材齢 5 年を経過したコンクリートの圧縮強度に及ぼす 初期の水中養生期間の影響

澤本武博^{*1} 辻正哲^{*1} 坂本大河^{*2} 舌間孝一郎^{*3}

^{*1} ものつくり大学 技能工芸学部建設学科(〒361-0038 埼玉県行田市前谷 333)

^{*2} ものつくり大学 大学院ものつくり学研究科(〒361-0038 埼玉県行田市前谷 333)

^{*3} 前橋工科大学 工学部社会環境工学科(〒371-0816 群馬県前橋市上佐鳥町 460-1)

要旨：コンクリートの強度発現と初期の湿潤養生期間の関係として、1951 年に米国で Walter. H. Price が発表した論文が代表的で、現在でも多くの文献や教科書に採用されている。本研究では現在の材料を使用して、Price の論文と同じ初期養生期間の条件でコンクリートの長期材齢における圧縮強度に及ぼす影響を検討した。その結果、初期の水中養生期間が圧縮強度に及ぼす影響では絶えず水中養生した場合に対して材齢 5 年において、初期の水中養生期間が 3 日間で 70 % 程度、7 日間で 75 % 程度、28 日間で 80 % 程度となった。また、初期の水中養生を 3 日間行くと、長期材齢になると管理強度(絶えず水中養生した材齢 28 日)と同程度の圧縮強度となった。

キーワード：コンクリート、初期養生、水中養生、長期材齢、圧縮強度、中性化深さ

1. はじめに

コンクリートの強度発現と初期の湿潤養生期間の関係として、1951 年に米国で Walter. H. Price(以下 Price と称す)が発表した論文¹⁾が代表的で、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²⁻⁴⁾。Price の論文は 70 年程度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。

そのため著者らは、水セメント比 70 %～31 %のコンクリートについて、Price の論文と同じ初期養生期間の条件で圧縮強度試験を行い、Fig. 1 に示した結果を得ている⁵⁾。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と比較すると、いずれの配合においても初期の水中養生期間が 3 日間では 80 % 程度、7 日間では 90 % 程度、28 日間では 100 % 程度となることを明らかにした。

本研究では水セメント比 70 %および 42 %の 2 種類のコンクリートについて、材齢 1 年および 5 年の実験結果を追加して、長期材齢における初期の水中養生期間の影響について検討した。また、水セメント比 70 %のコンクリートについて、材齢 5 年における中性化深さを測定し、初期の水中養生期間と中性化の関係について検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料およびコンクリートの配合

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。混和剤としては、水セメント比 70 %の場合には AE 減水剤を、42 %の場合には高性能 AE 減水剤を用いた。

コンクリートの配合を Table 1 に示す。スランブ試験および空気量試験結果は、水セメント比 70 %のコンクリートで 12.0cm および 5.3 %、42 %のコンクリートで 18.5cm および 3.1 %であった。

2.2 供試体の作製

実験に用いた供試体はφ100×200mm の円柱とした。Price の実験ではφ150×300mm 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。そのため、Price の実験より乾燥による影響は大きくなるものと考えられる。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現行の JIS A 1132 に準じて行った。

2.3 供試体の養生

コンクリートの脱型は材齢 1 日で行った。本研究ではコンクリートの湿潤養生として、一般的な水中養生を採用した。初期養生期間の条件としては、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 日と変化させる場合、脱型後試験材齢まで絶えず水中養生を行う場合および試験材齢まで絶えず気中養生を行う場合について実験を行った。さらに、Price の論文には記載がないが、型枠を試験材齢まで存置しておく場合についても実験を行った。なお、型枠を試験材齢まで存置しておく場合には、軽量型枠の上面を

Fig. 1 Effect of preliminary underwater curing on compressive strength of concrete⁵⁾

Table 1 Mix proportion of concrete

W/C (%)	Slump (cm)	Air content (%)	Unit content (kg/m ³)				
			W	C	S	G	Ad
70.0	12±2.5	4.5±1.5	171	245	895	958	2.94
42.0	18±2.5	4.5±1.5	170	405	791	935	4.05

ラップフィルムにより覆うことで水分の蒸発を抑えることとした。また、水中養生は温度 20℃、気中養生および型枠存置による養生は温度 20℃・相対湿度 60% の雰囲気下で行った。

2.4 圧縮強度試験および質量変化の測定

圧縮強度試験は JIS A 1108 に準じて行うこととし、各養生条件・材齢において、それぞれ 3 本ずつの供試体を使用した。なお、圧縮強度試験における供試体の端面処理は、機械研磨により行った。

質量変化の測定では、それぞれ脱型直後の質量および圧縮強度試験直前(端面処理の直前)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。

2.5 中性化深さ試験

中性化深さ試験は JIS A 1152 に準じて行うこととし、水セメント比 70% のコンクリートの各養生条件の材齢 5 年において、JIS K 8001 に規定されているフェノールフタレイン溶液を、それぞれ 3 本ずつの割裂面(計 6 断面)に噴霧して行うこととした。測定箇所は割裂面の両側(曲面側)5 箇所ずつ(供試体中央部から 10mm ずつ離して 5 箇所)の合計 10 箇所とし、6 断面の合計 60 箇所の平均値を中性化深さとした。なお、今回の実験は材齢 5 年のため、中性化が進行している水セメント比 70% のコンクリートのみとした。

3. 実験結果および考察

3.1 初期の水中養生期間が圧縮強度に及ぼす影響

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を Fig. 2 に示す。脱型後絶えず水中養生を行っ

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

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

た場合には、水セメント比 70 % のコンクリートに比べて 42 % のコンクリートの方が、材齢 1 年、さらには材齢 5 年と長期材齢に強度増加が見受けられた。これは、低水セメント比の方が水和に必要な水分が練混ぜ水では足りないため、外部からの水分供給により水和反応が進むためと考えられる。

絶えず型枠存置による養生を行った場合には、水セメント比 70 % のコンクリートは水和に必要な水分が練混ぜ水で足りるため、水中養生を行った場合に比べて若干の強度低下で収まっているが、42 % の場合には水和に必要な水分が供給されないため、材齢に伴う強度増加は小さかった。

脱型後絶えず気中養生を行った場合、また初期の水中養生を行った場合にも、水セメント比 70 % のコンクリートに比べて 42 % の方が、水中養生に比べてかなり強度が小さくなった。

初期の水中養生期間がコンクリートの質量変化に及ぼす影響を Fig. 3 に示す。質量変化については、水中

養生を行うことで 2 % 程度の増加、気中養生を行うと水セメント比 70 % で 4 % 程度の減少、水セメント比 42 % で 2 % 程度の減少であった。Fig. 2 の圧縮強度の結果においては、水セメント比 70 % のコンクリートに比べて水セメント比 42 % のコンクリートの方が、養生による強度差が大きくなっており、圧縮強度の変化を質量変化のみで判断することは困難と考えられる。

3.2 初期の水中養生期間を変化させた場合の強度とポテンシャル強度の比較

各材齢のポテンシャル強度(絶えず水中養生した場合)に対する初期に所定期間の水中養生を施した場合の同材齢における圧縮強度比を Fig. 4 に示す。絶えず型枠存置による養生を行った場合には、水セメント比 70 % では材齢 1 年まで、絶えず水中養生を行った場合と同程度の圧縮強度となり、材齢 5 年においても 90 % 程度であった。一方、水セメント比 42 % では、絶えず水中養生を行った場合に対して 80 % 程度に留まった。

脱型後絶えず気中養生を行った場合には、いずれの配

Fig. 4 Ratio to continuously cured in water

Fig. 5 Ratio to continuously cured in water at age of 28 days

合においても材齢が1年を超えると、絶えず水中養生を行った場合に対して60%程度となった。

初期の水中養生を行った場合には、水中養生期間が長いほど、絶えず水中養生を行った場合に近づく傾向にはあるが、材齢5年になると、初期の水中養生期間が3日間では70%程度、7日間では75%程度、28日間では80%程度となった。なお、水セメント比70%の方が若干初期の水中養生の効果が大きかった。

3.3 初期の水中養生期間を変化させた場合の強度と管理強度の比較

管理強度(絶えず水中養生した材齢28日)に対する初

期に所定期間の水中養生を施した場合の同材齢における圧縮強度比をFig.5に示す。材齢5年になると、絶えず型枠存置による養生で120%程度、絶えず気中養生であっても90%程度の圧縮強度となった。

初期の水中養生を3日間行くと、材齢5年では管理強度と同程度の圧縮強度となり(材齢180日から同程度)、土木学会コンクリート標準示方書⁶⁾や日本建築学会JASS5⁷⁾に示されている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日間以上行うという記載にも合致する。さらに、初期の水中養生を28日間行くと材齢5年においては管理強度の120%程度と

Fig. 6 Picture of carbonation depth of concrete

Fig. 8 Relation between carbonation depth and compressive strength

なった。また、3.2と同様に、水セメント比70%の方が42%に比べて、若干初期の水中養生の効果が大きかった。

3.4 初期の水中養生期間と中性化深さの関係

各供試体の中性化深さを比較した様子を Fig. 6 および Fig. 7 に示す。左から絶えず気中養生、初期の水中養生期間3日～28日の順であり、初期の水中養生期間が長期間になるほど中性化深さは小さくなり、絶えず気中養生の場合で33mm程度、初期の水中養生期間が28日の場合で20mm程度となった。

圧縮強度と中性化深さの関係を Fig. 8 に示す。圧縮強度が大きくなるほど中性化深さは小さくなる傾向にあり、初期の養生期間の違いによる圧縮強度と中性化深さの相関性は高くなった。

4. まとめ

現在のコンクリートについて、Price の論文と同じ初期養生期間の条件で、コンクリートの長期材齢における圧縮強度および中性化深さに及ぼす影響を検討した結

Fig. 7 Effect of preliminary underwater curing on carbonation depth of concrete

果、以下の(1)～(4)が明らかとなった。

- (1) 脱型後絶えず気中養生を行った場合には材齢が1年を超えると、絶えず水中養生を行った場合に対して60%程度となった。
- (2) 初期の水中養生期間が圧縮強度に及ぼす影響では、絶えず水中養生を行った場合に対して、材齢5年において、初期の水中養生期間が3日間では70%程度、7日間では75%程度、28日間では80%程度となった。
- (3) 初期の水中養生を3日間行くと、長期材齢(材齢180日～5年)になると管理強度(絶えず水中養生した材齢28日)と同程度の圧縮強度となった。
- (4) 初期の水中養生期間の違いによる圧縮強度と中性化深さの相関性は高かった。

参考文献：

- 1) Walter. 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 (2003)
- 3) 樋口芳郎、辻幸和、辻正哲：建設材料学(第六版)、技報堂出版、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) 澤本武博ほか：コンクリートの強度発現に及ぼす配合および初期の湿潤養生期間の影響、セメント・コンクリート論文集、Vol. 67, pp. 311-317 (2013)
- 6) 土木学会：2017年制定コンクリート標準示方書[施工編]、pp. 125-126 (2018)
- 7) 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、pp. 26-27 (2018)

EFFECT OF PRELIMINARY MOIST CURING ON STRENGTH DEVELOPMENT OF CONCRETE UNTIL AGE OF 5 YEARS

Takehiro SAWAMOTO^{*1}, Masanori TSUJI^{*1}, Taiga SAKAMOTO^{*2} and Koichiro SHITAMA^{*3}

^{*1} INSTITUTE OF TECHNOLOGISTS (333, Maeya, Gyoda-shi, Saitama 361-0038, Japan)

^{*2} INSTITUTE OF TECHNOLOGISTS, Graduate School of Technologists (333, Maeya, Gyoda-shi, Saitama 361-0038, Japan)

^{*3} MAEBASHI INSTITUTE OF TECHNOLOGY (460-1, Kamisadori-machi, Maebashi-shi, Gunma 371-0816, Japan)

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 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. However, it was experimented about 70 years ago, and that concrete material was different from present one. In this study, the effects of preliminary moist curing period on the strength development of concrete until the age of 5 years were examined with present materials. As a result, a 3-day period of underwater curing allowed the concrete to reach 70 % of the potential 5-year strength which could be achieved with continuous underwater curing. A 7-day period of underwater curing could allow the concrete to reach 75 % of the potential 5-year strength which could be achieved with continuous underwater curing. A 28-day period of underwater curing could allow the concrete to reach 80 % of the potential 5-year strength which could be achieved with continuous underwater curing. In case of long age, a 3-day period of underwater curing allowed the concrete to reach 100 % of potential 28-day strength which could be achieved with continuous underwater curing.

KEY WORDS : Concrete, Preliminary curing, Underwater curing, Long age, Compressive strength, Carbonation depth