

論文 人工軽量骨材の自己養生効果による暑中コンクリートの物性向上に関する研究

申 相澈^{*1}・小山 智幸^{*2}・小山田 英弘^{*3}・肥後 康秀^{*4}

要旨：本研究は、暑中環境で施工されるコンクリートに及ぼす人工軽量骨材の自己養生効果の有効性について模擬部材を用いて検討したものである。人工軽量細骨材を普通コンクリートの細骨材の一部として置換したコンクリートを対象として、暑中環境下でフレッシュ性状、圧縮強度及び透気性状について実験を行った。実験の結果、人工軽量細骨材を混入したコンクリートは、仕上げ作業性が良好であり、自己養生効果により強度及び耐久性に有効であることがわかった。従って、人工軽量細骨材の使用は暑中コンクリートにおける施工性及び品質向上に効果的であると考えられる。

キーワード：暑中コンクリート、人工軽量骨材、自己養生効果、仕上げ作業性、圧縮強度、透気性状

1. はじめに

人工軽量骨材を用いたコンクリートは、軽量性と断熱性などのメリットを持っており、良質な天然骨材の枯渇に対する代替効果や品質改善にも貢献できる。また、吸水率が高い人工軽量骨材を使用した場合、周囲の急激な乾燥に対して骨材に吸水された水が放出されることで乾燥収縮や自己収縮が小さくなるとともに、長期にわたってコンクリートの強度増進に寄与する。この特殊な性質は、人工軽量骨材の自己養生効果と呼ばれており、このため養生が困難な場合でも所定の強度が得られる¹⁾³⁾。

一般的に暑中コンクリートの施工においては、温度上昇や急激な乾燥による強度や耐久性の低下が問題とされており、十分な養生を行なうことが重要である。ここで人工軽量骨材の自己養生効果は、暑中コンクリートのように通常よりもコンクリートの温度が高く、乾燥しやすい条件でさらに効果を発揮することが期待される。

このような背景から、本研究では、人工軽量骨材を使用することによる自己養生効果に着目し、暑中環境で施工されるコンクリートを対象とし、その効果を模擬部材レベルで検討した。普通コンクリートに対して、普通コンクリートの細骨材の一部を人工軽量細骨材と置換してコンクリートの物性を比較した。さらに、参考として一般的な軽量コンクリート1種に関しても実験を行った。フレッシュ状態では人工軽量骨材の補水性が初期水分移動及び凝結特性に及ぼす影響について検討し、特に床スラブの表面仕上げ作業性に関して評価した。硬化体においては、暑中コンクリートの強度及び耐久性に及ぼす人工軽量細骨材の有効性を評価することを目的とした。

2. 実験概要

2.1 コンクリート調査及び試験体

表-1 に実験概要を示す。実験は暑中環境の影響を強く受ける夏季に行った。コンクリートの調査は、表-2 に示すように基準となる普通コンクリート（普通）に対して、細骨材の体積比で 25%（SL25）及び 50%（SL50）を軽量細骨材で置換したもの、及び普通と同様の設計条件における軽量コンクリート1種（軽量1種）の計4調査とした。模擬部材は、図-1 に示すとおり、各調査に対して、1m 角の柱試験体及び 0.2m 厚の床スラブ試験体を作製した。床スラブ試験体の養生は、無養生、給水養生、シート養生の3種類を採用した。給水養生はスラブ上面

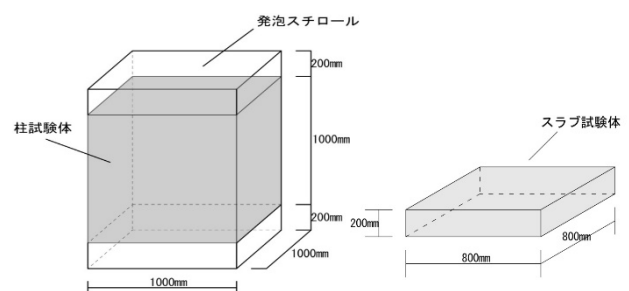


図-1 模擬試験体の概要

表-1 実験概要

実験環境	調査名	部材	養生		
			方法	開始時期	期間
暑中期 (35±2℃)	普通 SL25 SL50 軽量1種	柱 (1m角)	—	—	—
		床 (800×800 ×200mm)	無養生	—	—
			給水 シート	ブリーディング 終了直後	材齢5日 まで

*1 九州大学 大学院生（正会員）

*2 九州大学 准教授 工博（正会員）

*3 北九州市立大学 准教授 工博（正会員）

*4 人工軽量骨材協会

表-2 コンクリートの調合 (27-18-20-N)

調合名	W/C (%)	s/a (%)	空気量 (%)	単位量 (kg/m ³)						AD (C×%)	AE (C×%)	単位容積質量 (kg/m ³)
				W	C	S	SL	G	GL			
普通	53	46.4	4.5	184	348	789	—	963	—	1.1	0.0044	2,284
SL25				184	348	591	146	963	—	1.1	0.006	2,232
SL50				184	348	394	291	963	—	1.2	0.004	2,180
軽量1種	47	47.1	5.0	178	379	789	—	—	576	1.1	0.006	1,922

に 1～2cm 程度の水張りを行い、シート養生はポリ塩化ビニル製のシートを用い、型枠上面を密封した。また、いずれの養生もブリーディング水が消失した直後に開始した。

生コンクリートの製造は、パッチごとにフレッシュコンクリートの性状を確認し、管理目標範囲内となるように骨材の表面水率及び混和剤量を調整した。練り混ぜたコンクリートは、アジテータ車にて 60 分間待機させた後に品質試験を行い、現場に移動して打込みを行った。打込み時には、棒形振動機で振動を加えるとともに、型枠面を木槌で叩いて締め固めた。普通調合以外では過剰な振動を加えた場合に軽量骨材の浮きがやや見られたものの、概ね施工性に違いはなかった。柱試験体は、打込み後上面をコテ均しした後に発泡スチロールを被せて上下を断熱状態にし、材齢 7 日まで型枠を存置した。床スラブ試験体の表面仕上げは、打設直後に骨材を押さえて一次仕上げを行った後、概ね 30 分間隔でブリーディング終了まで表面状態を確認しながら、金コテを用いて平滑に仕上げた。

2.2 使用材料及び調合

本実験で使用した材料を表-3 に示す。人工軽量骨材は粗骨材、細骨材ともに膨張頁岩を原料として焼成された市販の製品（非造粒型、写真-1 参照）を用い、いずれも十分にプレウェットした状態で使用した。また、表-2 にコンクリートの各調合を示す。

2.3 測定項目

表-4 に測定項目を示す。

フレッシュ状態では、品質試験としてコンクリート温度、スランプ、空気量、単位容積質量を測定した。ブリーディングは、JIS A 1123 に準拠して φ250×285mm の JIS 規格容器で測定した。水分蒸発量は、φ250mm 容器（大）及び φ100mm 簡易型枠（小）を用い、コンクリートの質量を 10 分間隔で測定し、時間経過に伴う質量減少値から求めた。ブリーディングと蒸発量は部材と同一環境で試験を行い、床スラブ試験体の表面仕上げの作業容易性に及ぼす影響に関して検討した。表面仕上げ性の評価は、熟練作業者による定性的な評価とした。凝結は、貫入抵抗試験と N 式貫入試験を採用した。貫入抵抗試験は、JIS A 1147 に準じて行った。N 式貫入試験⁴⁾は、φ



(a) 粗骨材

(b) 細骨材

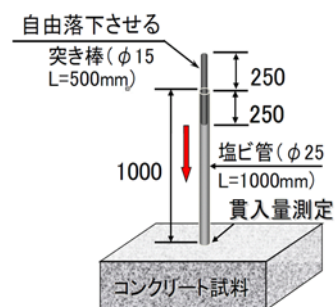
写真-1 人工軽量骨材の外観

表-3 使用材料

種類	記号	品名及び物性
セメント	C	普通ポルトランドセメント、密度 3.15g/cm ³
細骨材	S	玄界灘産海砂、表乾密度 2.57g/cm ³ 、吸水率 1.80%
	SL	人工軽量骨材、表乾密度 1.90g/cm ³ 、吸水率 15.2%
粗骨材	G	古賀市谷山産砕石、表乾密度 2.72g/cm ³ 、吸水率 0.71%
	GL	人工軽量骨材、表乾密度 1.67g/cm ³ 、吸水率 31.4%
混和剤	AD	AE 減水剤（遅延型 1 種）
	AE	AE 助剤

表-4 測定項目

状態	対象	測定項目
フレッシュ	各調合	● フレッシュ性状：コンクリート温度、スランプ、空気量、単位容積質量 ● ブリーディング：JIS A 1123 に準拠 ● 蒸発量：φ250mm 容器及び φ100mm 簡易型枠で測定 ● 貫入抵抗試験：JIS A 1147 に準拠 ● N 式貫入試験：突き棒（φ15mm、L=50cm）を、高さ 75cm から自由落下させ、コンクリートに突き刺さった深さを測定（打込み直後、1h、2h、3h 後に測定）
硬化後	柱	● 圧縮強度：7d、28d、91d ● 密度
	床	● 圧縮強度：91d ● 透気性状（トレント）：91d

図-2 N式貫入試験⁴⁾

250×500mm の容器に高さ 450mm までコンクリートを打込み、棒状パイプレータで加振した中央部を除いた 4 点から実施した。所定の時間に図-2 のように一般的なコンクリート実験で使用する突き棒（φ15mm、L=50cm）を、高さ 75cm から自由落下させ、コンクリートに突き刺さった深さを測定した。この方法により、打込み初期状態の凝結程度を把握することが可能である。

硬化コンクリートにおいては、標準水中養生を行った管理用供試体と、柱及び床のコア試験体の密度と圧縮強度を測定した。柱部材から抜いたコア試験体は、図-3 のように密度と強度試験用に分けて採取し、密度用はさらに上端と下端の部分に三等分に切断してφ100×50mm の試験体を 8 個作製した。また、床部材においては、スラブ表面の 12 箇所でトレント試験により透気性状を検討した。トレント透気試験⁵⁻⁶⁾は、コンクリート表面に二重チャンバーで密閉空間を作り、その内部チャンバーの気圧変化から透気係数を算出する方法で、測定結果の信頼性が比較的高く、完全な非破壊試験であるため近年は広く使用されている。

3. 実験結果及び考察

3.1 フレッシュ性状

フレッシュコンクリートの性状を表-5 に示す。軽量骨材を用いた調合の空気量は、それぞれ骨材修正係数を SL25 : 0.2%, SL50 : 0.3%, 軽量 1 種 : 0.8% を差し引いた値を示している。軽量細骨材の混入量が多いほどスランプが大きくなったが、すべての調合において目標値（スランプ:18±2.5cm, 空気量:4.5(軽量 1 種は 5.0)±1.5%）を満足した。また、コンクリート温度は暑中期の目標値とした 35±2℃の範囲内であった。

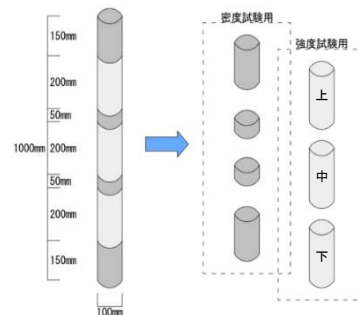


図-3 コア抜きした試験体の概要

表-5 フレッシュ性状

調合名	スランプ (cm)	空気量 (%)	単位容積 質量(kg/L)	コンクリート 温度(℃)	外気温 (℃)
普通	16.5	4.9	2.328	33	34
SL25	18.5	4.3	2.282	34	36
SL50	19.5	5.2	2.204	34	36
軽量 1 種	17.5	5.2	1.898	34	34

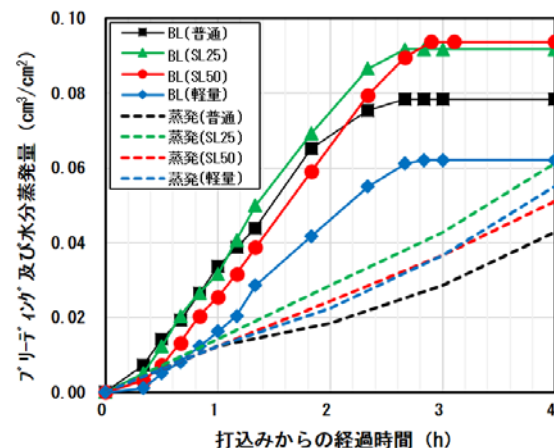


図-4 ブリーディングと蒸発量



写真-2 全体的な実験写真

3.2 ブリーディングおよび蒸発量

図-4 にブリーディング量と水分蒸発量を示す。まず、ブリーディングにおいては、全ての調合で打込みから約3時間経過した時点で終了し、大きな差は見られなかった。従って、気温と湿度などの環境条件が同一の場合は、調合上に骨材の種類及び量の違いがあっても、ブリーディング時間への影響は小さいことが分かる。ブリーディング量は、普通コンクリートでは $0.08\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 、軽量細骨材を混入した SL25 と SL50 では $0.09\text{cm}^3/\text{cm}^2$ となり、若干大きな値となった。一方、W/C が他の調合より小さい軽量1種の場合、ブリーディング量は $0.06\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 程度と小さくなった。打込み後4時間までの水分蒸発量は、 $0.04\sim 0.06\text{cm}^3/\text{cm}^2$ の範囲で、「SL25 > SL50 ≒ 軽量1種 > 普通」となっており、蒸発量自体が非常に小さい値ながらも軽量骨材を使用した調合が多くなる傾向を示した。

3.3 凝結

凝結特性を図-5 に示す。貫入抵抗試験の結果から、打込み後約5.0～5.5時間で始発となり、6.2～6.6時間後に終結した。普通と軽量1種は同様の凝結速度を示しており、SL25 は普通よりも15分程度、SL50 は30分程度始発、終結ともに遅くなった。このように、軽量細骨材が凝結速度を少し遅らせる結果となったが、大差はないと判断している。一方で、N式貫入試験の結果、打込み後早期にはSL50の90分後のプロットを除いて軽量骨材を混入した調合は普通よりも貫入深さが大きい傾向を示しており、暑中期におけるこわばりの抑制にも効果があると推察された。なお、ブリーディング終了時点である練混ぜから約4.5時間後の測定値は、すべての調合で同程度の値となった。

3.4 床スラブの仕上げ作業性の評価

仕上げ作業性に関して、軽量細骨材を含む SL25 及び SL50 の試験体では普通よりコテ均しを行える時間が多く確保でき、仕上げ作業が容易であった。また、表面のブリーディング水が少なくなったときのコテ均し時の抵抗（滑り）は、さほど違いを感じられなかった。これは、SL25 及び SL50 は普通と比べてブリーディング終了までの時間は同程度であったが、ブリーディング量がやや多く、蒸発量も若干多く持続していることから、コンクリート表面付近の水分が高く保たれていたと推察され、このことによりコテ仕上げ作業が容易であったと考えられる。すなわち表面乾燥が早期に始まる暑中環境の床スラブコンクリートにおいては、コンクリートに人工軽量骨材を使用することにより、表面の水分が適度に保たれ、表面のこわばりが抑制されることから、仕上げ作業性が普通コンクリートよりも優れることが確認された。

3.5 密度の上下分布

図-6 に柱試験体から抜いたコアの絶乾密度の上下分布を示す。普通では、底面と上面の差が約 $0.1\text{g}/\text{cm}^3$ 程度であったのに対し、SL25 及び SL50 は、上面に行くほど密度が小さくなっており、特に表面から10cm以内の部分の密度は顕著に小さくなった。これは、軽量細骨材が表面付近に多く分布したことが原因と考えられ、人工軽量細骨材を用いた場合には、締固めにおいて過度な振動による材料分離に注意する必要があると思われる。一方、軽量1種の試験体は、 $1.61\sim 1.74\text{g}/\text{cm}^3$ 程度の密度分布で上下の密度差は小さくなっており、これは他の配合よりも水セメント比が小さく、材料分離が生じにくかったためと考えられる。

3.6 圧縮強度

図-7 に圧縮強度試験結果を示す。管理用供試体では、普通、SL25 及び SL50 の3つの調合で同様の強度性状を示した。それに対して、模擬試験体のコア強度は、人工軽量細骨材の混入量が多いほど、圧縮強度が高くなった。また、軽量1種の場合、管理用供試体よりもコア試験体の強度は高いことが確認された。養生方法の違いについ

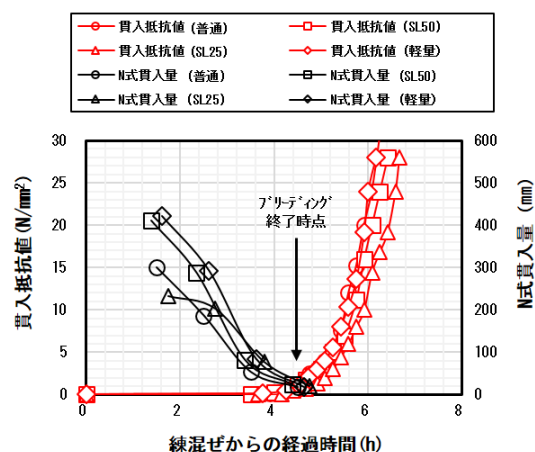


図-5 練混ぜ直後からの凝結特性

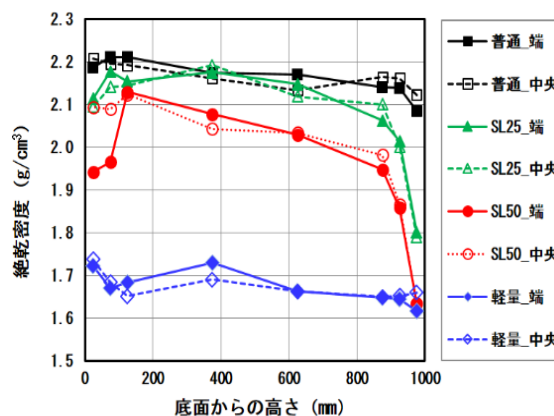
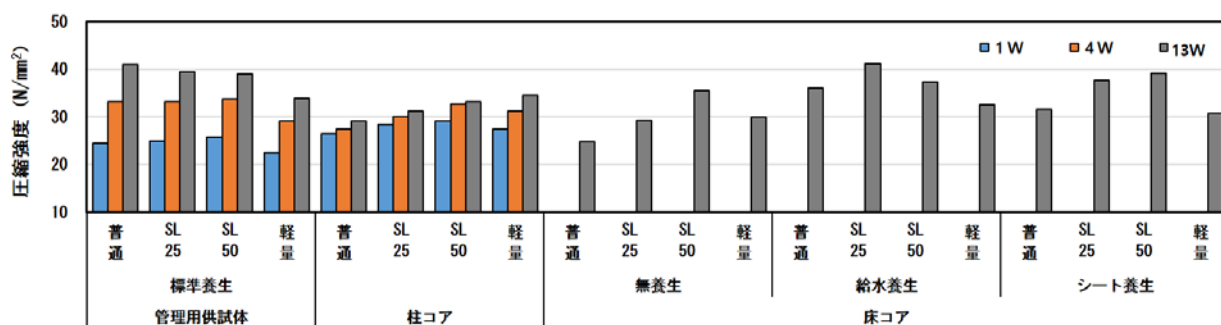


図-6 柱の上下密度分布

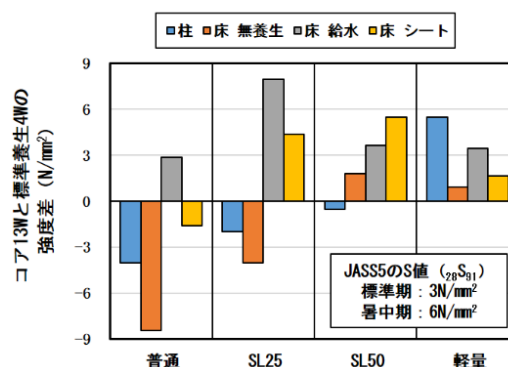


図－7 圧縮強度

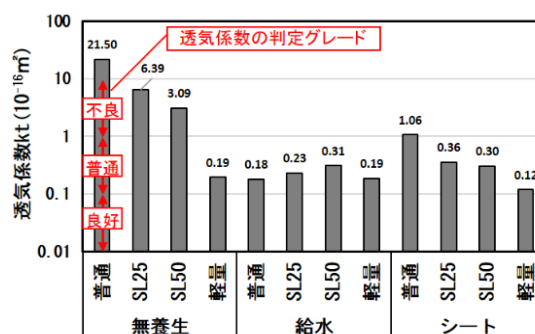
て調べると、程度の違いはあるが全ての調査において給水養生及びシート養生の効果が認められた。普通は、無養生と給水養生で圧縮強度が 10N/mm^2 程度違いが見られ、暑中コンクリートにおける養生の重要性が本実験でも確認された。SL25 は、普通と比べて無養生条件で強度が高くなり、さらに養生を積極的に実施すれば強度向上効果が確認された。SL50 は、無養生条件で他の試験体より最も強度が高く、普通コンクリートの給水養生試験体に相当する強度発現が得られた。軽量1種も、養生方法による強度性状の違いは少ない。これらの結果から、人工軽量骨材の自己養生効果が暑中コンクリートの強度性状に有効であり、養生方法の違いによる強度性状のばらつきを改善できることが認められた。なお、柱コアの強度において、上中下（図－3 参照）の強度差は認められなかった。これは、3.5 で記述したように、コア試験体の上下密度差が上部から 10cm の範囲に限定されるためと考えられる。

図－8 に材齢 13W における構造体強度と材齢 4W における標準養生供試体強度の差を示す。普通の柱は 4.0N/mm^2 の差であったが、部材の厚さが小さく乾燥の影響を受けやすい床の場合、無養生では 8.4N/mm^2 となり、適切な養生を行わない場合には強度差が大きくなることが確認された。しかし、軽量細骨材を混入した SL25 及び SL50 では、無養生の床の場合においても強度差が 4.0N/mm^2 以下で普通よりも小さくなっており、軽量骨材の補水性による自己養生効果が表れている。特に SL50 の場合、柱のコアは管理用供試体の 4W 強度とほぼ同程度、床のコアではむしろ大きな値を示した。なお、床の養生方法ごとに比較すると、養生を行うことに伴い、さらなる S 値低減効果が見られた。軽量1種の場合には、全ての条件で 4W の管理用供試体の強度よりも高くなった。

これらのことから、暑中コンクリートの施工において、人工軽量細骨材を普通骨材に対して置換することにより、養生条件による強度発現の差を小さくすることができ、構造体強度を確保できることから S 値を低減可能であることが示唆された。



図－8 材齢 13W における構造体強度と材齢 4W における標準養生供試体強度の差



図－9 透気性状

3.7 透気性状

透気係数は、耐久性に強く関連するコンクリート表層からの物質移動特性を表す有効な指標である⁷⁻⁹⁾。トレント透気試験による透気係数及び既往の研究¹⁰⁾から提示している透気係数の判定グレードを図－9 に示す。透気係数は、普通の無養生試験体が $21.5 \times 10^{-16}\text{m}^2$ と最も高くなった。軽量細骨材を入れた SL25 及び SL50 の試験体では、養生を実施しなくても $3.09 \sim 6.39 \times 10^{-16}\text{m}^2$ まで大幅に改善されたものの、そのグレードが「不良」となるため、透気性状の観点からは給水もしくはシート養生を行い、品質を高めることが好ましい。また、軽量1種は、養生方法にかかわらず「普通」のグレードとなり、養生が不要な結果となった。

4. まとめ

本研究では、暑中コンクリートに及ぼす人工軽量骨材の自己養生効果について模擬部材を用いた実験を行い、以下の結果を得た。

- 1) 人工軽量細骨材を混入したコンクリートは、ブリーディング量が若干多く、骨材の補水性が高いため表面のこわばりが抑制されることから仕上げ作業性が良好となった。
- 2) 人工軽量細骨材を普通細骨材の 25%以上置換することによって、養生条件によらず強度性状が向上した。
- 3) 人工軽量骨材の自己養生効果により、養生方法によらず透気性状を改善することができるため耐久性向上に有効である。
- 4) 以上のことから、人工軽量細骨材の使用は暑中コンクリートにおける施工性及び品質向上に効果的であると考えられる。

謝辞

本研究の実施に際し、株式会社麻生、麻生セメント株式会社、麻生コンクリート工業株式会社、太平洋セメント株式会社の各位に多大な協力を得た。ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) 松藤泰典ほか：人工軽量骨材コンクリートの自己養生機能に関する研究，日本建築学会九州支部研究報告，Vol.40，pp.173-176，2001.7
- 2) 成川史春ほか：人工軽量細骨材の自己収縮低減用材

料としての適用，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.435-436，2006.7

- 3) 河野克哉ほか：人工軽量骨材を用いたコンクリートの収縮に及ぼす養生の影響，コンクリート工学年次論文論文集，Vol. 22，No. 2，pp.241-246，2000
- 4) 土木学会：コンクリート構造物におけるコールドジョイント問題と対策，pp.53-54，2000.7
- 5) 野中英：簡易透気試験による構造物コンクリートの品質評価方法に関する研究，日本大学博士学位論文，pp.2-9，2015
- 6) R.J. Torrent：A two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of permeability to air the concrete cover onsite. Materials and Structures，Vol.25，No.6，pp.358-365，1992
- 7) 田中章夫ほか：表層透気性による既存 RC 構造物の中性化予測に関する研究，日本建築学会構造系論文集，Vol.78，No.691，pp.1539-1544，2013.9
- 8) 秋岡洋平ほか：透気特性に基づくコンクリートの空隙構造同定と熱力学連成解析による耐久性予測，コンクリート工学年次論文論文集，Vol.30，No.1，pp.675-680，2008
- 9) 唐沢智之ほか：既存建物の調査事例に基づいた仕上塗材の透気係数と中性化に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.1265-1266，2010.9
- 10) 井上翔ほか：現場簡易透気試験による実構造物コンクリート表層の透気性評価とその相互比較，第 35 回土木学会関東支部技術研究発表会，Vol.35，No.5，2008.3