

論文 理論モデルを用いたポーラスモルタルの配合設計法に関する研究

梶尾 聡^{*1}・國府 勝郎^{*2}・宇治 公隆^{*3}

要旨：充填性状に着目した理論モデルより導いた空隙構造を定式化した理論式を応用し、特殊な多孔質材料を用いないペーストと細骨材からなる空隙を連続して形成させたポーラスモルタルについて実験的検討を行った。実験の結果、ペーストの全体積に対する細骨材に均等に被覆する体積の割合を求め、これに加えて細骨材の実積率およびペースト細骨材空隙比からなる理論式により全空隙量を推定できることを示した。さらに、硬化後の性能として全空隙量と圧縮強度および保水量の関係を示し、同一保水量に対する圧縮強度は高水結合材比の方が大きくなる傾向を示し、所要の性能となる全空隙量から配合を導く手法を提案した。

キーワード：ポーラスモルタル, 配合設計, 空隙量, ペースト細骨材空隙比, 圧縮強度, 保水性

1. はじめに

近年、地球温暖化とともに都市部の気温が郊外に比べて高くなるヒートアイランド現象の弊害が顕在化しており、舗装路面の高温化がその一因として挙げられている。このため、都市部における歩道空間や沿道の熱環境の改善およびヒートアイランド現象の緩和を目的として路面温度を低減させる舗装技術の開発が行われている^{1),2)}。この技術のうち、保水性舗装は舗装内部に保水機能を有し、気化熱を利用して舗装温度の上昇と舗装体への蓄熱を抑制する舗装である。保水性舗装は、吸水・保水性能を有する特殊な多孔質材料を用いるものと、連続空隙を形成して吸水・保水性能を付与するものがある。後者の技術は、粗骨材粒子間空隙を利用して透水性を付与させるために連続した空隙を形成させた透水性舗装の技術を応用し、連続空隙の空隙径を小さくして保水性や揚水性の機能を付与させる技術である。

本研究は、ポーラスコンクリート技術を応用し、特殊な多孔質材料を用いないペーストと細骨材からなるモルタルに、細骨材粒子間空隙を利用して連続した空隙を形成させたポーラスモルタル(以下、POM)について検討したものである。既に筆者らは、POMの配合設計法を提案し、POMが毛管現象による揚水性能や保水性能を有すること、および気化熱を利用して表面温度を低減させる効果があることを報告した^{3),4)}。本論文は、充填性状に着目した理論モデルより導いた空隙構造を定式化したポーラスコンクリートの空隙量式^{5),6)}をPOMに応用し、所要の空隙を形成する配合設計法を提案すると共に、配合条件や使用材料が空隙量や硬化後の性能に及ぼす影響について評価を行ったものである。本論文で対象としたPOMは、吸水性を有するポリマー樹脂や多孔質骨材などの特殊な材料を使用せずに、従来からのセメント、

骨材および一般的な混和材料や混和剤だけを使用し、フルコンパクションとなる締固め条件で空隙を形成させたものとした。

2. 実験概要

実験は細骨材の種類を変化させた際のPOMのフレッシュ性状および硬化後の強度特性や保水性能を実験により確認した。本報は、既報³⁾の結果に混和剤および細骨材の異なるPOMの結果を加え、さらにペースト細骨材空隙比(K_p)⁷⁾と空隙量との関係を理論モデルから求めた関係式を用いて検討したものである。 K_p と締固め条件がPOMの空隙量に及ぼす影響を確認するため、理論上では空隙が得られない K_p も試験水準とした。 K_p は細骨材粒子間に形成される空隙量に対するペーストの体積の割合であり、コンクリート 1m^3 中の単位細骨材量 V_s (m^3/m^3)、単位ペースト量 V_p (m^3/m^3)および細骨材の実積率 G_s とすると式(1)で示される。

$$K_p = \frac{V_p \times G_s}{V_s(1 - G_s)} \quad (1)$$

2.1 使用材料

POMの使用材料は、普通ポルトランドセメント(C, 密度 $3.16\text{g}/\text{cm}^3$)、ポーラスコンクリート用無機系特殊混和材(Ad, 密度 $2.26\text{g}/\text{cm}^3$)、高性能AE減水剤(SP)、水道水(W)および細骨材とした。細骨材はコンクリート用細骨材を7種類、粒度範囲 $5\text{mm}-2.5\text{mm}$ である道路用単粒度碎石7号を2種類とした。各骨材の物性値を表-1に示す。骨材は全て粒度調整などを行わずに使用した。S5はS2とS3を4:1に混合した混合砂である。

2.2 配合

POMの配合条件を表-2に示す。POMのバインダー

*1 太平洋セメント(株) 中央研究所技術企画部 (正会員)

*2 首都大学東京 名誉教授 工博 (正会員)

*3 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科 教授 工博 (正会員)

であるセメントペーストは、Ad を用いた場合、W/C=30% でフロー試験 (JIS R 5201) の落下運動させない 10 打フロー値が 402mm、材齢 28 日の圧縮強さ (JIS R 5201) が 77.8N/mm² であった。また、SP を用いた場合、W/C=20% で 0 打フロー値が 100mm、15 打フロー値が 133mm、5 × 10mm 供試体を用いた材齢 14 日の圧縮強度が 73.2N/mm² であった。

2.3 練混ぜ方法

POM の練混ぜは強制練りミキサーを用い、細骨材およびセメントをミキサーに投入し、15 秒間空練りを行った後、水を投入して 5 分間練り混ぜた。混和材は予めセメントと混合してセメントと同時に投入し、混和剤は予め水と混合して水と同時に投入した。

2.4 全空隙量測定試験

POM の全空隙量測定試験の方法を図 - 1 に示す。振動台は振動数 3000rpm、起振力 823N のものを用い、加振時間は 120 秒間とした。試験方法は 10 × 20cm 鋼製型枠に試料質量 W_{tp} (2.60kg) を投入し、4kg の錘を載せて振動をかけた後、POM の高さ H_{tp} および直径 D_{tp} を測定し、POM のかさ体積 V_{tp} (m³) を求めた。配合より空気は全くないものとして計算した POM の理論単位体積質量 T_c (kg/m³) を用いて、式(2)によりコンクリート 1m³ に対する全空隙量実測値 V_{vt} (m³/m³) を求めた。本試験方法で求められた POM の全空隙量実測値は、同等な振動エネルギーを与えた際の POM の残存空隙量を示し、加振時間はほぼフルコンパクション状態となる時間を設定した。

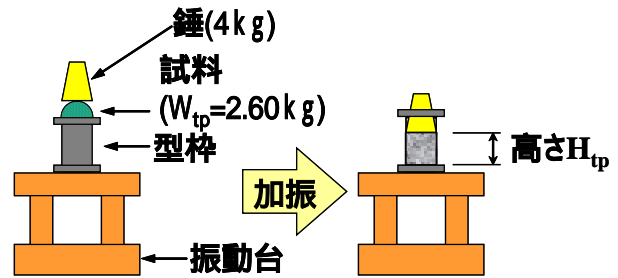


図 - 1 全空隙量測定試験

$$V_{vt} = 1 - \frac{W_{tp}}{V_{tp} \times T_c} \quad (2)$$

2.5 硬化後のポーラスモルタルの性能確認試験

硬化後の POM 供試体で性能を確認した試験を以下に示す。試験は S6 および S7 を用いた POM とした。

(1) 供試体の作製方法

既報³⁾では、供試体は予め設定した全空隙量となるように試料を量り取って作製したが、この方法は振動エネルギーの影響を含むことになる。本報では 2.4 節で作製した供試体を用いることとし、SP を用いた POM において供試体を 3 本作製した。

(2) 圧縮強度試験

供試体は作製翌日に脱型し、試験に供するまで 20 水中養生を行った。圧縮強度試験は材齢 14 日において JIS A 1108 に準拠して行った。POM 供試体高さは約 15cm であるため、JIS A 1107 表 1 の補正係数を用いて、高さ直

表 - 1 細骨材の物理的性状

種類	山砂	砕砂	海砂	細砂	混合砂	砕砂	山砂	砕石	砕石
記号	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	G1	G2
表乾密度 (g/cm ³)	2.61	2.70	2.59	2.88	2.68	2.63	2.58	2.63	2.64
吸水率 (%)	1.24	1.10	1.09	0.92	1.13	0.92	2.48	1.04	0.58
実積率	0.669	0.667	0.645	0.663	0.678	0.645	0.604	0.572	0.543
粗粒率	2.82	3.16	2.09	2.39	2.89	2.88	1.65	4.93	-
微粒分量 (%)	1.30	4.90	0.60	7.15	4.04	-	-	0.69	-

表 - 2 配合条件

細骨材	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	G1	G2
使用混和剤・材	Ad					SP		Ad	SP
混和剤・材量	C × 3.1%					C × 1.0%		C × 3.1%	C × 1.0%
K _p の範囲	0.40 ~ 1.00	0.40 ~ 0.80	0.40 ~ 0.60	0.40 ~ 0.80	0.40 ~ 0.80	0.41 ~ 0.56	0.47 ~ 0.60	0.40 ~ 0.80	0.54 ~ 0.66
水結合材比 (W/B) の範囲	24.6 ~ 45.0	30.0 ~ 60.0	30.0	30.0	30.0	20.0 ~ 30.0	20.0 ~ 30.0	30.0	20.0 ~ 30.0

径比が2となるように補正を行った。本報ではこの高さ補正した結果を圧縮強度として用いる。

(3) 保水量試験

最大保水量 WR (g/cm^3) は、供試体の乾燥質量 Wd_{tp} (g)、湿潤質量 Ww_{tp} (g) および体積 V_{tp} (cm^3) を測定し、式(3)により求めた。

$$WR = \frac{Ww_{tp} - Wd_{tp}}{V_{tp}} \quad (3)$$

乾燥質量は、供試体を作製翌日に脱型し、材齢7日まで気中放置した後、 40 ± 5 の乾燥炉内で24時間乾燥させた時点の質量とした。湿潤質量は、後述する揚水高さ試験後に 20 ± 2 の水中で24時間吸水させ、供試体を取り出して10秒間水が滴り落ちない程度まで水を切り、供試体表面の付着水を湿らせた布で拭いた直後の質量とした。

(4) 毛管上昇高試験

毛管上昇高 CH は、乾燥質量測定後に図-2に示す試験装置に供試体を設置し、水位を供試体底面から5mmの高さとなるように調節し、設置後24時間における供試体質量 Wc_{tp} を測定し、式(4)により求めた。

$$CH = \frac{Wc_{tp} - Wd_{tp}}{Ww_{tp} - Wd_{tp}} \times H_{tp} \quad (4)$$

3. ポーラスモルタルにおける空隙量の定式化

(1) ポーラスモルタルの空隙量式

既報^{5),6)}では、ポーラスコンクリートの粗骨材、モルタルおよび空隙の状態を模式化したモデルを提案し、このモデルから導いた空隙量と配合条件の関係を示す空隙量式について実験による検証を行い、精度良く回帰できることを確認した。本報では、このモデルをPOMに応用し、POMの空隙量式を導くこととした。POMの細骨材、ペーストおよび空隙量を模式化したモデル(図-3参照)は、ペーストは細骨材に均等に被覆するものと、細骨材粒子間に形成される空隙に充填されるものから成り立っていると考えている。ここで、全ペースト体積 V_p (m^3/m^3) に対する前者の細骨材に均等に被覆するペーストの体積の割合を β とすると、後者のペーストの割合は $1 - \beta$ で表すことができる。POMが細骨材に均等に被覆するペーストと細骨材から成り立っている場合、空隙量は細骨材の実積率 G_s を用いて $1 - G_s$ (m^3/m^3) となることから、式(5)が導かれる。

$$\beta V_p + V_s + (1 - G_s) = 1 \quad (5)$$

また、式(1)より式(6)を導き、式(6)を式(5)に代入すると、式(7)が求められる。

$$V_p = K_p \times V_s \times \frac{1 - G_s}{G_s} \quad (6)$$

$$V_s = \frac{G_s^2}{\beta(1 - G_s)K_p + G_s} \quad (7)$$

さらに、POMの全空隙量を V_v (m^3/m^3) とすると、全空隙量、細骨材体積およびペースト体積の和は $1m^3/m^3$ となることから、式(8)が成立する。

$$V_p + V_s + V_v = 1 \quad (8)$$

式(8)に式(6)および式(7)を代入して整理すると式(9)が導かれる。よって、POMの全空隙量を求める式は K_p の分数関数式となり、既報^{5),6)}のポーラスコンクリートの空隙量式の K_m を K_p に、 G_g を G_s とした形となった。

$$V_v = \frac{(1 - G_s)\{\beta(1 - G_s)K_p + G_s\}}{\beta(1 - G_s)K_p + G_s} \quad (9)$$

(2) 細骨材を被覆するペーストの割合

前項において、細骨材を被覆するペーストの割合をとした。ペーストの流動性や細骨材の粒径、粒度および形状などの影響を受ける定数であると考えられる。ここで、影響を及ぼす要因を細分化するために、POMを構成する材料である細骨材、セメントと混和材からなる結合材および水に分けて検討する。POMにおける細骨材を被覆するペーストの単位体積は V_p (m^3/m^3) で表すことができる。ここで、 $1m^3$ 中のPOMを構成する

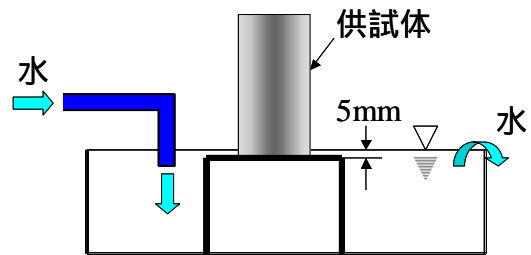


図-2 毛管上昇高試験

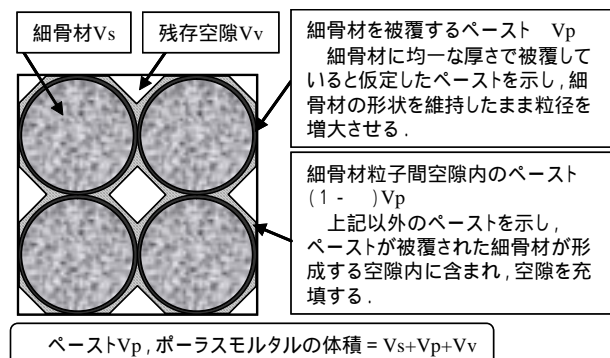


図-3 ポーラスモルタルを模式化したモデル

細骨材，結合材および水の体積割合が β に及ぼす影響度合いを示す係数をそれぞれ β_s ， β_b および β_w とすると， β は式(10)で示すことができる。ここで，単位結合量 V_b (m^3/m^3)，単位水量 V_w (m^3/m^3) とする。

$$\beta = \frac{\beta_s V_s + \beta_b V_b + \beta_w V_w}{V_s + V_b + V_w} \quad (10)$$

4. 空隙量式の適合性に関する実験的検証

前章において定式化した空隙量式について，実験により適合性を検証した。

(1) 全空隙量実測値

水結合材比 (W/B) 30% における POM の全空隙量実測値とペースト細骨材空隙比の関係を細骨材別に図 - 4 に示す。ペースト細骨材空隙比が増大するとペースト量が増加するため全空隙量が減少する。また，POM の全空隙量実測値と水結合材比の関係を図 - 5 に示す。図中の凡例は細骨材とペースト細骨材空隙比を示す。ペースト細骨材空隙比が同等な条件において，水結合材比が増大すると全空隙量は減少する傾向が認められる。

(2) 細骨材を被覆するペーストの割合の算出

式(8)より，全ペースト体積に対する細骨材を被覆するペーストの体積の割合である β は，細骨材の実積率，空隙量実測値およびペースト細骨材空隙比を用いた式(11)により求められる。

$$\beta = \frac{G_s \{V_{v_i} - (1 - G_s)(1 - K_p)\}}{K_p(1 - G_s)(1 - V_{v_i})} \quad (11)$$

図 - 4 および図 - 5 に示した空隙量実測値を用いて，式(11)より β を算出した結果を図 - 6 および図 - 7 に示す。 β とペースト細骨材空隙比の関係は，細骨材の種類によって異なっており，ペースト細骨材空隙比の増大により β は変化しないもしくは小さくなる傾向である。 β は水結合材比の増大に対しては小さくなった。この結果は，ペースト量の増加に対しては細骨材を被覆するペースト量の増減は細骨材の品質によって異なるが，水量の増大に対しては明らかに小さくなることを示している。また，G2 や S2 の結果で β が負の値となっているが，これは引締め現象⁸⁾，細骨材の比較的小さい粒子がペーストに取り込まれたことおよび振動の影響により細骨材の実積率が増大したためと考えられる。

(3) β に関する解析

図 - 6 および図 - 7 の結果を用いて，式(10)の形で細骨材の種類ごとに β と各材料の体積割合について回帰分析を行い， β_s ， β_b および β_w を求めた。ただし，水結合材比 30% のみの細骨材 (S3 ~ S5, G1) については β_b および β_w が求められないため，ペーストの体積割合が

に及ぼす影響度合いを示す係数を β_p とし， β を式(12)の形で回帰分析を行い， β_s および β_p を求めた。

$$\beta = \frac{\beta_s V_s + \beta_p V_p}{V_s + V_p} \quad (12)$$

また， β_p は β_b ， β_w ，W/B および結合材の密度 ρ_b が既知の場合は式(13)により求められる。

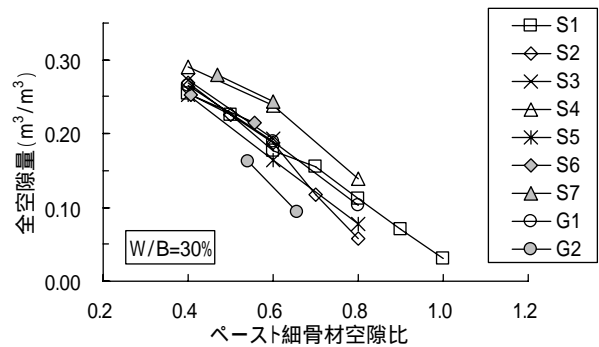


図 - 4 全空隙量とペースト細骨材空隙比の関係

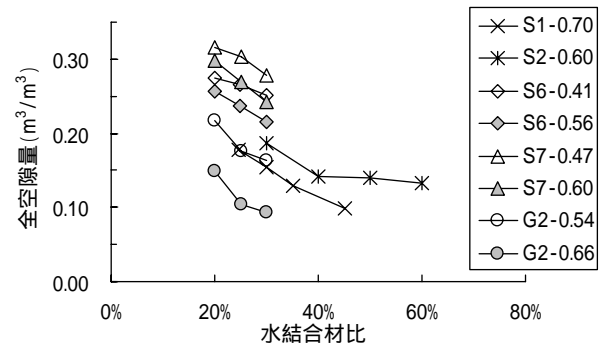


図 - 5 全空隙量と水結合材比の関係

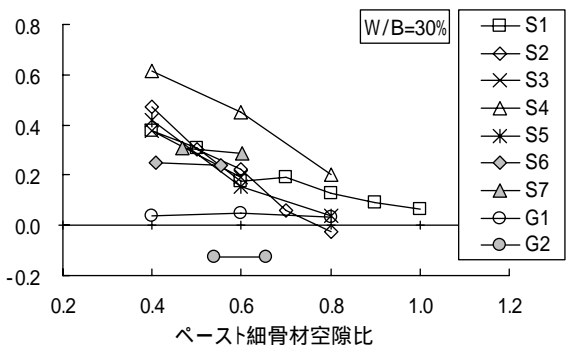


図 - 6 β とペースト細骨材空隙比の関係

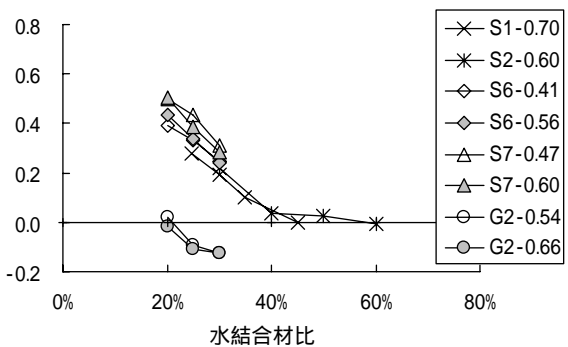


図 - 7 β と水結合材比の関係

$$\beta_p = \frac{\beta_b + \beta_w (\rho_b \times W / B)}{1 + \rho_b \times W / B} \quad (13)$$

回帰分析により求めた s 、 b および w の結果を図 - 8 に、 $W/B = 30\%$ における s および p の結果を図 - 9 に示す。単粒度砕石 7 号を除き、 s の増大に対し、 b および w は減少しており、同様に式(13)の関係からも明らかのように p も減少する傾向が認められた。

ここで、図 - 8 または図 - 9 の結果を式(10)または式(11)に代入して w を算出し、式(9)を用いて全空隙量計算値を求め、全空隙量実測値と比較した結果を図 - 10 に示す。全空隙量計算値は実測値の $\pm 0.015 \text{ m}^3/\text{m}^3$ の誤差範囲であり、精度良く回帰できた。よって、使用材料および混和材・剤使用量が同等であれば、 s 、 b および w より任意の水結合材比およびペースト細骨材空隙比で、 s および p より $W/B=30\%$ の任意のペースト細骨材空隙比で全空隙量が推定できる。S1 を用いた POM の全空隙量と配合条件の関係を図 - 11 に示す。図より、水結合材比およびペースト細骨材空隙比の違いに対する全空隙量の変化を精度良く推定できることが確認できた。

5. 硬化後のポーラスモルタルの性能

既報³⁾では、任意の計画空隙量を予め設定し、計画空隙量となるように振動時間を調整した POM の性能を報告した。本報では同等な振動エネルギーを与えた POM の強度および保水性を実験により確認した。

圧縮強度試験の結果を図 - 12 に示す。図中の凡例は細骨材と水結合材比を示す。圧縮強度は空隙量および水結合材比の増大に対して低下する。S6 は水結合材比の影響は小さく、空隙量との関係はほぼ同等になった。しかし、S7 は水結合材比ごとに空隙量の変化に対する強度の低下割合が異なっており、水結合材比が高いほど S6 の強度と空隙量の関係に近づく結果であった。

最大保水量の結果を図 - 13 に示す。最大保水量は空隙量および水結合材比の増大に伴って大きくなる。水結合材比の増大に対しては、ペースト中の空隙量が増加するため、保水量が大きくなったと考えられ、保水量は強度と相反する関係であった。圧縮強度と最大保水量の関係を図 - 14 に示す。図 - 14 より、最大保水量 $0.15 \text{ g}/\text{cm}^3$ を超える性能を有する POM を製造する場合には、可能な範囲で水結合材比を高く設定した方が強度は高くなる傾向が認められた。

毛管上昇高の結果を図 - 15 に示す。水結合材比が高いほど小さくなる傾向が認められるが、供試体高さが空隙量により $14.8 \sim 17.6 \text{ cm}$ まで変化しており、ほぼ供試体高さまで達している結果であった。既報³⁾では毛管上昇高と最大保水量には直線関係が認められたが、この原因は

計画空隙量となるように振動時間を調整したことにより、空隙径への影響が大きくなったためと推察される。

6. まとめ

既報³⁾では任意の計画空隙量となるように振動時間を調整したポーラスモルタルの性能を報告したが、本報で

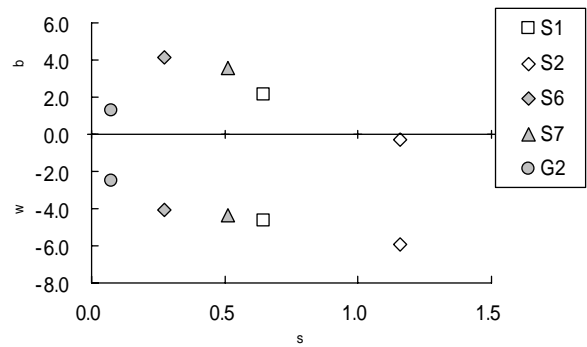


図 - 8 s 、 b および w

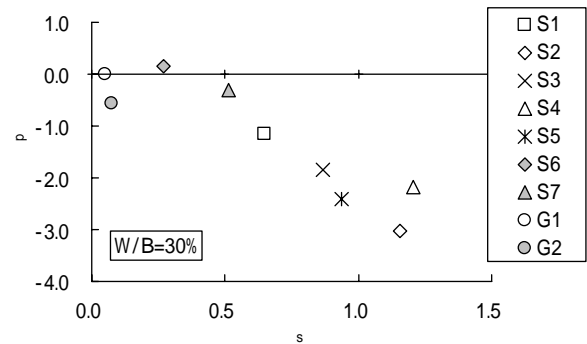


図 - 9 $W/B=30\%$ における s および p

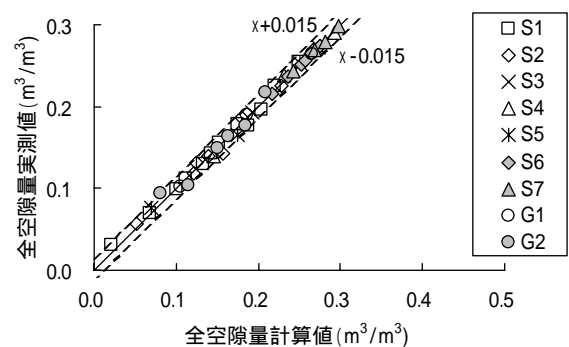


図 - 10 全空隙量計算値と実測値の比較

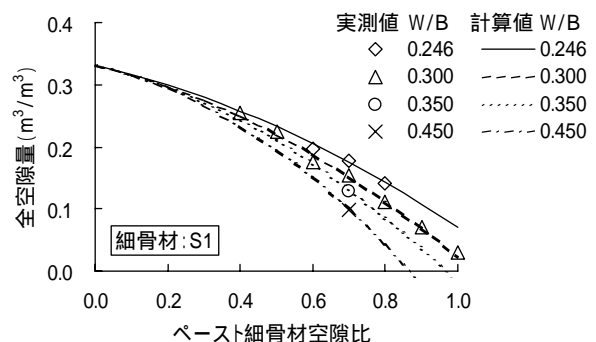


図 - 11 全空隙量と配合条件の関係

は同等な振動エネルギーを与えたポーラスモルタルの空隙量や性能に及ぼす影響について、理論的解析および実験的検討により以下のことが明らかとなった。

- (1) 全ペースト体積に対する細骨材に均等に被覆するペーストの体積割合を実験により求め、回帰分析により細骨材、セメントおよび水の体積割合がに及ぼす影響度を求めた。
- (2) ペースト細骨材空隙比、細骨材の実積率およびを用いた空隙量式によりポーラスモルタルの全空隙量を推定でき、水結合材比およびペースト細骨材空隙比の変化に対する全空隙量の変化を正確に示すことができた。
- (3) 空隙量および水結合材比の増大に対して、圧縮強度は低下し、保水量は増加する関係であった。最大保水量 0.15g/cm^3 を超える所要の性能を有するポーラスモルタルは、可能な範囲で水結合材比を高くした方が強度は高くなる傾向が認められた。
- (4) 毛管上昇高はほぼ供試体高さまで達しており、版厚 14cm 以内であれば舗装内の水を表面まで揚水することができると思われる。

要求された強度や保水性能を考慮した材料や配合条件の選定、設計全空隙量および空隙量式を用いたペースト細骨材空隙比の決定により、所要の空隙を形成させたポーラスモルタルの配合設計が可能となる。

参考文献

- 1) 日本道路協会舗装委員会環境・再生利用小委員会：路面温度低減に関する舗装技術，環境改善を目指した舗装技術（2004年版），pp.30-42，2005.3
- 2) 土木学会舗装工学委員会舗装環境小委員会：熱環境改善型舗装の評価技術，環境負荷軽減舗装の評価技術，pp.83-162，2007.2
- 3) 梶尾聡，宇治公隆，國府勝郎：ポーラスモルタルの配合設計法と保水特性に関する研究，セメント・コンクリート論文集，No.59，pp.210-217，2005
- 4) 梶尾聡，藤田仁，宇治公隆，國府勝郎：ポーラスモルタルの路面温度低減効果に関する研究，第60回セメント技術大会講演要旨，pp.212-213，2006
- 5) 梶尾聡，古屋貴之，宇治公隆，國府勝郎：流動性の異なるモルタルを用いたポーラスコンクリートの研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，NO.2，pp.289-294，2007
- 6) 梶尾聡，國府勝郎，宇治公隆：所要の空隙量を有するポーラスコンクリートの配合設計法に関する研究，土木学会論文集，部門E，Vol.64，No.1，2008.1
- 7) 國府勝郎，上野敦：締固め仕事量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

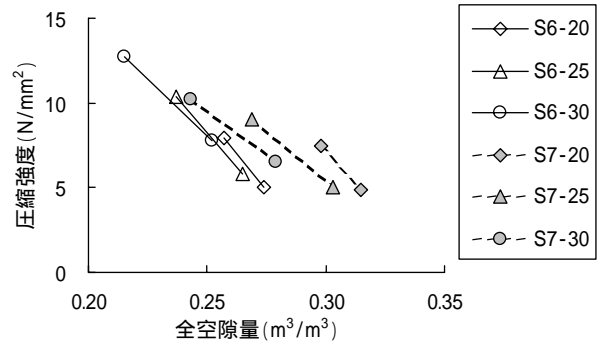


図 - 12 圧縮強度と全空隙量の関係

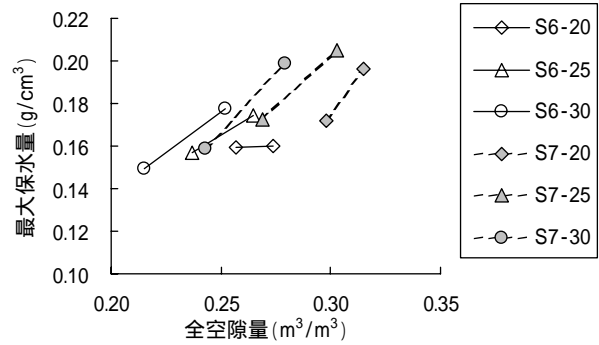


図 - 13 最大保水量と全空隙量の関係

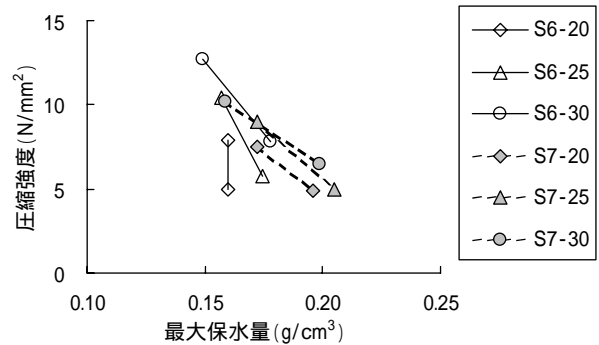


図 - 14 圧縮強度と最大保水量の関係

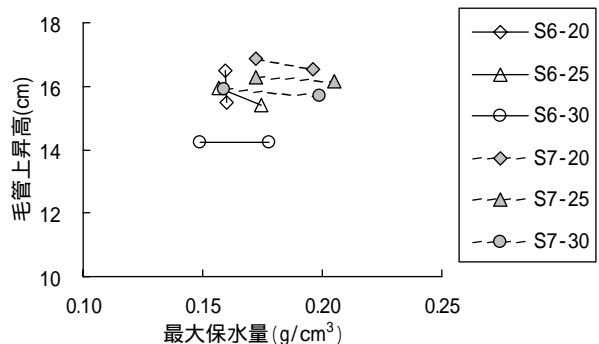


図 - 15 毛管上昇高と最大保水量の関係

- 8) 沼田晋一，前田博人：練混ぜ作用によるポーラスコンクリートの配合割合の構成機構と配合設計に関する基礎的研究，ポーラスコンクリートの設計・施工法と最近の適用例に関するシンポジウム論文集，pp.23-30，2003