

生体構造特性を有する海洋生物殻を混入した鉄筋コンクリートの動的劣化特性

生体構造特性 海洋生物殻 動的劣化特性 鉄筋腐食

小室清人*¹, 田村雅紀*

表1 使用材料

| 材料 | 種類 | 記号 | 内容 |
|------|--------------|-----|--|
| セメント | 普通ポルトランドセメント | C | 密度 3.16g/cm ³ |
| 細骨材 | ほたて貝砕砂 | S | 表乾密度 2.61g/cm ³ 吸水率 1.8% |
| | 大井川産陸砂 | O | 表乾密度 2.63g/cm ³ 吸水率 1.5% |
| 粗骨材 | 青梅産碎石 | G | 表乾密度 2.65g/cm ³ 吸水率 1.5% |
| 混和剤 | AE 減水剤 | Ad1 | リグニンスルホン酸化合物とポリオールの複合体(W/C=60%) |
| | 高性能 AE 減水剤 | Ad2 | 末端カルボン酸基を有するポリカルボン酸基含有ポリマー(W/C=40%) |

1. はじめに

現在北海道では、ほたて貝の生産量は40万トン近くあり、それに伴い毎年20万トン近くのほたて貝殻が発生している(写真1)。主な再利用方法として、消しゴム、チョーク、融雪剤など、また建築分野でもほたて貝殻を混入したコンクリートの基礎的物性、耐久性、強度など資源環境の改善を主眼とした再利用方法が研究されてきた(写真2)¹⁾。しかし、ほたて貝殻は北海道の主要な水産物であり、今後も安定した生産量が見込まれるため、今後はほたて貝殻独自の特徴を生かした、付加価値を付けた使用用途を確立して必要がある。ほたて貝殻の特徴として、生体内鈣質形成作用により、層状に重なった構造になっており、ほたて貝殻を混入したモルタルは通常のモルタルに比べ圧縮強度は下がるが、曲げ・引張破壊において、塑性域に到達後も強度が急激に低下せず、また引張破軟化が緩やかになることから仕上げ材として必要な引張や曲げ塑性域での変形抵抗性に優れることが示されている²⁾。

そこで本研究では、ほたて貝殻を混入したモルタルが脆性破断しない点に着眼し、中性化深さが鋼材の腐食限界に到達するまでの期間(潜伏期)を腐食確率により予測し、鋼材の腐食開始から腐食ひび割れが発生するまでの期間(進展期)、腐食ひび割れ発生により鋼材の腐食が増大する期間(加速期)および鋼材の腐食量の増加により耐荷力の低下が顕著な期間(劣化期)までを、鋼材の腐食速度および断面積残存率と年数の関係により算出した。また、進展期から劣化期までは水セメント比およびほたて貝砕砂の混入率が異なる鉄筋コンクリートを作製し、電食によりコンクリート表面に2000 μ のひずみが発生するまで鉄筋を腐食させ、腐食量とひずみの関係を明確にすることで、鉄筋コンクリート仕上げ部の動的劣化特性を調べた。

なお、本研究で使用する動的劣化とは、時間変化を意識した劣化性状であり、腐食の増加に伴い変化する部材の劣化度進展のことを指す。



写真1 ほたて貝殻の山積み状態

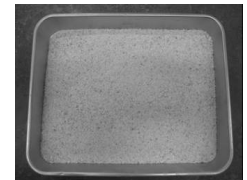
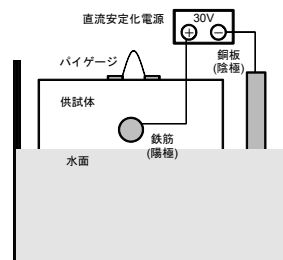


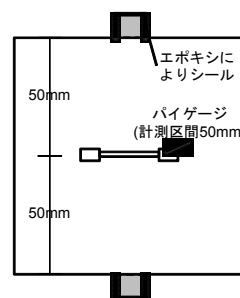
写真2 ほたて貝殻砕砂

表2 実験の要因と水準

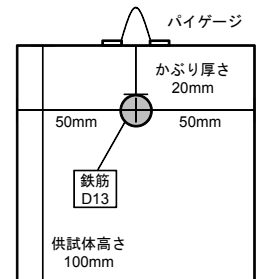
| 要因 | 水準 |
|--------------|-----------|
| 水セメント比(%) | 60, 40 |
| ほたて貝砕砂混入率(%) | 0, 30, 60 |



a) 電食による鉄筋腐食の促進方法



b) パイゲージの設置箇所(供試体上部)



c) 内部鉄筋の位置(供試体側面)

図1 供試体と鉄筋腐食の促進試験方法

表3 コンクリートの調合とフレッシュ試験の結果

| 供試体名 | W/C (%) | 単位量 (kg/m ³) | | | | | Ad1 (C×%) | Ad2 (C×%) | スランブ (cm) | スランブフロー (mm) | 実測空気量 (%) | 骨材修正係数 (%) | 空気量 (%) |
|--------|---------|--------------------------|-----|-----|-----|-----|-----------|-----------|-----------|--------------|-----------|------------|---------|
| | | W | C | S | O | G | | | | | | | |
| S0-60 | 60 | 175 | 292 | 0 | 817 | 999 | 0.25 | - | 19.0 | - | 4.0 | - | 4.0 |
| S30-60 | 60 | 185 | 308 | 259 | 518 | 999 | 0.25 | - | 18.5 | - | 5.0 | 0.8 | 4.2 |
| S60-60 | 60 | 195 | 325 | 489 | 245 | 999 | 0.25 | - | 12.0 | - | 7.5 | 1.4 | 6.1 |
| S0-40 | 40 | 160 | 400 | 0 | 766 | 999 | - | 0.90 | - | 610×610 | 3.0 | - | 3.0 |
| S30-40 | 40 | 170 | 425 | 240 | 479 | 999 | - | 0.90 | - | 620×630 | 6.0 | 1.6 | 4.4 |
| S60-40 | 40 | 180 | 450 | 448 | 224 | 999 | - | 0.90 | - | 600×600 | 7.0 | 2.1 | 4.9 |

2. 研究概要

2.1 使用材料と実験の要因

表1に使用材料を、表2に実験の要因と水準を示す。セメント、粗骨材は1種類のみを使用し、細骨材のみほたて貝砕砂と大井川産陸砂を使用し、細骨材の影響を調べた。実験の水準について、水セメント比は普通強度(W/C=60%)と高強度(W/C=40%)の2水準を設定し、ほたて貝砕砂混入率は大井川産陸砂を基準とし、ほたて貝砕砂の混入割合を0%(S0-W/C)、30%(S30-W/C)、60%(S60-W/C)の3水準に設定することで、ほたて貝砕砂の骨材量に違いを調べた。

2.2 供試体の概要と鉄筋腐食の促進試験方法

図1に供試体と鉄筋腐食の促進方法を示す。かぶり部分のひび割れの原因は、コンクリート中の鉄筋が中性化、塩害などにより鉄筋が腐食することで、鉄筋から錆が発生し体積が膨張するために、コンクリート内部に引張破壊が生じたためである。中性化による鉄筋腐食は、塩害と異なり全面腐食となることが多く、均一に腐食が進行する電食による試験が参考となる³⁾。よって、本研究でも電食により鉄筋腐食の促進試験を行った。供試体の寸法は100×100×100mm、内部に組み込む鉄筋はD13を用い、かぶり厚さはブリーディングの影響により所定のかぶり厚さが得られない可能性があるため、コンクリートの打ち込み下面から、かぶり厚さが2cmとなるように鉄筋を設置した。電食による鉄筋腐食の促進試験方法について、ひずみ測定面が上面になり、内部鉄筋が直接5%NaCl溶液に触れないように水槽に設置し、鉄筋を陽極、銅板を陰極に接続し直流安定化電源により30V一定の通電を行うことで内部の鉄筋を腐食させた。また、露出している鉄筋部には、腐食しないようエポキシ樹脂によりシーリングを行い、かぶり部分の上面には腐食ひずみを測定するためにパイゲージ(計測区間50mm)を設置した。なお、本研究では鉄筋は一律に腐食することとした。鉄筋の腐食減量の測定について、試験後の腐食した鉄筋を10%クエン酸二アンモニウム水溶液に浸漬し錆を十分に除去し、試験前と試験後の鉄筋の単位表面積当たりの重量変化を計測したものを鉄筋の腐食減量とした。

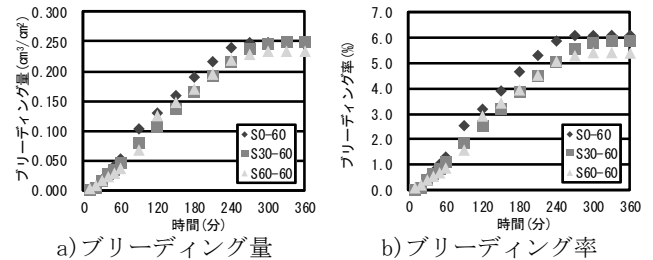


図2 ブリーディング試験の結果(W/C=60%)
備考)W/C=40%はブリーディング無し

3. 結果および考察

3.1 コンクリートのフレッシュ性状

表3にコンクリートの調合とフレッシュ試験の結果を、図2にブリーディング試験の結果を示す。コンクリートの調合について、W/C=60%の場合は目標のスランブを18±2.5cm、W/C=40%の場合はスランブフローを600±100mm、空気量は4.5±1.5%とし、試験結果が減水剤の影響を受けないように単位水量により調節をした。なお空気量について、ほたて貝砕砂を用いる場合は空気室圧力方法により測定した実測空気量から、骨材修正係数を引いたものを空気量とした。

表より、ほたて貝砕砂を多く入れることで単位水量を増やさないと所定のワーカビリティを得ることが難しいことが分かった。また、空気量はほたて貝砕砂の混入率が増えるに伴い実測空気量は増加する傾向を示したが、骨材修正係数を引くことで所定の空気量を得ることが可能であった。ただしW/C=60%、ほたて貝砕砂の混入率60%のものは、試し練りの結果から材料分離の起こらない範囲では所定のスランブ値を得ることが出来ず、空気量も設定値より多く混入した。

ブリーディング試験の結果より、ほたて貝砕砂を混入したコンクリートは、初期のブリーディングは若干抑えられ、ブリーディング量には大きな変化は見られなかった。なお、W/C=40%のコンクリートは120分経過後もブリーディングが見られなかったため、ブリーディング無しとした。

以上より、ほたて貝砕砂を細骨材に用いる場合、所定のワーカビリティを得るために単位水量を増やさなければならないが、ブリーディングには影響を及ぼさないことが確認された。

表 4 各供試体の強度試験の結果

| 供試体名 | 圧縮強度 (N/mm ²) | 引張強度 (N/mm ²) | 静弾性係数 (kN/mm ²) |
|--------|------------------------------|------------------------------|--------------------------------|
| S0-60 | 35.8 | 3.7 | 28.8 |
| S30-60 | 26.7 | 3.1 | 23.8 |
| S60-60 | 26.8 | 3.0 | 20.9 |
| S0-40 | 59.8 | 5.9 | 34.3 |
| S30-40 | 44.5 | 4.7 | 28.7 |
| S60-40 | 44.7 | 4.7 | 27.6 |

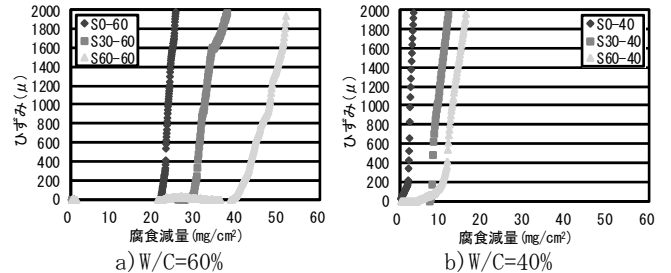


図 4 劣化期における腐食減量とひずみの関係

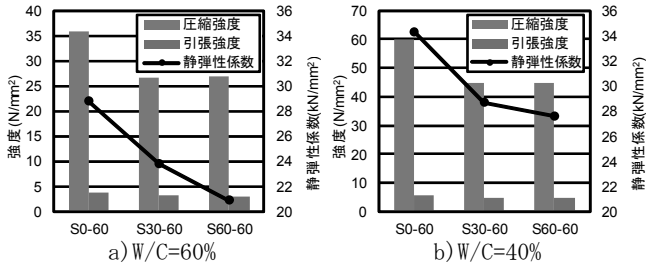


図 3 強度試験と静弾性係数の関係

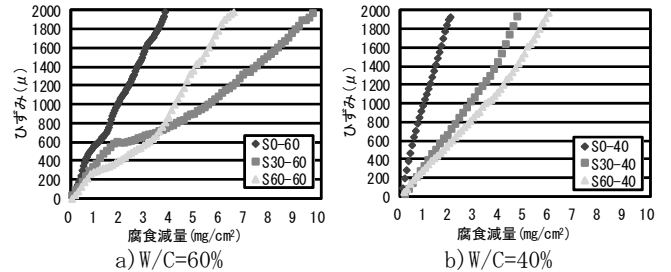


図 5 進展期における腐食減量とひずみの関係

3.2 基礎力学特性

表 4 に各供試体の強度試験の結果を、図 3 に強度試験と静弾性係数の関係を示す。ほたて貝砕砂を混入したコンクリートは、混入していないものに比べ強度は下がり、その値は水セメント比およびほたて貝砕砂混入率に関わらず、ほたて貝砕砂を混入していないものを 100%とすると約 75%程度となった。静弾性係数について、ほたて貝砕砂を混入したコンクリートは下がり、混入率が大きいほうが静弾性係数は下がる傾向が示された。

このことより、ほたて貝砕砂を混入することで、混入率に関係なく強度は下がるが、混入率が多い方が静弾性係数は下がることを確認された。

3.3 鉄筋腐食の促進試験結果

図 4 に劣化期における腐食減量とひずみの関係を、図 5 に進展期における腐食減量とひずみの関係を、図 6 に初期ひずみ発生後のひずみ進展速度を示す。本研究ではパイゲージのひずみが増加した時の初期変化量を、腐食減量の変化量で除したものを初期ひずみ進展速度とし、値が大きい方が初期ひずみの進展する速度が速いことを示している。各供試体とも腐食減量の増加に伴いひずみが増加するが、ほたて貝砕砂を混入した供試体の方が、また水セメント比が高い方が、腐食減量に対してグラフの立ち上がり位置が遅れる傾向を示した。初期ひずみ発生時の詳細について、ほたて貝砕砂混入率を増やすことで、水セメント比および強度に関わらず腐食減量に対するひずみの傾きが緩やかになった。また、ひずみ進展速度はほたて貝砕砂を混入したコンクリートの場合、混入率により一定の値をとることが確認された。

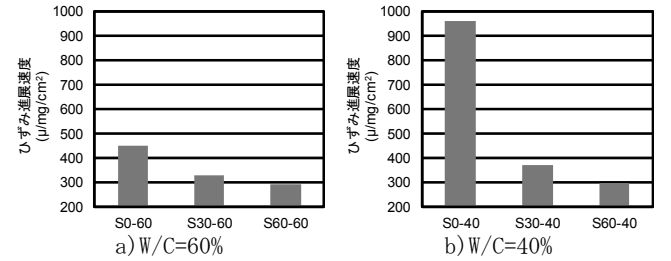


図 6 初期ひずみ発生後のひずみ進展速度

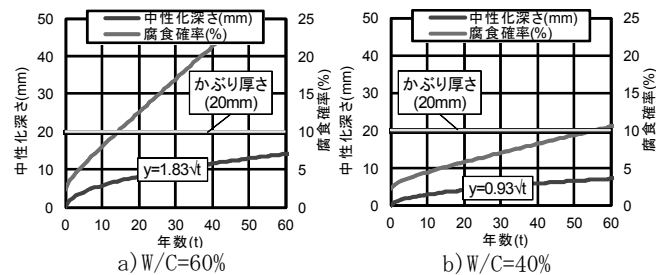


図 7 中性化深さの予測と腐食確率

$$f(D-C) = \frac{1}{\sqrt{2\pi \cdot (C^2 \cdot v^2 + \sigma^2)}} \cdot \exp \left\{ -\frac{[(D-C) - (D_{av} - C_{av})]^2}{2(C^2 \cdot v^2 + \sigma^2)} \right\} \quad (1)$$

ここに

- D かぶり厚さ(20mm)
- C 中性化深さ(mm)
- v 中性化変動係数(0.3)
- σ かぶり厚さの標準偏差(10mm)
- D_{av} かぶり厚さの平均(20mm)
- C_{av} 中性化深さの平均

3.4 動的劣化による材齢の予測

図 7 に中性化深さの予測と腐食確率を、図 8 に断面積残存率と年数の関係を、図 9 に動的劣化の許容年数を示す。腐食確率とは潜伏期における中性化深さとかぶり厚さにおける正規

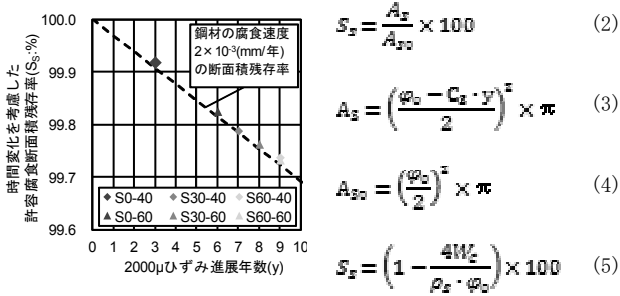


図8 2000μひずみ進展時の許容腐食断面積残存率と年数

ここに

- S_S 時間変化を考慮した許容腐食断面積残存率(%)
- A_S 腐食した鉄筋の断面積(mm²)
- A_{S0} 腐食前の鉄筋の断面積(mm²)
- W_C 2000μひずみ発生時の腐食減量(mg/mm²)
- ρ_S 鉄の密度(7.85mg/mm³)
- ϕ_0 腐食前の鉄筋の直径(mm)
- C_S 鋼材の腐食速度(2×10^{-3} mm/年)
- y 2000μひずみ進展年数

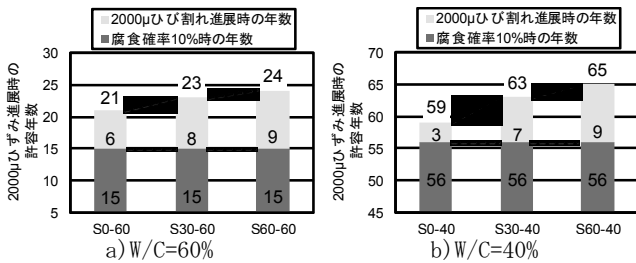


図9 2000μひずみ進展時の許容年数

分布(式1)の、ある年数における中性化残りまでの累積の確率密度(積分値)である⁴⁾。なお、中性化速度係数について、W/C=60%は1.83，W/C=40%は0.93と設定した。また、鉄筋の許容腐食確率は10%とし、その時の年数から鉄筋腐食の開始と仮定した。腐食開始からひずみが2000μ(本試験のバイゲージで0.1mm)を許容ひずみとし、その時の断面積残存率を、許容断面積残存率とした⁵⁾。モデル図は式2、式3および式4から、供試体の断面積残存率は各供試体の2000μ時の腐食減量を初期ひずみ進展速度から求め、式5から算出した。図より、水セメント比が低い方が初期ひずみ進展速度は大きいため、腐食してから2000μまでひずみが進展するのが早い傾向にあった。ただし、ほたて貝砕砂を混入することでひずみ進展速度は遅くなるため、混入していない鉄筋コンクリートでは2000μのひずみが生じる断面積残存率でも、同量のひずみは生じなかった。その結果を年数で比較すると、ほたて貝砕砂を混入した鉄筋コンクリートの方が、混入していないものと比較して2~6年程度2000μまでのひずみの進展を遅らせる可能性があり、ひずみに対する抵抗性に優れるといえる。また、腐食確率、鋼材の腐食速度、腐食減量とひずみの関係式、断面積残存係数を用いることで、鉄筋コンクリートのモ

ルタル仕上げ部の経年変化する部材の動的劣化特性を明確に示すことが可能である。

4. まとめ

- (1) ほたて貝砕砂を細骨材に用いる場合、所定のワーカビリティを得るために単位水量を増やさなければならないが、ブリーディングには影響を及ぼさない。
- (2) ほたて貝砕砂を混入することで、混入率に関係なく強度は下がるが、混入率が多い方が静弾性係数は下がる。
- (3) ほたて貝砕砂混入率を増やすことで、水セメント比および強度に関わらず腐食減量に対するひずみの傾きが緩やかになった。
- (4) ひずみ進展速度はほたて貝砕砂を混入したコンクリートの場合、混入率により一定の値をとる。
- (5) ほたて貝砕砂を混入した鉄筋コンクリートの方が、混入していないものと比較して2~6年程度2000μまでのひずみの進展を遅らせる可能性があり、ひずみに対する抵抗性に優れる。
- (6) 腐食確率、鋼材の腐食速度、腐食減量とひずみの関係式、断面積残存係数を用いることで、鉄筋コンクリートのモルタル仕上げ部の経年変化する部材の動的劣化特性を明確に示すことが可能である。

謝辞

本研究は、(株)北海道裕雅高柳雅保氏および技術員各位、(株)イワタ舗装外構事業部古川真弘氏および関係各位に、助力を頂いた。また、本研究は、工学院大学UDM・PJ研究費の一部による。

参考文献

- 1) 山内匡，清宮理，高橋久雄，山路徹：ホタテ貝殻を細骨材として活用したコンクリートの耐久性および実証試験，コンクリート工学年次論文集30(2)，pp.469-474，2008.7
- 2) 小室清人，田村雅紀：炭素固定性を有する海洋生物殻を混入したモルタルの基礎力学特性，コンクリート工学年次論文集Vol.33，No.1，pp.1877-1882，2011.7 田村雅紀：リサイクルコンクリートによるカーボンニュートラル化，コンクリート工学，vol.48，No.9，pp.124-128，2010.9
- 3) 社団法人土木学会：コンクリート標準示方書「維持管理編」，pp.95，2008
- 4) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針(案)・同解説，pp.92-94，2004.3
- 5) 社団法人日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の長期性能照査支援モデルに関するシンポジウム，pp.242-243，2004.10