

報告 舗装コンクリートのフローテーブルによる施工性評価の検討

加藤 祐哉^{*1}・森濱 和正^{*2}・古賀 裕久^{*3}・勝畑 敏幸^{*4}

要旨：振動台式コンシステンシー試験で得られる沈下度は、スランプでは必ずしも表現できない振動締固め時の舗装コンクリートのコンシステンシー評価指標であるが、レディーミクストコンクリート工場等にあまり普及していない。そこで、現場で準備のしやすい器具を用いたフローテーブルを用いた締固め性・変形性試験を検討した。その結果、打撃 80 回の締固め率および締固め率 100%時の打撃回数、水平方向の広がり易さなどが、沈下度 10～30 秒（スランプでは約 2.5cm～8cm）程度の範囲で評価に利用できる可能性があった。

キーワード：コンクリート舗装、沈下度、振動台式コンシステンシー試験、フローテーブル

1. はじめに

コンクリート舗装は国内のシェアが 5%程度であるが、耐久性が高く、アスファルト舗装よりもライフサイクルコストの低減が期待できる¹⁾。舗装の維持管理における予算的制約が全国的に年々厳しくなっており、コンクリート舗装の普及促進が期待されている。

コンクリート舗装の普及促進に向けて、根拠が不明確なまま残されている仕様規定を改め、性能規定化を進めることで、舗装コンクリートの高い耐久性を確保したまま材料面や施工面の自由度を拡大していくことが重要と考えられる。筆者等は、東京農業大学、(一社)セメント協会、太平洋セメント(株)、日本道路(株)との共同研究を実施し、骨材の最大寸法や種類、舗装コンクリートのコンシステンシー等、どこまで自由度を確保できるかを検討している²⁾。

2. 舗装コンクリートの施工性に関する課題

舗装コンクリートの配合設計は、舗装設計施工指針の配合参考表³⁾等を用いて単位水量や単位粗骨材かさ容積（以下、かさ容積）を仮設定して行われるのが一般的である。この配合参考表は、施工機械の振動締固めを考慮した振動台式コンシステンシー試験により得られる沈下度 30 秒（スランプでは約 2.5cm）の AE コンクリートを目標としたものである。

沈下度は硬練りの舗装コンクリートに適したコンシステンシー指標であるが、振動台式コンシステンシー試験の機器はレディーミクストコンクリート工場等で普及しておらず、スランプを指標として配合設計や管理が行われているのが現状である。しかし、スランプは振動等の締固めエネルギーを受けた状態の舗装コンクリートの性状を必ずしも十分には表現できないことに留意する必要がある。

一方、舗装コンクリートが締固めエネルギーを受けた際のコンシステンシーをレディーミクストコンクリート工場等で準備のしやすい器具を用いて測定・検討した例として、佐藤らによるフローテーブルによる締固め性・変形性試験の検討がある⁴⁾。そこで本報告では、この試験を種々の舗装コンクリートに適用し、沈下度で表現されるような締固め時の施工性評価として利用できるのではないかと期待し、その適用性を検討した。

3. 使用材料

3.1 材料の種類

今回の検討では、表－1 に示す 5 種類の粗骨材と 1 種類の細骨材を用いた。硬質砂岩 A は粒径が 5～20mm（2005 と表記）と 5～40mm（4005 と表記）の 2 種類を用いた。骨材以外の使用材料は、セメントは普通ポルトランドセメント（密度 3.16g/cm³、ブレン比表面積 3,380cm²/g）、コンクリート用化学混和剤として AE 減水剤（リグニンスルホン酸化合物とポリカルボン酸エーテルの複合体）と空気量微調整用の混和剤として AE 剤（変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤）を使用した。

3.2 骨材の基本性状

骨材の基本性状を表－2 に示す。高炉スラグの C20 は多孔質であり、吸水率が他に比べて高かった。電気炉酸

表－1 使用した骨材

骨材の種類			記号	粒度範囲
粗骨材	碎石	硬質砂岩	A20	2005
			A40	4005
		石灰石	B20	2005
	スラグ骨材	高炉スラグ	C20	2005
		電気炉酸化スラグ	D20	2005
細骨材		川砂	—	—

*1（国研）土木研究所 先端材料資源研究センター（正会員）

*2（国研）土木研究所 先端材料資源研究センター（正会員）

*3（国研）土木研究所 先端材料資源研究センター（正会員）

*4（国研）土木研究所 先端材料資源研究センター（元交流研究員）（正会員）

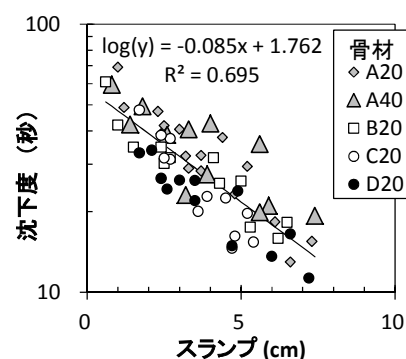
表－2 使用した骨材の物性

骨材の種類	粒度範囲	表乾密度 (g/cm ³)	絶乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	単位容積質量 (kg/L)	実積率 (%)	粗粒率	微粒分量 (%)	安定性 損失 質量 (%)	すり へり 減量 (%)	破砕値 (%)
	記号										
粗骨材	A20	2005	2.674	2.664	0.39	1.61	60.5	6.71	1.1	1.9	12.8
	A40	4005	2.677	2.669	0.31	1.64	61.6	7.31	1.2	1.1	12.5
	B20	2005	2.699	2.685	0.51	1.59	59.1	6.94	0.5	3.1	22.9
	C20	2005	2.659	2.577	3.17	1.51	58.5	6.33	0.6	1.5	25.9
	D20	2005	3.720	3.689	0.84	2.10	56.8	6.27	0.1	2.6	15.4
細骨材			2.560	2.515	1.79	1.73	66.9	2.80	1.2	5.1	—

表－3 配合条件 (A20 の場合)

目標 スラン プ (cm)	水セ メン ト比 (%)	単位 水量 (kg/m ³)	単位粗骨材かさ容積			
			0.62	0.67	0.72	0.76
			細骨材率 s/a (%)			
2.5	45	144	47.3	43.1	38.9	45.5
5.0		146	47.1	42.8	38.6	35.1
8.0*		152	46.3	42.0	37.7	34.2
10.5		157	45.6	41.3	36.9	33.4

*目標スランプ 8.0cm は A20 のみ実施した。



図－1 スランプと沈下度の関係

化スラグの D20 は鉄分が多く他に比べて密度が高い。C20 は吸水率が他に比べて高いが、JIS A 5011-1 の基準は満足した。B20 と C20 はすりへり減量 (JIS A 1121) が大きい。舗装施工便覧で示される基準 35%以下⁵⁾を満足した。本検討で用いた骨材は石灰石やスラグ骨材を含め、骨材試験結果からはコンクリート舗装に問題無く使用できると考えられる。また、既報⁶⁾ですりへり減量と破砕値 (BS 812) の間に高い相関が認められたが、本検討でも良い相関を示し、BS 812 は JIS A 1121 の代替になり得る可能性があると考えられる。

4. 配合およびフレッシュ性状

4.1 配合

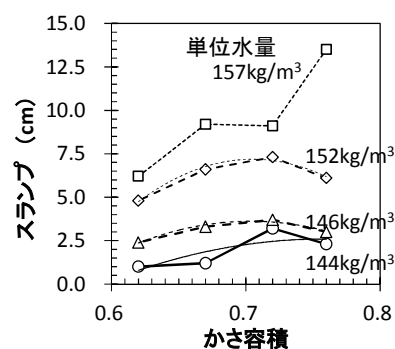
今回の検討では、水セメント比を 45%に固定し、粗骨材ごとに目標スランプを 3 水準 (A20 のみ 4 水準)、かさ容積を 4 水準変化させたコンクリートを用いた (12 または 16 配合/骨材)。かさ容積が 0.72 のときに目標スランプとなるように骨材ごとに単位水量を定めた。表－3 に例として粗骨材に A20 を用いた場合の配合条件を示す。また、空気量が 4.5%±1%となるように混和剤で調整した。

4.2 フレッシュ性状

スランプと沈下度の関係を図－1 に示す。なお、目標スランプが大きいと沈下度でコンシステンシーの違いを定量的に評価することが困難と考えられたため、10.5cm の場合は測らなかった。単位水量と沈下度の対数 (log 沈下度) の関係は直線的であると考えられている³⁾。本検討では単位水量の他にかさ容積も変化させているため、スランプと沈下度の対数 (log 沈下度) で関係を表現し

表－4 回帰式から求めた沈下度 (秒)

骨材	スランプ (cm)			
	2.5	5.0	8.0	10.5
A20	41.8	23.9	12.2	7.0
A40	39.9	27.2	17.1	11.7
B20	34.4	22.0	12.9	8.3
C20	34.8	16.7	6.9	3.3
D20	28.0	18.1	10.7	6.9
全骨材	35.4	21.7	12.1	7.4



図－2 かさ容積とスランプの関係 (A20)

てみると、概ね直線関係を示した。

スランプと沈下度の関係は骨材ごとに差があったため、骨材ごとおよび全骨材平均で回帰式を作成し、スランプに対応した沈下度を求めた (表－4)。同一スランプのとき、D20 がやや沈下度が小さく、A20 がやや大きかった。特に D20 は密度が他の骨材よりも大きく、振動下で骨材が沈降してモルタルが浮上し易く、沈下度が小さい傾向を示したと考えられる。スランプ 2.5cm は沈下度で 30 秒程度と言われているが、本検討においては全骨材

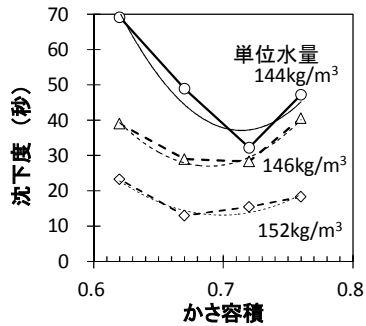


図-3 かさ容積と沈下度の関係 (A20)



左：試験器具 右：沈下量の測定
写真-1 締固め性試験の状況



写真-2 広がり測定

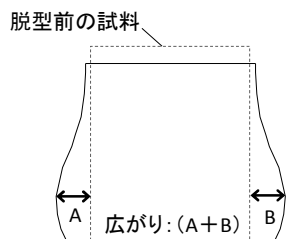


図-4 広がり定義

平均で 35.4 秒であった。

かさ容積とスランプの関係について、例として粗骨材に A20 を用いたものについて図-2 に示す。かさ容積が 0.72 のときに極力目標スランプとなるよう単位水量を決定したため、かさ容積を小さくすると細骨材率が上がりスランプが小さくなる傾向を示した。また、かさ容積を 0.72 より大きくすると、単位水量が 152kg/m³ 以下の硬い配合では、粗骨材が占める体積が大きくなって変形にくくなり、スランプが減少に転じた。なお、A20 の単位水量が 157kg/m³ と比較的大きな配合では、かさ容積が大きくなるほどスランプが増加していく傾向を示すものがあった。単位水量が多く、更にかさ容積の大きいものは細骨材率が少なく材料分離が生じ易いことなどが原因と考えられる。図には示さないが他の骨材の場合も同様の傾向を示した。

かさ容積と沈下度との関係 (A20 の例) を図-3 に示す。単位水量が 146kg/m³ 以下の場合にはかさ容積を 0.72

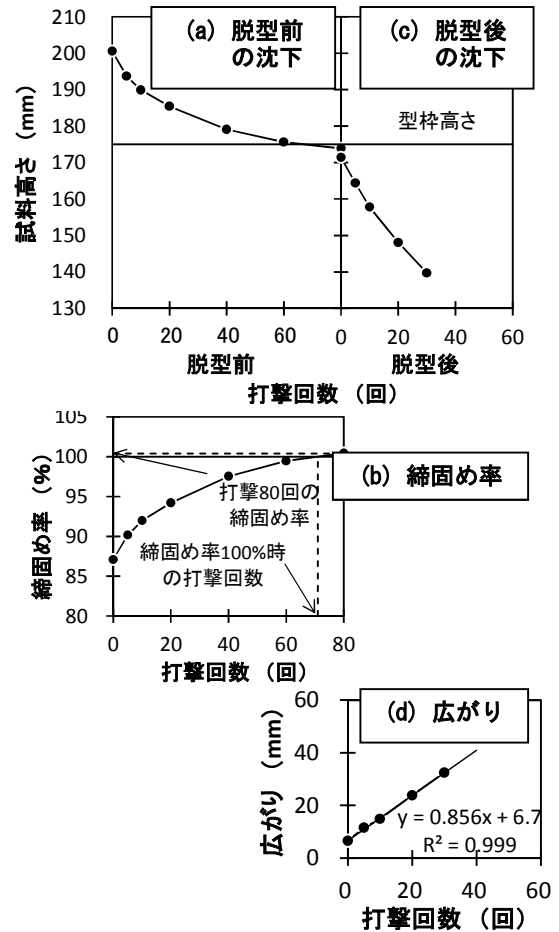


図-5 打撃回数と沈下量の関係の例

より小さくすると沈下度が増加し、0.76 にかさ容積が大きくなると沈下度は再び増加傾向を示した。単位水量が 152kg/m³ の配合を含めても、二次回帰曲線で最小沈下度を得る最適かさ容積は 0.69~0.71 程度であった。また、沈下度は硬いコンクリートに適した指標であり、スランプとは対照的に、単位水量の小さい配合でかさ容積による変化の傾向が明瞭であった。

5. フローテーブルを用いた締固め性・変形性試験

5.1 試験方法

次に、4 章の舗装コンクリートを用いてフローテーブルによる締固め性・変形性試験を実施した。

本試験はスリップフォーム工法用のコンクリートの品質管理のために検討された方法⁵⁾で、本報告では次の手順で試験を実施した。

- ・フローテーブルに CBR 供試体作製用モールド (φ 150×175mm) とカラー (約 φ 150×55mm) を載せた (写真-1 左)。
- ・試料が 100% 締め固まったとき (締固め率 100%)、試料上面がモールドの高さとなるような量を計量し、モールドに 6 層に分けて、各層を均しながら詰めた。

- ・ 締固め性試験：フローテーブルにより打撃を 5, 10, 20, 40, 60, 80 回加えて 100mm の落下運動をさせ、打撃回数ごとに試料の沈下量を測定した（写真－1 右）。
- ・ 変形性試験：締固め性試験終了後、モールドを脱型し、試料の高さと広がり を測定した。その後フローテーブルにより試料が崩れるまで打撃を 5, 10, 20, 30, 40 回加え、打撃回数ごとに試料の高さと広がり を測定した（写真－2 および図－4）。なお、打撃 40 回に達する前に試料が崩れた場合は、そこで測定を終了した。

5.2 締固め性・変形性の評価方法

試験結果の例として、A20 を用いた目標スランプ 2.5cm、かさ容積 0.67 の試料の場合を図－5 に示す。図－5(a) は脱型前の打撃回数と試料高さ、図－5(b) は図－5(a) より締固め率を求めた結果である。図－5(c) は脱型後の打撃回数と試料高さの関係である。図－5(d) は脱型後の打撃回数と水平方向への広がり の関係を示している。なお、図－5 の例では 30 回で試料が崩れたため、測定は 30 回で終了している。

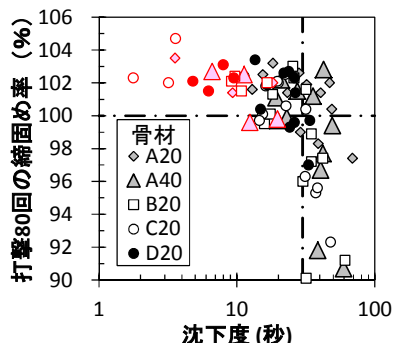
本試験からは、種々の指標を得ることができるが、試験最大の打撃回数（80 回）における締固め率は、一定のエネルギーで試料がどの程度締固め固まるか示すもので、施工性の評価検討に用いた。また、配合によっては少な

い打撃回数で締固め率が 100% 程度に達し、80 回の締固め率では差異がわかりにくいものもあると考えられたため、締固め率 100% に達するのに必要なエネルギー（打撃回数）も施工性の評価検討に用いた。これは試料が終始モールドによる拘束下ではあるが、一定の締固めになるまでの振動時間（沈下度）を測定する振動台式コンシステンシー試験の状況に近い。打撃回数 80 回でも締固め率 100% に達しない配合については、図－5(b) で傾きがほぼ直線となった範囲で作成した回帰直線を描き、それを外挿して締固め率 100% となる打撃回数を求めた。

脱型後における、打撃回数と水平方向の広がり の関係は、エネルギー下における試料の変形し易さを示し、振動台式コンシステンシー試験の円筒により試料が拘束される前の試験前半の状況に近い。広がり は、図－5(d) に示すように、今回の検討では概ね直線状のグラフが描けた。そこで、回帰直線の傾きを算出（図－5(d) では 0.856）して打撃 1 回当たりの広がり 易さ（mm/回）とし、施工性評価の検討を行った。

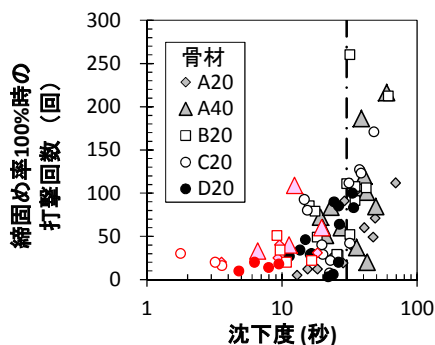
5.3 各指標と沈下度との関係

沈下度と打撃 80 回の締固め率の関係を図－6 に示す。スランプとの関係についても参考として図－7 に示す。沈下度が小さい程締固め率も大きい傾向が確認できる。



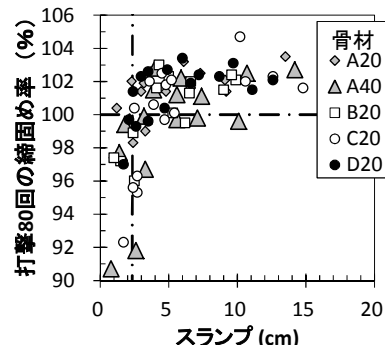
※図中の赤で表示した点は目標スランプが 10.5cm と大きい配合で、回帰式から算出した沈下度（表－4）を用いた値である。

図－6 沈下度と打撃 80 回の締固め率の関係

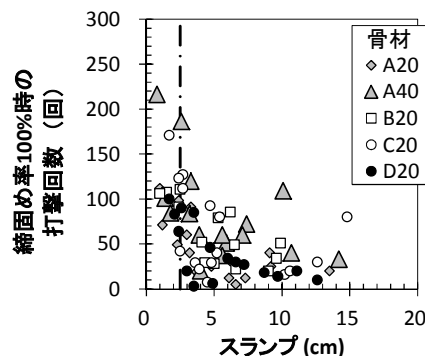


※図中の赤で表示した点は目標スランプが 10.5cm と大きい配合で、回帰式から算出した沈下度（表－4）を用いた値である。

図－8 沈下度と締固め率 100% 時の打撃回数の関係



図－7 スランプと打撃 80 回の締固め率の関係



図－9 スランプと締固め率 100% 時の打撃回数の関係

沈下度が 30 秒程度以下（スランプでは約 2.5cm 以上）の配合では締固めが十分に生まれ、締固め率が頭打ちになっている。なお、締固め率が 100%を超えているものが見られる。これは、打撃を重ねると空気量の低下が考えられることと、特に軟らかい配合においてはペースト分がモールドから多少しみ出しているのが確認されたことなどが原因として考えられる。

一方、沈下度 30 秒程度以上（スランプ 2.5cm 程度以下）となると、締固めに要するエネルギーが不足していることが分かるが、沈下度が僅かに変化した場合でも締固め率が大きく変化するようになってきており、この範囲では施工性の評価が難しくなっているものと考えられる。骨材ごとの目立った差は見られなかった。

次に、沈下度と締固め率 100%時の打撃回数の関係を図-8 に示す。スランプとの関係を示す参考図は図-9 のとおりである。沈下度が小さい程、締固め率 100%に要する打撃回数も少なくなる傾向を示した。骨材ごとの差はあまり認められなかった。締固め 100%時の打撃回数においても、沈下度 30 秒以上（スランプ 2.5cm 程度以下）の範囲において、打撃 80 回の締固め率と同様に沈下度が僅かに変化した場合でも大きく変化するようになった。詳細な検討を行う必要があるが、沈下度 30 秒以上（スランプ 2.5cm 程度以下）では、施工性の評価には利用し

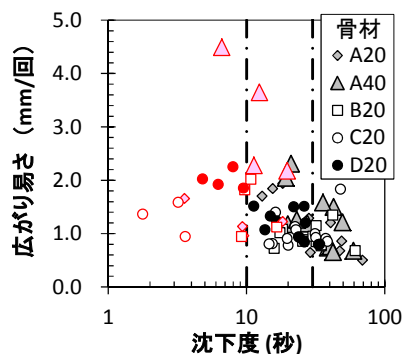
にくいと考えられる。

次に沈下度と水平方向への広がり易さの関係を図-10 に示す。スランプとの関係を示す参考図は図-11 のとおりである。沈下度が小さい程、広がり易さが増加している。骨材ごとの差は明確ではなかった。図-11 より、スランプが 8cm（表-4 より沈下度 8~10 秒程度）を超えると広がり易さが急激に増大するものが現れた。沈下度が同等でも広がり易さが大きくばらつく結果が出たため、詳細な検討を重ねる必要があるが、沈下度で表現される性状評価を本試験で行う上では、広がり易さは沈下度 10 秒程度以下の範囲では、利用しにくい可能性がある。

これらの結果より、本検討においては、フローテーブルを用いた締固め性・変形性試験は、沈下度 10 秒~30 秒（スランプでは概ね 2.5cm~8cm）程度の範囲においては、振動台式コンシステンシー試験（沈下度）と類似した結果が得られる試験として、施工性評価に利用できる可能性があると考えられる。

5.4 各指標とかさ容積との関係

単位水量一定の条件で、かさ容積と打撃 80 回の締固め率との関係を求めた。例として A20 の試験結果について図-12 に示す。単位水量が 152kg/m³以上の配合では、かさ容積に係わらず締固め率がほぼ 100%に達しており、グラフは横ばいもしくはかさ容積が大きくなるほど若干



※図中の赤で表示した点は目標スランプが 10.5cm と大きい配合で、回帰式から算出した沈下度（表-4）を用いた値である。

図-10 沈下度と広がり易さの関係

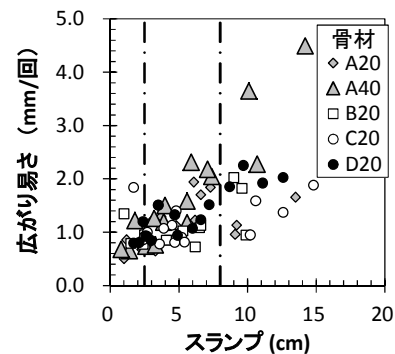


図-11 スランプと広がり易さの関係

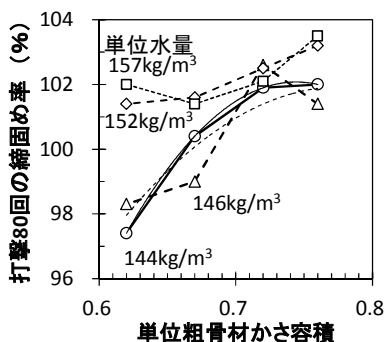


図-12 かさ容積と打撃 80 回の締固め率との関係 (A20)

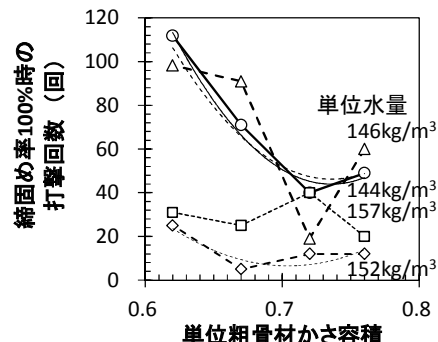


図-13 かさ容積と締固め率 100%時の打撃回数との関係 (A20)

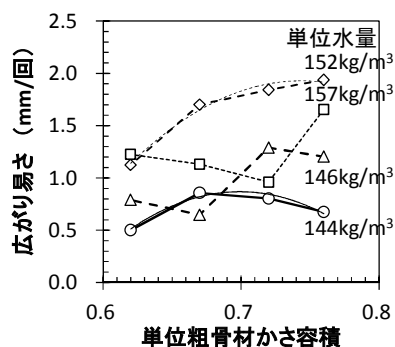


図-14 かさ容積と広がり易さとの関係 (A20)

表-5 回帰式から求めた最適かさ容積の比較

骨材	単位 水量 (kg/m³)	最適かさ容積			
		沈下 度	打撃 80 回の 締固め 率	締固め 率 100% 時打撃 回数	広がり 易さ
A20	144	0.71	0.74	0.74	0.70
	146	0.69	0.78	0.74	—
	152	0.70	—	0.70	0.74
A40	133	0.73	0.69	0.69	—
	140	—	—	0.72	—
B20	138	0.72	—	—	0.70
	143	0.74	0.72	0.74	—
C20	150	—	0.74	0.74	—
	157	0.74	—	0.70	0.68
D20	153	0.71	0.71	0.71	—
	159	0.76	0.72	0.73	—

増加する傾向であった。単位水量 146kg/m^3 以下の配合については、上に凸の形状を示し、二次回帰曲線の最大値から締固め率が最大となる最適かさ容積を求めると $0.74 \sim 0.78$ となった。

単位水量一定の条件で、かさ容積と締固め率 100% 時の打撃回数の関係を求めた結果 (A20) を図-13 に示す。単位水量が 152kg/m^3 以上の軟らかい配合は締固め率 100% 時の打撃回数は少なく、グラフはほぼ横ばいであった。単位水量が 146kg/m^3 以下の硬い配合は下に凸の形状を示した。A20 では二次回帰曲線の最小値より、必要打撃回数が最小となる最適かさ容積は $0.70 \sim 0.74$ となった。

かさ容積と水平方向の広がり易さとの関係を求めた結果 (A20) を図-14 に示す。単位水量の大きな軟らかい配合の方が広がり易さが大きい傾向を示した。かさ容積を変化させた場合は、単位水量 144kg/m^3 と 152kg/m^3 については、若干上に凸のグラフ形状が見られ、二次回帰曲線から、本検討で期待される広がり易さが最大となる場合の最適かさ容積を求めると $0.70 \sim 0.74$ となった。図には示さないが、A40、D20 では最適かさ容積は求められなかった。

沈下度、打撃 80 回の締固め率、締固め率 100% 時の打撃回数、広がり易さの場合の最適かさ容積を比較すると、

表-5 に示すとおりである (本検討の範囲内で最適かさ容積が明確にできなかったもの等は「—」としている) が、今回の検討の範囲では、4 つの性状が得られる最適かさ容積は近い値をとっているが、本検討においては締固め率 100% 時の打撃回数が比較的多くの最適かさ容積を求めることができた。更なる検討が必要であるが、これらの指標は、沈下度と同様に最適かさ容積を得るために利用できる可能性があるものと考えられる。

6. まとめ

フローテーブルを用いた締固め性・変形性試験の締固め時における施工性評価への適用可能性を検討した結果、次のことが分かった。

- (1) 締固め性試験で得られる打撃 80 回の締固め率および締固め率 100% 時の打撃回数は、沈下度 30 秒程度を上限、スランプ 2.5cm 程度を下限とする範囲において、施工性評価や最適かさ容積を得るために利用できる可能性があることが分かった。
- (2) 変形性試験においては、水平方向の広がり易さは沈下度 10 秒程度を下限、スランプ 8cm 程度を上限とする範囲のコンクリートにおいて、締固め時における施工性評価や最適かさ容積を得るために利用できる可能性があることが分かった。
- (3) (1)、(2) より、フローテーブルを用いた締固め性・変形性試験は、沈下度 10 秒～30 秒程度、スランプ 2.5cm ～8cm 程度の範囲で、舗装用コンクリートの施工性評価として利用できる可能性があることが分かった。なお、本検討の結果は締固めエネルギーを受けた状態の施工性評価に利用できる可能性を示せた段階であるため、今後更なる検討が必要である。

参考文献

- (1) (社)日本道路協会：コンクリート舗装に関する技術資料, pp.7-12, 2009.8
- (2) 森濱和正, 渡辺博志, 石田征男, 瀧波勇人：粗骨材の最大寸法 20mm, スランプ 5cm の舗装コンクリートの配合に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.1363-1368, 2013
- (3) (社)日本道路協会：舗装設計施工指針, p252, 2006.2
- (4) 佐藤聡明, 鎌田修, 坂本康文：舗装用スリップフォームコンクリートの施工性を考慮したフレッシュ性状評価に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.1253-1258, 2011
- (5) (社)日本道路協会：舗装施工便覧, pp.38-49, 2006.2
- (6) 森濱和正ほか：各種骨材を用いた舗装コンクリートの配合試験, 土木学会論文集 E1 (舗装工学), Vol.69, No.3 (舗装工学論文集第 18 巻), pp.I_81-I_86, 2013