論文　ポーラスコンクリートの曲げ強度発現性の評価に関する基礎的検討

佐藤　達三[*1]・梶尾　聡[*2]・小畠　明[*3]・大森　啓至[*4]

要旨：本研究は，環境温度がポーラスコンクリートの曲げ強度発現性に及ぼす影響に関して，実舗装版体に適用可能な評価手法を確立することを目的として検討を行った。強度発現性の異なる 2 種類のポーラスコンクリートを用いて検討を行った結果，①環境温度の評価には Arrhenius 式を応用して算出される等価材齢を用いることが有効であること，②対象となるコンクリートの材料特性や実験データの分布密度を考慮することにより，等価材齢から近似される強度増進式を用いて曲げ強度の増進過程が概ね把握できること，などの知見が得られた。

キーワード：ポーラスコンクリート，曲げ強度，温度依存性，等価材齢，強度増進式

1.　はじめに

近年，雨天時における走行安全性や低騒音性を考慮した排水性舗装の採用が拡大している。特に，高速道路の料金所や交差点，トラックヤードなどでは，変形抵抗性や耐油性などの観点からポーラスコンクリート舗装が望ましいと考えられる。これらの舗装工事では，舗設後できるだけ早期の交通開放が望まれている。

交通開放時のコンクリートの設計基準曲げ強度は 3.5N/mm^2 以上とされるが [1)]，実舗装版体は，温度，湿度等の要因によってコンクリートの強度発現性が影響を受けるため，交通開放時の版体強度を確認するか，もしくは推定する必要が生じる。後者の手段を考えた場合，強度発現性に影響を及ぼす因子のなかで温度の影響は大きく，ポーラスコンクリート舗装版体の強度を推定する上で不可欠な要因である。

温度の影響は，一般にマチュリティを用いた方法によって整理され，コンクリートの強度増進過程を表す関数を用いて評価される [2)]。著者らは，早期材齢におけるポーラスコンクリートの曲げ強度発現性が，Weibull 関数によって比較的精度良く近似できることを報告している [3)]。一方，コンクリートの強度増進過程は，積算温度を対象とする対数軸上で S 型の曲線となることが明らかとなっており，このような曲線は Gompertz 関数や Logistic 関数によって表現できるとされている [2) 4)]。

本論文では，材料・練混ぜ温度，養生温度を種々に変化させた実験の結果をとりまとめ，環境温度がポーラスコンクリートの曲げ強度発現性に及ぼす影響の評価手法に関して行った基礎的な解析の結果を報告する。

2.　実験概要

2.1　使用材料および配合条件

本研究は、新設舗装に用いられている普通ポルトランドセメントを用いたポーラスコンクリート（以下 N-PoC）と，早期交通開放を目的として開発した超早強型のポーラスコンクリート

表－１　使用材料

結合材	コンクリート	使用材料
セメント	N-PoC	普通ポルトランドセメント
	SH-PoC	早強ポルトランドセメント
混和材	N-PoC	N-PoC 用無機系特殊混和材
	SH-PoC	SH-PoC 用無機系特殊混和材
細骨材		陸砂
粗骨材		砕石 6 号 (13mm-5mm)

表－２　配合条件

コンクリート	水結合材質量比	結合材砂質量比	モルタル粗骨材体積比	配合空隙率
N-PoC	0.225	2.0	0.510	18.0
SH-PoC	0.180	3.0	0.535	16.5

*1 太平洋セメント(株)　中央研究所　コンクリート技術グループ研究員　工修　（正会員）
*2 太平洋セメント(株)　中央研究所　コンクリート技術グループ主任研究員　（正会員）
*3 太平洋セメント(株)　中央研究所　コンクリート技術グループ副主任研究員
*4 太平洋セメント(株)　中央研究所　コンクリート技術グループリーダー　工修

（以下 SH-PoC）を用いて実験を行った[5]。ポーラスコンクリートの使用材料を**表－1** に，配合条件を**表－2** に示す。曲げ強度の目標値はセメントコンクリート舗装における設計基準曲げ強度 4.5N/mm^2 以上とし[1]，所要材齢は，20℃環境下において N-PoC は材齢 28 日，SH-PoC は材齢 1 日とした。使用材料および配合条件は，上記の性能を満足するよう設定した[5]。

2.2 供試体の作製

ポーラスコンクリートの練混ぜ，および供試体の作製は 5℃，20℃，30℃の各恒温室内にて行った。供試体は，10×10×40（cm）の型枠に所定の空隙率となるように，振動をかけて締め固めて作製した。

2.3　温度条件

本研究では，練混ぜ温度と養生温度を変化させて実験を行った。供試体の養生は，5℃，10℃，20℃，30℃の各恒温室内において，実舗装版体を想定し所定の材齢まで気中養生（70-80%RH）とした。また，室内の試験結果から得られた強度増進式を検証する目的で、供試体を所定の材齢まで屋外養生した。屋外養生は、日射、風雨等の影響を避けるため供試体をシートで覆い、直射日光の当たらない日陰で実施した。温度条件および曲げ強度試験の材齢を**表－3** に示す。

表－3　温度条件および曲げ強度試験の材齢

練混ぜ温度（℃）	養生温度（℃）	曲げ強度試験の材齢（日）	
		N-PoC	SH-PoC
5	5	3,7,14,28	1,3,7,14,28
20	5		
	10	2,3,7,14,28	
	20		0.5,1,3,7,14,28
	30		
30	30		
20	屋外養生	2,3,7,14,28	0.5,1,2,3,7,14,28

2.4　試験項目

(1)曲げ強度試験

曲げ強度試験は，JIS A 1106 に準拠して表－3に示した材齢において実施した。

(2)コンクリートの温度測定

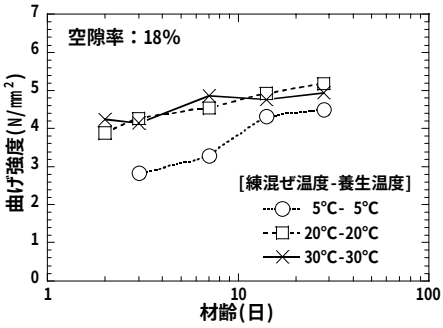
コンクリートの温度測定はT型の熱電対を用いて行った。熱電対の感応部位は，ポーラスコンクリートのモルタル部分に密着するよう留意した。温度測定位置は，ポーラスコンクリート版体の表面部、中心部および底面部の温度の差が小さいことから[6]，供試体の表面部中央と底面部中央とし，コンクリート温度は表面温度と底面温度の平均値とした。

3.　実験結果と考察

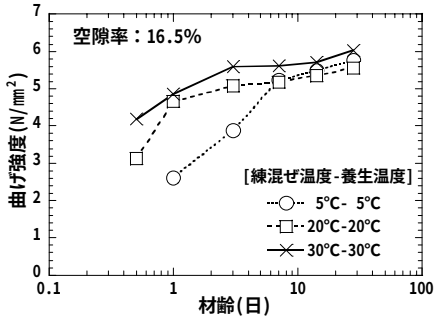
3.1　曲げ強度試験結果

N-PoC および SH-PoC の練混ぜ温度と曲げ強度の関係を**図－1** および**図－2** に，養生温度と曲げ強度の関係を**図－3** および**図－4** に示す。

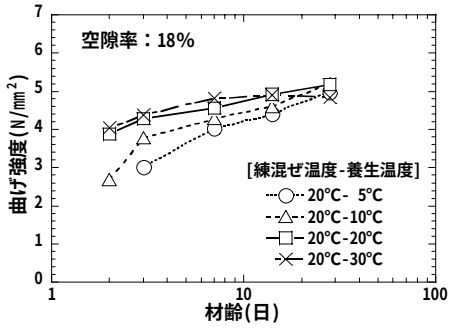
練混ぜ温度および養生温度が強度発現性に及ぼす影響が大きい材齢は，N-PoC では材齢 15 日程度まで，SH-PoC では材齢 7 日程度までであった。温度の影響により発生した早期材齢における強度差は，N-PoC において 1.0～1.5N/mm^2 程度，SH-PoC において 1.5～2.5N/mm^2 程度であった。早期材齢における強度差は，材齢の経過に伴って減少していく傾向にあった。以上のことから、ポーラスコンクリートの強度増進性状は，通常のコンクリートにおける強度増進過程



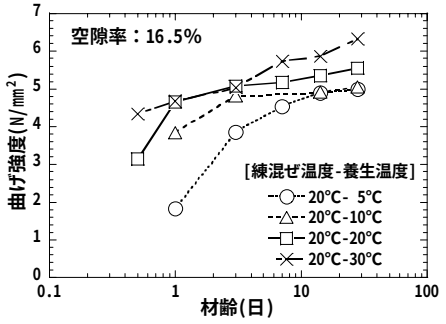
図－1　練混ぜ温度の影響(N-PoC)



図－2　練混ぜ温度の影響(SH-PoC)



図－３ 養生温度の影響(N-PoC)



図－４ 養生温度の影響(SH-PoC)

と同様であるといえる。

3.2 等価材齢および強度増進式

(1)等価材齢

3.1 において述べた実験結果より、温度の影響はポーラスコンクリートにおいても通常のコンクリートと同様に，マチュリティを用いた方法によって評価することができると考えられる。本研究では上記の手法のポーラスコンクリートへの適用性を明らかとするために，基準温度を20℃とし，基準温度の材齢に相当する等価材齢によって評価を行うこととした。以下，等価材齢の定義を示す。

式(1)に Arrhenius 式を応用して求められる等価材齢 Te_α を定義する。

$$Te_\alpha = \sum_{i=1}^{n} \Delta t_i \cdot \exp\left\{ -\frac{E}{R} \cdot \left(\frac{1}{T_{(i)}} - \frac{1}{Ts} \right) \right\} \qquad (1)$$

ここに，Te_α:等価材齢（日），$T_{(i)}$:コンクリート温度（°K），Ts：基準温度（293°K），E：活性化エネルギー（kJ/mol），R：気体定数（=8.314(J/mol)），Δt_i：コンクリート温度が $T_{(i)}$（℃）である時間（日）

式(1)における活性化エネルギー(E)は、反応速度の実測から決定される実験定数である。ポーラスコンクリートは、骨材種類によって配合および空隙率を修正し振動時間を調整するコンクリートである。そのため、実測により活性化エネルギーを求めることは困難であることから，実用性を考慮し、活性化エネルギーはコンクリート種類によらず式(2)に示す実験式を用いることとした[2)]。

$$E = 33.5 \text{（kJ/mol）}（T_{(i)} \geqq 293°K）$$

$$E = 33.5 + 1.47(293 - T_{(i)}) \text{（kJ/mol）}（T_{(i)} \leqq 293°K） \qquad (2)$$

一方，式(1)において全温度領域で E=33.5 (kJ/mol)とした場合の等価材齢 Te_β は次式で定義される。

$$Te_\beta = \sum_{i=1}^{n} \Delta t_i \cdot \exp\left\{ 13.75 - \frac{4030}{T_{(i)}} \right\} \qquad (3)$$

また，式(4)に等価材齢 Te_γ を定義する。

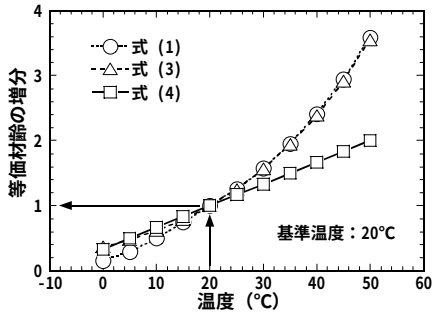
$$Te_\gamma = \sum_{i=1}^{n} \Delta t_i \cdot \left\{ (T'_{(i)} - T_0) / (Ts' - T_0) \right\} \qquad (4)$$

ここに，$T'_{(i)}$：コンクリート温度(℃)，Ts'：基準温度(20℃)，T_0：定数(-10℃)

上記に定義された Te_α，Te_β，Te_γ は，それぞれ温度の変化に伴うマチュリティの増分が異なっている。温度と等価材齢の増分との関係を**図－５**に示す。式(1)，式(3)，および式(4)の等価材齢の増分を比較した場合，高温域において特に増分割合が異なることがわかる。また，式(1)は低温領域での増分が小さく設定されている。

(2)強度増進式

本研究では,強度増進過程を表す関数として,



図－５ 温度と等価材齢の増分との関係

Weibull 関数，Gompertz 関数，および Logistic 関数を用い, 3.2 において定義した等価材齢をパラメータとして等価材齢の算出手法の評価および強度増進式の評価を行った。Weibull 関数を式(5)に，Gompertz 関数を式(6)に，Logistic 関数を式(7)に示す。

$$f_b(Te) = f_{b\max}\{1-\exp(-a_1 \cdot \mathrm{Te}^{b_1})\} \qquad (5)$$

$$f_b(Te) = f_{b\max}\exp\{-a_2 \cdot (1/\mathrm{Te})^{b_2}\} \qquad (6)$$

$$f_b(Te) = f_{b\max}/\{1+\exp(-a_3 \cdot \log \mathrm{Te}+b_3)\} \qquad (7)$$

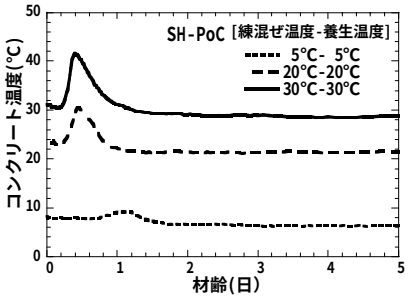
ここで，f_b (Te)：等価材齢 $\mathrm{Te}_{(\alpha,\beta,\gamma)}$ における曲げ強度（N/mm^2），f_{bmax}：見かけの終局曲げ強度（N/mm^2），a_1, b_1，a_2, b_2，a_3, b_3：実験定数

なお，上記の 3 つの強度増進式は，曲げ強度の増進が比較的早期に収束に向かう近似特性を有しており，近似上の収束値を見かけの終局曲げ強度と定義した。

3.3　等価材齢および強度増進式の評価

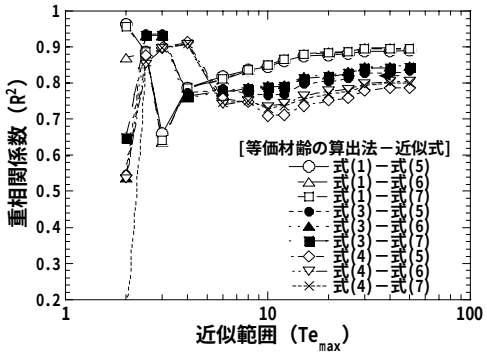
(1)等価材齢の算出法の評価

コンクリート温度の実測例（SH-PoC）を**図－６**に示す。コンクリート温度の実測値から，式

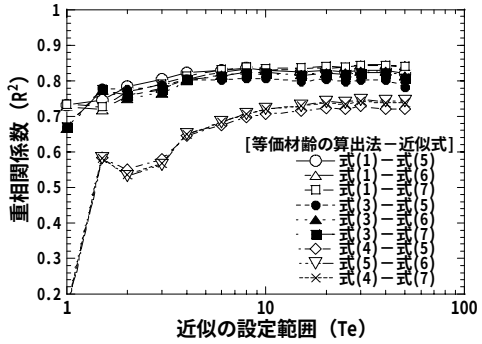


図－６ コンクリート温度の実測例（SH-PoC）

(1)，式(3)，(4)を用いて等価材齢（$\mathrm{Te}_{(\alpha,\beta,\gamma)}$）を算出した。また，等価材齢と曲げ強度との関係を Weibull 関数, Gompertz 関数, および Logistic 関数を用いて最小二乗法により近似した。近似における対象データは，等価材齢の近似範囲の最大値(以下 Te_{max})を変化させて設定し（$0<\mathrm{Te}<\mathrm{Te}_{max}$），それぞれ相関係数を求めた。等価材齢の算出法の評価は，相関係数とその変動から検討した。



図－７ 等価材齢の算出方法および近似範囲と重相関係数の関係（N-PoC）

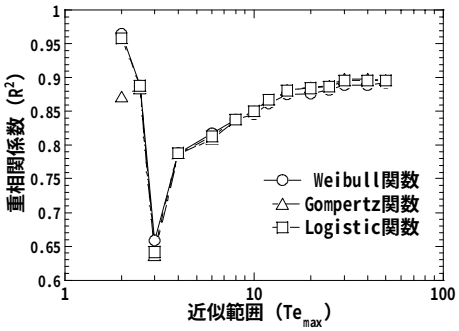


図－８ 等価材齢の算出方法および近似範囲と重相関係数の関係（SH-PoC）

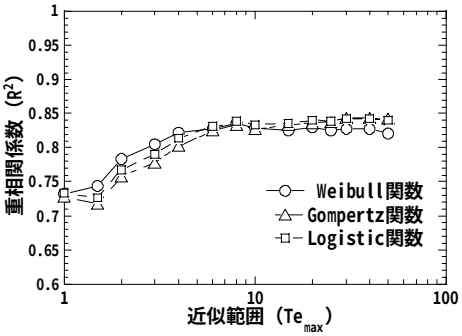
N-PoC および SH-PoC における等価材齢の算出方法および近似範囲と重相関係数の関係を**図－７**および**図－８**に示す。強度増進式の近似精度は等価材齢の算出法によって明確に異なる結果となった。近似精度は，式(1)および式(3)による等価材齢を用いた場合，いずれの強度増進式においても高い精度を有している。特に，式(1)の手法を用いた場合に精度が高くなる結果となった。これは各等価材齢の増分の違いに起因しており，ポーラスコンクリートの等価材齢の算出法として式(1)が最も良く温度の影響を表現できるものと考えられる。

(2)強度増進式の評価

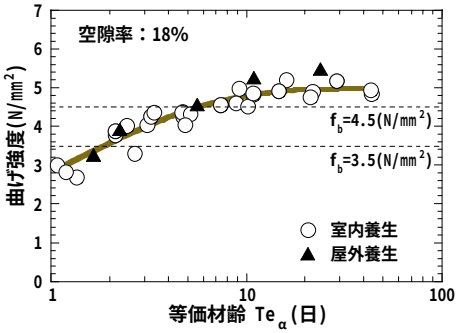
等価材齢の算出式として式(1)を用い，Weibull 関数，Gompertz 関数，および Logistic 関数の近似精度および適用性に関して検討する。各強度増進式の近似範囲と重相関係数の関係を**図－９**および**図－１０**に示す。N-PoC では近似範囲の短期化に伴って, 相関係数が徐々に低下するが,



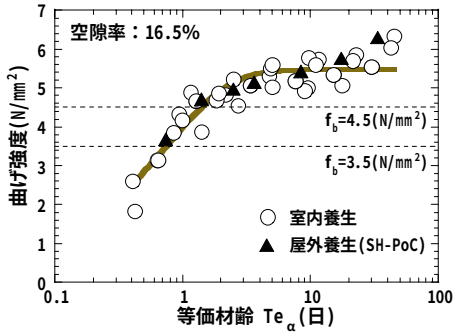
図－９ 強度増進式の近似範囲と重相関係数の関係（N-PoC）



図－１０ 強度増進式の近似範囲と重相関係数の関係（SH-PoC）



図－１１ 等価材齢と曲げ強度の関係と強度増進曲線（N-PoC）



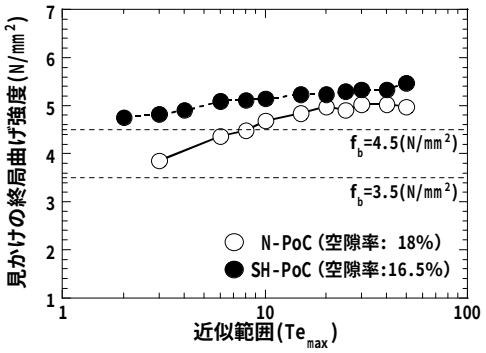
図－１２ 等価材齢と曲げ強度の関係と強度増進曲線（SH-PoC）

全体として比較的長期間にわたって高い相関性を有しており，各強度増進式の相関係数に有意な差は認められなかった。一方，SH-PoC では近似範囲の最大値(Te_{max})の変化に伴って各関数の相関係数に差が認められ，Te_{max} が(1～6)の区間では，重相関係数が Weibull 関数，Logistic 関数，Gompertz 関数の順に高く，Te_{max} が(8～50)の区間では，Gompertz 関数，Logistic 関数，Weibull 関数の順に高い近似精度となっていた。

以上のことから，強度増進過程の近似式として Weibull 関数，Gompertz 関数，Logistic 関数のいずれの関数でも評価は可能であるため，コンクリートの強度特性や目標とする強度の推定範囲，対象となる実験データの分布密度を考慮して，最適な強度増進式を選択すべきであると考えられる。本論文では，コンクリート舗装における交通開放時の曲げ強度や設計基準曲げ強度への到達時期の推定の観点から，早期材齢において近似精度の高い Weibull 関数をポーラスコンクリートの強度増進式として選択した。

(3)強度増進式の適用性の検討

室内養生および屋外養生を行った N-PoC および SH-PoC の等価材齢(Te_{α})と曲げ強度の関係，ならびに室内における試験結果から得られた N-PoC および SH-PoC の強度増進曲線(Te_{max}=50)を**図－１１**および**図－１２**に示す。N-PoC の強度増進曲線は，室内における等価材齢と曲げ強度の関係を概ね表現できていると考えられるが，SH-PoC の強度増進曲線は，等価材齢の経過とともに曲げ強度が強度増進曲線を上回る傾向がみられた。この傾向は，屋外養生した N-PoC および SH-PoC の等価材齢と曲げ強度の関係に明確に現れており，等価材齢 15 日以降では，試験結果が強度増進曲線を上回って増進していた。室内養生および屋外養生における等価材齢と曲げ強度の関係と強度増進曲線の乖離の傾向から，N-PoC および SH-PoC の曲げ強度の増進過程は，等価材齢 15 日以内において強度増進式の適用が可能であると考えられる。屋外養生を行った N-PoC および SH-PoC において試験結果と強度増進曲線の乖離が顕著であった原因は，湿度等の環境条件の影響と考えられ，



図－１３ 近似範囲と見かけの終局曲げ強度

表－４ 所要強度における等価材齢の算定値

	等価材齢 Te_α(日)			
曲げ強度	f_b＝3.5(N/mm²)		f_b＝4.5(N/mm²)	
Te_{max}	N-PoC	SH-PoC	N-PoC	SH-PoC
50	1.87	0.768	5.66	1.43
40	1.87	0.769	5.73	1.38
30	1.87	0.769	5.73	1.38
25	1.87	0.769	5.60	1.36
20	1.87	0.767	5.64	1.33
15	1.87	0.767	5.61	1.33
10	1.85	0.763	5.77	1.29
8	1.81	0.762	－	1.28
6	1.78	0.761	－	1.27
4	－	0.751	－	1.24

今後の検討が必要である。

強度増進式の適用範囲を等価材齢 15 日以内と限定した場合，交通開放時の設計基準曲げ強度 (f_b=3.5N/mm²) および設計基準曲げ強度 (f_b=4.5N/mm²)は，明らかに等価材齢 15 日以内に満足することから，近似範囲を変化させて所要強度に到達する等価材齢の算定を行った。近似範囲の最大値(Te_{max})は，Weibull 関数による近似で重相関係数 R^2＝0.80 以上の範囲とした。近似範囲の変化と見かけの終局曲げ強度の関係を**図－１３**に，所要強度における等価材齢の算定値を**表－４**に示す。見かけの終局曲げ強度は近似範囲の増加にともなって漸増しており，近似曲線が変化していることがわかる。一方，所要の強度に到達するまでの等価材齢 Te_αの算定差は, 曲げ強度 3.5N/mm² で 0.1 日程度(N-PoC：1.78～1.87 日，SH-PoC：0.751～0.768 日)，4.5N/mm² で 0.2 日程度(N-PoC：5.60～5.77 日，SH-PoC：1.24～1.43 日)であった。これらのことから，設計基準曲げ強度によっても異なるが，等価材齢をパラメータとする強度増進式を用いることによって比較的短期間の室内試験から，ポーラスコンクリートが所要の曲げ強度に到達する材齢を判定することが可能であると考えられる。

4.まとめ

本研究で得られた主な結論を以下に示す。

(1) 環境温度がポーラスコンクリートの曲げ強度発現性に及ぼす影響は，Arrhenius 式において活性化エネルギーが材齢によらず一定として算出される等価材齢を用いることが有効である。

(2) ポーラスコンクリートの曲げ強度の増進式は，等価材齢の算出によって Weibull 関数，Gompertz 関数，Logistic 関数のいずれの関数においても評価は可能である。また，強度増進式の近似範囲と相関係数の関係から最適な強度増進式を選択することにより，精度良く強度増進過程を評価することができる。

参考文献

1) 日本道路協会：セメントコンクリート舗装要綱，1984
2) 友沢史紀，牛島栄：最近の積算温度方式の発展とその応用，セメント・コンクリート，No.527，pp.66-74，1991
3) 佐藤達三ほか：ポーラスコンクリートの若材齢曲げ強度に及ぼす養生温度の影響，第 55 回セメント技術大会講演要旨，pp.268-269，2001
4) 吉野利幸ほか：高温域を含む各種養生温度でのコンクリート強度増進性状，セメント・コンクリート論文集，No.45，pp.370-375，1991
5) 梶尾聡ほか：ポーラスコンクリートの強度特性に関する研究，第 55 回セメント技術大会講演要旨，pp.266-267，2001
6) 白井一義ほか：夏季におけるポーラスコンクリート舗装面の温度上昇抑制効果、太平洋セメント研究報告、第 138 号、pp.24-34，2000