

論文 Article

コンクリートの配合および初期の水中養生期間が強度特性に及ぼす影響

原稿受付 2012年4月2日

ものづくり大学紀要 第3号 (2012) 62~67

望月昭宏^{*1}, 澤本武博^{*2}, 飛内圭之^{*2}, 辻正哲^{*3}, 樋口正典^{*4}^{*1}ものづくり大学大学院 ものづくり学研究科 大学院生^{*2}ものづくり大学 技能工芸学部 建設学科^{*3}ものづくり大学 非常勤講師^{*4}三井住友建設株式会社**Effects of Mix Proportions and Preliminary Underwater Curing on Strength Properties of Concrete**Akihiro MOCHIDUKI^{*1}, Takehiro SAWAMOTO^{*2}, Keishi TOBINAI^{*2},
Masanori TSUJI^{*3}, and Masanori HIGUCHI^{*4}^{*1} Graduate student. Graduate school of Technologists, Institute of Technologists^{*2} Dept. of Building Technologists, Institute of Technologists^{*3} Part-time teacher, Institute of Technologists^{*4} SUMITOMO MITSUI Construction Co.,Ltd.**Abstract**

The paper on relation between preliminary moist curing and compressive strength of concrete written by Walter. H. Price is widely known. In the paper written by the Price, when the moist curing is stopped, the rate of strength gain slows down as water is lost from the concrete, and further strength gain soon ceases. A 3-day period of moist curing will only allow the concrete to reach 60% of the potential 180-day strength which can be achieved with continuous moist curing. Furthermore, stored continuously in laboratory air will only allow the concrete reach 40% of the potential 180-day strength. However, it was experimented about 60 years ago, and that concrete material was different from present one. In this study, the effects of preliminary moist curing period on the mechanical behavior of present concrete are compared with the paper written by Price. As a result, in case of compressive strength, a 3-day period of moist curing allowed the concrete to reach 80% of the potential 180-day strength, and stored continuously in laboratory air allowed the concrete reach only 70%. However, a 28-day period of moist curing could allow the concrete to reach 100% of the potential 180-day strength which could be achieved with continuous moist curing. In case of tensile strength, a 3-day period of moist curing allowed the concrete to reach only 70%, and a 28-day period of moist curing could not allow the concrete to reach 100%. Therefore, the tensile strength is greatly subject to the influence of moist curing compared with the compressive strength.

Key Words : Concrete, Preliminary moist curing, Compressive strength, Tensile strength**1. はじめに**

コンクリートの打込み後、適切に養生が行われないと、材齢に伴う強度増加が鈍くなり、そのコ

ンクリートの持つポテンシャル強度とはほど遠い強度しか得られないことがある。特に、初期の湿潤養生期間が短い場合には、十分な強度増加が期待できない。そして、コンクリートの強度発現と

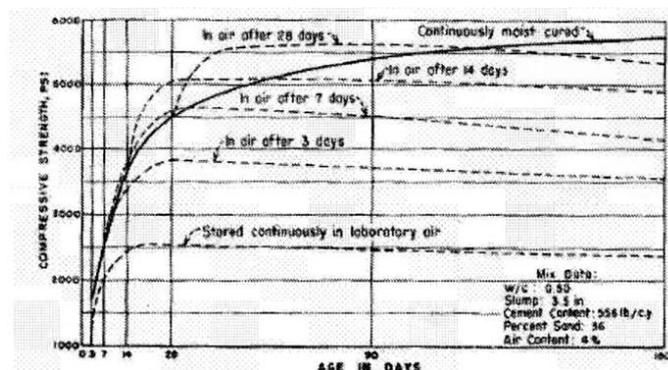


Fig. 1 Effect of preliminary moist curing on compressive strength of concrete (by Walter.H.Price)¹⁾

初期の湿潤養生期間の関係として、図1に示した1951年に米国でWalter.H.Price（以下、Priceと称す）が発表した論文¹⁾が世界的に用いられ、60年近く経過した現在でもほとんどの文献や教科書にPriceが発表したグラフが採用されている^{2,3,4)}。Priceの論文によると、水中養生後コンクリートが乾燥の影響を受けると、いったん強度が増加しピークを迎え、その後強度が緩やかに低下していく現象が見受けられる。しかし、乾湿の影響で一時的に強度増加した後に低下傾向が見受けられることはあるが、材齢180日に着目すると、材齢3日で湿潤養生から気中養生に切り替えた場合に、絶えず湿潤養生を行った場合に比べて60%程度の強度発現、絶えず気中養生を行った場合には40%程度の強度発現と現在のコンクリートの性能では考えにくい。

このように、Priceの論文は60年近く前のコンクリートに関するものであり、使用材料や配合など現在のコンクリートとは大きく異なる。現在では、セメントの性能が向上し、また配合においてもJIS A 5308「レディーミクストコンクリート」に、呼び強度が60まで規定され、水セメント比が30%程度の高強度コンクリートも使用されるようになった。

一方、現行の土木学会コンクリート標準示方書および日本建築学会JASS 5では、普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートの初期の湿潤養生期間を5日以上としており^{5,6)}、高強度コンクリートにおいては、JASS5で50N/mm²超で3日以上と定められている⁷⁾が、コンクリートのポテンシャル強度（絶えず湿潤養生を行った場合）に対し

てどの程度の強度発現を示すのかは明らかにされていない。

本研究では、現在の一般的な普通および高強度コンクリートの配合について、Priceの論文と同じ養生条件で圧縮強度試験を行い、強度発現性の相違を調べた。さらには、コンクリートのひび割れ発生に大きく関係する割裂引張強度についても検討を行い、初期の湿潤養生期間と強度の関係を総合的に検討した。

2. 実験概要

2.1 コンクリートの使用材料および配合

セメントには、普通ポルトランドセメント（密度3.16g/cm³）を、細骨材には栃木県栃木市尻内町産山砂（表乾密度2.61g/cm³、粗粒率2.75）を、粗骨材には栃木県佐野市会沢町産石灰岩碎石（最大寸法20mm、表乾密度2.70g/cm³、実積率60.0%）および栃木県栃木市尻内町産碎石（最大寸法20mm、表乾密度2.64g/cm³、実積率59.0%）を用いた。また、混和剤としてAE減水剤（W/C53.5）および高性能AE減水剤（W/C42.0、W/C31.0）を用いた。

コンクリートの配合は、表1に示したように、水セメント比を53.5%、42.0%および31.0%とした3種類である。スランプ試験および空気量試験結果は、水セメント比53.5%のコンクリートで14.0cmおよび4.4%、水セメント比42.0%のコンクリートで18.5cmおよび3.1%、水セメント比31.0%のコンクリートで56.5cm（スランプフロー）および3.5%であった。

なお、Priceの実験では、水セメント比50%、単位セメント量330kg/m³、スランプ9cm（3.5inch）、空気量4%、材齢28日まで絶えず湿潤養生を行った場合の圧縮強度は30N/mm²程度（4500psi）とな

Table 1 Mix proportions of concrete

W/C (%)	Slump (cm)	Air content (%)	Unit content(kg/m ³)				
			W	C	S	G	Ad
53.5	15±2.5	4.5±1.5	174	325	820	903	3.912
42.0	18±2.5	4.5±1.5	170	405	791	935	4.050
31.0	60±10*	4.5±1.5	170	549	773	851	7.686

*Slump flow

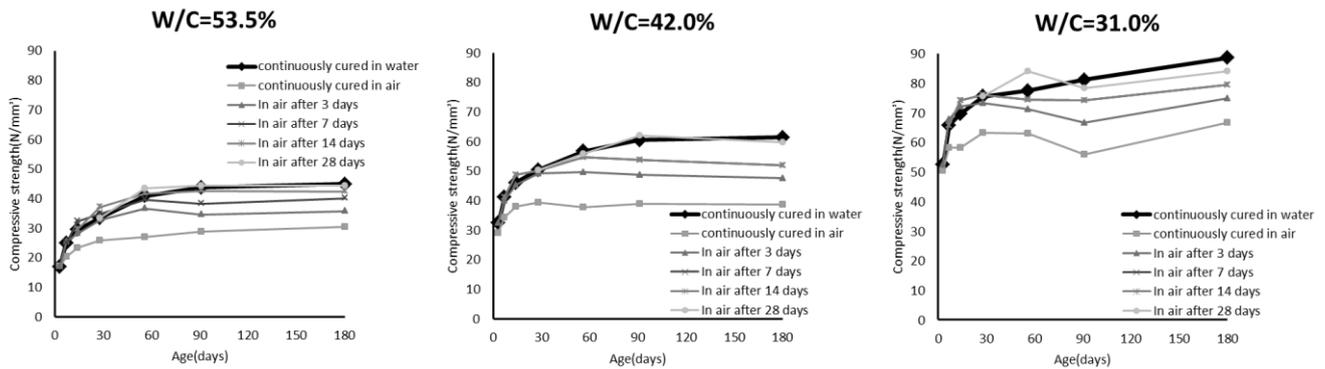


Fig. 2 Effect of preliminary moist curing on compressive strength of concrete

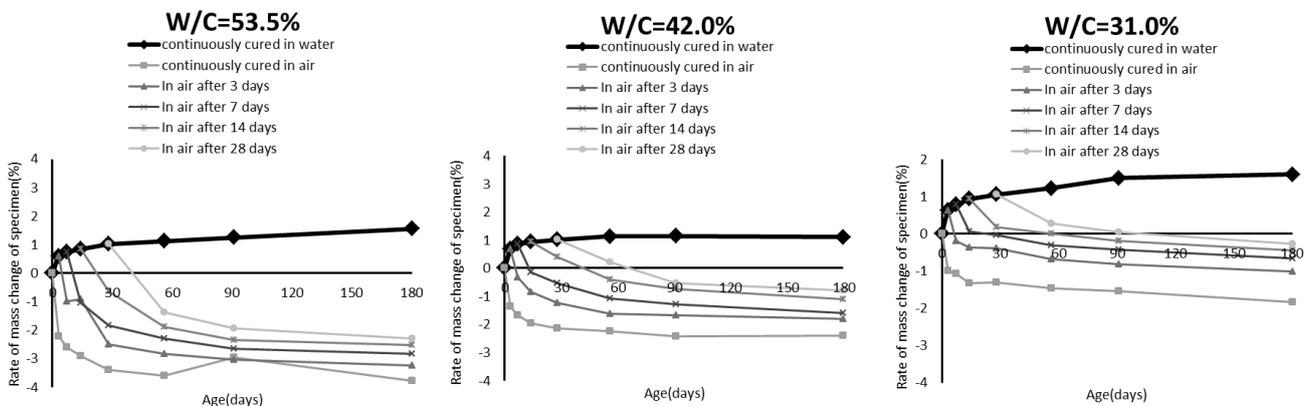


Fig. 3 Effect of preliminary moist curing on mass change of concrete

っており、今回実験を行った水セメント比 53.5% のコンクリートの配合に近くなっている。なお、本研究では、スランプは現在の施工に合わせたものを、また近年多く使用されるようになってきた高強度コンクリートについて実験を行うこととしている。

2.2 供試体の作製

実験に用いた供試体は、 $\phi 100 \times 200 \text{mm}$ の円柱とし、型枠には軽量型枠を用いた。Price の実験では $\phi 150 \times 300 \text{mm}$ の円柱を使用しているが、本研究では現在一般的に使用されている供試体寸法とした。

コンクリートは、実機練りとし、トラックアジテータで搬入した。コンクリートの打込み締固めは、約 10 名で行い、それぞれの配合において円柱供試体を 192 本ずつ合計 576 本作製した。なお、打込み締固めは、現行の JIS A 1132 に準じて行った。

2.3 供試体の養生

養生方法は、Price の論文に準じ、水中養生から気中養生に切り変える材齢を 3 日、7 日、14 日、

28 日と変化させた。また、脱型後絶えず水中養生を行う場合および絶えず気中養生を行う場合についても実験を行った。なお、気中養生は温度 20°C 、相対湿度 60% の雰囲気下で行った。また、各養生条件について、それぞれ 3 本ずつの供試体を使用した。

2.4 強度試験および質量変化の測定

圧縮強度試験および割裂引張強度試験は、それぞれ JIS A 1108、および JIS A 1113 に準じて行った。なお、供試体の端面処理は、機械研磨により行った。圧縮強度試験および割裂引張強度試験は、3 本の供試体の強度の平均値から、それぞれ 85% および 75% (割裂引張強度試験のばらつきが圧縮強度試験のばらつきより大きいため 75% と緩和) を下回る供試体は除外し 2 本の平均値とした。今回の実験結果では、圧縮強度試験において、水セメント比 31.0% の配合の材齢 28 日後に水中養生から気中養生に切りかえた場合の材齢 91 日の試験、割裂引張強度試験においては、水セメント比 31.0% の配合の絶えず水中養生を行った場合の材

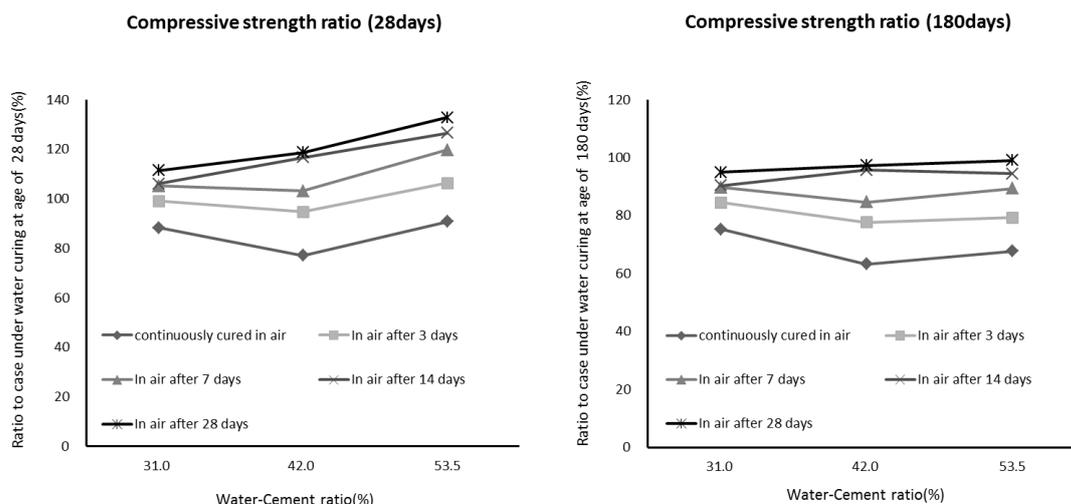


Fig. 4 Effect of preliminary moist curing on ratio to case underwater curing (In case of compressive strength)

齢 56 日および 180 日、材齢 7 日後に水中養生から気中養生に切りかえた場合の材齢 91 日、材齢 28 日後に水中養生から気中養生に切りかえた場合の材齢 91 日の試験のみであった。

質量変化の測定では、それぞれ脱型直後の質量および強度試験直前の質量を測定し、水中養生による質量の増加および気中養生による質量の減少の程度を求めた。

3. 実験結果および考察

3.1 圧縮強度特性

初期の水中養生期間がコンクリートの圧縮強度に及ぼす影響は、図 2 に示す通りである。いずれの配合においても、水中養生から気中養生に切り替えると、Price の論文と同様に、一旦は絶えず水中養生を行った供試体より圧縮強度は増加する傾向にあった。これは、供試体が乾燥していく過程において、供試体の外側は乾燥し内部は湿潤状態が保たれていることによって、載荷前にすでに供試体外側に引張力が働いているためと考えられる。この傾向は、水セメント比 31.0% のコンクリートの場合、水中養生から気中養生に切り変える材齢が 28 日の場合に顕著であった。そして、水中養生から気中養生に切り変えると、一旦強度増加した後、材齢の経過に伴い強度低下するものの、今回の実験では Price の論文と異なり材齢 91 日以降に再び強度増加する傾向を示し、特に水セメント

比 31.0% のコンクリートの場合に顕著であった。これは、図 3 の供試体の質量変化率に示したように、材齢 91 日以降は質量減少率が緩やかになり、供試体の外部と内部の乾湿の差が小さくなることで、載荷前に供試体に引張力がほとんど働かなくなり、その後は材齢 180 日まで水和の進行によって強度増加が認められたものと考えられる。

Price の論文において、水中養生から気中養生に切り替え、一旦強度増加した後、材齢の経過に伴い強度低下し続けたのは、当時のコンクリートの使用材料や配合、締固め、供試体寸法の相違などから、材齢 180 日においても供試体の内部と外部に乾湿の差が生じていたことによる可能性もある。

また、絶えず気中養生を行った場合の材齢 180 日における圧縮強度は、Price の論文によると、絶えず水中養生を行った場合の 40% 程度になっているが、今回の実験結果では、水セメント比 53.5% のコンクリートの場合に 70% 程度、水セメント比 42.0% のコンクリートの場合に 65% 程度、水セメント比 31.0% のコンクリートの場合に 75% 程度となった。

絶えず水中養生した場合に対するそれぞれの初期の水中養生期間における圧縮強度比は、図 4 に示す通りである。左図は絶えず水中養生を行った管理材齢 28 日の圧縮強度に対する材齢 180 日におけるそれぞれの養生条件の圧縮強度比を、右図は材齢 180 日まで絶えず水中養生を行った場合の圧縮強度に対する材齢 180 日におけるそれぞれの養生

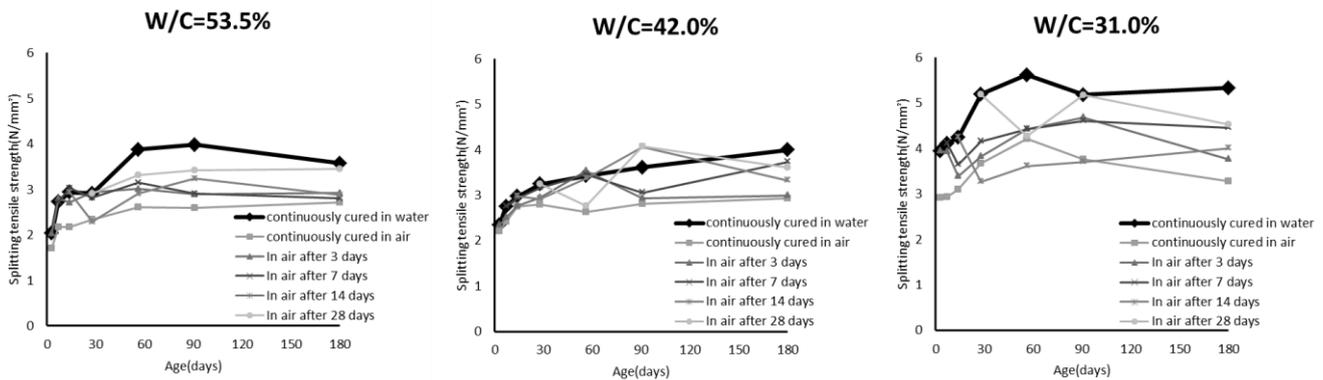


Fig. 5 Effect of preliminary moist curing on splitting tensile strength of concrete

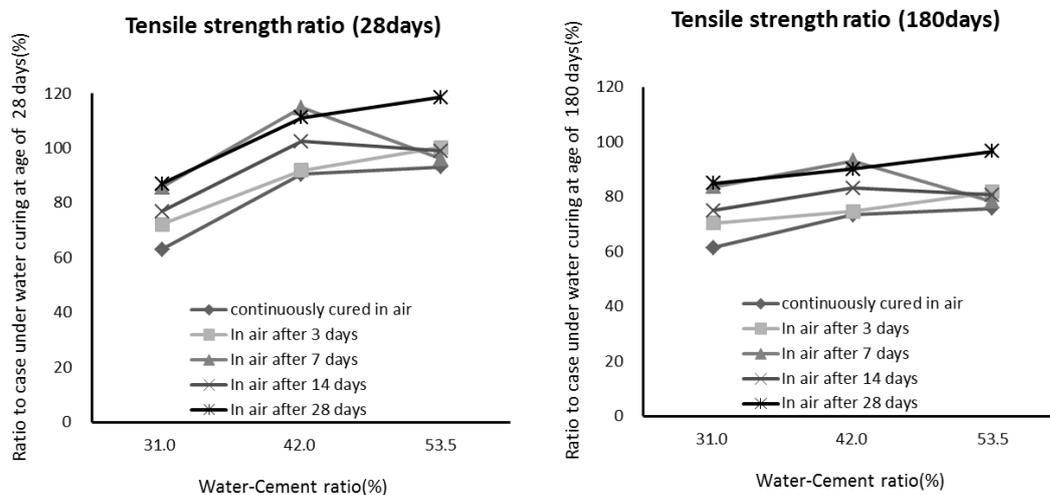


Fig. 6 Effect of preliminary moist curing on ratio to case underwater curing (In case of tensile strength)

生条件の圧縮強度比を示している。

左図より材齢 180 日において、絶えず水中養生を行った管理材齢 28 日の圧縮強度を満足するためには、いずれの配合においても初期の水中養生期間が 3 日間でもよい (強度比 100% 程度以上) ことになり、普通コンクリートで湿潤養生 5 日間以上、高強度コンクリートで 3 日間以上と記載されている土木学会コンクリート標準示方書や日本建築学会 JASS5 の考えでよいことになる。

しかし、右図のように材齢 180 日同士で比べることとし、材齢 180 日まで絶えず水中養生した場合をそのコンクリートの持つポテンシャル強度と考え比較すると、初期の水中養生期間が 3 日間ではポテンシャル強度に対していずれの配合においても 80% 程度となる。そして、90% 程度のポテンシャル強度を発揮するためには初期の水中養生期間が 7 日間必要となり、100% のポテンシャル強度を発揮するためには初期の水中養生期間が 28 日

間必要となる。

3.2 引張強度特性

初期の水中養生期間がコンクリートの割裂引張強度に及ぼす影響は、図 5 に示す通りである。割裂引張強度は、水中養生から気中養生に切り替えると、ほとんどの場合において一旦強度増加することはなく、逆に 20% 程度強度低下する場合も見受けられた。これは、圧縮強度試験の場合と同様に、供試体が乾燥していく過程において、載荷前にすでに供試体に引張力が働いていることによると考えられる。

絶えず水中養生した場合に対するそれぞれの初期の水中養生期間における引張強度比は、図 6 に示す通りである。左図は絶えず水中養生を行った管理材齢 28 日の引張強度に対する材齢 180 日におけるそれぞれの養生条件の引張強度比を、右図は材齢 180 日まで絶えず水中養生を行った場合の引張強度に対する材齢 180 日におけるそれぞれの養

生条件の引張強度比を示している。

左図より材齢 180 日において、絶えず水中養生を行った管理材齢 28 日の引張強度を満足するためには、水セメント比 42.0%、53.5%の配合において、初期の水中養生期間が 7 日間以上（強度比 100%程度以上）ことになる。しかし、水セメント比 31.0%の配合では、初期の水中養生期間を 28 日間としても、90%程度の強度比しか得られなかった。これは、高強度コンクリートほど、養生条件が引張強度に大きく影響を及ぼすことを表していると考えられる。

右図のように材齢 180 日まで絶えず水中養生した場合をそのコンクリートの持つポテンシャル強度と考え比較すると、初期の水中養生期間を 28 日間としても、ポテンシャル強度に対していずれの配合においても 100%を超えることはなかった。これは、圧縮強度に比べて引張強度はひび割れ発生などの耐久性に起因する要素が大きいため、養生条件の影響が敏感に反映されるものと考えられる。なお、ポテンシャル強度に対して 80%程度の引張強度を得るためには、いずれの配合においても、初期の水中養生期間が 7 日間は必要となる。

4. まとめ

現在のコンクリートについて、Price の論文と同じ養生条件で、初期の水中養生期間がコンクリートの力学的性質に及ぼす影響を検討した結果、以下の(1)~(4)が明らかとなった。

- (1)Price の実験結果と同様に、水中養生から気中養生に切り替えると、一旦圧縮強度が増加しピークを迎え、その後緩やかに低下していく現象は見受けられたが、供試体の外部と内部の乾湿の差が小さくなると、材齢の進行とともに再び圧縮強度は増加する傾向にあり、水セメント比が 31.0%のコンクリートにおいて顕著に見受けられた。
- (2)水中養生から気中養生に切り替え、コンクリートの圧縮強度が一旦増加すると、逆に引張強度

は一旦低下する傾向にあった。

- (3)初期の水中養生期間が圧縮強度に及ぼす影響では、材齢 180 日まで絶えず水中養生した場合をそのコンクリートの持つポテンシャル強度と考え比較すると、初期の水中養生期間が 3 日間では 80%程度、7 日間では 90%程度、28 日間では 100%程度となった。
- (4)初期の水中養生期間が引張強度に及ぼす影響では、初期の養生期間が短いと水セメント比が小さい配合ほど強度低下する傾向にあった。そして、いずれの配合においても、初期の水中養生期間を 28 日間としても、ポテンシャル強度に対して 100%を超えることはないが、初期の水中養生期間を 7 日間とすると 80%程度の引張強度は得られる。

今後は、初期の水中養生期間が圧縮強度および引張強度の力学的性質に及ぼす影響に加えて、かぶりコンクリートの耐久性を考えた中性化や塩化物イオン浸透に対する抵抗性を検討する予定である。

謝 辞

本研究を行うにあたり、澤本研究室の修士ならびに学部生に多大なご協力をいただきました。ここに記して深謝いたします。

文 献

- 1) Waltar.H.Price: Journal of the American Concrete Institute No.47 pp.417-432(1951)
- 2) Sidney Mindess, J. Francis Young, David Darwin: Concrete Second Edition pp.287-288
- 3) 樋口芳郎, 辻幸和, 辻正哲, 建設材料学 (第六版), p.91(2005)
- 4) 三橋博三, 大濱嘉彦, 小野英哲, “建築材料学 (初版)”, 共立出版, pp.74-76(2007)
- 5) 土木学会, コンクリート標準示法書[施工編], 丸善, pp.126-129(2007)
- 6) 日本建築学会, “建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事”, 技報堂, p.26, p.75(2009)