

論文 ポーラスコンクリートブロックの温度上昇抑制効果

永井 伴英^{*1}・寺西 浩司^{*2}・吉永 美香^{*3}

要旨：本研究では、屋上緑化に代わるヒートアイランド現象抑制対策の一つの方法として、ポーラスコンクリートのブロックを建物の屋上スラブ面に敷設することを考えた。そして、この方法の温度上昇抑制効果を調べるために、恒温恒湿槽内で、ポーラスコンクリートに対する模擬的な日射の照射試験を行った。その結果、ポーラスコンクリートの温度上昇抑制効果は空隙率が高いほど高くなる傾向にあること、また、ポーラスコンクリートブロックの潜熱による温度上昇抑制効果を高めるためには、ブロック深部の空隙中の水分を上面付近まで揚水する工夫が必要になることなどが明らかになった。

キーワード：ヒートアイランド現象、保水性建材、潜熱、押さえコンクリート、屋上緑化、空隙率

1. まえがき

現在、ヒートアイランド現象の最も代表的な抑制対策は屋上緑化であり、都市部では、自治体などによりこの対策が積極的に推進されている^{1),2)}。しかし、屋上緑化は、初期コストや維持管理の労力などの問題から、必ずしも順調に普及しているとはいえないのが実状である。そこで、筆者らは、屋上緑化よりも簡単に施工できて、かつ、維持管理の手間の少ない対策方法の一つとして、ポーラスコンクリートのブロックを建物の屋上スラブ面に敷設することを考えた。ポーラスコンクリートは保水性建材³⁾の一種であり、その空隙部に蓄えられた雨水の蒸発潜熱による温度上昇抑制効果が期待できる。また、屋上歩行の必要な建物では、このブロックの使用により押さえコンクリートを省略できる可能性が高い。

そこで、本研究では、上記方法の温度上昇抑制効果を調べることを目的として、恒温恒湿槽内で、ポーラスコンクリートに対して模擬的な日射の照射試験を行った。そして、ポーラスコンクリートブロックの空隙率や厚みが温度上昇抑制効果に及ぼす影響を検討した。

2. 実験概要

2.1 実験ケース

実験ケースを表-1に示す。本実験では、ポーラスコンクリートの空隙率を10、20および30%に変化させ、試験体のブロックの厚さを5、15および25cmに変化させた。また、これらのほかに、比較用のケースとして、普通コンクリート（押さえコンクリートまたは屋上スラブコンクリートを想定したケース）、土壌、土壌+セダム（屋上緑化を想定したケース）および水の試験体を用意した。なお、比較用試験体の厚さは15cmの一定

とした。

2.2 使用材料

表-2に、ポーラスコンクリートおよび普通コンクリートの使用材料を示す。ポーラスコンクリートには、寸法10~20mmの単粒度粗骨材を使用した。また、土壌用の土には園芸用の黒土を用い、セダムとしてはメキシコマンネン草を使用した。

2.3 ポーラスコンクリートおよび普通コンクリート

表-3に、ポーラスコンクリートおよび普通コンクリートの調合を示す。ポーラスコンクリートの調合は、JCI「ポーラスコンクリートの製造・施工指針（案）」⁴⁾に示された方法に準拠して設計した。

練混ぜには強制二軸練りミキサ（容量55l）を使用し、

表-1 実験ケース

記号	種 別	空隙率 (%)	試験体厚さ (cm)		
			5	15	25
P10	ポーラス コンクリート	10	●	●	●
P20		20	●	●	●
P30		30	●	●	●
C	普通コンクリート		—	●	—
S	土壌		—	●	—
SG	土壌+セダム		—	●	—
W	水		—	●	—

表-2 使用材料

記号	種 別	仕 様
OPC	普通ポルトランドセメント	密度 3.16g/cm ³
S	細骨材	長良川産川砂, 表乾密度 2.64g/cm ³ , 吸水率 2.26%
G	粗骨材	春日井産碎石, 寸法 5~20mm, 表乾密度 2.74g/cm ³ , 吸水率 0.30%, 実積率 62.5%
IG	単粒度粗骨材	春日井産碎石, 寸法 10~20mm, 表乾密度 2.74g/cm ³ , 吸水率 0.49%, 実積率 56.6%
HAE	高性能 AE 減水剤	ポリカルボン酸エーテル系

* IG はポーラスコンクリートに、S および G は普通コンクリートに使用。

*1 名城大学 理工学研究科建築学専攻大学院生(正会員)

*2 名城大学 理工学部建築学科教授 博士(工学)(正会員)

*3 名城大学 理工学部建築学科助教 博士(環境学)

表-3(a) 調合（ポーラスコンクリート）

記号	目標空隙率 (%)	水セメント比 (%)	単位水量 (kg/m ³)	絶対容積(l/m ³)		質量(kg/m ³)		HAE (g/m ³)
				OPC	IG	OPC	IG	
P10	10	25	153	193	554	610	1518	6100
P20	20		108	137		434		4340
P30	30		64	81		257		2570

表-3(b) 調合（普通コンクリート）

スランプ (cm)	空気量 (%)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位水量 (kg/m ³)	絶対容積(l/m ³)			質量(kg/m ³)			HAE (g/m ³)
					OPC	S	G	OPC	S	G	
18±2.5	4.5±1.5	54.5	44.1	182	106	293	372	335	771	997	1059

ポーラスコンクリートの場合、ペーストを 90 秒間練り混ぜた後に、粗骨材を投入してさらに 90 秒間練り混ぜた。一方、普通コンクリートの場合、30 秒間の空練りの後に 60 秒間の本練りを行った。なお、ポーラスコンクリートの型枠への充填に際しては、厚さ 5cm ごとに、コンクリートの上面に錘（質量 7kg）を載せてテーブルバイブレータにより締め固めを行った。

2.4 試験体

試験体の概要を図-1 に示す（試験体厚さ 15cm の場合）。照射試験にあたっては、底面に断熱材（発泡ポリスチレンフォーム）を用いた箱状の容器を作製し、その中に試験体を設置した。そして、容器の側板と試験体の隙間にグラスウールを充填して水平方向を断熱した。なお、ポーラスコンクリート試験体の場合は、側面および底面にモルタルを塗布して平滑にし、その上からウレタン樹脂により防水処理を施した。また、非コンクリート系の試験体の場合は、グラスウールの内側にビニールシートを敷き、その内側に土壌や水を詰めた。

2.5 試験装置

照射試験は恒温恒湿槽内で行った。その際、槽内の雰囲気は、東京の夏季を想定して温度 30℃、相対湿度 70% に設定した。図-2 に試験装置の概要を示す。本実験では、試験体上面の 20cm 上方からハロゲンライト（500W）による光を照射した。また、試験体からの水分蒸発量を調べるため、ロードセル（定格容量 500N）を介在させたワイヤーで試験体を吊るし、5 分ごとに試験体の質量を測定した。同時に、試験体上面の中央に設置した熱電対により試験体の表面温度を測定した。

2.6 試験スケジュール

試験開始の 12 時間前に、予め試験条件の雰囲気温度・相対湿度に設定した恒温恒湿槽内に試験体を存置し、その温度を 30℃ に調整した。その際、試験体は、原則として、上面まで空隙中に水を満たした状態で設置した。そして、試験開始までは、試験体の上面をビニー

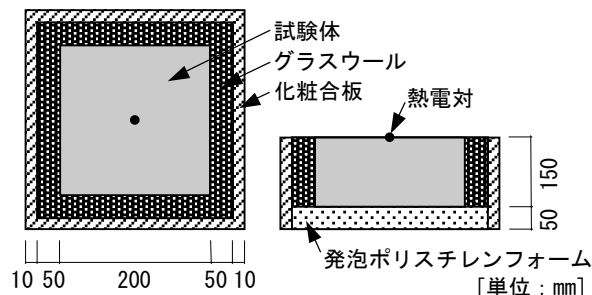


図-1 試験体の概要（試験体厚さ 15cm の場合）

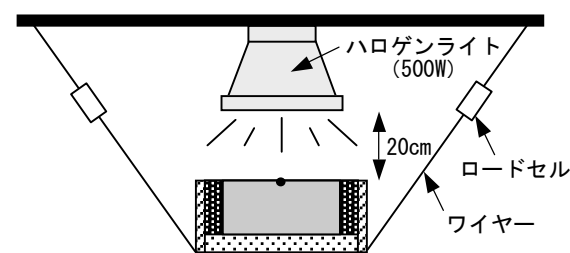


図-2 試験装置の概要

表-4 ポーラスコンクリート試験体の全空隙率

試験体厚さ (cm)	P10		P20		P30	
	全空隙率 (%)	平均値 (%)	全空隙率 (%)	平均値 (%)	全空隙率 (%)	平均値 (%)
5	26.5	14.8	17.8	16.1	34.8	31.9
15	8.87		15.7		30.2	
25	9.12		14.9		30.7	

ルシートで覆い、試験体中の水分（以下、空隙水という）の蒸発を防止した。ただし、P30 の場合は、このようなケースのほかに、空隙水のない状態で試験体を設置するケース（以下、これらを区別して、空隙水ありのケースを P30W、空隙水なしのケースを P30N という）についても比較のために試験を行った。

以上の準備を行ったうえで試験を開始し、ハロゲンライトの光を 12 時間照射した。

3. 実験結果とその考察

3.1 ポーラスコンクリートの空隙率

表-4 に、JCI-SPO2-1「ポーラスコンクリートの空隙率試験方法（案）」⁴⁾（容積法）を準用して測定したポーラスコンクリート試験体の全空隙率を示す。同表からわかるように、厚さ 5cm の試験体の場合、他の試験体よりも全空隙率が高くなった。P10 ではこの傾向が特に顕著であったが、その原因としては、試験体作製時に、ポーラスコンクリート中の粗骨材を調合上の比率よりも多めに型枠内に投入してしまったことなどが可能性として考えられる。また、P20 では、全空隙率が目標値よりも平均値で 4% 程度低くなった。

3.2 水分蒸発量

(1) 水分蒸発量の経時変化

図-3 に、水分蒸発量（すなわち、試験体の質量減少

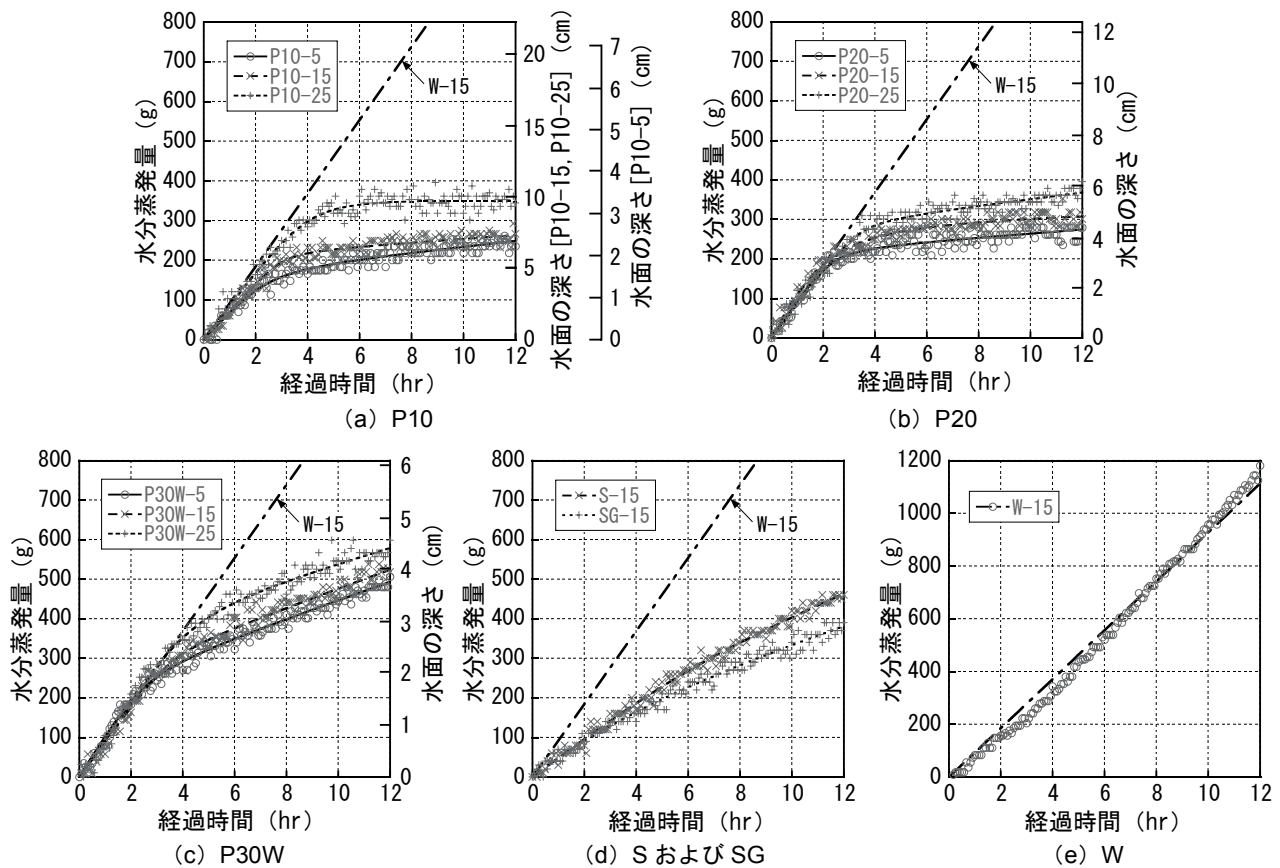


図-3 水分蒸発量の経時変化

量)の経時変化を示す(ただし、P30N および C の場合、水分蒸発量が僅かであったため、表示していない)。ここで、ポーラスコンクリートの図中には、表-4 中に示した全空隙率の平均値から計算した、空隙水の水面の試験体上面からの深さ(以下、単に水面の深さという)を示してある(ただし、P10 の場合、P10-5 の全空隙率の値が他のケースと極端に異なるため、これらを区別して水面の深さを表示してある)。また、図(a)～(d)中には、図(e)に示した W-15(水のケース)の回帰直線を示してある。

同図によると、ポーラスコンクリートの回帰曲線の傾きは、試験開始からしばらくは W-15 の場合とほぼ同

一であり、その後は極めて緩やかになっている。また、傾きが変化するのは、ケースによってもばらつきがあるが、空隙水の水面の深さが 1～10cm 程度になった時点である。以上のことは、ポーラスコンクリートの上面付近の空隙水は水だけの場合と同様に蒸発するが、それよりも深部の空隙水は、上方に存在する骨材が空気の対流抵抗となるため、蒸発しにくくなることを意味している。

なお、S-15 や SG-15 のように、基材が土壌で構成された試験体の場合には、このような蒸発メカニズムの変化点は見られず、試験開始直後から緩やかな速度で水分が蒸発している。

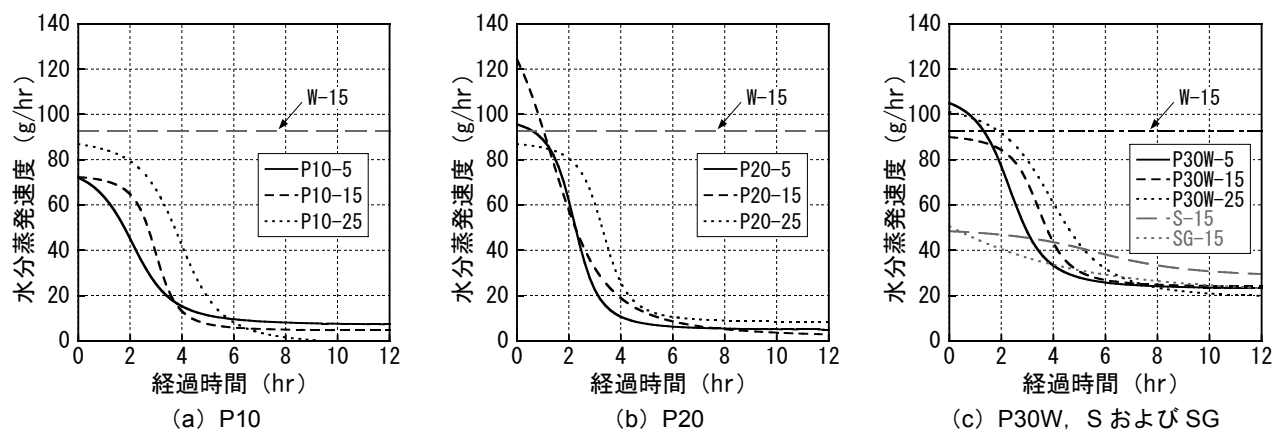


図-4 水分蒸発速度

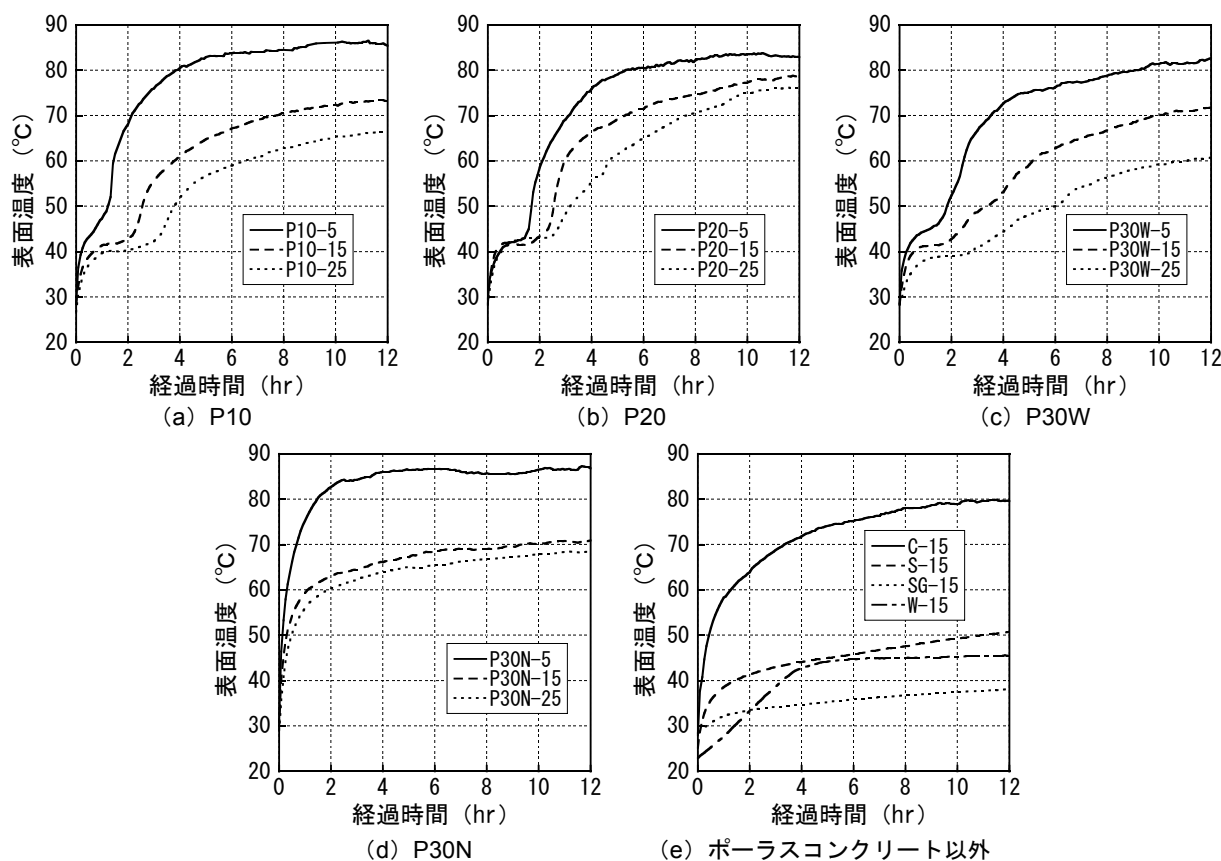


図-5 表面温度の履歴

(2) 水分蒸発速度

図-4 に、水分蒸発速度の経時変化（図-3 中に示した水分蒸発量の回帰式の微分）を示す。同図によると、P10 および P20 の場合、経過時間 4~6hr 以降の水分蒸発速度は非常に小さい。すなわち、試験体の深部の空隙水はほとんど蒸発していない。このことから、ポーラスコンクリートの空隙率が小さい場合、ブロックの厚みを増して保水能力を高めても、上面から一定以上の深い位置に存在する空隙水は、潜熱による温度上昇抑制効果にはほとんど寄与しないことがわかる。換言すると、ブロックを厚くした場合の保水能力の高さを有効に活用するためには、深部の空隙水を上面付近まで揚水するための何らかの工夫が必要になるものと考えられる。

3.3 温度上昇量

(1) 表面温度の履歴

図-5 に表面温度の履歴を示す。同図によると、空隙水ありのポーラスコンクリートの場合、表面温度は、試験開始直後に急激に上昇し、一時的な安定期を経て再び上昇し、最終的に一定値に収束するという履歴を示している。なお、この温度履歴曲線に見られる安定期は、ポーラスコンクリートブロックの上面付近に存在する空隙水の蒸発潜熱と吸熱量が平衡している状態であると考えられる。また、空隙水なしのポーラス

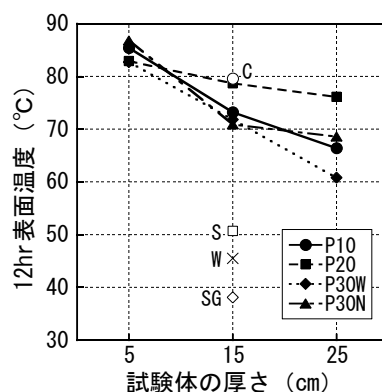


図-6 12hr 表面温度

コンクリート (P30N) やポーラスコンクリート以外のケースには、このような安定期は認められない。

(2) 温度上昇抑制効果の比較

図-6 は、各試験体の温度上昇抑制効果を比較するために、試験終了時の表面温度（以下、12hr 表面温度という）を示したものである。同図によると、ポーラスコンクリートの場合、12hr 表面温度は、その種類にかかわらず S や SG よりも高くなっており、このことから、ポーラスコンクリートの温度上昇抑制効果は屋上緑化ほど高くはないものと判断される。

図-7 は、図-6 と同様の主旨により、表面温度が 60°C に達するまでの時間（以下、60°C 到達時間という）を示したものである（ただし、非コンクリート系の試験

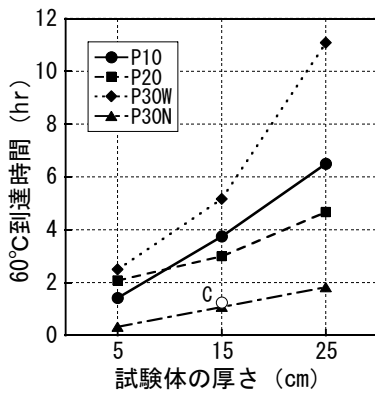


図-7 60°C到達時間

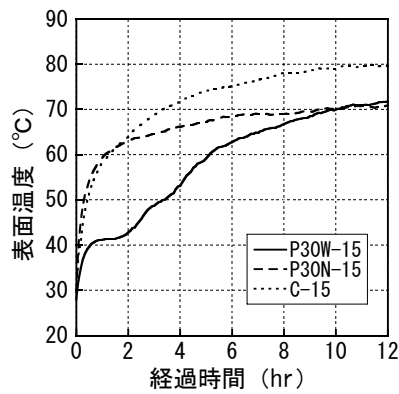


図-8 表面温度の履歴の比較

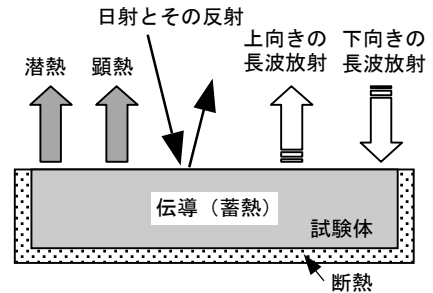


図-9 試験体表面における熱収支

体の場合、試験期間内に表面温度が 60°C に達しなかったため、表示していない。同図における空隙水ありのポーラスコンクリートのケースに着目すると、全空隙率の低い P10 や P20 (表-4 によると、測定値の平均値は、順に 14.8, 16.1%) では 60°C 到達時間は短い。それに対し、全空隙率の高い P30W (表-4 によると、測定値の平均値は 31.9%) では、60°C 到達時間が長くなっており、温度上昇抑制効果が高いことがわかる。なお、60°C 到達時間は試験体厚さが増すほど長くなっているが、これは、試験体の熱容量の増大によるものであると考えられる。

4. ポーラスコンクリートの温度上昇抑制機構

図-8 に、P30W-15, P30N-15 および C-15 の表面温度の履歴を比較して示す。同図から、ポーラスコンクリートの空隙水ありのケース (P30W)、空隙水なしのケース (P30N)、普通コンクリート (C) の順に温度上昇抑制効果が高いことがわかる。また、P30W と P30N の温度上昇抑制効果の差異は、主に、P30W における空隙水の蒸発潜熱に起因するものであると考えられる。そこで、本章では、P30W と P30N の比較に基づく潜熱効果の定量化を試みる。

図-9 に、ポーラスコンクリート試験体の表面における熱収支を示す¹⁾。ここで、両ケースでは、試験環境や試験体の表面形状が同一であるため、図中の日射とその反射量、下向きの長波放射量はほぼ同一である。また、顕熱量および上向きの長波放射量は試験体の表面温度に依存する。したがって、試験体の表面温度が同一の場合には、P30W の蒸発潜熱が両ケースの蓄熱量の差と釣り合うことになる。

以上の考察を踏まえ、ここでは、P30W と P30N のケースについて、表面温度の 10°C ごとの差分からそれぞれ表面温度上昇速度を計算した。そして、潜熱による温度上昇抑制効果を調べるために、表面温度が同一の場合の両ケースの差を求めた。その計算結果を図-10

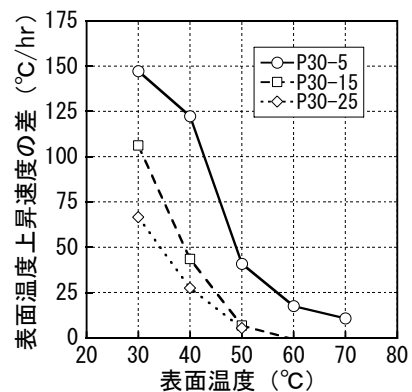


図-10 表面温度上昇速度の差と表面温度の関係

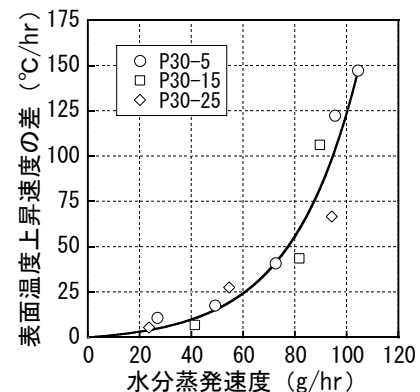


図-11 表面温度上昇速度の差と水分蒸発速度の関係

に示す。また、図-11 に、この計算結果とそれに対応する水分蒸発速度 (図-4 に示した値) の関係を示す。図-11 によると、両者の関係は、試験体厚さにかかわらず一つの曲線で表されている。ただし、表面温度上昇速度の差が空隙水の蒸発潜熱のみに依存するのであれば、この値と水分蒸発速度の関係は線形になるはずである。すなわち、この表面温度上昇速度の差には、蒸発潜熱のほかに、ポーラスコンクリートの空隙水の有無による熱伝導 (蓄熱) 特性の違いの影響が含まれている。したがって、ポーラスコンクリートの温度上昇抑制効果を明確にするためには、今後、これらのことを含めた熱収支のより正確な把握が必要になるものと考えられる。

5. まとめ

本研究では、ヒートアイランド現象抑制を目的として屋上スラブ面に敷設することを想定したポーラスコンクリートのブロックに対し、模擬的な日射の照射試験を行い、その温度上昇抑制効果を調べた。その結果から得られた知見は、以下の通りである。

- (1) ポーラスコンクリートの温度上昇抑制効果は、屋上緑化には及ばないが、普通コンクリートよりは高い。
- (2) ポーラスコンクリートの空隙率が高いほど、温度上昇抑制効果は高くなる傾向となる。
- (3) ポーラスコンクリートブロックの上面付近の空隙中の水分は、水のみの場合と同様に蒸発する。しかし、それより深い位置の空隙中の水分は、緩やかにしか蒸発しないか、または、ほとんど蒸発しない。したがって、ポーラスコンクリートの潜熱による温度上昇抑制効果を高めるためには、ブロックの深部の空隙中の水分を上面付近まで揚水する工夫が必要となる。

謝辞

本研究の実施に際し、名城大学学生・桜井資真君および竹内秀喜君の助力を得た。ここに付記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 森山正和：ヒートアイランドの対策と技術，学芸出版社，2004.8
- 2) 尾島俊雄：ヒートアイランド，東洋経済新報社，2002.8
- 3) 萩原伸治：保水性コンクリート，コンクリート工学，Vol.45，No.5，pp.142-146，2007.5
- 4) 日本コンクリート工学協会：ポーラスコンクリートの設計・施工法に関する研究委員会報告書，pp.145-163，pp.179-181，2003.5