性を判定するためのコンクリートの試験方法とその適用性に関する研究報告書, pp.67-72, 2009.7
- 3) 西川隆之, 橋本親典, 山地功二, 水口祐之: 加振装置を用いたフレッシュコンクリートのコンシステンシー評価試験方法の開発、コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.2, pp.397-402, 2000
- 4) 梁俊, 丸屋剛, 坂本淳, 宇治公隆: 締固め完了エネルギーによる同一スランプコンクリートの施工性評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.1393-1397, 2009
- 5) 梁俊, 丸屋剛, 坂本淳: 締固めエネルギーによる鉄筋コンクリートの締固め性評価装置の開発, 土木学会第 65 回年次学術講演会, V-683, pp.1365-1366, 2010
- 6) 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), pp.57-75, 2007.3
- 7) 石井佑大, 宇治公隆, 上野敦: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.2, 2008
- 8) 國府勝郎, 上野敦: 締固め仕事量の評価に基づく超硬練りコンクリートの配合設計, 土木学会論文集, No.532/V-30, pp.109-118, 1996.2
- 9) 梁俊, 國府勝郎, 宇治公隆, 上野敦: フレッシュコンクリートの締固め性試験法に関する研究, 土木学会論文集 Vol. 62, No.2, pp.416-427, 2006.6