

# 報告 屋外曝露を実施した膨張コンクリートの諸特性

長塩 靖祐<sup>\*1</sup>・岸 利治<sup>\*2</sup>・鎌田 知久<sup>\*3</sup>・竹下 永造<sup>\*4</sup>

**要旨:** 本報告では約 12 年間屋外曝露した膨張コンクリートの耐久性について、膨張材を使用しないコンクリートと比較検討を実施した。屋外曝露は実構造物打設時に小型の試験体を作製し、供用されている構造物と同環境下で実施した。その結果、約 12 年間屋外曝露を実施した膨張コンクリートの圧縮強度は、膨張材を使用しないコンクリートと同程度にあった。また、同期間実施した乾燥収縮試験では膨張材を使用しないコンクリートと比較して 20%程度乾燥収縮ひずみが低減していた。表層品質は、膨張材を使用しないコンクリートと比較して、透気係数が同程度、透水量が少ない結果にあった。

**キーワード:** 膨張材, 屋外曝露, 圧縮強度, 乾燥収縮, 透気係数, 透水量

## 1. はじめに

コンクリート構造物におけるひび割れの防止対策の一つとして膨張材の使用が挙げられる。最近では、低添加型の膨張材 (単位膨張材量:  $20\text{kg/m}^3$ ) によるコンクリート工事への使用実績も増えてきており、膨張材を用いたコンクリート (以下、膨張コンクリート) の期待は大きいものと考えられる。

他方、コンクリート構造物の耐久性確保は重要な課題である。一般的に耐久性は劣化に対する抵抗性と定義されており、膨張コンクリートについてもその性能を有している必要がある。

膨張コンクリートの耐久性については数多く報告されている。例えば、文献<sup>1)</sup>では凍結融解抵抗性について、文献<sup>2)</sup>では中性化や耐硫酸塩抵抗性などが検討されており、膨張材を使用しないコンクリート (以下、普通コンクリート) と同程度であることが報告されている。ただし、いずれも促進試験による供試体の結果である。一方、屋外曝露を実施した結果についてもいくつか報告されている。文献<sup>3)</sup>では鉄筋コンクリート構造の平屋実験棟に膨張コンクリートと普通コンクリートを半分ずつ施工し、35 年間経過後に、その実験棟よりコア試験体を採取して中性化深さや塩化物イオン浸透深さを確認している。その結果、膨張コンクリートと普通コンクリートで特に変わらないとしている。また文献<sup>4)</sup>では 25 年間経過した膨張コンクリートの内部鉄筋について調査した結果、腐食に対して健全であったとしている。これらの結果は膨張材の標準添加量を  $30\text{kg/m}^3$  とした従来の膨張材を使用した場合の結果であり、現在の一般的な低添加型の膨張材を使用した結果ではない。

以上のように膨張コンクリートの耐久性について、現

在一般的となっている低添加型の膨張材を使用して検討した例は促進試験による結果がほとんどであり、屋外曝露を実施した結果についての報告はほとんどない。

そこで本報告は、実際に低添加型の膨張材を使用した膨張コンクリートの実構造物の打設時に壁状の試験体を作製し、供用されている実構造物と同環境で約 12 年間曝露を実施し、膨張コンクリートの耐久性について普通コンクリートの場合と比較検討したものである。

## 2. 試験概要

### 2.1 試験体概要

図-1 に作製した試験体の概要を示す。試験体寸法は幅  $900\text{mm}$ ×高さ  $900\text{mm}$ ×厚さ  $225\text{mm}$  である。本試験体は実構造物の壁の一部を切り出したものを設定しており、周囲を断熱材で覆い壁面内方向からの影響を無視できるようにしている<sup>5)</sup>。コンクリートのかぶりは  $40\text{mm}$  および  $75\text{mm}$  とし、壁厚および配筋は実構造物と同様とした。

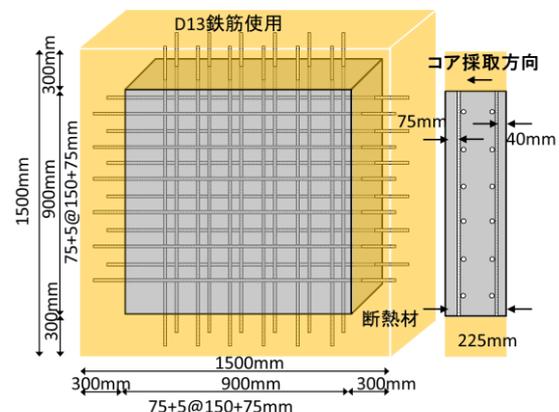


図-1 試験体寸法

\*1 太平洋マテリアル (株) 開発研究所 混和材料グループ 博士 (工学) (正会員)

\*2 東京大学 生産技術研究所 人間・社会系部門 教授 博士 (工学) (正会員)

\*3 東京大学 生産技術研究所 人間・社会系部門 特任助教 博士 (工学) (正会員)

\*4 太平洋マテリアル (株) 開発研究所 耐火・機能性材料グループ 修士 (工学) (正会員)

曝露場所は東京大学生産技術研究所駒場キャンパス内であり、曝露開始は2004年である。写真-1に曝露試験状況を示す。なお、本報告ではかぶり75mm側の表面の凹凸が大きく、一部試験実施が困難であったことからかぶり40mm側のコンクリートの耐久性について検討を行っている。

## 2.2 使用材料<sup>5)</sup>

表-1に使用材料を示す。セメント(C)には中庸熱ポルトランドセメント(以下、M)を、細骨材(S)には千葉県産陸砂(S1)および埼玉県産砕砂(S2)を混合容積比でS1:S2=60:40としたものを、粗骨材には東京都産碎石(G)を使用した。混和剤にはポリカルボン酸系の高性能AE減水剤(SP)を、膨張材には石灰系低添加型(水和熱抑制型:EX)を使用した。

## 2.3 コンクリート配合

表-2にコンクリート配合を示す。コンクリート配合は30-18-20である。膨張材の使用量はセメントの内割で20kg/m<sup>3</sup>とした。



写真-1 曝露試験状況

表-1 使用材料

セメント(C)	M: 中庸熱ポルトランドセメント
細骨材(S)	S1: 千葉県産陸砂
	S2: 埼玉県産砕砂
粗骨材	G: 東京都産碎石
混和剤	SP: ポリカルボン酸系 高性能AE減水剤
膨張材	EX: 石灰系低添加型 (水和熱抑制型)

## 2.4 試験項目とその方法

### (1) 圧縮強度試験

圧縮強度試験はJIS A 1107に準拠した。壁状試験体よりコア試験体を採取して試験を実施した。コア試験体の寸法はφ10×20cmとした。

### (2) 割裂引張強度試験

割裂引張強度試験は圧縮強度試験と同様にコア試験体を採取して試験を実施した。コア試験体の寸法はφ10×20cm、試験はJIS A 1113を参考にして実施した。

### (3) 乾燥収縮試験

乾燥収縮試験(長さ変化率試験)はJIS A 1129-2の附属書A(参考)に準拠して行った。乾燥収縮試験は10×10×40cmの試験体を実構造物打設時に作製し、7日間標準養生後に乾燥を開始して試験を行った。乾燥条件は試験実施期間中20℃、相対湿度60%の環境下とし、測定材齢は乾燥開始後7、28、56、91日、1.5年、4年、5年、7.5年および11.5年とした。

### (4) 中性化試験

中性化試験は割裂引張強度試験を実施した試験体を用いて行った。測定方法はJIS A 1152に準拠し、測定面は試験体の割裂面とした。

### (5) 透気係数試験

透気係数試験は表層透気試験(トレント法)<sup>6)</sup>により、壁状試験体に装置を設置して実施した。測定時間は360秒とした。

### (6) 透水量試験

透水量試験は2種類の手法、表面吸水試験(SWAT法)<sup>7)</sup>および簡易透水試験<sup>8)</sup>により実施した。

表面吸水試験(SWAT法)は、壁状試験体にカップを設置し、カップを水で満たした後の400秒後の水位低下量を測定した。

簡易透水試験はJIS A 6909の透水試験B法に準じて実施した。壁状試験体から圧縮強度試験用と同様にコア試験体を採取し、写真-2に示すように試験体をアルミテープで覆い、透水試験器具を試験体上面に止めつけ、試験開始から1、2、3、4、5、6、24、30および48時間にて透水量を測定した。

### (7) 細孔径分布

細孔径分布は水銀圧入式ポロシメーターにより測定を行った。試料は壁状試験体より採取したコア試験体の表面から5mm程度の部分を切り出して行った。切り出

表-2 コンクリート配合

種類	W/C (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					SP (C×%)
		W	C	EX	S	G	
普通コン	49	172	351	—	830	934	1.2
膨張コン		172	331	20	830	934	1.2

したコンクリートをアセトンにて水和停止を実施した後、D-dry 乾燥を行い測定を行った。なお、本検討による細孔径分布の測定範囲は0.003~30 $\mu\text{m}$ としている。

### 3. 試験結果

#### 3.1 圧縮強度および割裂引張強度

図-1 に圧縮強度の試験結果を示す。図中には既往の報告<sup>5)</sup>にある標準養生28日の結果も併せて示している。膨張コンクリートの曝露材齢約12年の圧縮強度は50N/mm<sup>2</sup>を超える結果にあった。また、膨張コンクリートと普通コンクリートを比較すると、曝露材齢約12年の圧縮強度は同程度であった。材齢28日以降の強度発現性も膨張コンクリートと普通コンクリートで特に大きな違いは認められない結果にあった。

図-2 に割裂引張強度の試験結果を示す。図中には圧縮強度の試験結果と同様に既往の報告<sup>5)</sup>にある標準養生28日の結果も併せて示している。膨張コンクリートの曝露材齢12年の割裂引張強度は普通コンクリートと同程度の結果にあった。

#### 3.2 乾燥収縮

図-3に乾燥期間約12年までの乾燥収縮の試験結果を示す。乾燥期間約12年の膨張コンクリートの乾燥収縮ひずみは658 $\times 10^{-6}$ 、普通コンクリートは809 $\times 10^{-6}$ であった。乾燥期間約12年の膨張コンクリートと普通コンクリートの乾燥収縮ひずみは151 $\times 10^{-6}$ の差が見受けられた。乾燥収縮ひずみの低減率としては20%程度の結果にあった。乾燥収縮ひずみは材齢4年程度を経過してから収束している傾向が確認され、膨張コンクリートと普通コンクリートのその差は長期的に継続していることも確認された。実構造物打設時に実施した材齢7日の拘束膨張ひずみは170 $\times 10^{-6}$ が得られており<sup>5)</sup>、収縮補償コンクリートとして必要な膨張量<sup>9)</sup>(材齢7日における拘束膨張ひずみが150~250 $\times 10^{-6}$ )を満足する結果が得られている。例えば低添加型膨張材の標準添加量である20kg/m<sup>3</sup>にて、膨張材により導入された圧縮応力を乾燥収縮ひずみの低減量に換算した場合、150 $\times 10^{-6}$ 程度という知見<sup>10), 11)</sup>がある。

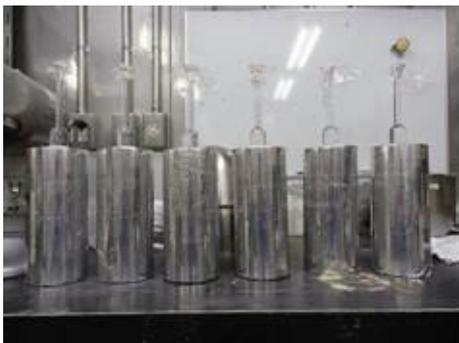


写真-2 簡易透水試験状況

本検討内では圧縮応力の推定までには至っていないが、その低減量としては150 $\times 10^{-6}$ 程度であることから、膨張材の効果が既往の知見と同様に得られているものと推察される。

#### 3.3 中性化

表-3に中性化の試験結果を示す。曝露材齢約12年の

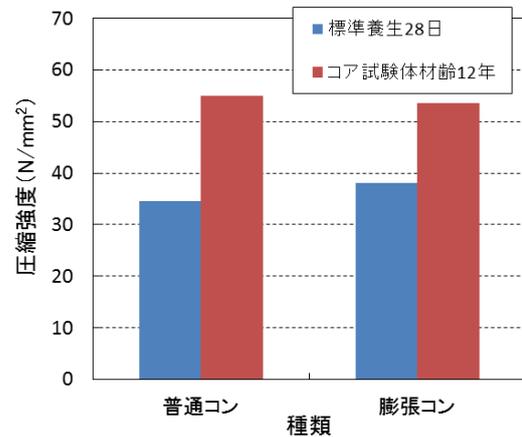


図-1 圧縮強度

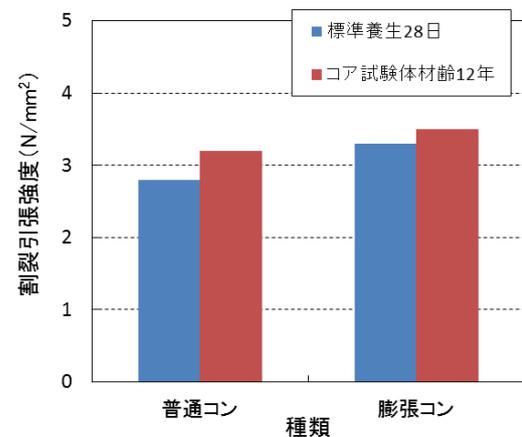


図-2 割裂引張強度

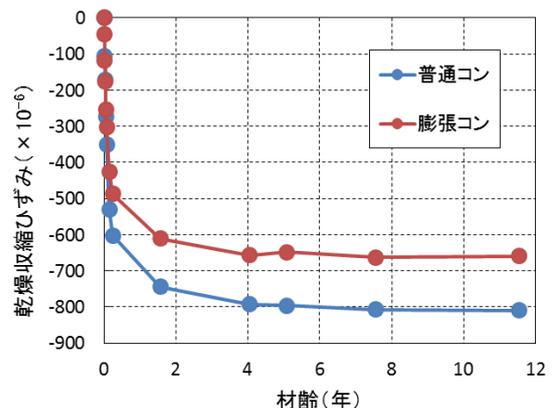


図-3 乾燥収縮

膨張コンクリートと普通コンクリートの中性化深さはいずれも 1mm 程度であり、中性化はほとんど進行していなかった。例えば W/C55% で中庸熱ポルトランドセメントを使用した普通コンクリートで 10 年間屋外曝露を実施した場合の中性化深さは、2mm 程度であり、屋外曝露環境下ではあまり中性化は進行していない<sup>12)</sup>。本結果の中性化深さもあまり進行しておらず、既往の報告と一致している結果にあった。実環境下に曝露した場合の中性化深さの一例として、W/C45% の条件となるが 1mm 以下であること、また曝露地域による影響も小さいことが報告されており<sup>13)</sup>、本検討結果も既往の曝露試験と同様な傾向にあるものと考えられる。

### 3.4 透気係数

図-4 に透気係数（トレント法）の試験結果を示す。膨張コンクリートの透気係数は普通コンクリートとほぼ同程度であった。膨張コンクリートおよび普通コンクリートともに透気係数は Torrent<sup>6)</sup> らによって提案された 5 段階評価基準で分類すると一般という結果にあった。

### 3.5 透水試験

図-5 に透水試験（SWAT 法）による水位低下量の試験結果を示す。膨張コンクリートと普通コンクリートで SWAT 法による水位低下量にやや差が見受けられる結果にあった。膨張コンクリートの方が普通コンクリートよりも水位低下量が少ない結果にあった。

図-6 に簡易透水試験による透水量の試験結果を示す。膨張コンクリートの方が普通コンクリートよりも透水量が少ない結果にあった。普通コンクリートの方が膨張コンクリートよりも比較的経過時間の早い段階で透水している傾向が確認された。

2 種類の透水試験結果から、本検討内では膨張コンクリートの方が普通コンクリートよりも透水量が少ない結果となった。

### 3.6 細孔径分布

図-7 に細孔径分布の測定結果を示す。図中には、細孔直径（ $\mu\text{m}$ ）を 6 段階に分けて示した。全細孔容積は膨張コンクリートと普通コンクリートでほぼ同程度にあった。しかしながら、細孔径別に見ると膨張材の有無によりやや異なる結果となった。膨張コンクリートは普通コンクリートと比較して 0.1~1.0 $\mu\text{m}$  の細孔量が多く、1.0 $\mu\text{m}$  以上の細孔量が少ない結果にあった。また、膨張コンクリートは 0.003~0.01 $\mu\text{m}$  の細孔量が普通コンクリートよりもやや多い傾向にあることも確認された。ここで、細孔径分布の測定に使用した試料はコア試験体表面であることから、これらの結果と透気係数や透水量との関連について考察を加えてみる。

文献<sup>14)</sup>では水銀圧入式により測定した細孔径分布と透気係数の関連について検討しており、約 0.056 $\mu\text{m}$  以上

表-3 中性化深さ

種類	中性化深さ(mm) (かぶり 40mm 側)
普通コン	1.0
膨張コン	1.1

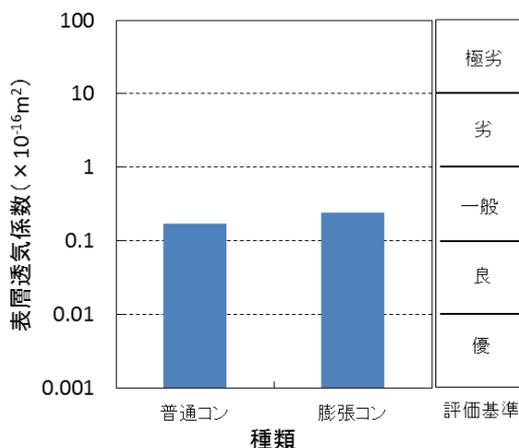


図-4 透気係数

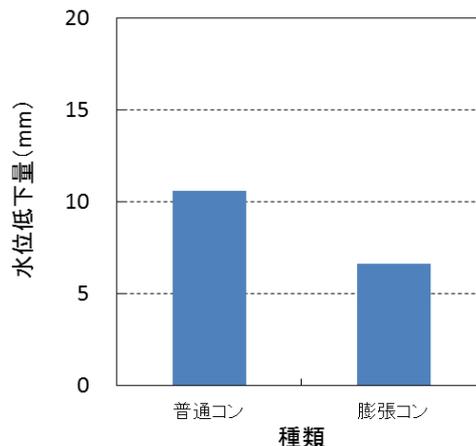


図-5 透水量 (SWAT 法)

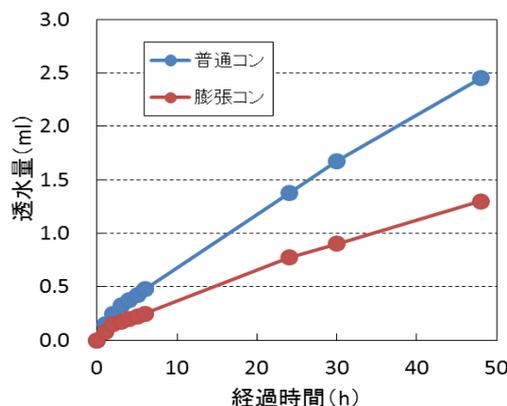


図-6 透水量 (簡易透水)

の細孔径が関係している可能性があることを示唆している。本検討で例えば 0.05 $\mu\text{m}$  以上の細孔量を見てみると膨張コンクリートが 0.055mg/l, 普通コンクリートが 0.056mg/l と大きな差は見受けられない結果にある。本検討内での透気係数に膨張コンクリートと普通コンクリートに大きな違いが見受けられないのは、0.05 $\mu\text{m}$  付近から大きい細孔量に差がないことが影響している可能性があるのではないかと考えられる。

次に、文献<sup>15)</sup>では水銀圧入式により測定した細孔径分布と透水量の関連について、0.1 $\mu\text{m}$  以上の細孔量が関連していると報告している。本検討内における 0.1 $\mu\text{m}$  以上の細孔量はほぼ同程度にある。その一方で 1.0 $\mu\text{m}$  以上については細孔量に違いがあり、普通コンクリートの方が膨張コンクリートのよりもその細孔量が 1.3 倍程度多い。透水性についてはイオン透過性に関連する細孔よりもはるかに大きな径の細孔が関係している<sup>16)</sup>とされており、本検討内の透水量の結果は 1.0 $\mu\text{m}$  以上の比較的大きい細孔量の影響を受けた可能性があるのではないかと考えられるが、現時点では明確でない。

膨張コンクリートの細孔量は鉄筋の拘束度の影響を受ける<sup>17)</sup>とされており、また物質透過性は空隙が連続か不連続かによる影響もある<sup>18)</sup>。本検討内では透水性と空隙構造の関係で既往の知見と一部異なる傾向も見受けられている。表層品質の確保についてはコンクリートの耐久性にとって重要な要因の一つである。そのため膨張コンクリートの透気や透水性と空隙構造の関連については、前述した点も含め今後の検討課題としたい。

#### 4. まとめ

本報告は、低添加型の膨張材を使用した膨張コンクリートについて、約 12 年間曝露を実施し、膨張コンクリートの耐久性について普通コンクリートの場合と比較検討を実施した。その結果、以下の知見が得られた。

- (1) 圧縮強度および割裂引張強度は膨張コンクリートと普通コンクリートで同程度であった。
- (2) 乾燥収縮は乾燥期間 12 年で膨張コンクリートと普通コンクリートで  $151 \times 10^{-6}$  の差が見受けられ、乾燥収縮ひずみの低減率としては約 20% 程度の結果であった。
- (3) 中性化は膨張コンクリートおよび普通コンクリートともにほとんど進行していなかった。
- (4) 透気係数は膨張コンクリートと普通コンクリートとではほぼ同程度であった。
- (5) 透水量は膨張コンクリートの方が普通コンクリートよりも少なかった。
- (6) 細孔径分布は全細孔容積については膨張コンクリートと普通コンクリートでほぼ同程度であったが、細

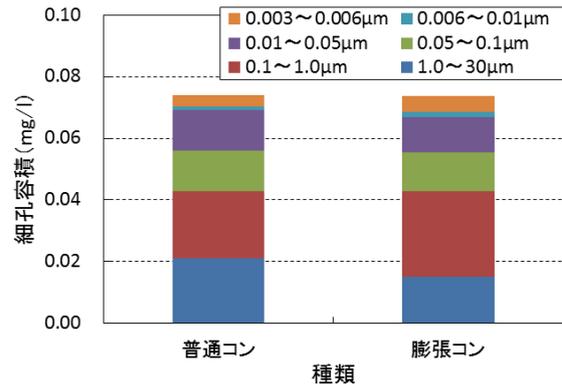


図-7 細孔径分布

孔径別の細孔量には違いは見受けられた。

謝辞：本実験の実施にあたり鉄建建設株式会社唐沢智之氏にご助力頂きました。ここに感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 國府勝郎：膨張コンクリートの凍結融解抵抗性に関する基礎研究，土木学会論文報告集，第 334 号，pp.145-154，1983
- 2) 杉野雄亮，郭度連，竹下永造：膨張材を混和したコンクリートの耐久性，混和材料を使用したコンクリートの物性変化と性能評価研究小委員会（333 委員会），土木学会，No.2，pp.429-434，2010
- 3) 笹川幸男，大塚哲雄，白井健太郎，坂井悦郎：35 年間曝露した膨張コンクリートの諸特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.1，pp.1287-1292，2002
- 4) 渡辺齊，佐久間隆司，宮里心一，黒木康貴：早強型膨張材の基本的耐久性，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.1，pp.641-646，2003
- 5) 柴垣昌範，佐竹紳也，岸利治，唐沢智之：中庸熱ポルトランドセメントを用いた膨張コンクリートのひび割れ抑制効果に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，pp.203-208，2006
- 6) R.J. Torrent：A two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of the permeability to air of the concrete cover on site，Materials and Structures, Vol.25，pp.358-365，1992
- 7) 林和彦，細田暁：表面吸水試験によるコンクリート構造物の表層品質の評価方法に関する基礎的研究，土木学会論文集，Vol.69，pp.82-97，2013
- 8) 郭度連，花田達雄：塗布タイプ収縮低減剤を用いたコンクリートの収縮低減および養生効果，プレストレストコンクリート技術協会シンポジウム論文集，第 19 回，pp.357-360，2010
- 9) 土木学会：コンクリート標準示方書 施工編，2012

- 10) 百瀬晴基, 閑田徹志: 膨張材による収縮低減効果の定量化, 日本建築学会構造系論文集, 第 76 巻, 第 666 号, pp.1367-1373, 2011
- 11) 橋田浩, 菊地俊文, 辻野真人, 田中博一: 膨張材と石灰石骨材を併用した低収縮コンクリートに関する検討, その 3 初期膨張力と収縮ひずみ低減効果, 日本建築学会大会講演梗概集(北陸), pp.927-928, 2010
- 12) 市川勝俊, 大沢勉, 中村秀三, 綱取秀夫: 屋外曝露または室内養生を 10 年間行ったコンクリートの炭酸化と強度, セメント・コンクリート論文集, No.53, pp.198-204, 1999
- 13) 社団法人日本コンクリート工学協会: 自然環境とコンクリート性能評価に関するシンポジウム, 委員会報告書, 論文集, 2005
- 14) 田中章夫, 今本啓一, 下澤和幸, 山崎順二: ダブルチャンパー法を用いた既存鉄筋コンクリート造建築物の中性化予測に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.1691-1696, 2011
- 15) 井川秀樹, 横室隆, 橋高義典, 小川洋二: 重量コンクリートの表面透水性と細孔空隙量の関係, コンクリート工学論文集, 第 27 巻, pp.57-66, 2016
- 16) セメント協会: わかりやすいセメント科学, 1993
- 17) 佐久間隆司, 辻幸和, 佐竹紳也: 膨張コンクリートの内的拘束膨張ひずみと組織構造, セメント・コンクリート論文集, No.60, pp.257-263, 2006
- 18) N.R SHORT, C.L PAGE: The Diffusion of Chloride Ions through Portland and Blended Cement Paste, Silicates Industriels, No.47, pp.237-240, 1982