

論文 高強度コンクリートの強度発現に及ぼす湿潤養生の影響

佐藤幸恵*1・榊田佳寛*2・中村成春*3・鹿毛忠継*4

要旨：高強度コンクリートの強度発現に及ぼす湿潤養生の影響を把握するために、強度レベルを3段階に設定し、各種養生条件下での強度発現および含水率を実験した。その結果、相対湿度が低くなるにつれて、コンクリートの含水率が低くなり、強度発現が小さくなった。また、質量変化および含水率から、見かけの結合水量を計算により求め、結合水率と強度発現が関係することを明らかにした。また、高強度コンクリートの場合は、コンクリート組織の緻密さに大きく影響を受けるため、材齢によって結合水との関係が異なることがわかった。

キーワード：強度発現、水和反応、含水率、湿潤養生、結合水量

1. はじめに

コンクリートの強度発現が、養生時の温度¹⁾および湿潤条件に大きな影響²⁾を受けることは、よく知られている。このうち養生時の温度条件については多くの研究が行われ、かなり定量的に明らかになり、仕様書にも取り入れられている。しかし、湿潤条件については定量的に解明されているとはいえず、実際の工事において湿潤養生の重要性が指摘されているにもかかわらず、十分仕様が守られているとはいえない状況にある。特に近年使用が増加している高強度コンクリートは、普通コンクリートに比較すると単位水量が単位セメント量に比べて少ないため、水和反応に寄与するコンクリート中に当初から存在する水分が不足したり、セメント硬化体組織が緻密なために外部から補給される養生水が、コンクリートの中心部まで浸透しにくいことなどが考えられる。高強度コンクリートの構造体における強度発現を予測するには、これらの水分の影響を明らかにする必要がある。

そこで、本研究では、各種強度レベルに設定したコンクリートに種々の湿潤条件を与え、その湿潤条件がコンクリートの含水率および強度

表-1 要因と水準

要因	水準
W/C (%)	60, 40, 25, 25 (LH+SF)
養生方法	水中, 封かん, 100%RH, 90%RH, 80%RH, 60%RH, 40%RH養生
養生温度	20℃
供試体寸法	φ10×20cm

表-2 使用材料

セメント	普通ポルトランドセメント 密度: 3.16g/cm ³
	低熱ポルトランドセメント 密度: 3.20g/cm ³ , C ₂ S量: 47% 比表面積: 4120cm ² /g
細骨材	大井川産川砂 絶乾密度: 2.53g/cm ³ 表乾密度: 2.58g/cm ³
粗骨材	岩瀬産硬質砂岩碎石 絶乾密度: 2.62g/cm ³ 表乾密度: 2.65g/cm ³
混和材	シリカフェューム 密度: 2.2g/cm ³ 比表面積: 20m ² /g
混和剤	AE減水剤標準形 (リグニンスルホン酸化合物ポリオール複合体), AE剤 (アルキルアリルスルホン化合物系陰イオン界面活性剤) 高性能AE減水剤 (ポリカルボン酸エーテル系の複合体)

*1 宇都宮大学大学院 工学研究科エネルギー環境科学専攻 工修 (正会員)

*2 宇都宮大学教授 工学部建設学科 工博 (正会員)

*3 宇都宮大学助手 工学部建設学科 工博 (正会員)

*4 独立行政法人建築研究所 材料研究グループ 上席研究員 Ph.D (正会員)

表-3 計画調合

W/C(%)	C種別	単位粗骨材かさ容積 (m ³ /m ³)	s/a(%)	単位水量 (kg/m ³)	質量 (kg/m ³)			
					C	SF	S	G
60	OPC	0.62	46.0	175	292	-	816	984
40	OPC	0.62	41.3	180	450	-	674	984
25	OPC	0.61	40.3	160	640	-	637	968
25	LH	0.61	39.7	160	576	64	621	968

発現にどのような影響を与えるかを調べ定量的に検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料および調合条件

要因と水準を表-1に、使用材料を表-2に、計画調合を表-3に示す。高粉末度タイプの低熱ポルトランドセメントは、水結合材比 25%にのみ用いた。相対湿度 100%湿空養生は、容器に供試体に触れないように水を張り、透明シートで密閉して行い、湿度計で容器内の湿度を測定し、相対湿度が 100%であることを確認した。相対湿度 90, 80, 40%養生は、それぞれ恒温恒湿チャンバーを用いて養生を行った。

2.2 試験項目および試験方法

試験項目は、圧縮強度、質量変化および乾燥法による含水率の変化である。供試体は、JIS A 1132 に準じて作製し、材齢 1 日の脱型まで封かん養生とし、脱型後より各種養生を行った。圧縮強度は、JIS A 1108 に準じて試験を行い、乾燥法による含水率は、圧縮試験後の供試体をただちに 105℃に加熱し絶乾質量を測定して求めた。圧縮試験時の端面仕上げは研磨仕上げとし、若材齢で研磨仕上げが不可能な場合は硫黄キャッピングを施し試験に供した。

3. 実験結果と考察

3.1 強度発現

調合別の圧縮強度と材齢の関係を図-1に示す。図に示すように、強度発現性は湿潤養生の影響を大きく受ける。40%RH養生では、いずれの調合でも強度の増進が少なく、普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートでは材齢 7 日で、低熱ポルトランドセメントを用いたコン

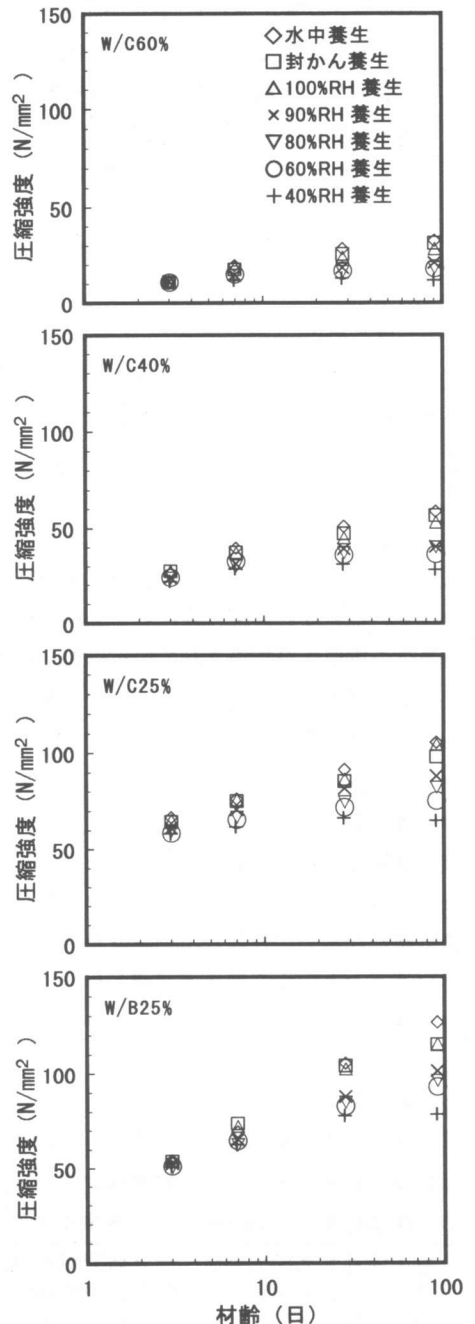
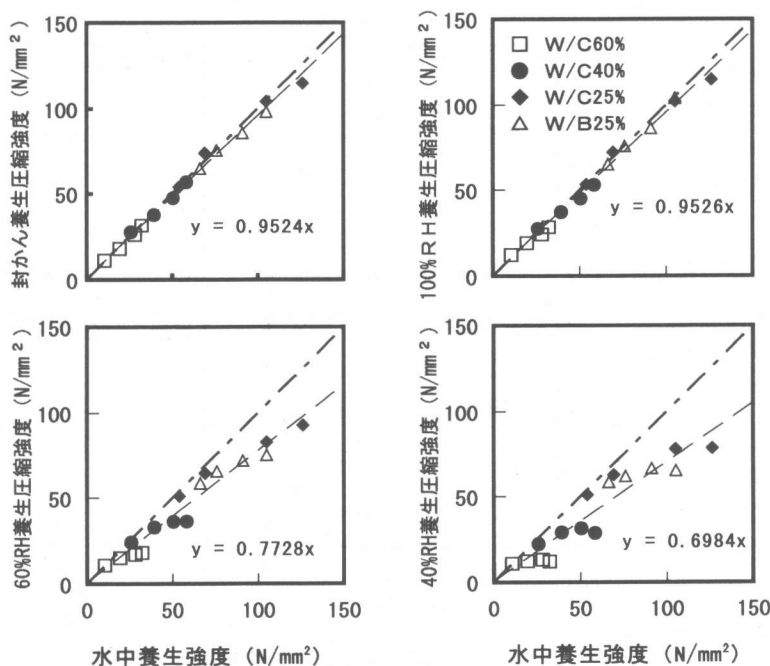


図-1 圧縮強度と材齢の関係

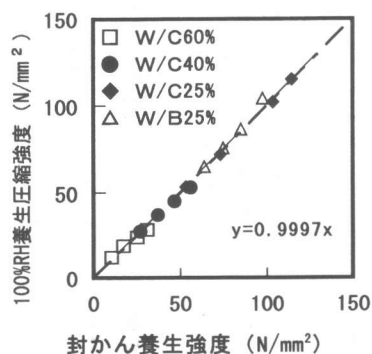


図—2 水中養生強度に対する各種養生強度の関係

クリートにおいては材齢 28 日で強度がほとんど増加しなくなる。この湿潤条件による強度発現の差は、低水セメント比および低水結合材比になるほど大きくなる傾向があり、高強度コンクリートにおいて十分な強度を得るには湿潤養生が重要であるといえる。

3. 2 湿潤条件と圧縮強度

図—2 に示すように、コンクリートのポテンシャルの強度である水中養生をした供試体の強度に比較すると、封かん養生および 100%RH 養生の場合は 3～4 % 強度が低いことがわかる。特に、高強度になると水中養生圧縮強度の方が明らかに強度が大きくなっている。高強度コンクリートにおいては、単位セメント量に対して単位水量が少ないため、水和反応に要する水分が不足するものと考えられる。そのため、養生水の供給のない封かん養生や、相対湿度 100% 養生では、高強度の領域において水中養生の圧縮強度より強度が低くなるといえる。それ以下の相対湿度での養生では、さらに強度が低下し、水中養生強度との差は非常に大きいものとなる。



図—3 封かん養生強度と 100%RH 養生強度の関係

図—3 から 100%RH および封かん養生の圧縮強度の関係は、ほとんど差がないことが認められ、このことから、封かん養生は、相対湿度 100% の湿空養生に相当するということがわかる。また、水中養生強度を 1 とした場合の各種養生時の強度比と、水中養生強度と各種養生時の強度差の関係を図—4 に示す。図—4 より、養生方法による強度発現の強度比は低強度になるほど大きい、強度差は高強度コンクリートほど大

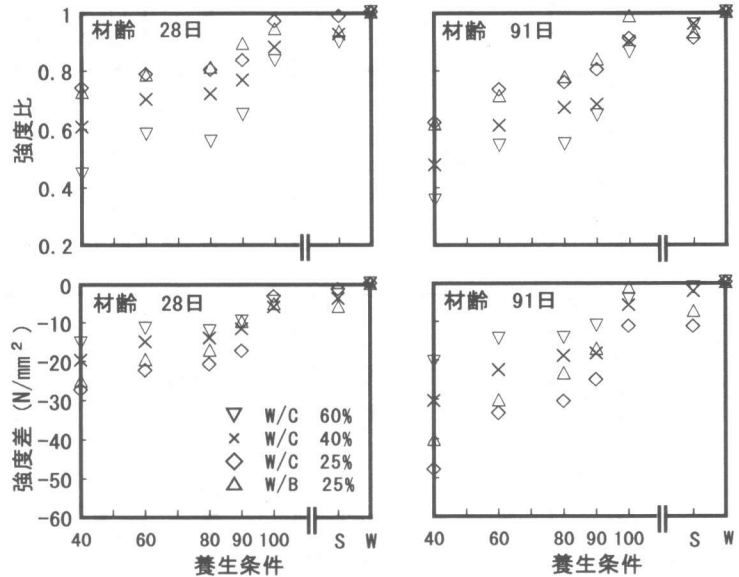
きい。いずれにせよ強度管理における適切な湿潤養生が非常に重要であるといえる。

3. 3 含水率の経時変化

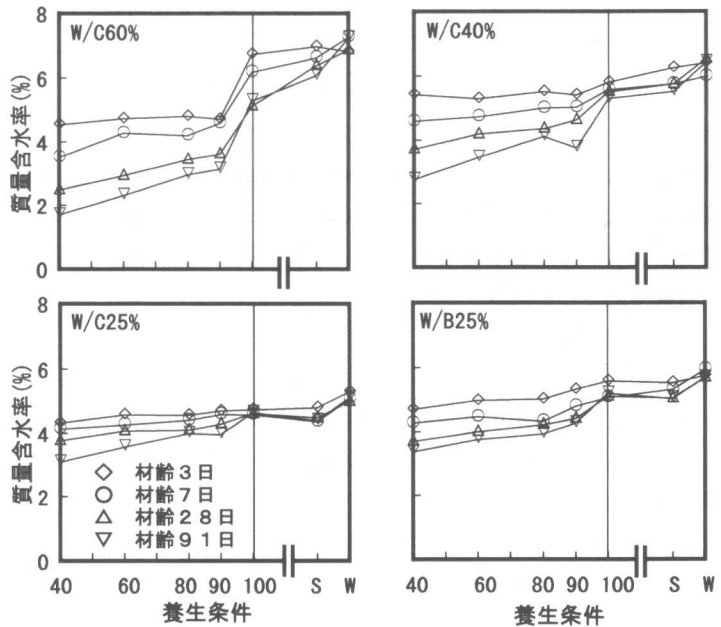
含水率分布の経時変化を図—5に示す。いずれの調合、養生においても、長期材齢になると含水率は低下し、40%RHの気中養生で最も含水率の減少の程度が大きい。この要因として、コンクリート内部の自由水の乾燥が先ず挙げられる。また、水和反応が進む過程でのコンクリート組織の緻密化に伴い、結果として自由水が減り、含水率が減少すると考えられる。高強度コンクリートでは組織が緻密なため、自由水の乾燥は起こりにくく、コンクリート組織の緻密化によって含水率が低下することが考えられ、養生の影響による含水率の違いは低強度のコンクリートに比べて小さくなると考えられる。

また、水セメント比60%のコンクリートで

は含水率の変化が大きい、これは逆にコンクリート組織がそれほど緻密ではないため、水和反応によるものより、材齢の初期から養生の影響を大きく受け、自由水の乾燥による影響の方が大きいと考えられる。これらの結果とあわせ



図—4 強度発現の比と強度差

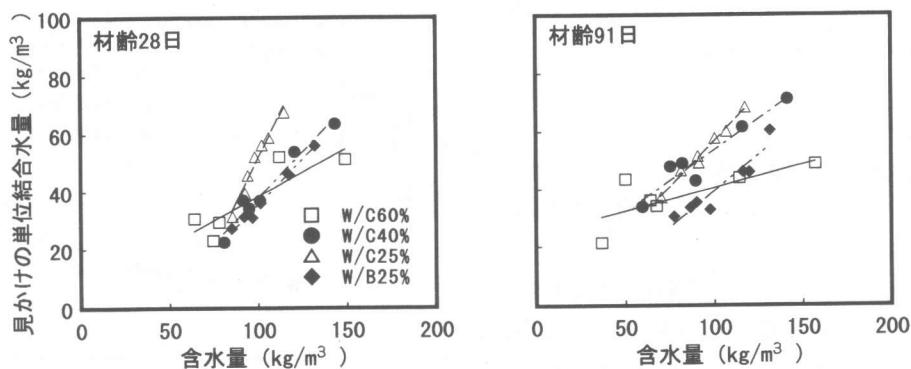


図—5 質量含水率の経時変化

て図—1, 2と比較すると、相対湿度90%以下の養生は、すべてコンクリートを乾燥させ、強度発現に大きな影響を与えていることがわかる。

3. 4 含水量と結合水量

実験で求めた質量含水率を用いて、本研究で



図—6 含水量と見かけの単位結合水量の関係

は、105℃加熱で失われなかった水分を結合水とみなすこととし、各材齢での質量変化をもとに養生中の自由水の増減（乾燥および吸水）を測定し、計画調合上の見かけの結合水量を算出した。材齢 28 日および 91 日における単位結合水量と含水量の関係を図—6 に示す。各調合とも、結合水量と含水量の関係には直線性が認められる。水セメント比が大きい場合に傾きが小さいのは、養生条件によって乾燥や吸水の影響を大きく受けるが、水和反応はそれほど進まなくなり、結合水量の増加がほとんどなくなるためであると考えられる。水セメント比（水結合材比）25%のコンクリートでは、普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートの方がその傾きは大きく、低熱ポルトランドセメントの結合水量の増加はそれほど急激ではない。これは、普通ポルトランドセメントと低熱ポルトランドセメントの強度発現特性の違いによるものと考えられ、普通ポルトランドセメントでは、強度発現が低熱ポルトランドセメントより早く水和反応が進み、材齢 28 日を過ぎると強度発現が小さくなるため、乾燥による含水率の低下の方が大きくなるため、材齢 28 日から 91 日での結合水量と含水量の関係の傾きは大きく低下している。低熱ポルトランドセメントを用いたコンクリートでは、材齢 28 日以降においても強度発現は低下しないため、結合水量と含水量の関係の傾きはそれほど小さくならない。含水量は、コンクリー

ト内部の全水分量の中で、結合水量の増加に伴い減少し、また、養生条件での乾燥や吸水による水分の増減で変化することがいえる。

3. 5 結合水量と強度

図—7 に単位セメント量あたりの見かけの結合水量(%)と圧縮強度との関係を示す。水セメント比 60 および 40%のコンクリートでは、材齢が経過すると結合水量が増加し、圧縮強度も高くなっている。また、結合水量と圧縮強度は良く対応して材齢に関わらず両者の関係には相関性があるといえる。しかし、高強度コンクリートでは、材齢が経過しても結合水量は水セメント比 60, 40%の時ほど増加せず、結合水量と圧縮強度の関係は材齢毎に直線性があり、材齢が進むにつれて、結合水量と強度との関係は結合水量が同じでも強度が高い方へ移行している。これらの要因についてはさらに検討が必要であるが、低強度のコンクリートの場合は、水和反応に要する十分な水が存在するため、材齢と共に水和反応が順調に進行するが、高強度コンクリートの場合は、単位セメント量に対する単位水量が少なく、材齢の初期にセメントゲルを生成する水和反応が急速に進んだ後、未水合のまま残っているセメント粒子の周囲にはわずかな水しか存在せず、緩やかな反応が進行し、組織が緻密化することが考えられる。いずれにせよ、水セメント比が小さい高強度コンクリートの場合は、単に結合水量だけで強度発現を定量化す

ることは難しく、形成される組織の違いを考慮する必要があると考えられる。

4. まとめ

本研究では、各種養生条件がコンクリートの圧縮強度に及ぼす要因について実験および検討を行い、以下のことが明らかになった。

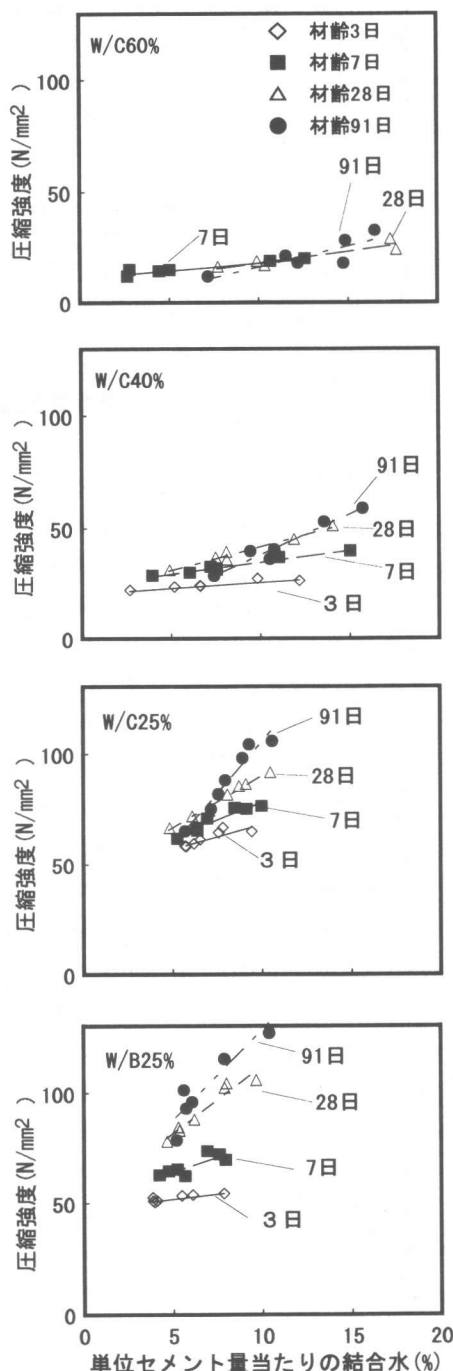
- 1) 条件による含水率は、養生の湿度が低いほど含水率は低くなるが、水セメント比が大きい場合その増減は大きく、水セメント比が小さい場合は増減が小さい。
- 2) 質量含水率および圧縮強度の結果より、封かん養生は、相対湿度 100% 養生と同等の養生である。
- 3) 質量含水率をもとに、見かけの単位結合水量を算出した結果、含水量が少ないほど結合水量も少なく、その関係には各調合毎に直線性が認められた。
- 4) 養生条件による強度発現の経時変化は、水セメント比が大きいとその比率は大きくなり、水セメント比が小さいと強度の差が大きくなる。
- 5) 単位セメント量当たりの結合水は、圧縮強度との関係性が認められるが、高強度コンクリートにおいては、強度発現が結合水量のみでは決定されない。

謝辞

本研究をまとめるにあたり、福島瑞子氏、皆川 淳氏（当時宇都宮大学卒論生）の協力を得ました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 杉山 央：コンクリートの長期強度に及ぼす初期高温履歴の影響およびその定量化に関する研究；学位請求論文，2000
- 2) 杉山 雅：構造体コンクリートの力学的性状に及ぼす乾燥の影響に関する研究；学位請求論文，1980



図—7 単位セメント量に対する見かけの結合水量と圧縮強度の関係