

論文 火山礫 POC 版の表面保護効果に関する検討

城門 義嗣*¹・加賀谷 誠*²

要旨：軽量で吸水率の大きい秋田産火山礫を用いたポーラスコンクリート(火山礫 POC)版をコンクリート構造部材表面に被覆して養生効果を活用することを想定した。このため、屋外暴露試験により火山礫 POC 自体の耐久性、普通コンクリートとの付着強度を確認した。次に、被覆によるコンクリート構造物の表面保護効果を小径コア圧縮強度、夏期および冬期暴露試験において測定した断面中心温度や凍結融解試験結果から明らかにした。

キーワード：屋外暴露試験、被覆養生、表面保護効果、小径コア圧縮強度、凍結融解試験

1. はじめに

橋脚や壁面部材などの土木構造物は一般に、打放しコンクリートとすることが多く、このような構造部材を被覆して保護できる新たな建設材料の開発・研究が、構造物の長寿命化の観点から求められている。

本研究では、軽量で吸水率の大きい火山礫を用いたポーラスコンクリート(火山礫 POC)版をコンクリート構造部材表面に被覆して養生効果の活用を想定した。このため、火山礫 POC 自体の耐久性、普通コンクリートとの付着について検討した。次に、被覆したことによる普通コンクリートの圧縮強度の増加程度や夏期および冬期暴露試験において測定した断面中心温度を、被覆しない場合と比較して表面保護効果を有することを明らかにした。さらに、被覆による普通コンクリートの耐凍害性改善について検討を加えた。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

普通ポルトランドセメント(密度 3.16g/cm^3)、秋田産火山礫(最大寸法 15mm)、混合砂(表乾密度 2.58g/cm^3 、吸水率 3.03%、粗粒率 2.72)、碎石(最大寸法 20mm、表乾密度 2.68g/cm^3 、吸水率 1.34%)、

混和剤として高性能 AE 減水剤(SP)、補助 AE 剤(AE₁)、AE 剤(AE₂)を使用した。表-1 に火山礫の物理的性質を示す。表乾密度および吸水率は 24 時間吸水後の結果であり、単位容積質量および実積率は絶乾状態での結果である。

火山礫 POC の W/C を 25%、空隙率 30%としてペースト粗骨材容積比(p/g)を変えたコンクリートを製造し、示方配合を決定した¹⁾。また、W/C=60.0%、スランプ 8.0cm、空気量 6.0%の普通コンクリートを製造した。表-2 に本研究で使用したコンクリートの示方配合を示す。

2.2 火山礫 POC および供試体の製造方法

火山礫、セメント、水と混和剤の順にパン型強制練りミキサーに投入し、90 秒間練混ぜた。直径 100mm、高さ 200mm の円柱供試体および断面 $100\times 100\text{mm}$ 、長さ 400mm の角柱供試体の製造に際し、締固め終了時に空隙率が 30%となるように試料を計量して型枠に入れ、バイブレーションタンパ(振動数 50Hz、質量 15kg)により締固めを行った。縦横 $300\times 300\text{mm}$ 、厚さ 60mm の平版の製造に際し、打込み面中心で深さ 30mm の型枠断面中心に K 型熱電対をステンレス鋼線により固定した後に試料を入れ、同様に締固めを行った。脱型後、供試体質量を測定した後、標準水中養生を行った。

*1 秋田大学大学院 工学資源学研究科生産・建設工学専攻 工修 (正会員)

*2 秋田大学 工学資源学部土木環境工学科教授 工博 (正会員)

2.3 圧縮および曲げ強度試験方法

JISA1108 および JISA1106 に準じて圧縮および曲げ強度試験を材齢 28 日で行った。

2.4 屋外における暴露試験方法

材齢 7 日まで水中養生を行った角柱供試体を、吸水性の高い布を用いて一定時間表面の水分を拭き取り、これを表乾状態と仮定して 2003 年 10 月 29 日より実験棟屋上に設置して屋外暴露試験を行い、相対動弾性係数および質量減少率を測定した。

2.5 付着強度試験方法

縦横 150×150mm、厚さ 60mm の火山礫 POC 版を、110℃で 24 時間炉乾燥後、24 時間吸水させて表乾状態とし、150×150×150mm の立方体となるように側面から普通コンクリートを打継いで供試体を作製した(図-1)。24 時間で脱型後、材齢 7、28 および 91 日まで以下の環境で供試体を保存した。a.水中(20℃静水中)、b.実験室(室温 20±2℃、相対湿度 60±20%)、c.恒温恒湿室(室温 20℃、相対湿度 60%)、d.屋外暴露とした。所定の材齢で、鋼製細長片を付着境界線上に置いて割裂引張強度試験を行い、付着強度を求めた。

2.6 小径コアによる圧縮強度試験方法

普通コンクリートで製造した角柱供試体を脱型後、材齢 7、28 および 91 日まで a.水中養生(20℃静水中)、b.気中養生(室温 20±2℃、相対湿度 60±20%の実験室内放置)、c.火山礫 POC 版による被覆養生(火山礫 POC 版を 24 時間絶乾後、24 時間吸水させて表乾状態として普通コンクリート角柱供試体全面を被覆し、気中養生と同様に実験室内に放置)を行い、供試体側面部から直径 25mm、長さ 100mm の小径コアを抜き取った。加圧面に石膏キャッピングを施した後、供試体の高さ h と直径 d を測定し、小径コアによる圧縮強度試験を JISA1108 に準じて行った。

2.7 暴露試験における断面中心温度測定方法

42～44 日間水中養生を行った平版を用いて夏期における暴露試験を 2004 年 7 月 30 日～9 月 23 日の期間実施した。水平に設置した平版を用いて 5 分毎に平版断面中心温度の測定を行った。

表-1 火山礫の物理的性質

表乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	単位容積質量 (kg/l)	実積率 (%)
1.18	68.97	0.42	60.4

表-2 コンクリートの示方配合

火山礫POCの示方配合								
目標空隙率 (%)	p/g	W/C (%)	単位量 (kg/m ³)					
			W	C	L _{5~10}	L _{10~15}	SP	AE ₁
30	0.07	25.0	19	81	309	463	0.81	0.02

普通コンクリートの示方配合								
W/C (%)	s/a (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	単位量 (kg/m ³)				
				W	C	S	G	AE ₂
60.0	46.3	8.0±1	6.0±0.5	172	287	804	878	0.17

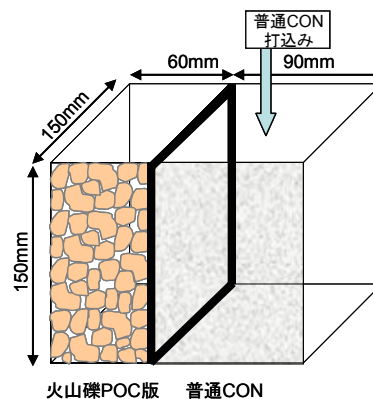


図-1 付着強度試験用供試体

また、同じ寸法の普通コンクリート版上面に火山礫 POC 版をステンレス鋼線で固定し、同様に平版断面中心温度の測定を行った。夏期に測定を行った平版を用いて冬期における暴露試験を 2005 年 2 月 14 日～3 月 29 日の期間実施した。凍結融解繰返し作用を受けやすいように、水平面より 60 度傾斜させて南向きに設置した平版の中央部で、夏期と同様に断面中心温度の測定を行った。夏期および冬期における日最高温度と日最低温度との差を日較差として求めた。また、冬期における凍結融解繰返し回数を、普通コンクリート版の断面中心温度が 0℃を境にして(正→負→正)を一回として実測温度の結果から求めた。

2.8 被覆を行った普通コンクリートの凍結融解試験方法

2.6 節の a～c に示す方法で材齢 14 日まで養生を行った普通コンクリート角柱供試体を用いて、JISA1148 : A 法に準じて試験を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 火山礫 POC 自体の耐久性と普通コンクリートとの付着強度の検討

表-3 に、火山礫 POC および普通コンクリートの 24 時間吸水率, 28 日間水中養生後における単位容積質量, 圧縮および曲げ強度を示す。表より, 火山礫 POC の 24 時間吸水率は 45.4% と極めて大きく, 単位容積質量は普通コンクリートの 1/2 程度と軽量であることがわかる。圧縮および曲げ強度は 0.7 および 0.3 N/mm² と低強度であった。このような低強度, 高吸水率かつ軽量の火山礫 POC を実際のコンクリート構造部材の表面に被覆可能か否か, 暴露試験によりそれ自体の耐久性を検討した。

図-2 に、屋外暴露試験の材齢と相対動弾性係数の関係を示す。図より、相対動弾性係数は 100% 以上を有している。これは、屋外暴露試験の初期における水和反応の進行と供試体の乾燥により密度が減少して共鳴振動数が増加し、相対動弾性係数が 100% 以上になったものと考えられ、約 2 年(越冬 2 回)経過した現時点において、この値の低下は認められない。図-3 に、前図と同時に測定した材齢と質量減少率の関係を示す。図より、質量減少率は試験開始後 7 日間晴天が続いたことにより、多量の水分が蒸発して、供試体質量が試験開始時と比べて 35% 程度減少した。その後、天候の変動に伴い水分蒸発や降雨による吸水が繰り返され 40% 程度となったが、約 2 年を経過した現時点において、供試体の損傷に伴う質量の低下は認められない。ここで、試験開始 7 日後の供試体質量を基準として質量減少率を算出すると 180 日目まで 5.6%、766 日目まで 4.9% となり、大きな変化は見られなかった。すなわち、質量減少率が 40% 程度となったのは水分蒸発によるものであり、耐久性の低下は現時点においては認められないと判断された。また、目視観察において供試体の損傷は確認されなかった。

したがって、火山礫 POC 自体は屋外暴露試験において、明確な耐久性の低下は認められない

表-3 コンクリートの物性値

	火山礫POC	普通コンクリート
24時間吸水率(%)	45.4	6.2
単位容積質量(kg/l)	1.01	2.31
圧縮強度(N/mm ²)	0.7	29.6
曲げ強度(N/mm ²)	0.3	4.2

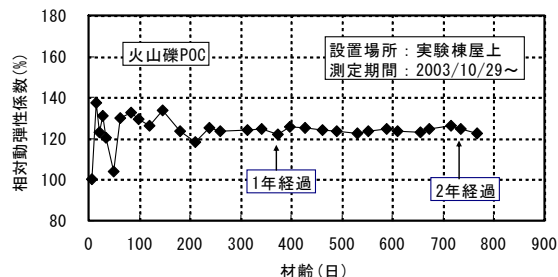


図-2 材齢と相対動弾性係数の関係

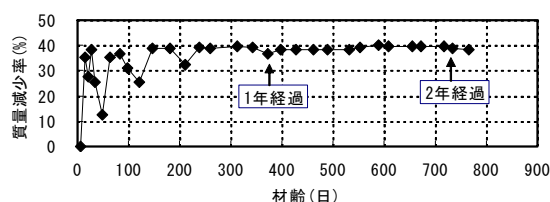


図-3 材齢と質量減少率の関係

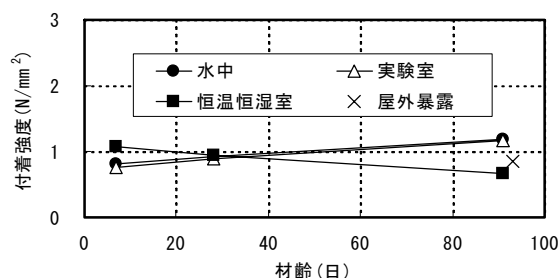


図-4 材齢と付着強度の関係

ことから、コンクリート構造部材の表面被覆材としての適用は可能であると考えられるが、今後さらに計測を継続しなければならない。

次に、火山礫 POC 版をコンクリート構造部材の表面へ被覆して使用する場合、付着が問題となる。そこで火山礫 POC 版に普通コンクリートを打継いだ時の付着強度試験を行った。図-4 に、供試体設置環境の違いによる材齢と付着強度の関係を示す。図より、これらの環境で静置した場合、材齢の進行に伴う大きな低下や増加は認められず、材齢 91 日で 0.7~1.1N/mm² の範囲となった。なお、付着強度試験後における破断面の状況を観察した結果、火山礫 POC と普通コンクリートの打継部分の割裂引張による破断が、付着界面で発生せず火山礫 POC 部分で発生した。

これはコンクリート中のモルタルが、付着面の POC の空隙に侵入して界面が強化されたことにより、強度の低い火山礫 POC 部分で破壊が生じたことによると考えられる。以上の結果から、火山礫 POC のコンクリート構造部材表面への被覆は可能であると判断される。

3.2 火山礫 POC 版の被覆による表面保護効果

(1) 小径コア圧縮強度に基づく養生効果の評価

コンクリート構造物の耐久性を確保するには、養生を十分行うことが極めて重要である。そこで、養生方法の異なる普通コンクリートから直径 25mm の小径コアを採取して圧縮強度試験を行い、火山礫 POC 版の被覆による養生効果について相対的な評価を行った。図-5 に、養生方法の違いによる小径コア圧縮強度の比較を材齢ごとに示す。なお、図中には、材齢 28 日での標準供試体の圧縮強度も示した。図より、水中養生の場合、材齢 28 日における小径コアの圧縮強度は、標準供試体の圧縮強度よりも 4.6N/mm^2 小さくなった。これは、既往の研究結果²⁾と一致しており、コアの直径と関係があると考えられる。このとき、小径コアの圧縮強度は水中養生を行った場合、全ての材齢で最も大きくなるのに対して、気中養生を行った場合、全ての材齢で最も小さく、被覆養生を行った場合、気中養生よりも 1.1~1.2 倍強度が大きくなった。これは、吸水率の大きな火山礫 POC 版の被覆により普通コンクリート表面からの水分蒸発が緩和され、コンクリートの水和反応がより進行したためと考えられる。このことから、火山礫 POC 版による被覆は、強度低下や、養生初期の乾燥による表面の収縮ひび割れを低減するなどの養生効果を有していると考えられ、コンクリート構造物の耐久性の向上に効果を発揮すると思われる。

(2) 暴露試験における断面中心温度測定に基づく表面保護効果の検討

火山礫 POC 版の被覆による表面保護効果を検討するため、屋外暴露試験による被覆した場合の、普通コンクリート版断面中心温度の測定を

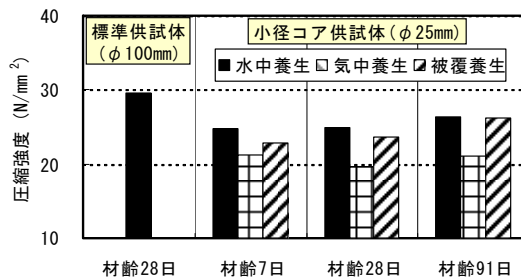


図-5 養生方法と圧縮強度の比較

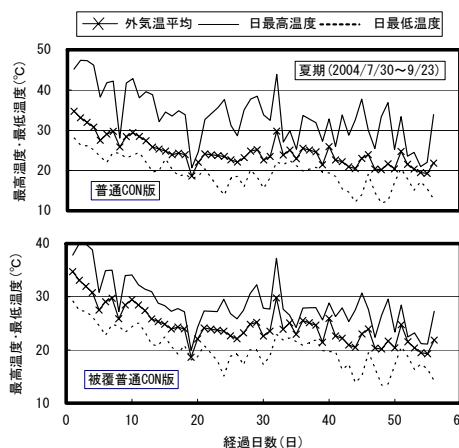


図-6 夏期における火山礫 POC 版の被覆の有無による普通 CON 版の最高・最低温度の推移

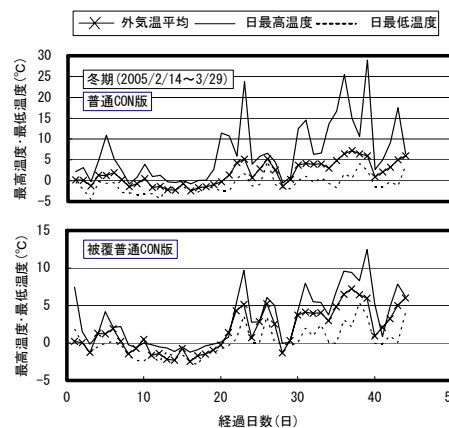


図-7 冬期における火山礫 POC 版の被覆の有無による普通 CON 版の最高・最低温度の推移

行った。図-6 および図-7 に、被覆しない普通コンクリート版および被覆した普通コンクリート版の断面中心温度の夏期および冬期における日最高温度と日最低温度の推移を示す。図中には比較として 24 時間の平均外気温を示した。図より、被覆した普通コンクリート版の温度変動幅は測定期間 2 カ月を通じて小さく、夏期においては普通コンクリート版が高温となることを

低減し、冬期においては普通コンクリート版内部の温度低下を緩和することがわかる。

図-8 および図-9 に一例として、被覆した普通コンクリート版の断面中心温度の一日の経時変化を、夏期および冬期における2時間毎の平均値で示した。図中には同時に測定した外気温も示す。図より、夏期および冬期とも日最高温度から日最低温度の間の温度昇降速度が、火山礫 POC 版で被覆した方が緩速となることがわかる。

表-4 に、被覆の有無による普通コンクリート版断面中心温度の夏期、冬期における日較差と冬期における日最低気温の平均値および凍結融解繰返し回数を示す。ここで、凍結融解繰返し回数は、図-7 に示したデータに基づいて算出した。表より、日較差は、被覆した場合、夏期および冬期とも被覆しない場合の1/2程度となり、膨張・収縮の原因となる断面内の温度変動が大きく低減されること、冬期における日最低温度は、被覆した場合0.9℃高く、日最低気温の平均値より1.2℃高くなること、凍結融解繰返し回数が約1/3に低減されることが実測温度の結果から明らかとなった。

これらの結果より、火山礫 POC 版による被覆は、普通コンクリート部材の夏期における温度変化による膨張・収縮の低減と、冬期における凍結融解繰返し回数と凍結融解速度の低減など、温度変動に誘発されるコンクリートの劣化に対する表面保護効果を発揮すると判断される。

(3) 火山礫 POC 版の被覆による普通コンクリートの耐凍害性向上に関する検討

(2) で得られた温度変動による耐凍害性向上に関する結果を検証するため、火山礫 POC 版で被覆した場合の普通コンクリートの凍結融解試験の検討を行った。図-10 および図-11 に、養生方法の異なる普通コンクリートの凍結融解試験におけるサイクル数と相対動弾性係数、質量減少率の関係を示す。図より、相対動弾性係数の低下は、270 サイクルまでは、水中養生の場合が最も大きく、次いで被覆養生、気中養生とな

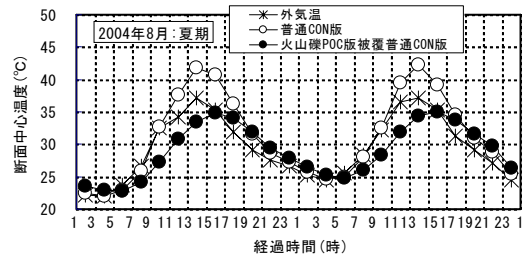


図-8 断面中心温度の経時変化(夏期)

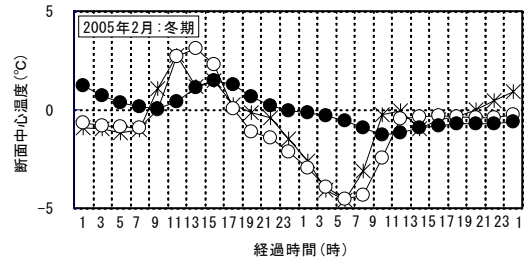


図-9 断面中心温度の経時変化(冬期)

表-4 被覆の有無による普通 CON 版断面中心温度の日較差および冬期日最低気温の平均値と凍結融解繰返し回数

	被覆無	被覆有
普通コンクリート版断面中心温度の日較差の平均値(夏期)	15.7℃	8.7℃
普通コンクリート版断面中心温度の日較差の平均値(冬期)	5.6℃	2.2℃
普通コンクリート版断面中心温度の日最低温度の平均値(冬期)	-1.5℃	-0.6℃
日最低気温の平均値(冬期)	-1.8℃	
凍結融解繰返し回数(回)	20	6

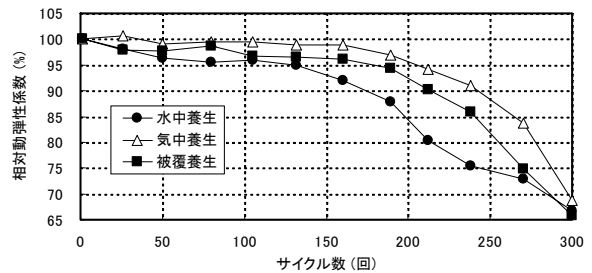


図-10 サイクル数と相対動弾性係数の関係

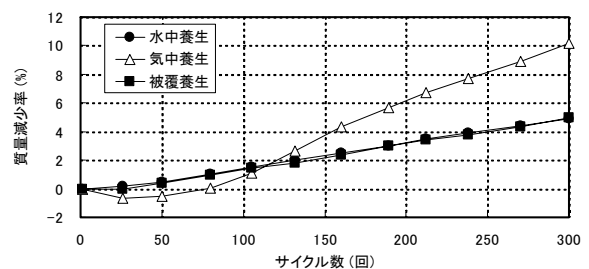


図-11 サイクル数と質量減少率の関係

ったが、300 サイクル終了時では、全て同程度となり 66~69%の範囲となった。質量減少率は、気中養生の場合、試験開始時に供試体が乾燥していたため、26 サイクルまでの間に吸水し質量が増加したと考えられるが、その後、100 サイクルを越えると著しく増加し、300 サイクル終了時において、水中および被覆養生の約2倍となり、著しいスケーリングにより粗骨材が供試体表面に露出している状況が観察された。水中および被覆養生は、ほぼ同様に直線的に増加したが、供試体表面のスケーリングは気中養生の場合より軽減された。図-12 に、凍結融解試験 300 サイクル終了後ののはりの折片による圧縮強度の比較を示す。図より、被覆養生を行った場合の圧縮強度は気中養生よりも 1.7 倍大きく、水中養生の場合と同程度となった。したがって、火山礫 POC 版による被覆は、気中養生と同様の環境条件下に置かれた場合であっても、コンクリート表面の劣化や強度の低下を低減するなど耐凍害性を改善することから、湿潤養生が困難な柱や梁などのコンクリート構造部材の表面へ使用した場合、凍害に対する表面保護効果を発揮することが検証された。

4. まとめ

多孔質で高吸水性の秋田産火山礫を用いたポーラスコンクリート(火山礫 POC)版を構造部材の表面などに被覆することを想定した屋外暴露試験を行い、火山礫 POC 自体の耐久性や普通コンクリートとの付着、断面中心温度の測定および凍結融解試験を実施して被覆による表面保護効果を検討した結果、以下の結論が得られた。

- (1) 約 2 年の屋外暴露試験における火山礫 POC 自体の相対動弾性係数や質量減少率の変化は少なく、耐久性の低下は認められなかった。また、普通コンクリートとの付着強度試験を行った結果、静置した環境条件に拘わらず、材齢 91 日で $0.7\sim 1.1\text{N/mm}^2$ の範囲となり、材齢の進行による大きな低下は認められな

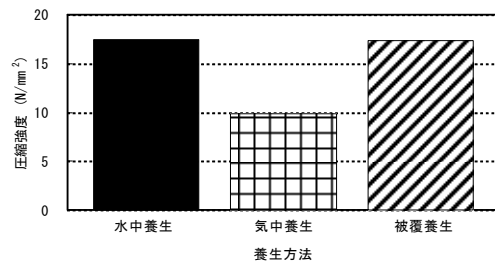


図-12 凍結融解試験終了後の圧縮強度の比較

かった。

- (2) 火山礫 POC 版で被覆した場合に採取した小径コアの圧縮強度は、材齢 7~91 日で被覆しないで気中養生した場合よりも 1.1~1.2 倍大きく、乾燥による圧縮強度の低下を低減すると考えられ、養生効果を有していることが明らかとなった。
- (3) 火山礫 POC 版による普通コンクリートの被覆は、夏期において温度変動によるコンクリートの膨張・収縮の低減、冬期においてコンクリートの温度低下の緩和や凍結融解繰返し回数を約 1/3 に低減するなどの表面保護効果を発揮することが明らかとなった。
- (4) 凍結融解試験の結果、火山礫 POC 版で被覆した場合、相対動弾性係数の低下は緩速となること、300 サイクル終了時で質量減少率の低下が水中養生の場合と等しく、気中養生の 1/2 でスケーリングを軽減することから、凍害に対する表面保護効果を発揮することが検証された。

参考文献

- 1) 城門義嗣, 加賀谷誠: 火山礫を用いたポーラスコンクリートのヒートアイランド現象抑制効果に関する検討, 土木学会論文集, No.781/V-66, pp.133-143, 2005.2
- 2) 寺田謙一, 谷川恭雄, 中込昭, 佐原晴也: 小径コアによる構造体コンクリート強度の推定法, コンクリート工学, Vol.39, No.4, pp.27-32, 2001.4