高強度コンクリートの長期的な長さ変化と中性化に関する研究

LONG-TERM LENGTH CHANGE AND CARBONATION OF
HIGH STRENGTH CONCRETE

陣内 浩*, 並木 哲**, 黒岩 秀介***, 渡邊 悟士****

*Hiroshi JINNAI, Satoru NAMIKI, Shusuke KUROIWA
and Satoshi WATANABE*

Experimental studies were performed about a long-term length change and carbonation of high strength concrete. The concretes with water-binder ratio of 15-65% were examined. The following conclusions were obtained as results of examination.

1) Length change and weight change of concrete at 6 months became so small that a water-binder ratio becomes low. 2) When the water binder ratio became low, length change of the concrete continued long time. 3) By the accelerated carbonation test, the water portland cement ratio of the concrete that is not carbonation at 26 weeks was less than about 40%. 4) Even if accelerated carbonation test results of long-term was used, depth of carbonation could be expressed by the function of the square root of age.

Keywords : *High Strength Concrete, Durability, Long-term, Length Change, Carbonation*

高強度コンクリート, 耐久性能, 長期材齢, 長さ変化, 中性化

1. はじめに

日本で高強度コンクリートが用いられるようになり、約 30 年が経過した¹⁾。1990 年代末には設計基準強度 100N/mm² のコンクリートが普及しはじめ²⁾、現在では、現場打設可能な設計基準強度 150N/mm² のコンクリートが実用段階³⁾ に到達している。このようなコンクリートの高強度・高耐久性化技術の進歩は、建設省総合プロジェクト「鉄筋コンクリート造建物の超軽量・超高層化技術の開発（通称 New RC 総プロ）」⁴⁾ の成果をはじめとする多くの研究者の研究成果と、構造設計者の努力によるところが大きい。

一方、このような高強度・高耐久性コンクリートを実際の建築物に適用するにあたっては、従来よりも低い水結合材比のコンクリートの耐久性能を把握する必要が生じている。また、計画供用年数が 100 年を超える高層 RC 建築物⁵⁾ も建設されるようになり、従来ではあまり検討されなかった 100 年を超えるような長期材齢での高強度コンクリートの耐久性能を把握することも重要となっている。しかしながら、このようなデータの蓄積には時間がかかり、現在でもデータ数は十分とはいえない。そこで本論では、水結合材比 15~65% 程度のコンクリートの、長期耐久性能に関する基礎的なデータの蓄積を目的として、高強度コンクリートの長期的な長さ変化および中性化抵抗性に関して実験的な検討を行った。

2. 長さ変化

2. 1 水結合材比と長さ変化

日本建築学会の建築工事標準仕様書・同解説「JASS5 鉄筋コンクリート工事⁶⁾ 19 節 高強度コンクリート」(以下 JASS5 (19 節) と称す) の本文では、「コンクリートの乾燥収縮は、部材に耐久性上有害なひび割れが発生するおそれのない範囲とする」と記述されている。また、同仕様書の解説には、日本建築学会の高耐久性鉄筋コンクリート造設計施工指針(案)・同解説⁷⁾ に示される「材齢 6 ヶ月で乾燥収縮 7×10^{-4} 以下 (0.07% 以下)」を長さ変化の目安とすることが記述されている。一般に、コンクリートの長さ変化は使用材料や単位水量によって異なることが知られている。⁸⁾ さらに、使用材料や単位水量を同条件とした場合には、水結合材比が低いほどコンクリートの長さ変化は小さくなることが報告されている。⁹⁾ そこで、まず筆者らが蓄積したコンクリートの長さ変化試験のデータを整理し、水結合材比と長さ変化率の関係を検討した。

実験に用いた使用材料を表 1 に、コンクリートの調合を表 2 に示す。ここで使用しているスラグ石膏¹⁰⁾ とは、高温下におけるコンクリートの圧縮強度の改善を目的として用いられる高炉スラグと石膏を混合した混和材(密度: 約 2.9g/cm³、比表面積: 約 7000cm²/g)である。実験を行った調合は 71 調合とした。いずれも

* 大成建設技術センター 主任研究員・博士(工学)
** 大成建設技術センター 材料チームリーダー
*** 大成建設技術センター 主任研究員・工修
**** 大成建設技術センター 研究員・工修

Senior Research Engineer, Technology Center, Taisei Corp., Dr. Eng.
Material Team Reader, Technology Center, Taisei Corp.
Senior Research Engineer, Technology Center, Taisei Corp., M. Eng.
Research Engineer, Technology Center, Taisei Corp., M. Eng.

表1 使用材料

結合材	普通ポルトランドセメント (OP)	密度 3.15～3.16g/cm ³	
	早強ポルトランドセメント (HP)	密度 3.13～3.14g/cm ³	
	フライアッシュ (FA)	密度 2.2～2.4g/cm ³	
	スラグ石膏 (SG)	密度 2.91～2.92g/cm ³	
	シリカフェューム (SF)	密度 2.2g/cm ³	
骨 材		砕 石	砕 砂
	硬質砂岩系砕石・砕砂	絶乾密度 2.62～2.73g/cm ³ 、吸水率 0.42～0.79%	絶乾密度 2.56～2.62g/cm ³ 、吸水率 1.07～1.58%
	石灰岩系砕石・砕砂	絶乾密度 2.68～2.70g/cm ³ 、吸水率 0.35～0.85%	絶乾密度 2.65g/cm ³ 、吸水率 0.52%
	安山岩系砕石・砕砂	絶乾密度 2.48～2.67g/cm ³ 、吸水率 1.91～3.29%	絶乾密度 2.60g/cm ³ 、吸水率 2.28%
	石英系砕石・砕砂	絶乾密度 2.43～2.60g/cm ³ 、吸水率 0.64～3.11%	絶乾密度 2.44～2.45g/cm ³ 、吸水率 2.99～4.91%
	流紋岩系砕石・砕砂	絶乾密度 2.59～2.61g/cm ³ 、吸水率 0.75～0.91%	絶乾密度 2.47g/cm ³ 、吸水率 2.63%
	結晶片岩系砕石・砕砂	絶乾密度 2.72g/cm ³ 、吸水率 0.95%	絶乾密度 2.62g/cm ³ 、吸水率 1.97%
	天然砂	絶乾密度 2.44～2.70g/cm ³ 、吸水率 0.42～2.73%	

表2 調査 (長さ変化試験)

結合材*	粗骨材	W/B (%)	単位量 (kg/m ³)			
			水	結合材	粗骨材	細骨材
OP	硬質砂岩	22~65	155	285~682	798~1077	626~933
	石灰岩		185			
	安山岩					
	結晶片岩					
OP : FA = 8 : 2	硬質砂岩	25~56	150	268~640	888~1039	563~866
	石灰岩		175			
	安山岩					
	流紋岩					
OP : SF = 9 : 1	硬質砂岩	15~50	150	330~1000	848~894	458~973
	石灰岩		165			
	安山岩					
	流紋岩					
HP	石英片岩	21	190	905	845	473
HP : SF = 9 : 1	石英片岩	16	150	938	879	459
HP : SG : SF = 7 : 2 : 1	石英片岩	16~24	150	626~938	879~918	446~694

*混合比率はいずれも質量比

JIS A 1129-1「モルタル及びコンクリートの長さ変化試験方法—第1部：コンパレータ方法」に準じて測定を行った。なお、乾燥時の湿度条件は長さ変化に影響するため^{11) 12)}、本論の実験では、いずれの供試体も、材齢 7 日まで温度 20℃の水中、それ以降を温度 20℃湿度 60%の気中で養生している。

材齢 6 ヶ月における水結合材比と長さ変化率の関係を図 1 に示す。ここでは結合材の種類、粗骨材の種類、および単位水量の 3 つの要因によってデータを分類している。

今回の実験範囲では、水結合材比が低いほど材齢 6 ヶ月での長さ変化率が小さくなる傾向と、石灰岩砕石を用いた場合にやや長さ変化率が小さくなる傾向が見られた。この結果は、本論よりも水結合材比の高い範囲で同様の検討を行った既往の報告^{13) 14) 15)}と同様であった。また、本論の実験範囲では、水結合材比と長さ変化率の関

図1 材齢 6 ヶ月における水結合材比と長さ変化率の関係

結果から、JASS5（19 節）の目安となっている長さ変化 7×10^{-4} 以下（0.07%以下）のコンクリートを製造するには、使用材料と単位水量のいずれにも配慮して調合計画する必要があると考えられた。

材齢 6 ヶ月における水結合材比と質量変化率の関係を図 2 に示す。コンクリートの質量変化率は、主に、コンクリート中に含まれる余剰水の量とコンクリート中での水の移動速度に影響されると考えられる。そこで、ここでのデータの分類は、結合材の種類と単位水量の 2 つの要因で行った。

今回の実験範囲では、水結合材比が低いほど材齢 6 ヶ月でのコンクリートの質量変化率は小さくなった。この理由としては、低水結合材比のコンクリートほど内部の余剰水が少ないこと、組織が緻密で水の移動が難しいことなどが考えられる。これは、水結合材比が低いほどコンクリートの長さ変化が小さくなることと密接に関係していると推察される。この理由から考えれば、両者の関係に結合材の種類と単位水量が影響を及ぼすと考えられるが、今回の検討では、その影響を定量的に示すことはできなかった。

2. 2 長期材齢における長さ変化

2.1 の結果から考えると、コンクリートは、水結合材比が低くなるほど長さ変化が小さくなるのではなく、水結合材比が低くなるほど長さ変化がゆっくり進むという可能性もある。そこで、高強度コンクリートの長期における長さ変化率を確認するために、材齢 10 年に亘り、水結合材比 20% 程度のコンクリートの長さ変化率と質量変化率を測定した。

実験を行ったコンクリートの材料・調合条件を表 3 に示す。表中には、参考として各コンクリートの材齢 28 日の標準養生圧縮強度も示した。実験を行った調合は、ポルトランドセメント、もしくはポルトランドセメントにスラグ石膏とシリカフュームを混合した結合材を用いた水結合材比 20～22% の 4 種類の調合である。また、今回の検討では、比較用として材齢 5 年まで長さ変化を測定した水結合材比 65%、単位水量 185 kg/m^3 の一般的なコンクリートのデータを使用した。調合を計画するにあたり、水結合材比 20～22% の調合では、コンクリートの単位水量を 150 kg/m^3 としたかった。しかし、当時の化学混和剤（アミノスルホン酸系高性能 AE 減水剤）の性

能では、早強ポルトランドセメントのみを用いる HP21 の単位水量を 150 kg/m^3 とすることは困難であった。そこで、HP21 のみ単位水量を 190 kg/m^3 とした。

対数材齢と長さ変化率の関係を図 3 に示す。今回の実験範囲では、水結合材比 20% 程度のコンクリートは材齢 100 日で 0.03～0.04% 程度収縮し、材齢 10.5 年までに、さらに同等の 0.02～0.04% 程度収縮した。また、材齢 10 年が経過しても長さ変化が収束する傾向は見られなかった。これに対し、比較用の水結合材比 65% のコンクリートは、材齢 100 日までに 0.08% 近く収縮したが、その後、材齢 5 年までには 0.02% 程度収縮するのみであった。また、材齢 1 年程

図 2 材齢 6 ヶ月における水結合材比と質量変化率の関係

表 3 材料・調合条件（長期の長さ変化試験）

調合名	材料条件		調合条件					標準養生 圧縮強度 材齢 28 日
	結合材種類	粗骨材種類	W/B (%)	単位水量 (kg/m^3)	単位結合材量 (kg/m^3)	単位細骨材量 (kg/m^3)	単位粗骨材量 (kg/m^3)	
OP22	OP	硬質砂岩系砕石 1	22	150	682	726	888	82.6
OSS20	OP : SG : SF = 7 : 2 : 1		20	150	750	646	894	109
HP21	HP	石英系砕石	21	190	905	473	845	107
HSS20	HP : SG : SF = 7 : 2 : 1		20	150	750	586	918	135
OP65 (比較用)	OP	硬質砂岩系砕石 2	65	185	285	849	934	37.5

結合材 : OP: 普通ポルトランドセメント (密度 3.16 g/cm^3)、HP: 早強ポルトランドセメント (密度 3.13 g/cm^3)

SG: スラグ石膏 (密度 2.70 g/cm^3)、SF: シリカフューム (密度 2.2 g/cm^3)

粗骨材 : 硬質砂岩系砕石 1: (絶乾密度 2.65 g/cm^2 、吸水率 0.79%)、石英系砕石: (絶乾密度 2.60 g/cm^2 、吸水率 0.64%)

硬質砂岩系砕石 2: (絶乾密度 2.62 g/cm^2 、吸水率 0.72%)

図3 対数材齢と長さ変化率の関係

図4 対数材齢と質量変化率の関係

度から長さ変化が収束しはじめる傾向にあった。

対数材齢と質量変化率の関係を図4に示す。水結合材比 20%程度コンクリートは材齢 10 年が経過しても質量変化が緩やかに進んでいるのに対し、水結合材比 65%のコンクリートは材齢 100 日から 1000 日の間で質量変化がほぼ収束した。また、図3と図4からわかるように、今回の実験範囲では、水結合材比 20%程度コンクリートは、水結合材比 65%のコンクリートに比べて長さ変化に対する質量変化率が小さかった。水結合材比が低くなるにつれてセメント硬化体の長さ変化率に対する質量変化率が小さくなるという結果については、水結合材比 35~65%のセメントペーストを対象とした永松らの研究¹⁵⁾でも示されており、妥当な結果と考えている。

これらの結果より、コンクリートは水結合材比が低くなるほど、より長期間に亘って収縮するようになることが確認できた。今回の実験の範囲では、低水結合材比のコンクリートの長さ変化がどの程度の材齢で収束するのか、また、この時の長さ変化はどの程度なのかは明確にはならないが、本論の供試体を継続的に測定することで今後も検討を進めたいと考えている。

3. 中性化

3.1 水結合材比と中性化深さの関係

コンクリートは水結合材比を低くして緻密になるほど中性化速度が遅くなるとされている¹⁷⁾。JIS A 1153「コンクリートの促進中性化試験方法」に従ってコンクリートを炭酸ガスの中で養生しても、低水結合材比の領域では、促進材齢 26 週でまったく中性化することがない。¹⁸⁾ そのような領域で長期の促進中性化試験を行っても、コンクリートが中性化しなければ中性化速度係数などを求めることはできない。そこで、まず筆者らが蓄積したコンクリートの促進中性化試験のデータを整理し、促進中性化試験における促進材齢 26 週で中性化が生じるようなコンクリートの水結合材比の範囲を検討することとした。実験に用いる材料は、表1に示した長さ変化試験に用いた材料の範囲に含まれるものとした。

検討にあたっては、フライアッシュのような混和材がポルトランドセメントに比べてコンクリートの中性化抵抗性を改善する効果が小さい¹⁹⁾ことを考慮した。従って、ここではコンクリート

表4 調合（促進中性化試験）

結合材*	W/B (%)	W/PC (%)	単位量 (kg/m ³)			
			水	結合材	粗骨材	細骨材
OP	25~65	25~65	155~185	285~640	798~1077	640~933
OP:FA =8:2	25~56	31.3~70	160~175	214~512	888~1039	720~866
OP:SG:SF =7:2:1	15~50	21.4~71.4	150~165	231~700	848~894	468~973
HP:SG:SF =7:2:1	20	28.6	150	525	918	586

*混合比率はいずれも質量比

図5 水ポルトランドセメント比と中性化深さの関係

表5 調合（長期促進中性化試験）

W/PC (%)	スラ ンプ (cm)	空気量 (%)	単位量 (kg/m ³)			
			水	結合材	細骨材	粗骨材
40	10	3.0	165	413	841	925
55	10	4.5	175	318	848	935
65	10	4.5	185	285	849	934

結合材：普通ポルトランドセメント（密度 3.16g/cm³）

細骨材：硬質砂岩系砕砂（絶乾密度 2.56g/cm³、吸水率 1.58%）

：天然砂（絶乾密度 2.58g/cm³、吸水率 1.15%）

＝8：2（質量比）

粗骨材：硬質砂岩系碎石（絶乾密度 2.62g/cm³、吸水率 0.72%）

1 m³に含まれるポルトランドセメントの量と単位水量の比を水ポルトランドセメント比（W/PC）と定義し、データの整理に用いた。なお、ここでのポルトランドセメントは、JIS R 5210「普通ポルトランドセメント（5. 製造方法）」に規定される 5%の混合物を含んだものとした。

実験を行った調合の範囲を表4に示す。実験に用いたコンクリートは、水ポルトランドセメント比として 21.4～71.4%の範囲である。いずれのコンクリートも、日本建築学会の高耐久性鉄筋コンクリート造設計施工指針（案）・同解説⁷⁾の付録に示されているコンクリートの促進中性化試験方法（案）に従って試験を行っている。なお、本論の実験の供試体は、いずれも温度 20℃の水中で 4 週間養生し、その後、温度 20℃湿度 60%の気中で 4 週間養生した後に、温度 20℃湿度 60% CO₂濃度 5%の養生槽で促進中性化を行ったものである。この方法は、2003 年に制定された JIS A 1153「コンクリートの促進中性化試験方法」の内容と整合している。

促進材齢 26 週での、水ポルトランドセメント比と中性化深さの関係を図5に示す。これより、今回の実験範囲では、促進材齢 26 週におけるコンクリートの中性化深さは、いずれも 25mm 以下となった。また、水ポルトランドセメント比 40%程度を下回るコンクリートは、促進材齢 26 週ではほとんど中性化しないと考えられた。この結果は、既往の報告^{17) 19)}と概ね同様のものではあった。

3. 2 長期間促進中性化した供試体の中性化深さ

ここまでの検討で、水ポルトランドセメント比が 40%程度を下回るコンクリートは、ほとんど中性化しないという知見を再確認した。そこで、水ポルトランドセメント比 40%、50%および 65%の 3 種のコンクリートについて、促進材齢 5 年までの促進中性化試験を実施した。試験方法は 3. 1 と同様である。ただし、各調合とも供試体 6 本ずつ養生層で促進中性化し、このうち 3 本を長期材齢での中性化を確認するのに使用した。すなわち、材齢 6 ヶ月までは前述したコンクリートの促進中性化試験方法（案）に従って 3 本の供試体を用いて中性化深さを測定し、6 ヶ月以降は残りの 3 本を用いて同試験方法（案）に準拠して中性化深さを測定した。

試験を行ったコンクリートの材料・調合条件を表5に示す。いずれのコンクリートもスランプ 10cm とし、できる限りブリーデ

表6 長期促進中性化試験結果

W/PC (%)	4 0	5 5	6 5
促進材齢 7 日	0mm	1.8mm	3.3mm
促進材齢 28 日	0mm	3.6mm	5.2mm
促進材齢 56 日	0mm	5.9mm	8.5mm
促進材齢 91 日	0mm	7.1mm	12.6mm
促進材齢 6 ヶ月	0mm	10.1mm	16.6mm
促進材齢 1 年	0mm	14.7mm	21.3mm
促進材齢 2 年	0mm	23.7mm	測定不能
促進材齢 3 年	0mm	27.6mm	測定不能
促進材齢 4 年	8.2mm	33.2mm	測定不能
促進材齢 5 年	10.8mm	測定不能	測定不能

イングや沈降によって供試体が不均質となるのを避けた。また、使用する化学混和剤も遅延効果の小さい高性能 AE 減水剤（ポリカルボン酸系）を選択した。各調査とも、空気量、単位水量などは実際に施工されているコンクリートを参考に定め、実験の共通条件とはしなかった。

促進材齢 5 年までの促進中性化試験結果を表 6 に示す。水ポルトランドセメント比 40% のコンクリートは、促進材齢 3 年までまったく中性化することがなかった。促進材齢 4 年ではフェノールフタレイン吹き付け後に、表面から 8mm 程度がうす赤紫色にしか変色しなくなり、材齢 5 年ではわずかにその範囲が広がった。

水ポルトランドセメント比 55% のコンクリートは、促進材齢 7 日の段階で表層から 2mm 程度が中性化し、材齢の経過とともにその範囲が深くなった。材料・調合選定の段階から供試体を均質に成形することに十分な配慮をしたつもりであったが、促進材齢 3 年からは供試体上部と下部の中性化深さの差が顕著になった。本論では、これら全体の平均を中性化深さとした。促進材齢 5 年では中性化深さが 50mm を超え、測定することができなくなった。

$$C = A' \sqrt{\frac{CO_2}{5.0}} \times \sqrt{t} \quad \cdots (1) \quad A = A' \sqrt{\frac{CO_2}{5.0}} \quad \cdots (2)$$

ここに、

C : 中性化深さ (mm)

CO_2 : CO_2 濃度 (%)

A : 中性化速度係数 (mm $\times$ 年 $^{1/2}$)

A' : 促進中性化試験による中性化速度係数 (mm $\times$ 年 $^{1/2}$)

t : 材齢 (年)

図 6 長期的な促進中性化試験による材齢 t と中性化深さ C の関係

表 7 長期の促進中性化試験より求めた中性化速度係数 A (mm $\times$ 年 $^{1/2}$)

W/PC (%)	構造物のおかれる環境の CO_2 濃度			
	0.03%	0.05%	0.10%	0.20%
40	0.35	0.45	0.64	0.90
55	1.24	1.61	2.27	3.21
65	1.72	2.23	3.15	4.46

水ポルトランドセメント比 65% のコンクリートは、他のコンクリートよりも中性化速度が速く、促進材齢として僅か 2 年で中性化深さが 50mm を超えて測定することができなくなった。

促進材齢と中性化深さの関係を図 6 に示す。図中には中性化深さを材齢の平方根の関数で表現する $\sqrt{t}$ 則にしたがった回帰式も示した。また、ここでの回帰式は、実際の建物の中性化深さを推定しやすいように、材齢に年を代入する式とした。

図 6 の水ポルトランドセメント比 55% および 65% のコンクリートの結果より、長期的な促進中性化試験の結果であっても、中性化深さは $\sqrt{t}$ 則で表現できることが実験的に確認できた。また、促進材齢 26 週までの試験であれば水ポルトランドセメント比 40% のコンクリートは中性化しないと判断するところであるが、今回の実験では促進材齢 4 年以降にわずかに中性化したため、本論では水ポルトランドセメント比 40% のコンクリートの促進材齢と中性化深さを表現する線として、促進材齢 4 年および 5 年の結果を原点回帰した安全側の評価線で表すこととした。

次に、この結果から実際の構造物のおかれる環境での中性化速度係数 A を検討した。中性化速度係数 A は (2) 式で表される。検討にあたっては、実務で用いやすいように、日本建築学会の鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計指針 (案)・同解説²⁰⁾ に示される式 (1) の材齢の単位を、週から年に読み替えて使用した。設定 CO_2 濃度は、日本建築学会の高耐久性鉄筋コンクリート造設計施工指針 (案)・同解説で設定している屋外と屋内の CO_2 濃度 0.03% と 0.10%、および日本建築学会の鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針 (案)・同解説で設定している屋外と屋内の CO_2 濃度 0.05% と 0.20% の 4 種類とした。

検討結果を表 7 に示す。この検討により、長期の中性化促進試験の結果から、材齢を年単位で代入する場合の中性化速度係数 A として表 7 に示す値を得ることができた。

4. まとめ

高強度コンクリートの長期的な長さ変化および中性化抵抗性に関して実験的な検討を行い、以下の結論を得た。

- 1) 材齢 6 ヶ月では、コンクリートの長さ変化や質量変化は水結合材比が低くなるほど小さくなる傾向がみられた。
- 2) コンクリートは水結合材比が低くなるほど、より長期に亘って収縮するようになると考えられた。
- 3) 今回の実験範囲では、促進材齢 26 週でのコンクリートの中性化深さはいずれも 25mm 以下となった。また、水ポルトランドセメント比 40% 程度を下回るコンクリートは、促進材齢 26 週ではほとんど中性化しないと考えられた。ただし、長期間の促進試験では、水ポルトランドセメント比 40% のコンクリートでもわずかに中性化することが確認された。
- 4) 長期的な促進中性化試験の結果でも、中性化深さは材齢の平方根の関数で表現することができた。また、材齢を年単位で代入する $\sqrt{t}$ 則にしたがった中性化深さ推定式に用いる CO_2 濃度 0.03%、0.05%、0.10% および 0.20% の場合の中性化速度係数 A を示した。

参考文献

- 1) 日本建築学会：高強度鉄筋コンクリート造設計施工指針案・同解説，1976.2
- 2) 陣内 浩・黒羽健嗣・並木 哲・黒岩秀介・川端 三・原 孝文・稲津秀明・後藤和正：設計基準強度 100N/mm²の高強度コンクリートを用いた超高層建物の施工，日本建築学会技術報告集，第9号，pp.7～12，1999.12
- 3) 小室 努・黒岩秀介・渡辺英義・陣内 浩：150N/mm²級の超高強度コンクリートを用いたRC柱の実用化研究，コンクリート工学，Vol.39，No.10，pp.9～16，2001.10
- 4) (財)国土開発技術センター：建設省総合技術開発プロジェクト鉄筋コンクリート造建築物の超軽量・超高層化技術の開発，1988～1992
- 5) 並木 哲・鶴田 隆・木村正人・原 孝文：計画供用年数 200 年住宅の施工，コンクリート工学，Vol.40，No.7，pp.41～46，2002.7
- 6) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 J A S S 5 「鉄筋コンクリート工事」，1997
- 7) 日本建築学会：高耐久性鉄筋コンクリート造設計施工指針（案）・同解説，1991.7
- 8) 例えば，日本建築学会：コンクリートの調査設計指針・同解説，1999
- 9) 陣内 浩・早川光敬・黒岩秀介：実用化を迎えた 150N/mm²級超高強度コンクリートの性能，セメント・コンクリート，No.678，pp.10～16，2003.8
- 10) 陣内 浩・黒羽健嗣・並木 哲・後藤和正：超高強度コンクリートによる柱構造体の強度発現性状の検討，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.16，No.1，pp.255～260，1994
- 11) 杉山 央・榊田佳寛・前田弘美：コンクリートの乾燥収縮に及ぼす湿度条件の影響，セメント・コンクリート論文集，No.49，pp.594～599，1995
- 12) 永松静也・佐藤嘉昭・大常好範：セメント硬化体の乾燥の程度と乾燥収縮ひずみの関係 乾燥条件の影響，日本建築学会構造系論文集，No.439，pp.13～21，1992.9
- 13) 長瀧重義・米倉重州夫：高強度コンクリートの乾燥収縮及びクリープの特性，コンクリート工学，Vol.20，No.4，pp.75～87，1982.4
- 14) 塩見伊津夫・榊田佳寛・阿部道彦・安田正雪：高強度コンクリートの乾燥収縮特性に影響を及ぼす諸要因の検討，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.14，No.1，pp.487～492，1992
- 15) 森 大介・池永博威・石神 忍・山田雅章：高強度コンクリートの乾燥収縮に関する研究，セメント・コンクリート論文集，No.46，pp.690～695，1992
- 16) 永松静也・佐藤嘉昭・大常好範：セメント硬化体の乾燥の程度と乾燥収縮ひずみの関係 材令及び水セメント比の影響，日本建築学会構造系論文集，No.451，pp.41～47，1993.9
- 17) 柳 啓，友沢史紀・榊田佳寛・阿部道彦・田中 斉・和泉意登志：コンクリートの中性化進行予測に関する実験（その 2）中性化速度に及ぼす水セメント比、炭酸ガスの影響，日本建築学会大会学術講演梗概集 A，pp.247～248，1987.10
- 18) 陣内 浩・黒羽健嗣・並木 哲・後藤和正：超高強度コンクリートの強度特性および耐久性の検討，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.17，No.1，pp.1055～1060，1995
- 19) 黄光律・野口貴文・友沢史紀：フライアッシュを大量混和したコンクリートの中性化特性に及ぼすポゾラン反応の影響，日本建築学会構造系論文集，No.531，pp.7～14，2000.5
- 20) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針（案）・同解説，2004.3

(2005年3月2日原稿受理，2005年4月28日採用決定)