

# 原産国の異なる普通ポルトランドセメントを 用いた養生方法の違いによる物理特性

The Physical properties under the different curing system using the Portland cements from different countries

伊代田 岳 史\*・魚 本 健 人\*

Takeshi IYODA and Taketo UOMOTO

## 1. はじめに

コンクリートの製造に用いられる各種ポルトランドセメントは JIS や ASTM ならびに欧州規格など様々な機関で規定されている。その多くは強度規格であり、JIS においては最低強度値のみを規定しており、欧州規格では必要なコンクリートの強度にあわせて最適なセメントを選択できるよう、強さ 32.5, 42.5, 52.5 の三クラスが規定されている。このように日本と欧州諸国においては規格の異なるセメントを用いており、その違いがコンクリートの物理性能を左右することも考えられるため、原産国が異なるセメントがどのような物理的性質を持ちうるかを把握する必要がある。セメント種類の違いによる強度や耐久性などの試験は近年盛んに行われており、非常に有用な結果が集められている。しかし、その多くは標準養生を施した試験体を比較するにとどまっており、材齢初期における養生不足等の問題点はあまり取り上げていない。近年の現場におけるコンクリートの製造は工期短縮・型枠転用などの原因により早期脱型されることが考えられる。このように若材齢において脱型されたコンクリートの内部組織構造はまだ形成されていないため、外部環境の影響を大きく受け、長期材齢における強度や耐久性に大きな影響を与えたと考えられる。

このような観点から原産国が異なったセメントの若材齢時環境変化が物理的性質に与える影響を個々に評価する必要があると考えられる。そこで本研究においては欧州規格の 42.5 セメントであるスイスセメントと日本の汎用セメントを用いて若材齢から乾燥環境に曝した試験体の長さ変化、重量変化、圧縮強度などを測定し長期における物理特性を把握することを目的とした。また、乾燥環境下から水分を再供給した場合の各種特性を把握することで、後の水分供給における感受性を評価した。

表1 使用したセメントの物理特性

		Switzerland	Japan
		Normo4	OPC
密度(g/cm <sup>3</sup> )		3.13	3.16
圧縮強さ (N/mm <sup>2</sup> )	2d	22.8	-
	3d	-	27.5
	7d	-	43.7
	28d	53.6	試験中
凝結	水量(%)	26	27.4
	始発(min)	15	2-20
強熱減量(%)		3.1	2.43
三酸化硫黄(%)		2.7	2
塩化物イオン(%)		0.04	0.007

## 2. 実験概要

本研究においてはスイスで汎用的に用いられている Holcim 社製普通ポルトランドセメント (密度 3.13 g/cm<sup>3</sup>) と日本で汎用的に用いられている太平洋セメント社製普通ポルトランドセメント (密度 3.16 g/cm<sup>3</sup>) を用いて作製したセメントペーストを利用して実験を行った。それぞれのセメントの特性と Bouge 式により計算した鉱物組成を表 1, 2 に示す。作製したセメントペーストは配合 W/C = 0.35 で一定とし、供試体は均一に環境の影響を受けるようにできるだけ小さな直方体とした。実験は、打設したセメントペーストを前養生として 20°C の環境で 18 時間程度静置したのち脱型し、それぞれの環境条件で引き続き養生を行った。環境条件は RH 35%, RH 60%, 水中養生の三種類の連続環境とそれぞれの乾燥環境で 28 日間静置した後、水中に移動した水分再供給環境とした。それぞれ本論文では連続乾燥を D, 水分再供給 (乾燥後水中養生) を DW, 水中養生を W と表す。また、各記号の前にかかっている数字は連続乾燥時の相対湿度を表しており、S ならびに J はそれぞれスイス、日本を示している。なお、本研究では

\*東京大学生産技術研究所 都市基盤安全工学国際研究センター

研 究 速 報

表2 使用したセメントの鉱物組成

	S-OPC	J-OPC
C <sub>3</sub> S	55.8	63.1
C <sub>2</sub> S	14.9	11.2
C <sub>3</sub> A	8.1	8.7
C <sub>4</sub> AF	9.5	8.7

温度の影響を考慮しないためにすべての環境で温度 20°C 一定とした。測定項目は以下の 3 種類である。

(1) 長さ変化試験

ASTM C 1378 に準拠した 20 × 20 × 285 mm の試験体を用いて、試験体数を 2 ~ 3 本とし、それぞれの測定値の平均値を長さ変化量として用いた。

(2) 重量変化率試験

試験体の大きさは 20 × 20 × 100 mm のものを用い、1 mg まで測定できるはかりを用いて継続的に測定した。試験体は 2 本用意し、その平均値で表記した。

(3) 曲げ試験並びに圧縮試験

JIS セメント強度試験に準拠して 40 × 40 × 160 mm の試験体で行った。曲げ強度は 2 本の平均値、圧縮強度は 4 本の平均値を用いた。

3. 実 験 結 果

3.1 長さ変化試験

図 1, 2 は水中養生 W, 連続乾燥養生 D (RH 35 %, RH 60 %) と水分再供給 DW (乾燥環境から水中養生へ移行) した試験体のスイス汎用セメントと日本の汎用セメントとの結果を比較したものである。個別に行ったスイス汎用セメントの水中養生は RH 35 % の試験体と RH 60 % の試験体でほぼ同じ結果を示していることから試験体間の相違はあまり見られないことが確認できる。スイス汎用セメントの W では材齢数日の若材齢時に吸水し膨張した後、緩やかな膨張が継続している。日本汎用セメントではスイス汎用セメントと比較して膨張率が著しく小さいことがわかる。このことは日本汎用セメントに対してスイス汎用セメントの変形しやすさを物語っている。しかし、両者のセメントは膨張が継続して起こっていることがわかる。次に D では材齢 28 日程度までは乾燥による水分逸散により乾燥収縮が大きく発生する。セメントならびに環境を比較すると、RH 35 % ではスイス汎用セメントの方が日本汎用セメントよりも収縮率が大きく、RH 60 % ではほとんど変わらない結果が示されている。このことよりスイス汎用セメントは厳しい環境ほど変形のしやすさが顕著に表れると考えられる。DW では水分供給直後に著しく膨張しその後も

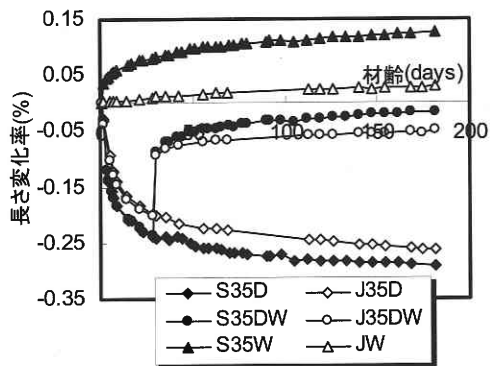


図 1 試験体長さの経時変化 (RH35 %)

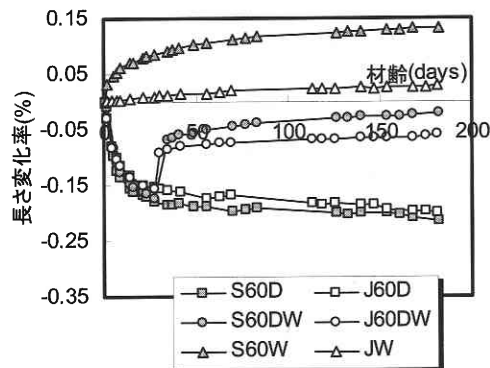


図 2 試験体長さの経時変化 (RH60 %)

膨張が継続している。この環境においてもスイス汎用セメントの方が敏感な挙動を示している。また相対湿度の異なる二つの試験体を比較すると、どちらのセメントにおいても乾燥環境が異なっても水分供給後は同じ挙動を示している。この膨張現象の原因は水分を外部から与えると未反応であったセメント粒子が水和反応を再開し、また水分を吸水することで膨潤することによるものと考えられる。しかし、水分再供給では基長以上に膨張することができず、最終的には収縮状態で収束することがわかる。また、膨張の原因が水和反応によるものと水分の空隙内膨潤によるものを区別することができないため、考察は難しいものの筆者らの研究による再水和反応や空隙構造の考え方<sup>1)</sup> から接水と同時に再水和反応が急速に起こり、内部組織構造が確立すると考えられ、その後の膨張量は膨潤によるものと考えられる。水分再供給による再水和反応は著者らの研究<sup>2)</sup> により同程度と推定でき、内部組織構造は若干異なっているものの長さ変化にはあまり影響しないと考えられる。

3.2 重量変化率試験

図 3, 4 は W, D (RH 35 %, RH 60 %) ならびに DW を施した試験体のスイス汎用セメントと日本の汎用セメントとの質量変化率の比較を示したものである。W の試験体

では両者のセメントとも養生直後に吸水し質量増加しており、日本の汎用セメントの方が接水直後の質量増加量が大きく、長期材齢においてもスイス汎用セメントより若干大きい。これは日本の汎用セメントの方が、早期に水和反応がおこり、質量増加量が著しく大きくなったものと考えられる。一方、Dでは乾燥開始直後に水分が逸散して著しい質量減少が起こっており、また長期材齢においては材齢の経過とともに質量増加が認められた。これは大気中の炭酸ガスが原因でセメント硬化体中のセメント水和物との炭酸化で質量増加に転じたと考えられる。セメントによる比較では両者のセメントにおいてさほど大きな差が見られるわけではない。また、どちらのセメントにおいても同様に長期材齢においては炭酸化の影響をうけるため質量増加に転じている。DWでは接水直後から吸水し再水和反応と空隙内の水分充満により質量が急激に増加し、接水数日後にはWと同等まで質量が回復した。どちらのセメントも接水直後から質量増加している。しかし、著者らの既往の研究同様<sup>2)</sup>、乾燥時の湿度の高いRH 60%の方がRH 35%に比べて質量増加量が小さいことがわかる。これは乾燥環境下において低湿度よりも高湿度の方が、水和反応が進行しやすい環境であるために、内部組織構造が確立しており吸水しにくい構造、もしくは水和反応が順調に進行できない構造となっていると考えられる。スイス汎用セメントと日本汎用セメントの間には格別大きな差は認められず、水分再供給によって水和反応が進行し質量増加が起こることが確認できた。

図5は長さ変化と質量変化の関係を測定時間ごとに示したものである。若材齢から乾燥を受けると長さ変化を伴わずに質量変化することがわかる。これはまだ固まらないセメント硬化体の水分蒸発が著しく起こるため、質量が減少し長さは変化しない現象が起こる。乾燥養生におけるスイス汎用セメントと日本汎用セメントとの相異はほとんどなく環境条件によりその関係が決定するといえる。一方で水中養生では重量増加はほぼ同等であるが、日本汎用セメントは長さ変化を起こしにくく変形のしづらい材料であるといえる。水分を再供給した試験体を比較すると、重量の回復は同程度だが長さ変化が大きく異なり、水分供給による膨張には日本汎用セメントは鈍感であるといえる。

### 3.3 強度試験結果

図6、7はW、D (RH 35%, RH 60%) ならびにDWを施した試験体のスイス汎用セメントと日本の汎用セメントの圧縮試験結果を示している。Dでは材齢7日からほとんど強度増進しておらず、水和反応が一時的に停止したことによるものと考えられる。

連続乾燥を行った試験体は一方、連続的に水中養生した

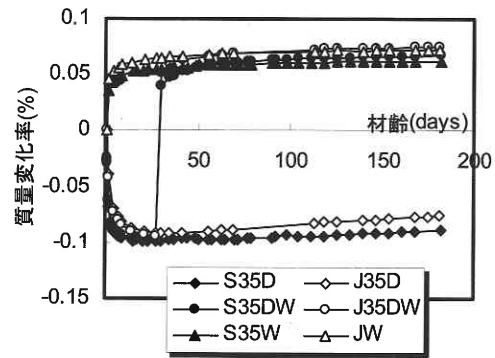


図3 試験体重量の経時変化 (RH35%)

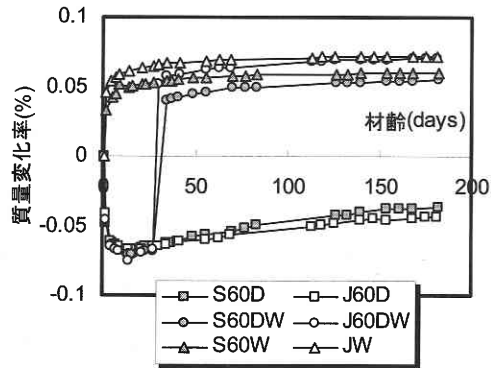


図4 試験体重量の経時変化 (RH60%)

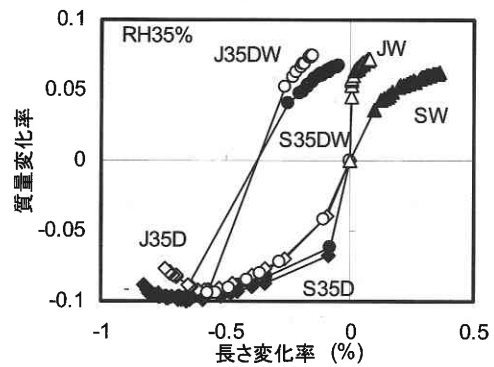


図5 長さ変化率と質量変化率の関係

試験体は材齢90日程度まで徐々に強度増進しており、水和反応が起こっていることが伺える。DWにおいては接水してから強度増進が起こり、材齢182日で水中養生した試験体と同程度の圧縮強度が確認できた。これは再水和反応により水和生成物が空隙を充填したのものであると考えられる。

次に図6は乾燥環境がRH 35%におけるスイス汎用セメントと日本の汎用セメントを比較したものである。初期における両者のセメントの差はあまり大きくないが、材齢28日において日本のセメントは水中養生においてスイスセ

研 究 速 報

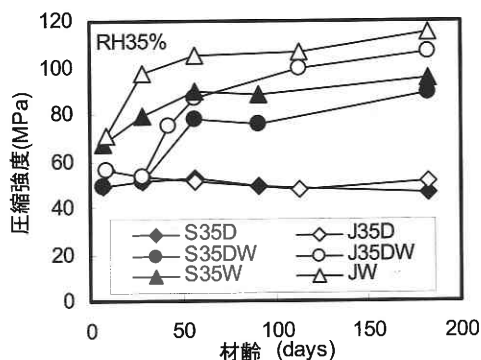


図 6 圧縮強度の経時変化 (RH35%)

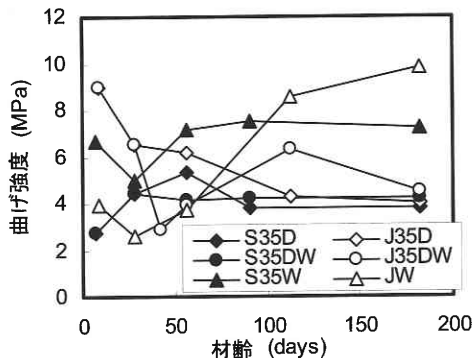


図 8 曲げ強度の経時変化 (RH35%)

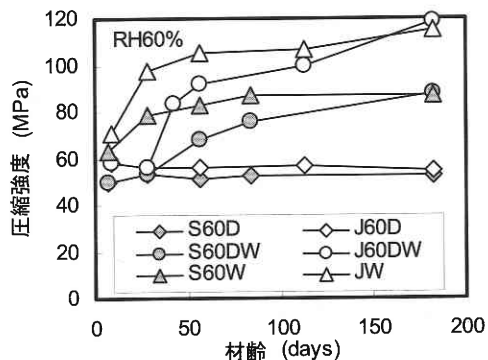


図 7 圧縮強度の経時変化 (RH60%)

ントに比べて高い強度を示した。一方、乾燥養生においてはスイスセメントとほとんど差がない結果であった。また、水分再供給 (DW) では、どちらの試験体においても強度が増進していることがわかる。これは内部の未反応セメント粒子が再水和反応を起こし内部組織を作り上げたためと考えられる。スイスセメントに比べ日本のセメントはその反応が敏感であることが伺える。この原因としてセメント粒子の密度の差とともに、内部含有物の違いが考えられる。一般に日本のセメントは初強期度が得られやすく作られており、欧州規格の 52.5 セメントクラスだと考えられることから、内部に含有する不純物の量がかなり制限されていると考えられる。一方、スイスのセメントではおそらくフライアッシュが含有しており、その含有量により水和低減ならびに強度抑制が行われていると考えられる。

図 8 は曲げ試験の結果を示したものである。曲げ強度にはばらつきがあるものの D は強度発現していないことがわかる。また、W では材齢とともに強度発現している様子がうかがえる。しかし、DW においては材齢が経過しても強度発現が認められなかった。圧縮強度においては強度発現した DW でも曲げ強度が弱点となっていることが明らかとなった。つまり、乾燥または水分再供給したときに

導入されるひび割れが曲げ方向の耐力に対して悪影響を及ぼしていることが想像できる。

4. ま と め

本研究で得られた結果を以下に列挙する。

- (1) スイス汎用セメントならびに日本汎用セメントを用いた長さ変化試験を行ったところ、日本汎用セメントにおける水中養生中の膨潤はスイス汎用セメントよりも小さい結果となった。これはスイス汎用セメントには膨張しやすい鉱物が多く含有しているためであるといえる。
- (2) 水分再供給した試験体は水分を供給された直後から膨潤し始める。しかし、長期間水中に含浸しても、元の長さには戻らず収縮状態となる。
- (3) 質量変化に関しては乾燥時には質量減少するが、水分再供給すると質量増加し、水中養生した環境まで回復する。
- (4) 水分再供給した場合、圧縮強度は水中養生した試験体と同等まで強度増進するが、曲げ強度は強度発現できない。これは乾燥時または水分再供給時に導入されたひび割れが原因と考えられる。

(2003 年 4 月 1 日受理)

参 考 文 献

- 1) 伊代田岳史, 魚本健人: 若材齢時に連続乾燥を受けるセメント硬化体の水和進行と内部水分量, セメント・コンクリート論文集, Vol. 54, pp. 167-173, 2000
- 2) 伊代田岳史, 魚本健人: 乾燥による水和停止後の水分再供給による水和進行と細孔径分布の形成, 生産研究 53 号 5 号, pp. 46-49, 2001

謝 辞

本研究は筆者がスイス連邦工科大学ローザンヌ (EPFL) に留学した際に行ったものであり、研究に対して助言いただいた Scrivener 教授をはじめ、LMC のみなさまに感謝いたします。