

論文 高水圧を受けるコンクリートの力学的挙動に関する基礎的研究

田中 佳南*¹・中山 一秀*²・岩波 光保*³

要旨：深海環境におけるコンクリートの適用性を評価するための基礎的な検討として、高水圧を作用させたコンクリートの力学的挙動を調べるための実験を行った。作製したコンクリート供試体に水深 5000m を模擬した 50MPa までの水圧を作用させ、水圧作用による外観上の変化、吸水特性、ひずみ値、圧縮強度、微小部分の硬さ、細孔径分布の変化を調べた。その結果、W/C や材齢、混和剤により小さい空隙が多くみられる供試体において、セメント硬化体が最大水圧に耐えることができないと外観変状や圧縮強度の低下が生じることが分かり、高水圧下でのコンクリート利用には十分な養生が必要であることが示唆された。

キーワード：コンクリート、高水圧、透水性、骨格、セメント硬化体の破壊

1. 背景

海洋国である日本において、現在、海底資源に注目が集まっている。エネルギーや鉱物といった資源は私達が生活する上で必要不可欠であるが、日本ではそのほとんどを輸入に依存し、脆弱な供給構造となってしまう。そこで、国内資源として安定的な供給が可能とされる海底資源の積極的な探鉱・開発が進められている。

特に、今まで眠っていた資源として、メタンハイドレート、熱水鉱床、コバルトリッチクラスト、レアアース泥、マンガン団塊の日本周辺海域での採掘に関心が集まっており、その他、深海への二酸化炭素の回収・貯留などの深海の活用も考えられている¹⁾。コンクリート材料は、大量に使用できる、安価である、耐久性が良い、施工が容易であるというメリットがあり、さらに鋼材との相性が良いとされているため、深海で作業をする際の基礎部をはじめとして活用の可能性が考えられる。

そこで、コンクリートが実際に深海に耐えることができるのかが問題となるが、既往研究として、アメリカの海軍土木研究所で中空コンクリートを深海に沈める実験²⁾があり、18 個の供試体がアメリカ沖の水深 548m から 1524m の深海に沈められ 13 年間に渡り観察された。その結果、3 個の中空コンクリートが割れ、その原因は不確かだったものの、透水がほとんどなかったこと、沈めた直後の供試体の圧縮強度は湿潤環境で養生しているものよりも低下してしまっただが、数年後には回復したことが、表面上の劣化は見られなかったこと²⁾が分かっている。

また日本でも、堀らのセメントペースト、モルタルに高水圧を作用させた際の破壊挙動の研究³⁾、小林らのセメントモルタルを深海に沈めた際の物理的特性の変化の研究⁴⁾があり、高水圧による破壊の進展は水セメント比や空気量によって変化すること³⁾、結合材の種類によっ

て海水との化学反応が生じ、ひび割れや圧縮強度などの物理的特性が変化することが分かっている⁴⁾。

しかし、1000m 以上の深海でのコンクリートの挙動やそのメカニズムについてまだ分かっていない点も多い。高水圧を受けるコンクリートは、全方向から力をうけると同時に、水圧による圧縮がかかるため透水が影響する複雑な挙動を示す。さらに、海水による化学的影響や低水温の影響も考えられ、様々な観点からの研究が必要である。そこで本研究では、力学的挙動にのみ焦点を絞り、50MPa という 5000m の深海における高水圧を与えることでコンクリートに生じる変化と、そのメカニズムの研究を行った。

2. 実験概要

本研究では、材齢を変化させたコンクリート、モルタル、セメントペーストに水圧を作用させ、外観、吸水量、ひずみ、圧縮強度、ビッカース硬さの変化、細孔径分布を調べ、高水圧を受けるコンクリートの力学的挙動について考察を行った。以下に、今回用いた供試体概要と水圧作用条件について述べる。

2.1 供試体概要

本研究で使用したコンクリートとモルタルの配合を表-1に示す。透水の影響を調べるため、コンクリートは AE 剤を用いたものと AE 剤を用いていないものを用意した。また、セメントペースト供試体は、水セメント比 0.50 としてセメント量に対して 0.008% の AE 剤を入れて作製した。なお、セメントは普通ポルトランドセメントを用いた。それぞれの供試体は $\phi 10\text{cm} \times 20\text{cm}$ の円柱供試体サイズで、打設 1 日後に脱型し、その後温度 20 度の環境下で供試体に応じて 1 日間から 56 日間の水中養生を行った。

*1 東京工業大学 環境・社会理工学院 土木・環境工学系 土木工学コース (学生会員)

*2 東京工業大学 環境・社会理工学院助教 博士 (工学) (正会員)

*3 東京工業大学 環境・社会理工学院教授 博士 (工学) (正会員)

2.2 水圧作用条件

水圧を作用させるために図-1 に示す高水圧载荷装置を用いた。この装置は、水を満たした圧力容器の中に供試体を入れ、シリンジポンプで水を送り込むことによって水圧を作用させる仕組みになっている。制御用 PC により最大水圧値と維持時間、加圧速度、減圧速度を入力することで水圧を自動で調整することができる。

水圧を作用させる条件は、最大水圧 50MPa、維持時間 10 分間、加圧速度と減圧速度ともに 3MPa/min とした。装置の最大加圧・減圧速度を用いて、水圧を作用させた際の力学的挙動が大きく変化するように設定を行った。材齢 2 日、7 日、13 日、28 日、56 日の供試体に対してそれぞれ水圧を作用させ、モルタルとセメントペーストに対しては材齢 7 日と 13 日に代えて 8 日と 15 日で水圧を作用させた。なお、水圧作用開始時の供試体を湿潤状態に揃えるため、水圧作用前のコンクリートに対し-0.1MPa の圧力で水中での 2 時間の脱気吸水処理を行った。

3. 水圧作用による外観上の変化と吸水量

3.1 水圧作用結果

材齢ごとの水圧作用後の供試体の様子を図-2 から図-5 に示す。なお、コンクリートはそれぞれの材齢で 4 本ずつ水圧を作用させたが、今回は 1 本のみを示す。コンクリート (AE 有) の材齢 7 日の供試体は水圧を作用させた 4 本ともにひび割れと欠けが生じており、最大で断面方向に 5mm 程度の深さであった。モルタルでは材齢 8 日と 15 日の供試体にひび割れと欠けが生じていた。セメントペーストでは、材齢 8 日で小さな欠けが生じて

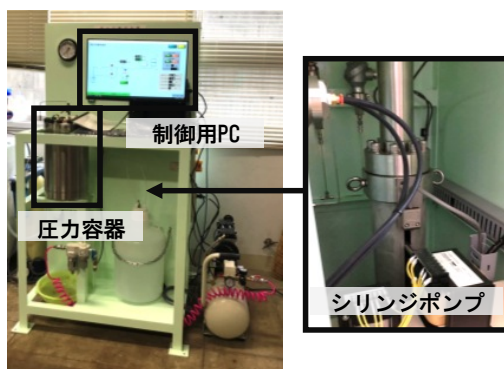


図-1 高水圧载荷装置

おり、材齢 2 日以外の供試体ではひび割れが見られた。材齢 7 日と 8 日の供試体における全体のひび割れや欠けの様子をスケッチした展開図を図-6 から図-8 に示す。

また、コンクリートの材齢ごとの吸水量を表-2 に示す。吸水量は、脱気直後に供試体表面を拭いた後の重さと、水圧作用後すぐに供試体表面を拭いた重さの差として求め、4 本の供試体の平均値を取っている。

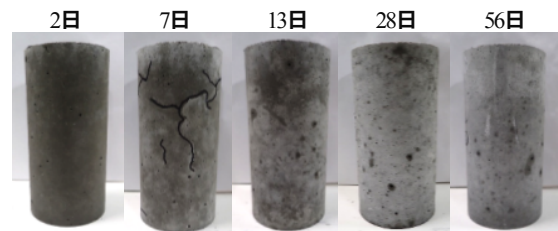


図-2 水圧作用後の供試体 (コンクリート AE 有)

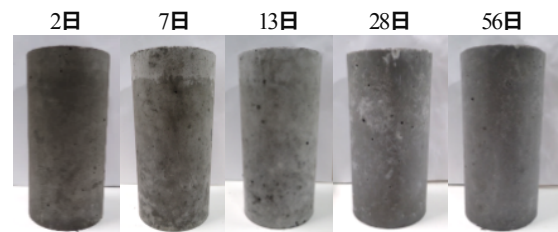


図-3 水圧作用後の供試体 (コンクリート AE 無)

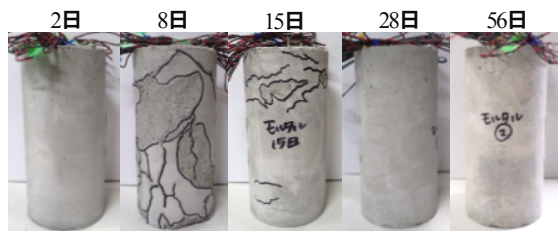


図-4 水圧作用後の供試体 (モルタル)

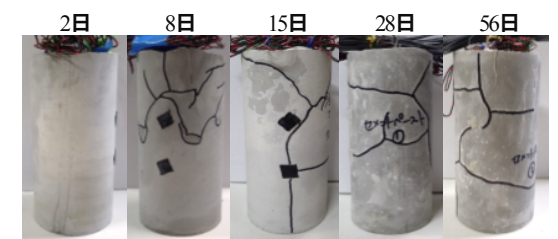


図-5 水圧作用後の供試体 (セメントペースト)

表-1 配合表

	粗骨材の最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	水セメント比 (%)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)				
						水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 Ad
コンクリート AE 有	20	17.0	50	5	40.7	175	350	651	1043	0.028
コンクリート AE 無	20	18.5	50	2	44.5	209	414	708	973	0
モルタル	—	—	50	5	40.7	175	350	651	—	0.028

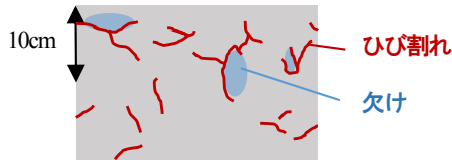


図-6 供試体側面の展開図（コンクリート AE 有）

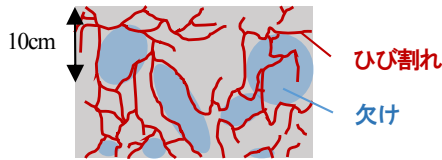


図-7 供試体側面の展開図（モルタル）



図-8 供試体側面の展開図（セメントペースト）

表-2 水圧作用時の吸水量（単位:g）

材齢（日）	2	7	13	28	56
コンクリート AE 有	70	63	25	11	6
コンクリート AE 無	30	19	10	5	3

3.2 考察

図-2と図-4を見ると、コンクリート（AE有）の材齢7日の供試体と、モルタルの材齢8日、15日の供試体において、層状のひび割れが生じ外側から剥がれるように割れていた。コンクリートとモルタルは複合材料であるため、空隙の繋がり方により透水しやすい空隙と透水しにくい空隙があり、図-9に示すように表面付近で局部的に内部の間隙水圧が高くなったことで、内側からの圧力によってひび割れや剥がれが生じたと考えられる。

また、コンクリート供試体について、図-2と図-3より、AE剤を入れた場合材齢7日時点で供試体にひび割れや欠けが生じたが、AE剤を入れていない場合は養生日数に関わらず外見変状が見られない。表-2においてAE剤入りのコンクリートは吸水量が多くなっており、AE剤による透水量の多さも外見変状に関係していると考えられる。

一方のセメントペースト供試体では、図-5に示すように材齢8日以降ひび割れが続いていたが、このひび割れはコンクリートやモルタルと違い、水圧作用直後は目立っていなかったが、時間をおいたことで乾燥によってひび割れが広がり見えるようになった。細骨材や粗骨材が入っていない分透水自体が少なく、コンクリートやモルタルと比べてひび割れが目立たなかったと考えられる。

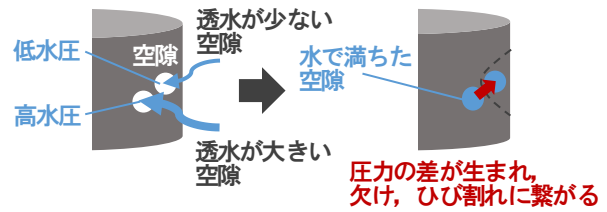


図-9 水圧作用によりひび割れや欠けが生じた仕組み

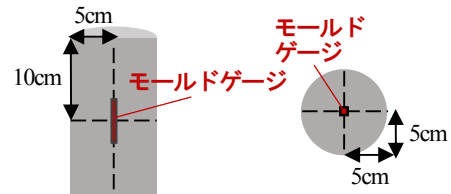


図-10 モールドゲージ位置（断面図）

なお、コンクリートとモルタル、セメントペーストのいずれの供試体においても、材齢によって外観変状が変化しており、吸水量も材齢が大きくなるにつれて減少していた。原因について、4章以降の実験を踏まえて考察していく。

4. 水圧作用時のひずみ

4.1 実験概要

コンクリート（AE有）、モルタル、セメントペースト供試体にモールドゲージを入れ、水圧作用中のひずみ変化を調べた。なお、モールドゲージの位置を図-10に示す。

4.2 ひずみ測定結果

材齢別のモールドゲージによるひずみ測定結果を図-11から図-13に示す。なお、原点を水圧作用開始時点とし、ひずみは圧縮を正としている。グラフ中の丸印と角印は順に、50MPaに到達した時点、10分間維持後圧力が下がり始める時点を示している。ただし、コンクリートの材齢7日の供試体では、装置の都合により所定の水圧を作用させることができず、16分のところで50MPaから少しずつ圧力が下がっており、その2分後にもう一度加圧したが48MPaでまた停止し、計10分が経過したところで他の材齢のものと同様に減圧を行った。また、モルタルの材齢2日の供試体では最大水圧が44.4MPaまでしかかからず、その後緩やかに圧力が低下し10分間が経過したところで減圧を行った。材齢8日のモルタル供試体でも50MPaに達して7分30秒が経過したところで緩やかに圧力が低下してしまい、計10分が経ったところで減圧を行った。

また、材齢を横軸にとった50MPa到達時のひずみを図-14に示す。ただし、材齢2日のモルタルでは44.4MPaまでしか計測できなかったため、値を1.126 (=50/44.4)

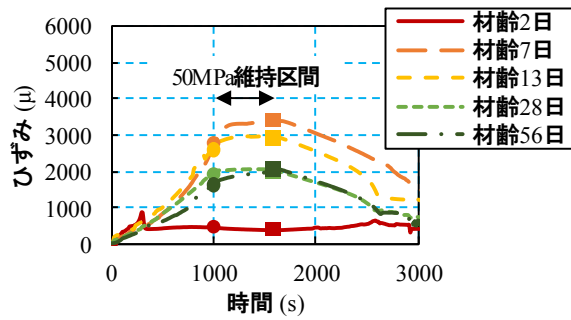


図-11 ひずみ変化 (コンクリート AE 有)

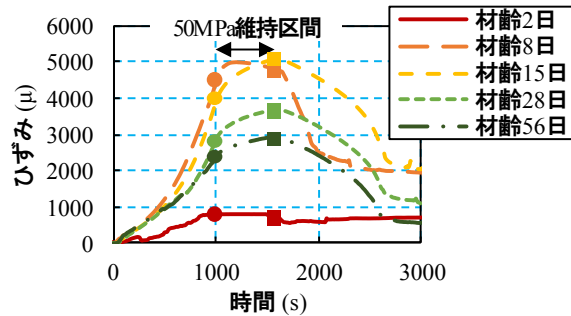


図-12 ひずみ変化 (モルタル)

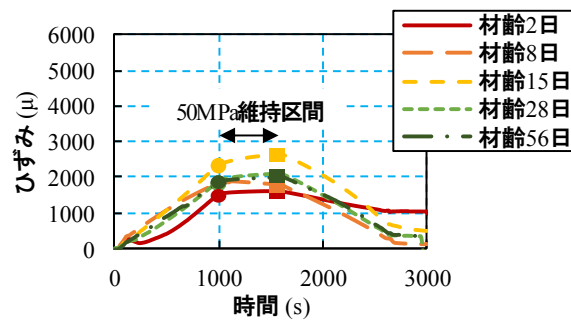


図-13 ひずみ変化 (セメントペースト)

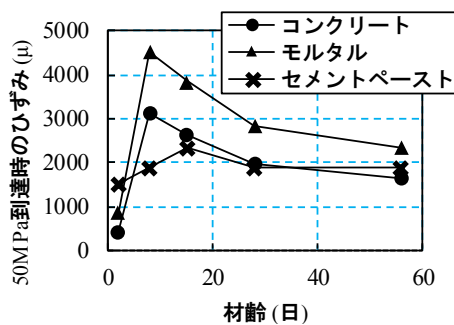


図-14 50MPa 到達時のひずみ

倍して 50MPa 時のひずみ値に換算した。

4.3 考察

図-14 の 50MPa 到達時点のひずみに注目すると、材齢 7 日から 15 日にかけて値が大きくなっており、3 章の図-2 から図-5 で外観変状が大きかった供試体でひずみも大きくなっていることが分かる。特にコンクリートとモルタルにおいては、図-11 と図-12 の減圧後 2600s

におけるひずみも材齢 7 日から 15 日にかけて大きくなっており、ひび割れが発生したためにひずみが戻りきらなかったと考えられる。

材料別にみると、モルタル供試体のひずみはセメント供試体の値と比較して大きくなっていることが分かる。これは、モルタル供試体の方がブリーディングに伴い骨材底面に連続的な空隙が生じたため透水量が大きくなったことで、透水によるダメージが大きくなったと考えられる。実際に外観変状についても、モルタル供試体のひび割れや欠けが最も顕著であった。

50MPa 維持区間に注目すると、特にセメントペーストの材齢 8 日では 50MPa がかかっているにもかかわらずひずみが減少している。材齢 2 日では透水性が大きく水が供試体内部まで入っていたが、材齢 8 日になるとセメントの水和反応が進み空隙が小さくなることで水が供試体内部まで入りにくくなり、50MPa 到達後も水が入り続け間隙水圧が大きくなったためであると考えられる。15 日以降では、さらに空隙が小さくなるため水の移動が少なくなり、純粋に水圧作用によるクリープの影響が出たことでひずみが大きくなったと考えられる。

また、どの材料においても材齢 2 日の加圧初期 200s から 300s にかけてひずみの低下がみられる。これは、材齢 2 日の供試体では、まだ水和反応が進んでおらずセメント硬化体が弱かったため、モールドゲージ周りのセメント硬化体が破壊してしまったためであると考えられる。一方で、材齢 2 日の供試体は供試体表面にひび割れが生じておらず、材齢 7 日以降の供試体と比較してひずみ値も小さかった。これは、材齢 2 日の供試体では材齢 7 日以降と比較して空隙が大きく、水圧作用が大きくなってからは内部まで水が侵入できたことで空隙に侵入した水が水圧に抵抗したため、セメント硬化体のダメージが少なかったと考えられる。

5. 水圧作用による圧縮強度の変化

5.1 圧縮強度の変化

水圧作用後のコンクリートに対し圧縮試験を行った。コンクリート AE 有、AE 無について、水圧を作用させた供試体と作用させていない供試体の圧縮試験結果を図-15、図-16 に示す。水圧作用 1 日後に圧縮試験を行っており、圧縮強度として 3 本の供試体の平均値を示す。

5.2 考察

図-15 をみると、AE 剤入りのコンクリートでは材齢 7 日で水圧作用によって圧縮強度が 8.6MPa 低下、材齢 13 日では 2.9MPa 低下したが、その他の材齢ではほとんど変化しなかった。3 章の図-2 に示すように材齢 7 日では外観変状も大きく、材齢 7 日の供試体にダメージが生じていることが分かる。

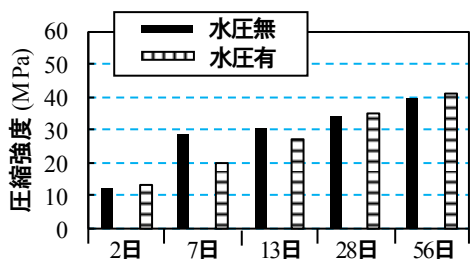


図-15 コンクリート AE 有の圧縮試験結果

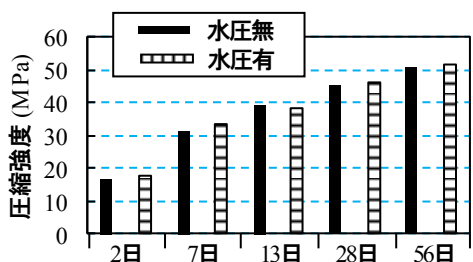


図-16 コンクリート AE 無の圧縮試験結果

一方の図-16 に示す AE 剤無しのコンクリートでは、水圧作用によって圧縮強度が低下しなかった。AE 剤を用いたコンクリートでは、空気量が多いため、表-2 に示すように吸水量が多く、水圧作用によるダメージが生じやすくなり、圧縮強度が低下していることが分かった。

6. 水圧作用による微小部分の硬さの変化

6.1 実験概要

水圧作用による微小部分の硬さの変化を知るため、コンクリート (AE 有) 供試体のビッカース硬さ試験を行った。ビッカース硬さ試験とは、正四角錐のダイヤモンド圧子を試験片の表面に押し込み、その試験力から硬さを測定するもので、「JIS Z 2244:2009 ビッカース硬さ試験-試験方法」⁵⁾に基づいて行った。

水圧作用後の供試体と作用させていない供試体をカッターにより 4cm×4cm×2cm の直方体に切り出し、マイクロビッカース硬さ試験機を用いて作製した試料に圧子を押し当て、できた正方形のくぼみの表面積で試験力を割った値から、ビッカース硬さを計算した。試験力は HV0.5 (4.903N) で、荷重保持時間は 10s とした。

6.2 ビッカース硬さ試験結果

材齢ごとのビッカース硬さを表-3 に示す。なお、材齢ごとに 18 回ビッカース硬さを測定しており、その平均値を示している。なお、試験によってできたくぼみサイズは 150 μ から 300 μ の範囲であった。

6.3 考察

表-3 より、水圧を作用させた試料と作用させていない試料でビッカース硬さの値があまり変化しなかった。ビッカース硬さ試験で作られるくぼみのサイズが 150 μ

表-3 ビッカース硬さ (HV 0.5)

材齢 (日)	2	7	13	28	56
水圧無	23.0	24.4	24.7	22.2	24.7
水圧有	17.4	24.7	22.9	24.2	26.7

から 300 μ と水圧作用による変化が表れた空隙サイズよりも大きかったため、ビッカース硬さに変化が現れなかったと考えられる。

ただし、材齢 2 日では水圧作用によってビッカース硬さが低下している。材齢 2 日の時点ではセメントの水和反応が進んでおらず、圧縮強度も小さかったようにまだセメント硬化体自体も弱かったためであると考えられる。

7. 水圧作用による細孔径分布の変化

7.1 実験概要

水圧作用による空隙の変化を調べるため、コンクリート (AE 有) 供試体に対し水銀圧入法によって水圧作用前と後の供試体の細孔径分布を調べた。圧力を変化させながら水銀を試料の空隙部分に圧入することで、水銀圧入量から空隙径分布を調べる方法で、「JIS R 1655:2003 ファインセラミックスの水銀圧入法による成形体気孔径分布試験方法」⁶⁾に基づいて行った。

水圧を作用させた供試体と作用させていない供試体をカッターとハンマーによって 5mm 角に砕き、アセトンを用いて水和停止を行った後 24h 乾燥させ、作製した試料を水銀ポロシメータによって計測した。

7.2 細孔径分布測定結果

材齢 2 日、7 日、28 日の細孔径分布を図-17 から図-19 に示す。実線が水圧を作用させた結果、点線が水圧を作用させていない供試体の結果を示している。なお、10nm から 1000nm は毛細管空隙を表している。

7.3 考察

図-17 から図-19 をみると、特に材齢 7 日の供試体では水圧作用によって 70nm の空隙が減少し、300nm の空隙が増加していることが分かる。つまり、水圧作用により 70nm の空隙周りのセメント硬化体が破壊したと考えられ、セメント硬化体の破壊により材齢 7 日の供試体でひび割れや欠け、ひずみの増大、圧縮強度の低下が引き起こされたと考えられる。

材齢 7 日の供試体でセメント硬化体が壊された原因について考える。コンクリートは材齢が大きくなるにつれて水和反応が進み、硬化していく。本供試体では 28 日まで硬化が進んでおり、実際に図-17 から図-19 をみると、空隙量のピークを示す空隙サイズが材齢 2 日から 28 日にかけて小さくなっている。特に材齢 2 日の供試体では、それ以降の材齢と比較して空隙のピークが一桁大きい。よって、材齢 2 日の供試体では 400nm ほどの大きな空隙

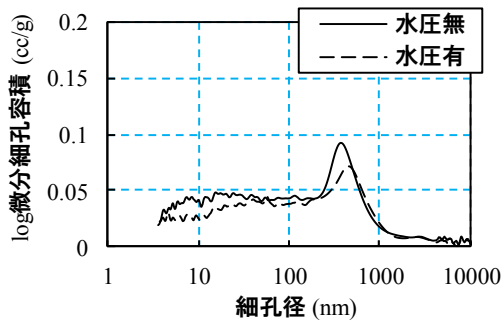


図-17 細孔径分布測定結果 (材齢 2日)

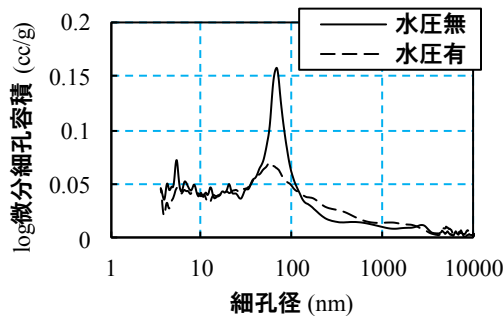


図-18 細孔径分布測定結果 (材齢 7日)

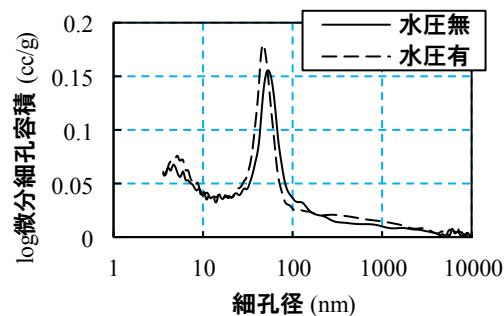


図-19 細孔径分布測定結果 (材齢 28日)

が多く、水圧を作用させた際に空隙に水が入ることができ、空隙中の水が水圧に抵抗するため、セメント硬化体の強度自体は小さいもののダメージが生じなかったと考えられる。一方で、材齢7日の供試体では、材齢2日と比較して60nm程度の小さな空隙が多くなるため水が供試体内部に入りづらくなり、空隙中の水が水圧に抵抗することができず、さらにセメント硬化体の強度自体も小さいため、水圧によるダメージを受けてしまったと考えられる。しかし、材齢28日になると、空隙サイズは材齢7日と同じであるため透水はしにくいものの、セメント硬化体の強度が上がることで、水圧によるダメージを受けなくなったと考えられる。以上のメカニズムにより、高水圧を受けるコンクリートの力学的挙動に材齢による差が生じたと考えられる。材齢により力学的挙動が変化したメカニズムをまとめた概念図を図-20に示す。

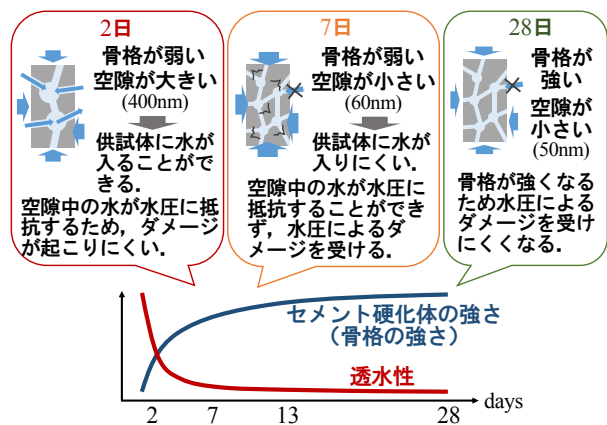


図-20 透水性とセメント硬化体の強さ (骨格の強さ) による水圧作用時の変化

8. 結論

- (1) コンクリート、モルタル、セメントペーストに水圧を作用させた際の力学的挙動の変化は、透水性とセメント硬化体の強さとの関係性で決まり、W/Cや材齢、混和剤により小さい空隙が多くみられる供試体において、セメント硬化体が最大水圧に耐えることができないと外観変状や圧縮強度の低下が生じた。特に、混和剤の導入により空隙量が多くなると供試体へのダメージが大きくなった。
- (2) 水圧作用によりひび割れやひずみ、圧縮強度に差が生じた原因は、水圧作用によりセメント硬化体が破壊したためだと考えられる。
- (3) 水セメント比 0.50、空気量 5%の AE 剤を用いたコンクリートについて、50MPaの圧力下で使用するには28日以上十分な養生が必要である。

参考文献

- 1) 瀧澤 美奈子『日本の深海-資源と生物のフロンティア』講談社 2013
- 2) Rail, R. D. Wendt, R. L.: Long-term Deep-ocean Test of concrete spherical structures - Results after 13 years, Technical Report R-915, pp.1-43 July. 1985
- 3) 小林真理ほか：深海底におけるセメントモルタルの物理的特性と水和物の変化、セメント・コンクリート論文集, Vol.72, pp.247-254, 2018.3
- 4) 堀尚ほか：高水圧作用下におけるコンクリートの破壊挙動に関する基礎的研究, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.71, No.2, pp.I_179-I_184, 2015
- 5) 日本規格協会：ビッカース硬さ試験-試験方法, JIS Z 2244, 2009
- 6) 日本規格協会：ファインセラミックスの水銀圧入法による成形体気孔径分布試験方法, JIS R 1655, 2003