

V-512

高温温度履歴を受ける超高強度コンクリートの強度発現性と微細組織の特徴

金沢大学 正会員 鳥居和之
山形県 佐藤清光
金沢大学 正会員 川村満紀

1. まえがき

高温温度履歴を受ける超高強度コンクリート（80～100MPa）の強度発現性に関しては、超高強度コンクリートに形成される緻密な内部組織とコンクリート内部の少ない自由水の量を考えると、外部からの水分の補給によってセメントおよびシリカフュームの水和反応を継続するにはおのずと限界がある（1）。その結果、超高強度コンクリートの内部では高温温度履歴の下で自己乾燥（Self-desiccation）が促進され、セメントおよびシリカフュームの長期にわたる水和反応性状に重大な影響を及ぼしている可能性がある（2）。また、超高強度コンクリートでは、低水／セメント比で、かつシリカフュームを混入した場合に自己収縮ひずみが大きくなることも報告されており、シリカフュームの混入がコンクリートの内部組織や微細なひびわれの発生に及ぼす影響についても検討しておく必要がある。

本研究は、コンクリート柱部材において実測された内部温度を模擬できる温度追従システムを備えた水槽中で打設直後の超高強度コンクリートを養生（Temperature Matched Curing、TMC）することにより、超高強度コンクリートの強度発現に及ぼす硬化初期における高温温度履歴の影響についてそれらの水和反応性状および微細組織の特徴との関連性より検討したものである。

2. 実験概要

シリカフューム無混入（略号OPC80）およびシリカフューム8%混入（略号SF100）の2種類の超高強度コンクリートの目標強度（28日材令）は80および100MPaであり、両コンクリートの配合を表-1に示す。コンクリートは、直径10cm、高さ20cmの鋼鉄製シリンダーに打設し、一部の供試体は3時間経過の時点で厳重に密閉した状態で温度追従養生水槽に移した。コンピュータ制御による温度追従養生（TMC養生、80×80cmの柱部材中心部の実測温度を模擬したもの（図-1参照））は、温度履歴の影響が大きいと考えられる材令4日目までとし、それ以後は23℃の室内にて供試体全体を完全にシールした状態で養生（シール養生）した。なお、比較のために温度履歴を受けていないコンクリート供試体のシール養生および水中養生も実施した。測定項目は、圧縮強度、結合水量（105～1000℃の減量）、DTA-TG分析、SEM観察、水銀圧入式ポロシメータによる細孔径分布の測定、および蛍光顕微鏡による微細ひびわれの観察等である。

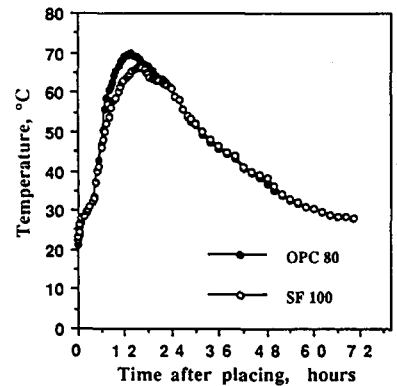


Fig.1 Temperature profiles

3. 強度発現性と水和反応性状

超高強度コンクリートの圧縮強度および結合水量を表-2に示す。シリカフューム無混入のもの（OPC80）では、TMC

Table 1 Mix proportions of ultra high-strength concretes with and without a silica fume.

Type of concrete	W/C (%)	Water (kg/m ³)	Cement (kg/m ³)	SF (kg/m ³)	Sand (kg/m ³)	Gravel* (kg/m ³)	SP** (liter)	Slump (mm)
OPC 80	30	150	500		595	1330	5.0	130
SF 100	30	150	460	40	535	1385	6.0	150

* Basalt aggregate (specific gravity : 2.95, water absorption : 1.6%, maximum size : 14 mm)

** Naphthalene-based superplasticizer

Table 2 Compressive strength and combined water content of ultra high-strength concretes.

Type of concrete	Curing condition	Compressive strength (MPa)			Combined water content (%)			Ca(OH) ₂ (%)
		7 days	28 days	91 days	7 days	28 days	91 days	
OPC 80	T.M.C.	74.3	84.4	93.3	6.3	6.7	6.8	4.3
	Sealed	66.9	79.1	85.7	5.2	6.2	6.4	4.6
	W. bathed	71.3	80.6	91.6	5.9	6.2	6.4	5.0
SF 100	T.M.C.	85.9	91.5	94.5	6.0	5.9	6.0	3.2
	Sealed	72.9	91.6	103.3	5.7	5.7	6.1	3.9
	W. bathed	71.4	91.0	104.6	5.7	5.9	6.1	3.9

養生のものの強度の発達がシール養生および水中養生と比較して大きく、少なくとも90日材令までの範囲では初期における高温履歴がOPC80の強度の発達に悪影響を及ぼすことはない。しかし、シリカフューム混入のもの（SF100）では、TMC養生のものは7日材令における強度の発達はOPC80の場合と同様に顕著であるが、28日材令以後の強度の伸びがほとんど見られず、90日材令においてはシール養生および水中養生と比較して逆に10%程度強度が低下している。一方、超高強度コンクリートの結合水量に関しては、シリカフューム無混入のもの（OPC80）では、TMC養生>水中養生>シール養生の順番で結合水量が増大しており、高温履歴を受けた場合には初期におけるセメントの水和反応が促進されるとともに、その後のセメントの水和反応も継続して進行しているのが認められる。それに対して、シリカフューム混入のもの（SF100）では、いずれの養生の場合も材令にともなう結合水量の増加はOPC80のものよりかなり小さくなり、とくにTMC養生のものは3日材令以後の結合水量の増加が全く見られず、91日材令では水中養生およびシール養生のものよりも結合水量が減少している。TMC養生を行った超高強度コンクリート（SF100）の長期材令における水和反応の抑制は、示差熱分析（DTG-TG）から求めた水酸化カルシウム量にも明確に示されている。

4. 細孔構造と微細ひびわれの発生

超高強度コンクリート（91日材令）の細孔径分布を図-2および3に示す。高温履歴を受けた超高強度コンクリートの強度発現の抑制を蒸気養生やオートクレープ養生におけるような細孔構造の粗大化によるものとする指摘がある。しかし、OPC80およびSF100の細孔径分布曲線より明らかなように、高温履歴を受けたもの（TMC養生）と受けないもの（シール養生）の間には明確な相違は認められず、細孔構造の粗大化が強度発現の抑制の直接の原因ではない。高温履歴を受けた超高強度コンクリート供試体（SF100）の中央部（水平断面）の蛍光顕微鏡による観察結果を写真-1に示す。円柱供試体の側面には、ほぼ等しい間隔で表面から微細なひびわれ（幅 $10 \sim 20 \mu\text{m}$ ）が発生しており、微細なひびわれの進展は表面に最も近い粗骨材の界面で止っている。従って、微細なひびわれが発生している領域は表面から数mm程度であり、それより内部では微細なひびわれの発生は観察されない。高温履歴を受けていない供試体では、微細なひびわれの発生は表面および内部ともに観察されないことから、このひびわれはTMC養生中の温度変化または自己乾燥によって生じたものと推測される。コンクリート表面における微細なひびわれの発生は、圧縮強度を受け持つ領域が低減するだけでなく、水分や塩素イオンの浸透が助長されるために、コンクリートの耐久性の面で大きな問題となる可能性もある。

5. まとめ

温度追従養生システムにより高温履歴を受けた超高強度コンクリートの強度発現性に及ぼすシリカフューム混入の影響について検討した結果、とくにシリカフューム混入の場合に顕著に見られる長期強度の伸びの抑制は、硬化初期のセメントおよびシリカフュームの水和反応の促進によるコンクリート内部での急激な乾燥の進行が原因であり、細孔構造の粗大化によるものではないことが明らかになった。また、高温履歴を受けた超高強度コンクリート（SF100）には、コンクリートの表面に微細なひびわれが発生しており、このことが強度および耐久性にどのような影響を及ぼすかについてさらに検討することが必要である。

謝辞：本研究の一部はオーストラリアのCSIRO D.B.C.&E.にて実施したものであり、実験等にて協力いただいたDr. S.L.MakおよびDr.D.W.S.Hoの両氏に感謝致します。

参考文献

- 1) F.D.Larrard, P.C. Aitcin, Apparent Strength Retrogression of Silica-Fume Concrete, ACI Materials Journal, Vol.90, No.6, pp.581-585, 1993.
- 2) 鳥居和之, S.L.Mak, D.W.S. Ho, シリカフュームを使用した高強度コンクリートの強度発現に及ぼす高温履歴の影響、材料、Vol.43, No.484, pp.95-100, 1994.

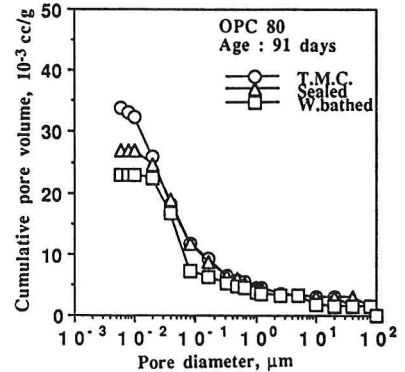


Fig.2 Pore size distributions (OPC80)

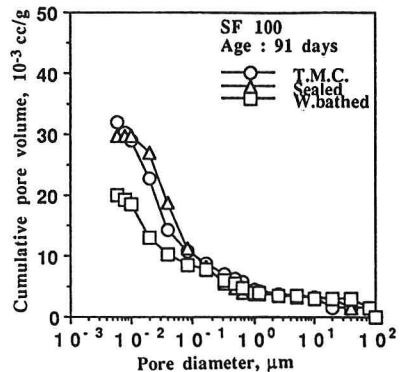


Fig.3 Pore size distributions (SF100)

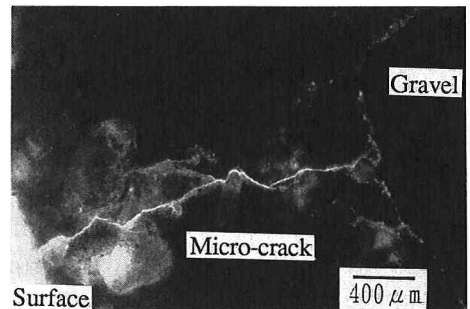


Photo.1 Occurrence of micro-cracks (SF100)