

論文 振動締固めを必要とするコンクリートの間隙通過性に関する検討

高橋 直希*1・井手 一雄*2・津野 和宏*3

要旨: コンクリートのワーカビリティは、混和剤の使用などによりスランプのみで評価することは困難になりつつある。振動締固めを必要とするコンクリートを対象とし、細骨材率を変えた配合に対して、混和剤の添加量または単位水量の増減によって同一スランプとなるコンクリートを用いて、間隙通過性試験を実施した。間隙通過性に着目した場合、本実験の範囲内では細・粗骨材混合実積率が最大となる細骨材率を選定することで、振動締固めを必要とするコンクリートの間隙通過性が最大となることがわかった。

キーワード: 間隙通過性, 振動締固め, 細骨材率, 実積率, 加速度

1. はじめに

我が国の建設産業は、社会基盤整備の担い手であるものの、技能労働者の高齢化や若手入職者の減少が予想されており、社会基盤を支える労働力の確保に支障が生じることが懸念されている。この解決策として、少ない人数で建設業務を遂行できるよう建設業の生産性を高めることが挙げられる。

コンクリート構造物の生産性向上は、品質確保あるいは品質向上を前提とした形でなければ、本質的な生産性向上ではないとし、品質を確保した生産性向上について議論が行われてきた。その中で、作業性が十分でない条件でスランプの小さいコンクリートを打ち込む場合などは、確実な充填のために多大な労力と時間を費やすことになり、現場におけるコンクリート工の生産性を阻害するとされている¹⁾。高流動コンクリートやプレキャスト工法などを用いることで、コンクリート構造物建設の生産性は向上しているものの、多くの場合、振動締固めを必要とする現場打ちコンクリートが用いられている。

従来、コンクリートのワーカビリティは、スランプで評価することも比較的容易であった。しかし、天然骨材に比べて施工性の劣る砕石や砕砂のような骨材や、高性能化・高機能化した化学混和剤などが使われる状況下では、スランプだけでワーカビリティを評価することは困難になりつつある²⁾。したがって、単にスランプが大きくなるような配合を選定するのではなく、ワーカビリティが向上するような配合でなければ、品質を確保した生産性の向上は期待できない。コンクリートの施工性能として、充填性、圧送性、凝結特性などのワーカビリティおよび強度発現性が示されている。高品質で密実なコンクリート構造物を構築するうえで、コンクリートの充填性が最も重要な性能であるとされている²⁾。加振条件下でのコンクリートの充填性を評価する方法としては、JSCE-F701-2018「ボックス形容器を用いた加振時

のコンクリートの間隙通過性試験方法(案)」があり、配合を定量的に評価できるものと考えられている^{2,3)}。

本研究は、振動締固めを必要とするコンクリートを対象とし、細骨材率を変えた配合に対して、混和剤の添加量または単位水量の増減によって同一スランプとなるよう調整したコンクリートを用いて、間隙通過性を検討した。さらに、細骨材と粗骨材を合わせた混合物の実積率と間隙通過性の関係について検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料およびコンクリートの配合

使用材料を、表-1に示す。また、空気量を調整するため、AE剤と消泡剤を適宜使用した。コンクリートの配合およびフレッシュコンクリートの試験結果を、表-2に示す。目標スランプおよび目標空気量は、12cmおよび4.5%とした。ケース①は、水セメント比および単位水量を一定とし、細骨材率を変化させた場合に混和剤の添加量により目標スランプとなるよう調整した配合である。ケース②は、水セメント比を45, 50および55%, 混和剤の

表-1 使用材料

セメント	普通ポルトランドセメント
	密度: 3.16 (g/cm ³)
細骨材	上内田産山砂
	表乾密度: 2.57 (g/cm ³)
	実積率: 65.9 (%) 粗粒率: 2.68
粗骨材	桜川産硬質砂岩砕石 (最大寸法: 20mm)
	表乾密度: 2.64 (g/cm ³)
	粒形判定実積率: 58.0 (%) 粗粒率: 6.64
混和剤	AE減水剤 (リグニンスルホン酸系)
	高性能AE減水剤 (ポリカルボン酸系)

*1 (株)フジタ 技術センター 土木研究部 修士 (工学) (正会員)

*2 (株)フジタ 技術センター 土木研究部 博士 (工学) (正会員)

*3 国土館大学 理工学部 理工学科 教授 博士 (工学) (正会員)

表-2 コンクリートの配合

ケース	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				混和剤(C×%)		スランブ (cm)	空気量 (%)
			水	セメント	細骨材	粗骨材	AE減水剤	高性能AE減水剤		
ケース①	50.0	40.0	163	326	708	1091	0.65	-	10.5	5.4
		42.0			744	1055	0.80	-	10.9	3.8
		44.0			779	1018	0.75	-	12.5	5.9
		46.0			814	982	1.05	-	12.7	6.1
		48.0			850	946	1.25	-	13.8	6.1
		50.0			885	909	1.30	-	11.8	3.9
		52.0			921	873	-	1.10	11.8	5.3
		54.0			956	837	-	1.35	11.9	4.5
		56.0			991	800	-	1.55	11.1	3.5
		58.0			1027	764	-	1.75	12.8	3.2
ケース②	45.0	40.0	160	356	702	1081	-	-	10.6	4.2
		40.0	162	360	698	1076	-	-	10.8	4.0
		42.0	162	360	733	1040	-	-	10.0	4.6
		44.0	167	371	758	991	-	-	12.7	4.4
		46.0	169	376	789	951	-	-	12.8	4.6
		48.0	171	380	819	911	-	-	12.6	5.1
		50.0	173	384	849	872	-	-	12.7	5.4
		52.0	174	387	880	835	-	-	11.1	3.9
		54.0	176	391	909	796	-	-	10.8	4.0
		56.0	179	398	936	755	-	-	10.5	3.7
	50.0	40.0	160	320	713	1099	0.80	-	10.0	5.0
		42.0	163	326	744	1055	-	-	10.9	5.0
		42.0	163	326	744	1055	-	-	10.9	3.8
		44.0	166	332	773	1011	-	-	12.1	5.0
		46.0	169	338	803	968	-	-	12.6	5.0
		48.0	171	342	834	928	-	-	13.3	5.5
		50.0	173	346	864	888	-	-	11.2	4.5
		52.0	175	350	894	848	-	-	11.8	5.2
		54.0	177	354	924	809	-	-	13.3	4.5
		56.0	179	358	954	770	-	-	11.3	4.0
	55.0	40.0	160	291	723	1113	-	-	10.1	4.1
		42.0	162	295	755	1072	-	-	11.2	4.1
		44.0	164	298	788	1030	-	-	10.8	4.0
		46.0	166	302	820	989	-	-	10.6	5.1
		48.0	168	305	852	948	-	-	11.7	5.4
		50.0	171	311	881	905	-	-	11.8	6.2
		52.0	173	315	912	865	-	-	11.8	6.5
		54.0	176	320	941	823	-	-	13.7	6.2
		56.0	179	325	969	782	-	-	11.6	5.9
		58.0	183	333	994	739	-	-	10.8	4.5

添加量を一定とし、細骨材率を変化させた場合に単位水量の増減によりスランブを調整した配合である。

2.2 細骨材と粗骨材の混合物の実積率

細骨材と粗骨材の混合物の実積率(以下、細・粗骨材混合実積率と称す)は、あらかじめ所定の細骨材率で混合した試料を、JIS A 1104 に準じた棒突きによる方法で容器に詰めて求めた。細骨材率の水準は、40、42、44、46、48、50、52、54、56、58 および 60%の全 11 水準とした。

2.3 間隙通過性試験

加振時のコンクリートの間隙通過性を定量的に評価するため、JSCE-F-701-2018「ボックス形容器を用いた加振時のコンクリートの間隙通過性試験方法(案)」に準じて、間隙通過性試験を行った。間隙通過性試験の概念図を、図-1 に示す。本試験では、B 室の試料の高さが 190mm および 300mm に達するまでの時間を計測し、式(1)から間隙通過速度を求めた。

$$V_{pass} = \frac{110}{t_{300} - t_{190}} \quad \text{式(1)}$$

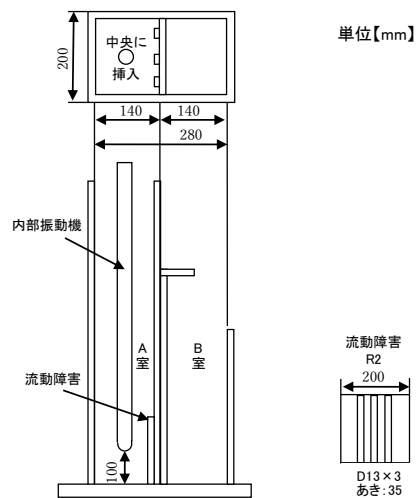


図-1 間隙通過性試験の概念図

ここで、 V_{pass} は間隙通過速度(mm/s)、 t_{300} は 300mm 到達時間(s)、 t_{190} は 190mm 到達時間(s)である。

使用した内部振動機は、振動部の直径が 28mm、振幅が 1.8mm および振動数が 230Hz である。

2.4 加振時のコンクリート中における加速度

フレッシュコンクリートに振動を与える目的は、コンクリートを流動化し、鉄筋の間隙や型枠の隅々に行き渡らせることや、コンクリート中の空気を液状化により追い出し、緻密化すること、などが挙げられる。特に、締固め過程に関しては、コンクリートの振動締固めや振動伝播に関する数多くの研究が行われている⁴⁻⁷⁾。さらに、内部振動機を用いた締固め完了までの時間を、振動加速度や振動数などから算出した締固め完了エネルギーという指標を用いて求める方法も提案されている^{8,9)}。充填過程についても、振動がコンクリートに作用する点においては締固め過程と同様であり、振動加速度や振動伝播などの振動特性が大きく影響していることが考えられる。

本研究では、細骨材率の異なるコンクリートに対し、加振時のコンクリート中の振動加速度を計測した。加速度の計測の概念図を、図-2に示す。プラスチック製の容器にコンクリートを投入した後、内部振動機は容器の中央に挿入し、内部振動機の先端が底面から100mmの高さになるよう設置した。また、加速度計は内部振動機から横方向は100mmおよび200mm、高さ方向は底面から100mmの位置に設置した。その後、内部振動機により10秒間振動を与え、コンクリート中の加速度を計測した。実施水準は、ケース②の水セメント比が50%、細骨材率が44%、50%および58%の3水準とした。

3. 実験結果

3.1 細・粗骨材混合実積率

細・粗骨材混合実積率を、図-3に示す。細・粗骨材混合実積率が最大となる細骨材率は52%であった。

細・粗骨材混合実積率が最大となる細骨材率と、スランプが最大となる細骨材率の関係を確認するため、細骨材率を変化させたスランプ試験を行った。実施した配合を、表-3に示す。水セメント比が50%、単位水量が169kg/m³に対し、細骨材率は42~50%の5水準とした。本試験によって得られたスランプと細骨材率の関係を、図-4に示す。スランプが最大となる細骨材率は44%であり、既往の研究¹⁰⁾と同様、細・粗骨材混合実積率が最大となる細骨材率とは異なる結果となった。

3.2 コンクリートの間隙通過速度

(1) ケース①：混和剤の添加量の異なる配合

間隙通過性試験の結果を、図-5に示す。混和剤の添加量によりスランプを調整した場合、細骨材率と間隙通過速度の関係は上に凸な形状を呈し、間隙通過速度が最大となる細骨材率が存在しており、そのときの細骨材率は52%であった。間隙通過速度と細・粗骨材混合実積率が最大となる細骨材率は一致し、スランプが最大になる細骨材率とは異なる結果となった。さらに、細骨材率が

52%より大きくなるほど間隙通過速度は低下している。これは、4章で後述するように、細骨材率が大きくなると、振動を伝える粗骨材量が少なくなることに加えて、ケース①の場合には、単位水量を一定のまま細骨材率を大きくしているため、粘性が高くなることで、より振動エネルギーが小さくなり、間隙通過速度が低下したものと考えられる。

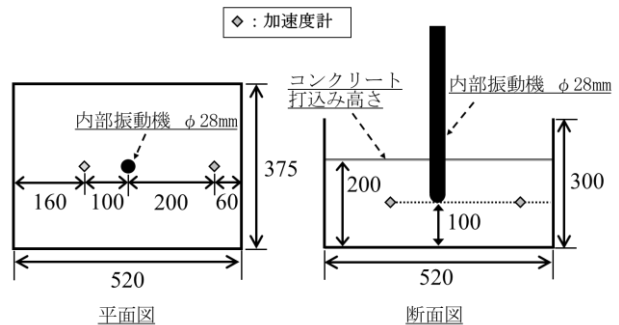


図-2 加速度計測の概念図

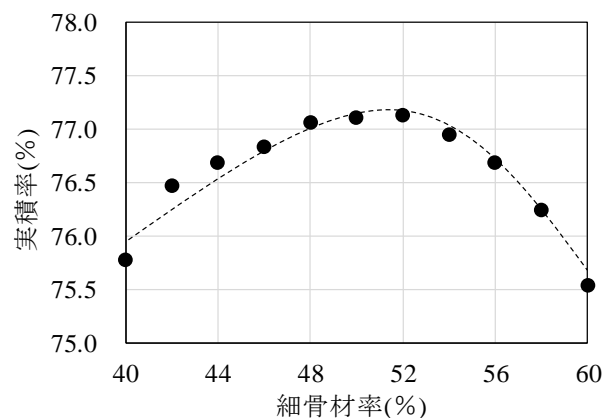


図-3 細・粗骨材混合実積率

表-3 スランプ試験におけるコンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				混和剤 (C×%)	
		水	セメント	細骨材	粗骨材	AE減水剤	
50.0	42.0	169	338	733	1040	0.80	
	44.0			768	1004		
	46.0			803	968		
	48.0			838	932		
	50.0			873	896		

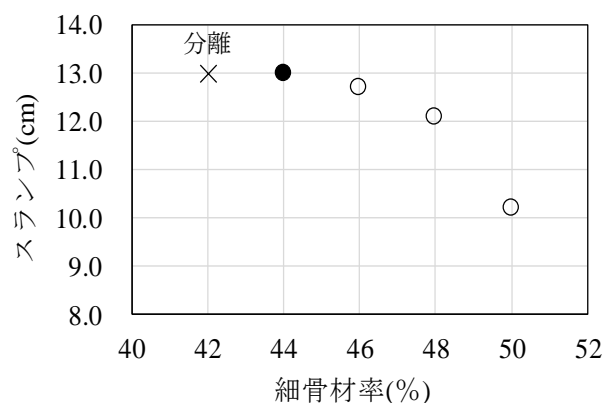


図-4 細骨材率とスランプの関係

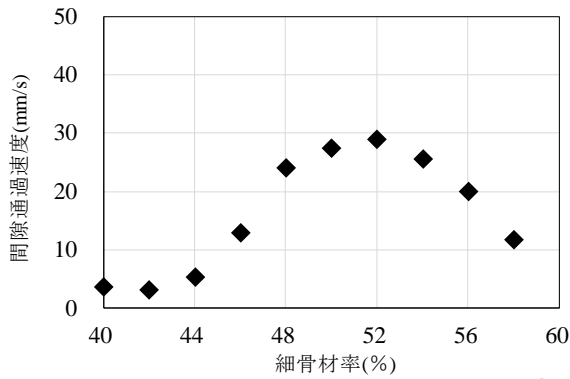


図-5 細骨材率と間隙通過速度の関係(ケース①)

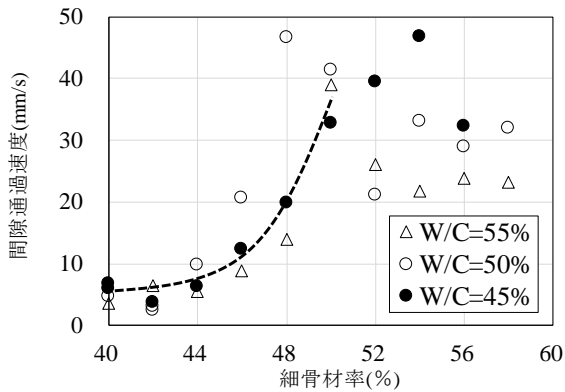


図-6 細骨材率と間隙通過速度の関係(ケース②)

(2) ケース②：単位水量の異なる配合

間隙通過性試験の結果を、図-6 に示す。単位水量によりスランプを調整した場合、間隙通過速度が最大となる細骨材率は、水セメント比によって多少の違いはあるが、48～54%の範囲である。細骨材率が大きくなると間隙通過速度がバラついているが、これは、細骨材率が大きいほど単位水量が大きくなり、材料分離が生じやすくなったためであると考えられる。なお、ケース①と比べれば、細骨材率が大きい場合の間隙通過速度の低下は少ないといえる。

3.3 加振時におけるコンクリート中の加速度

加速度計測の結果を、図-7 および表-4 に示す。表-4 に示す、平均加速度は、振動開始後と終了前の1秒間を除いた、約8秒間の加速度の絶対値の平均とした。

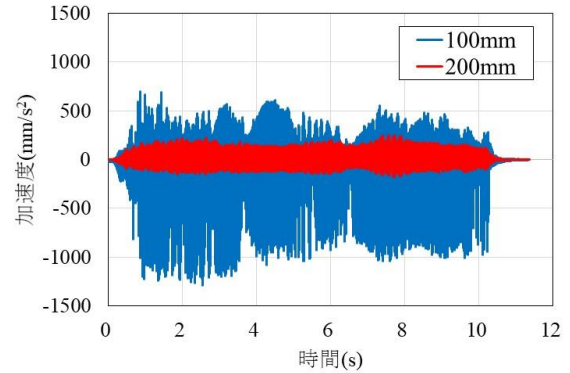
コンクリート中の振動については、主にコンクリートの粘性により、指数関数的に減衰することが報告されている⁹⁾。本試験においては、いずれの細骨材率においても、内部振動機からの距離が大きくなるほど、加速度が小さくなっている。さらに、細骨材率が大きいほど、平均加速度は小さくなっており、同一スランプであっても、コンクリート中を伝播する振動は異なっている。

4. 間隙通過性に及ぼす影響

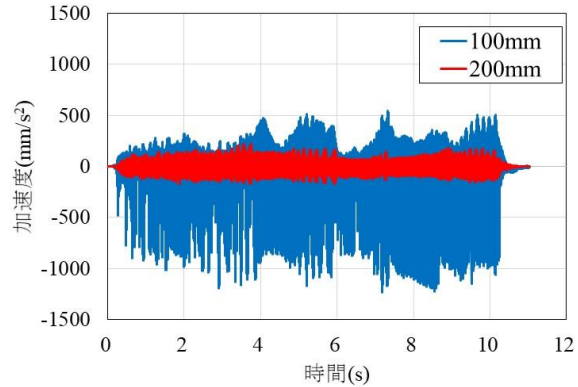
梁ら¹¹⁾は、同一スランプのコンクリートであっても、

表-4 加速度の計測結果

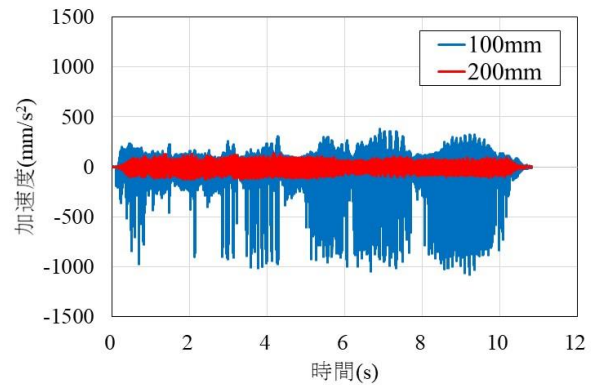
細骨材率 (%)	平均加速度(mm/s ²)	
	100mm	200mm
44	221	75
50	208	58
58	122	35



(a) 細骨材率：44%



(b) 細骨材率：50%



(c) 細骨材率：58%

図-7 細骨材率の違いによる加速度波形

配合条件が異なる場合、締固め特性は変化するとしており、締固め完了エネルギーが異なると指摘している。そこで、締固め完了エネルギーの算定式として提案されている式(2)^{8,9)}を用いて、細骨材率の違いとコンクリートの振動エネルギーについて検討した。

$$E_t = \frac{\rho \cdot \alpha_{max}^2}{4\pi^2 \cdot f} \cdot t \quad \text{式(2)}$$

ここで、 E_t はコンクリートの t 秒間あたりの振動エネルギー(J/L)、 t は振動時間(s)、 ρ は試料の単位体積重量(kg/L)、 α_{max} は最大加速度(m/s^2)、 f は振動数(Hz)である。

既往の研究^{4,5)}において、フレッシュコンクリート中を伝播する波動の振動数は、無負荷時の内部振動機の振動数と等しく、コンクリートの配合や振動時間によらず、ほぼ変化しないことが確認されている。そのため、算出の際の振動数は、内部振動機の振動数である、230Hz とし、配合に関わらず一定であると仮定した。また、加速度には計測により算出した平均加速度を用いた。

上記の仮定および算定式から、単位時間当たりのコンクリートの振動エネルギーを算出した。算出した振動エネルギーを、表-5に示す。式(2)に示すように、振動エネルギーは加速度の2乗に比例するため、加速度が変化した場合、振動エネルギーはより顕著に変動する。算定結果から、粗骨材量が多いほど、コンクリート中を伝わる振動は大きく、振動エネルギーが大きくなっていることが考えられる。一方、振動エネルギーと間隙通過速度には相関性が認められない。つまり、振動エネルギーの大小のみが間隙通過速度に影響を及ぼしているわけではないことがわかる。

本試験で得られた間隙通過速度と粗骨材量の関係を、図-8に示す。一般に、粗骨材量が多くなると、コンクリートの間隙通過性などのコンクリートの施工性能が低下する。本試験結果においても、粗骨材量が多い場合には、間隙通過速度が低下しており、粗骨材が鉄筋間の円滑な通過を妨げていることが推測される。粗骨材量が少ない場合、ケース①では、間隙通過性が低下する。これは、単位水量を一定としたまま細骨材率を大きくしているため、コンクリートの粘性が大きくなり、振動エネルギーが小さくなったためと考えられる。一方、ケース②では、間隙通過性の低下は見られないものの、バラつきが大きくなっている。これは、細骨材率が大きくなるほど単位水量も大きくしているため、材料分離が生じやすくなっていることが要因と考えられる。以上の結果、振動締固めを必要とする同一スラブのコンクリートの間隙通過性に対する、コンクリートの振動エネルギーと粗骨材量の相互のバランスの重要性が再認識された。

C.T.Kennedy¹²⁾は、フレッシュコンクリートをペーストと骨材の混合物として捉え、各骨材粒子はペースト膜で覆われているとする、余剰ペースト理論を提唱した。骨材粒子を覆う膜を形成するペーストは余剰ペースト、その体積は余剰ペースト体積、余剰ペースト体積を骨材の全表面積で除した値は平均余剰ペースト膜厚(以下、余剰

表-5 コンクリートの振動エネルギー

細骨材率 (%)	算出した振動エネルギー($\mu\text{J/L}$)		間隙通過速度 (mm/s)
	100mm	200mm	
44	12.3	1.4	9.8
50	10.8	0.8	41.4
58	3.7	0.3	31.9

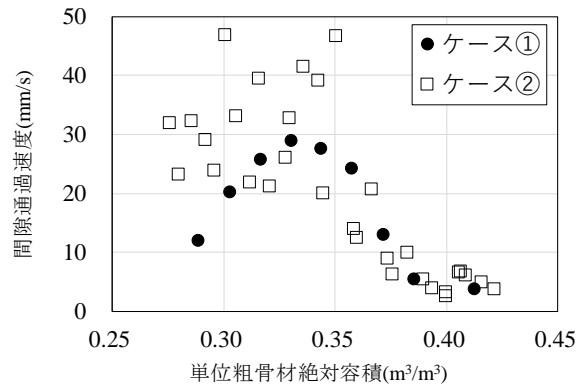


図-8 粗骨材量と間隙通過速度の関係

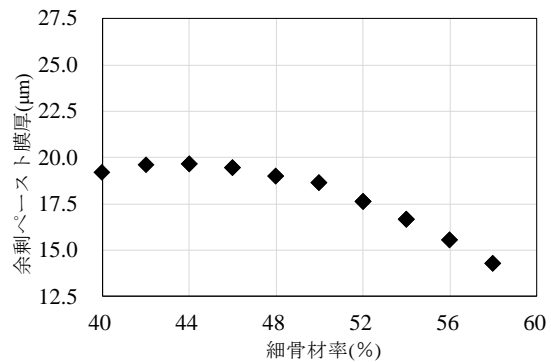


図-9 細骨材率と余剰ペースト膜厚(ケース①)

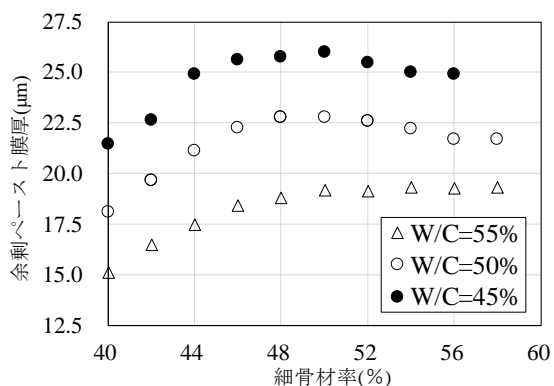


図-10 細骨材率と余剰ペースト膜厚(ケース②)

ペースト膜厚と称す)とされ、松山下¹⁰⁾は、細・粗骨材混合実積率を最大にする細骨材率は、余剰ペースト膜厚が最大になる細骨材率であるとし、さらに、余剰ペースト膜厚が最大となる細骨材率において振動締固めが最も容易になると報告している。

本試験における細骨材率と余剰ペースト膜厚の関係

を、図-9 および図-10 に示す。余剰ペースト膜厚は、松下ら¹⁰⁾に倣って算出した。ケース①では細・粗骨材混合実積率が最大となる細骨材率と余剰ペースト膜厚が最大となる細骨材率は一致していないが、ケース②では一致している。ケース①については、余剰ペースト膜厚が最大となる細骨材率は44%であり、間隙通過速度が最大となる細骨材率と一致していない。ケース②については、いずれの水セメント比においても、余剰ペースト膜厚が最大となる細骨材率は50%程度であり、間隙通過速度が最大となる細骨材率の範囲にある。なお、ケース①において余剰ペースト膜厚が最大となる細骨材率と間隙通過速度が最大となる細骨材率が一致していない要因については、今後の課題とする。

以上より、本研究の範囲では、間隙通過性が良好となる配合設計を行う場合、余剰ペースト膜厚よりも、細・粗骨材混合実積率が最大となる細骨材率を選定の方が適切であると考えられる。なお、骨材の種類の違いや混和剤の種類の違いなどが間隙通過性に及ぼす影響については、今後の課題とする。

5. まとめ

本研究は、振動締固めを必要とするコンクリートを対象とし、細骨材率を変えた配合に対して、混和剤の添加量または単位水量の増減によって同一スランプとなるよう調整したコンクリートを用いて、間隙通過性を検討した。さらに、細骨材と粗骨材を合わせた混合物の実積率と、間隙通過性の関係について検討した。以下に、本実験の範囲内で得られた知見を示す。

- (1) 細・粗骨材混合実積率が最大となる細骨材率を選定することで、コンクリートの間隙通過性が最大となる。
- (2) スランプが最大となる細骨材率と、細・粗骨材混合実積率が最大となる細骨材率は異なる。
- (3) 粗骨材量が多いほど、間隙通過速度は低下する。一方、粗骨材量が少ない場合には、混和剤でスランプを調整した場合と単位水量でスランプを調整した場合で挙動が異なる。すなわち、混和剤でスランプを調整した場合には、間隙通過速度が明らかに低下し、単位水量で調整した場合には、バラつきは大きくなるものの、間隙通過速度の低下は小さい。
- (4) 単位水量によりスランプを調整した場合、余剰ペースト膜厚が最大となる細骨材率は間隙通過速度が最大となる細骨材率の範囲内である。一方、混和剤によりスランプを調整した場合、余剰ペースト膜厚が最大となる細骨材率は間隙通過速度が最大となる細骨材率と一致しない。

謝辞

本実験の遂行にあたり、国士舘大学の構造・維持管理工学研究室の小貫陸斗氏、藤井椋介氏に多大なるご協力を頂きました。ここに感謝の意を示します。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリートライブラリー148，コンクリート構造物における品質を確保した生産性向上に関する提案，2016.12
- 2) 土木学会：コンクリートライブラリー145，施工性能にもとづくコンクリートの配合設計・施工指針[2016年版]，2016.5
- 3) 中村敏之，橋本紳一郎，佐伯啓介，北野潤一：水セメント比および細骨材率が振動条件下におけるコンクリートの充填性に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.38，No.1，pp.1383-1388，2016
- 4) 岩崎訓明，坂本信義：コンクリート中における振動伝播に関する基礎研究，土木学会フレッシュコンクリートの物性とその施工への適用に関するシンポジウム論文集，pp.113-118，1986.3
- 5) 村田二郎：フレッシュコンクリートの挙動に関する研究，土木学会論文集，Vol.378，V-6，pp.21-33，1987.2
- 6) 岩崎訓明：振動によるフレッシュコンクリートの液状化と内部振動機の作用領域に関する考察，土木学会論文集，No.426，V-14，pp.1-18，1991.2
- 7) 村田二郎：コンクリート振動機の知識，コンクリート工学，Vol.33，No.8，pp.26-34，1995.8
- 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 E，Vol.62，No.2，pp.416-427，2006.6
- 10) 松下博道，三宅淳一：コンクリートの配合設計と品質管理，コンクリート新聞社，2013
- 11) 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.1393-1398，2009
- 12) C.T.Kennedy：The Design of Concrete Mixtures，Proceedings of the ACI，Vol.36，pp.373-400，1940