

資 料

# 瓦粉砕物を骨材としたコンクリートの製造並びに評価試験

阿部 公平\*\*・安藤 邦広\*\*・江角 典広\*\*・原田 達也\*・江木 俊雄\*

## 1. 目 的

島根県の石見地方で製造されている石州瓦は日本三大瓦の一つであり、焼成温度が1200℃近傍と高温であるため古くから強度、耐久性に優れた瓦として使用されている<sup>1)</sup>。しかしながら、瓦の製造時に発生する13,000～16,000t/年の規格外瓦は、一部が路盤材などへ再利用されているものの大部分は産業廃棄物として埋め立て処分されている。環境省の報告によると平成18年4月現在、産業廃棄物の最終処分場の残余年数は全国平均で僅か7.7年と逼迫した状況にある。加えて、昨今の地下資源の枯渇や地球温暖化といった深刻な社会状況を踏まえると、これら大量の規格外瓦を積極的に循環再利用するシステムを構築することは喫緊の課題であるともいえる。

こうした状況の中、規格外瓦や使用済みの古瓦を循環再利用するために各方面で様々な方策が鋭意研究開発されており、その一つにコンクリート用骨材としての利用に関する取り組み<sup>2～7)</sup>が挙げられる。すなわち、我々の生活に欠かせない土木・建設資材であるコンクリートは体積でその約70%が骨材であることから、コンクリート用骨材として活用すれば大量の瓦を有効利用することが可能となる。これまでの一連の研究成果を概観すると、規格外瓦や使用済みの古瓦を粉砕した瓦粉砕物は瓦の産地や製造方法の違いにより吸水率などの物理的性質にバラツキが見られるが、コンクリート骨材の一部または全量を瓦粉砕物と置換したコンクリートは総じて従来の普通骨材を使用した普通コンクリートと同等の強度と耐久性を示すことが報告されている<sup>7)</sup>。さらに近年では、瓦の高い吸水率に着目し瓦粉砕物の内部養生効果によるフライアッシュ混入コンクリートの高強度化に関する検討も行われている<sup>8)</sup>。

一方、島根県は国の漁港漁場整備長期計画策定に合わせて島根県水産基盤整備計画（平成19年度～平成23年度）を策定し、水産資源の増大および水産物の安定供給を図るために人工漁礁や漁港、漁村などの水産基盤の整備を計画的に推進している。また、県内の地場産業の振興と未利用産業廃棄物のリサイクル化を図るため、規格外瓦が漁礁に利用されることが期待されている。そこで本報では各種骨材試験、コンクリートの配合設計、圧縮強度試験を行い、

\*研究開発グループ、\*\*株式会社イズコン

規格外の石州瓦の粉砕物が漁礁コンクリートの骨材として利用が可能かを検討した。また、瓦粉砕物をコンクリートの表面へ露出させることで魚の蛸集効果、生物易付着性などの効果が期待されることから、コンクリート表面に瓦粉砕物が露出する割合を算出したので、それらの結果について報告する。

## 2. 方 法

### 2.1 使用材料および配合

本試験で使用した瓦粉砕物の外観を図1に示す。粉砕物は赤褐色をしている。この瓦粉砕物は、島根県浜田市にある株式会社石州川上窯業が自社の工場から発生する規格外瓦（石州瓦）をジョークラッシャーで粉砕して5～20mmの粒度に加工したものであり、コスト縮減を図るため角取りなどの特段な処理は施していない。そのため、瓦粉砕物はやや角張った形状で扁平、鋭利な粒形をしており、表面の一部に黒色の釉薬の付着が認められた。釉薬は瓦の表面をガラス質にして水の浸透性を防ぐために使用されるが、一般的に発色を安定化させるため釉薬の中へ鉛を添加することから環境への影響が懸念される。しかし、今回使用した規格外瓦は無鉛釉薬を用いており、また事前に溶出試験を行い鉛などの重金属が環境基準値を超えて溶出しないことが確認されていることから、本瓦粉砕物は安全で安心な土木資材である。

石州瓦の瓦粉砕物を使ったコンクリートの試験体を作製するために、表1に示す材料を使用した。練混ぜ水（W）は地下水、セメント（C）は普通ポルトランドセメント、



図1 使用した瓦粉砕物の外観写真

表1 使用した材料

種別	記号	名称	仕様
練混ぜ水	#	地下水	密度1.00g/cm <sup>3</sup>
セメント	C	普通ポルトランドセメント	密度3.16g/cm <sup>3</sup>
細骨材	S	加工砂（奥出雲産）	密度2.57g/cm <sup>3</sup> 吸水率1.47% 粗粒率2.74%
	G1	砕石（三次産5~20mm）	密度2.73g/cm <sup>3</sup> 吸水率0.31% 粗粒率6.79%
	G2	瓦粉砕物（石州産5~20mm）	密度2.24g/cm <sup>3</sup> 吸水率7.43% 粗粒率6.47%
混和剤	AD	マイティ21LV	密度1.05g/cm <sup>3</sup>

細骨材は加工砂（S：奥出雲産）を用いた。粗骨材は瓦粉砕物（G2：石州産）および比較のための普通コンクリート用として砕石（G1：三次産）を用いた。また、混和剤（AD：マイティ21LV）は高減水性と非遅延性を有する高性能減水剤（I種 JIS A 6204）を使用した。

瓦粉砕物を使用したコンクリートの示方配合を表2に示す。本試験では瓦粉砕物を粗骨材の内割とし、瓦粉砕物の容積置換率を0%、50%、100%の3水準に設定した。水セメント比（W/C）はJISの鉄筋コンクリートのフレッシュコンクリートの品質<sup>9)</sup>に則り55%とした。細骨材率（s/a）はコンクリート中の全骨材量に対する細骨材量の絶対容積比を表し、細骨材が圧縮強度に及ぼす影響を最小限にし、かつ瓦粉砕物による圧縮強度変化を明らかにするために、細骨材比がほぼ等しくなるよう砕石と瓦粉砕物の使用量を調整した。単位水量は土木学会コンクリート標準示方書施工編<sup>10)</sup>で推奨されている単位水量の上限値を参照にして175kg/m<sup>3</sup>と一定にした。スランプは高性能減水剤（AD）を対セメント重量で0.5~0.6%の範囲で添加し調整を行った。なお、瓦粉砕物を使用したコンクリートの目標規格値は、漁港・漁場の施設の設計の手引き<sup>11)</sup>の設計基準強度を参考にして圧縮強度は21N/mm<sup>2</sup>（材齢14日）とし、スランプは8±2.5cmとした。スランプの許容差は、JISのレディーミクストコンクリート<sup>12)</sup>を参考にした。

## 2.2 試験体の作製方法および試験項目

コンクリートの練り混ぜはパン型強制練りミキサーを用

い、1バッチ当たりの練り混ぜ量は0.036m<sup>3</sup>とした。各使用材料は細骨材、セメント、粗骨材の順にミキサー内へ投入して30秒間空練りを行った後、練混ぜ水と混和剤を投入し90秒間本練りを行った。練り混ぜ終了後、切り返しを行い直ちにスランプ試験を実施し、所要の状態が得られたことを確認してから十分な剛性を持った型枠に入れて円柱試験体（φ10×20cm）を作製した。円柱試験体の成形にはテーブル型振動機を使用し、圧縮強度試験に供する当該円柱試験体は成形後12時間静置してから脱型を行った。ただし、瓦粉砕物は普通骨材である砕石に比して吸水率が7.43%と高いため、練り混ぜ時に瓦粉砕物が練混ぜ水を吸水し流動性が著しく低下（スランプロス）することが推察された。そこで、軽量骨材を使用する場合と同様に24時間水中に瓦粉砕物を浸漬（プレウェッティング）をして表面乾燥飽水状態に調整を行った。

工場で製造されるコンクリート二次製品は、一般的に製品の脱型時期を早めて型枠の利用効率を上げ生産性を向上させるために、蒸気養生などの促進養生が行われる。そこで、作製した試験体は土木学会標準示方書施工編「工場製品」<sup>13)</sup>に準じて蒸気養生を行った。蒸気養生の条件は、前置（2h以上）、昇温（20℃/h）、最高温度（65℃）処理（以降、自然放冷）とし、蒸気養生終了後の円柱試験体（φ10×20cm）9本はコンクリート二次製品と同様に材齢14日まで気中養生に供した。なお、参考までに別の円柱試験体（φ10×20cm）9本を材齢14日まで20℃の水中に浸け標準養生も行った。

試験項目はJISによる試験方法に準拠して、各配合のコンクリートについてのスランプ試験（JIS A 1101）および配合毎に蒸気+気中養生、標準養生を行った円柱試験体（φ10×20cm）各3本による圧縮強度試験（JIS A 1108）とした。

次いで、試験体表面を洗い出し処理して外観状況を目視観察するために、配合毎に円柱試験体（φ10×20cm）を作製した。具体的には、グリース状のコンクリート打継目処理剤（デイスパライトDV、型枠用塗布タイプ、密度1.17g/cm<sup>3</sup>）をハケで予め型枠へ塗布して24時間乾燥させた後に前述と同様の方法で練り混ぜたコンクリートを打設した。その後、12時間静置した後に脱型をして水道水（流水）とワイヤーブラシで試験体表面を洗い出し処理した。洗い出し処理した試験体について、瓦粉砕物の露出状況を

表2 コンクリートの示方配合

試験体の名称	容積置換率 (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )					
				W	C	S	G1	G2	AD*
瓦粉砕物0%	0	55	48	175	319	868	1,000	-	1.60
瓦粉砕物50%	50	55	49	175	319	887	490	402	1.75
瓦粉砕物100%	100	55	50	175	319	905	-	788	1.91

\*) 混和材（AD）は、練混ぜ水（W）に含まれる。

目視観察するとともに、デジタルカメラ (RICOH G600 画素数 1280 × 960) を用いて試験体上面 (φ 10cm) を真上から垂直に撮影をして、その画像を解析することにより、瓦粉砕物の露出率を求めた。

### 3. 結果

#### 3.1 骨材の物性

JIS A 5005「コンクリート用砕石及び砕砂」に基づいてコンクリート用骨材として必要な物性を調べた結果を表3に示す。また、瓦粉砕物の粒度曲線を図2に示す。瓦粉砕物の粗粒率は6.47であり一般的な粗骨材の粗粒率である6～8の範囲内にあった。粒度曲線は破線で示す土木学会の標準粒度範囲内に収まっており、粒度の極端な偏りは認められなかった。微粒分損失量は1.2%であり、JISの規格値3.0%以下を満足した。単位容積質量は1.22 (kg/L)であり、標準的な粗骨材の単位容積質量1.55～1.85 (kg/L)よりも小さかった。瓦粉砕物の絶乾密度および吸水率は2.08g/cm<sup>3</sup>、7.43%であり、JISの規格値である絶乾密度2.5g/cm<sup>3</sup>以上、吸水率3.0%以下を満足しないことが分かった。粒形判定実積率については58.0%でJISの規格値である56%以上を満足した。すりへり減量は28.0%でJISの規格値である40%以下を満足した。

瓦粉砕物のアルカリシリカ反応性 (ASR) を化学法で調べた結果を図3に示す。溶解シリカ量 (Sc) が304mmol/L (>10mmol/L) であるのに対してアルカリ濃度減少量 (Rc) は96mmol/L (<700mmol/L) と溶解シリカ量 (Sc) がアルカリ濃度減少量 (Rc) を上回っている (Sc/Rc=3.17) ことから、使用した瓦粉砕物は「無害でない (有害)」と判定された。そのため、瓦粉砕物中の反応性を持つシリカ (二酸化けい素, SiO<sub>2</sub>) と、コンクリートに含まれるアルカリ成分 (Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup> など) とが反応することによって生じる生成物 (アルカリシリカゲル) が吸水膨張し、コンクリートにひび割れを生じさせる可能性が考えられた。

#### 3.2 アルカリ骨材反応抑制対策

国土交通省は平成14年にアルカリ骨材反応抑制対策として、1) コンクリート中のアルカリ総量を規制する対策、2) 抑制効果のある混合セメントなどを使用する対策、3) 安全と認められる骨材を使用する対策の三つの抑制対策の

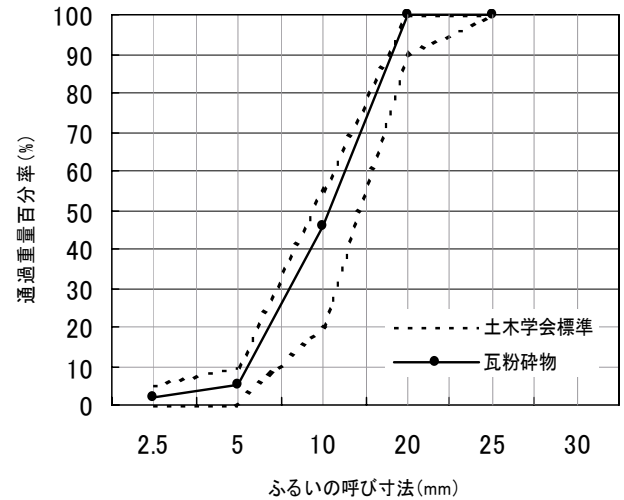


図2 瓦粉砕物の粒度曲線

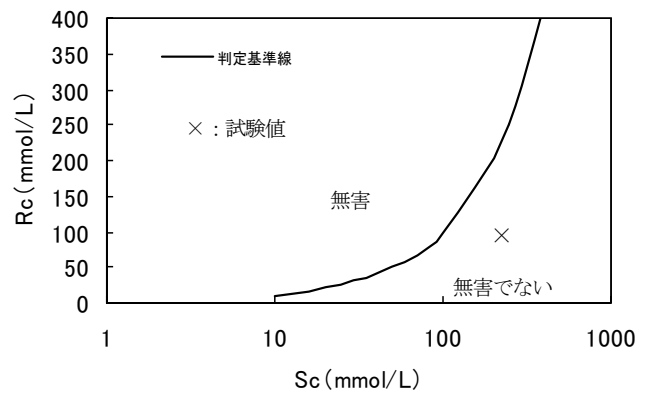


図3 瓦粉砕物のアルカリシリカ反応性 (化学法)

うち何れか一つについて確認を行い、土木構造物については1)、2)を優先することと位置付けている。そこで本試験では、1)のコンクリート中のアルカリ総量を規制するため、セメントの全アルカリ量の最大値のうち直近6ヶ月の最大値 (Na<sub>2</sub>O換算値%)と各骨材中のNaCl%, 混和剤中の全アルカリ量%の確認を行った。その結果、セメントは0.45%、各骨材は0.00%、混和剤は0.80%であった。これらの全アルカリ量の数値と表2のコンクリートの示方配合を基にコンクリート1m<sup>3</sup>に含まれるアルカリ総量をNa<sub>2</sub>O換算で次式により計算した。

表3 瓦粉砕物の物性値

試験名	規格	項目	規格値	試験値
骨材のふるい分け試験	JIS A 1102	粗粒率 (F.M.)		6.47
骨材の微粒分量試験	JIS A 1103	微粒分損失量 (%)	3.0以下	1.20
骨材の単位容積質量及び実積率試験	JIS A 1104	単位容積質量 (kg/L) 実積率 (%)		1.22 58.5
粗骨材の密度及び吸水率試験	JIS A 1110	表乾密度 (g/cm <sup>3</sup> )	2.45以上	2.24
		絶乾密度 (g/cm <sup>3</sup> )	2.5以上	2.08
		吸水率 (%)	3.0以下	7.43
粒形判定実積率試験	JIS A 5005	実積率 (%)	56以上	58.0
ロサンゼルス試験機による粗骨材のすりへり試験	JIS A 1121	すりへり減量 (%)	40以下	28.0
骨材のアルカリシリカ反応性試験 (化学法)	JIS A 1145	判定		無害ではない



アルカリ総量 =  $0.45/100 \times \text{単位セメント量 (kg/m}^3\text{)}$   
 $+0.00/100 \times \text{各単位骨材量 (kg/m}^3\text{)}$   
 $+0.80/100 \times \text{単位混和剤量 (kg/m}^3\text{)}$

その結果、各配合とも  $1.45\text{kg/m}^3$  となり、アルカリ総量の規制値  $3.0\text{kg/m}^3$  以下を満足することができた。

### 3.3 コンクリートのスランブ

練り上がり直後のフレッシュコンクリートを、図4に示すようにスランブコーンに詰めて突き棒で所定の回数一様に突いた後、直ちにスランブコーンを静かに鉛直に引き上げスランブ試験を行った。スランブはコンクリートの中央部における下がり具合を測定して、そのフレッシュコンクリートのスランブとした。図5、図6に瓦粉砕物50%と瓦粉砕物100%のスランブ試験の結果を示す。その結果、瓦粉砕物50%、瓦粉砕物100%のスランブはそれぞれ7cm、8cm（瓦粉砕物0%：7cm）であり、2.1で述べたスランブの目標許容範囲である  $8 \pm 2.5\text{cm}$  内に収まった。

### 3.4 コンクリートの圧縮強度

図7に蒸気+気中養生と標準養生を行った円柱試験体の材齢14日目における圧縮強度試験の結果を示す。その結果、瓦粉砕物を使用したコンクリート試験体である瓦粉砕物50%と瓦粉砕物100%は、蒸気+気中養生と標準養生ともに普通骨材を使用した普通コンクリートである瓦粉砕物0%よりも若干強度が低くなった。しかし、瓦粉砕物50%、瓦粉砕物100%はともに破線で示す目標強度  $21\text{N/mm}^2$  を大きく上回る結果となった。瓦粉砕物50%、瓦粉砕物100%の試験体の圧縮強度は、蒸気+気中養生で各々  $28\text{N/mm}^2$  程度、標準養生で  $32\text{N/mm}^2$  程度であり、瓦粉砕物の置換率の違いによる圧縮強度の顕著な差は認められなかった。

### 3.5 瓦粉砕物の洗い出し状況

円柱試験体の洗い出し処理後の外観状況を図8に示す。右側から順に瓦粉砕物0%、瓦粉砕物50%、瓦粉砕物100%の試験体であり、瓦粉砕物の置換率が高くなるに従い試験体の外観が赤くなっていることが分かる。試験体の表面はワイヤブラシで比較的容易に洗い出しすることができ均質な処理面を確保できた。試験体表面の処理深さは概ね  $2 \sim 3\text{mm}$  であり、試験体の中に瓦粉砕物が偏ることなく混入していることが確認できた。

瓦粉砕物の露出状況を評価するために、デジタルカメラ



図4 スランブ試験の状況



図5 スランブ試験（瓦粉砕物50%）



図6 スランブ試験（瓦粉砕物100%）

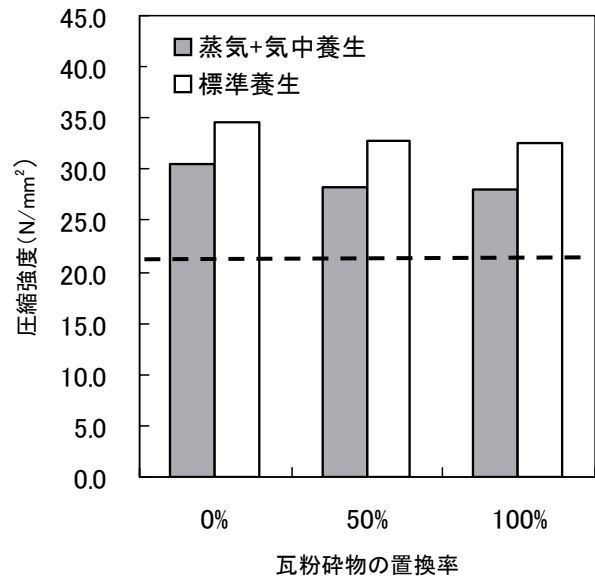


図7 圧縮強度試験結果 (材齢14日)



図8 試験体の洗い出し状況

撮映像を二値化処理し、瓦粉砕物だけを表示した画像を図9に示す。上が瓦粉砕物100%で下が瓦粉砕物50%の瓦粉砕物の露出状況を表しており、黒で表示された部分が瓦粉砕物である。これを用いて、瓦粉砕物50%と瓦粉砕物100%の試験体上面部における瓦粉砕物の露出率（瓦粉砕物の面積 / 試験体上面の面積 × 100%）を求めた結果、それぞれ13.9%、38.3%であった。

### 3.6 まとめ

規格外の石州瓦の粉砕物を使用してコンクリートの試験体を作製し、その諸性質を普通骨材を使用した普通コンク

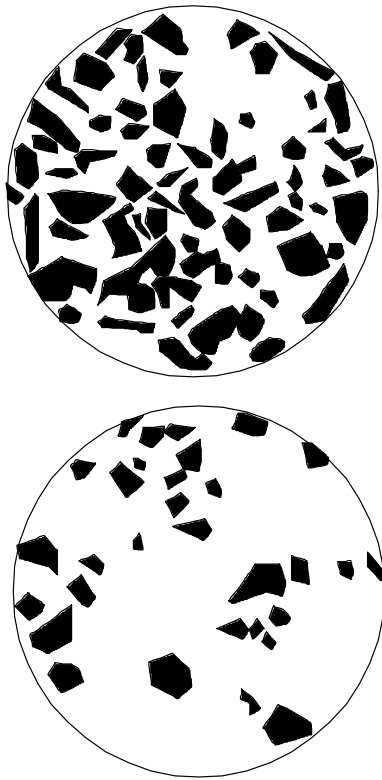


図9 瓦粉砕物の露出状況(試験体上面)  
(上:瓦粉砕物100%,下:瓦粉砕物50%)

リートと比較検討を行った。以下に、本試験で得られた知見を示す。

- 1) 瓦粉砕物を用いて骨材試験を行った結果、微粒分損失量、実積率、すりへり減量はJISの規格値を満足し粗粒率は標準値内にあった。他方、絶乾密度、吸水率はJISの規格外であり、単位容積質量は標準的な値よりも小さな値を示した。
- 2) 骨材のアルカリシリカ反応性試験(化学法)で瓦粉砕物は「無害でない」と判定されたが、適切に配合設計を行うことで、アルカリ骨材反応抑制対策の一つである、コンクリート中のアルカリ総量の規制値 $3.0\text{kg}/\text{m}^3$ 以下を満足することができた。
- 3) 瓦粉砕物を使用したフレッシュコンクリートは、高性能減水剤の添加量を調整することにより所要のスランプを確保できた。
- 4) 瓦粉砕物を使用したコンクリートは、普通骨材を使

用したコンクリートよりも若干圧縮強度が小さいものの目標強度である $21\text{N}/\text{mm}^2$ を十分に満足した。また、瓦粉砕物の置換率の違いによる圧縮強度の顕著な差は認められなかった。

- 5) コンクリート打継目処理剤の使用により、試験体の表面を容易に洗い出しすることができ均質な処理面を確保できた。

## 謝 辞

本報告は、平成21年度資源循環技術基礎研究実施事業による研究成果の一部である。

## 文 献

- 1) 須藤定久. 瓦の話(4)島根県の石州瓦と原料粘土. 地質ニュース. 2000, Vol.550, No.1, p.45-52.
- 2) 谷口義則. "KCクリートの開発とKCプレキャスト地覆の施工報告～廃瓦を活用したコンクリート～". 平成19年度中国地方建設技術開発交流会(島根県会場)発表課題, 松江, 2007-10-26. 中国地方建設技術開発推進会議.
- 3) 友竹博一, 清水利康, 坂本一樹, 鳥居和之. 廃瓦再生骨材を使用したコンクリート製品の諸性質. コンクリート工学年次論文集. 2003, Vol.25, No.1, p.1355-1360.
- 4) 上原匠, 梅原秀哲, 友竹博一, 篠田泰宏. 瓦廃材を細骨材として用いたコンクリートの物性. コンクリート工学年次論文集. 2005, Vol.27, No.1, p.1405-1410.
- 5) 飛田浩孝, 上原匠, 梅原秀哲, 友竹博一. 瓦廃材のコンクリート用骨材への適用性に関する研究. コンクリート工学年次論文集. 2006, Vol.28, No.1, p.1577-1582.
- 6) 井上正一, 黒田保, 金子泰治, 吉野公. 廃瓦を細骨材として用いたコンクリートの物性. 日本材料学会誌. 2007, Vol.56, No.8, p.730-735.
- 7) 高田龍一. 「廃瓦リサイクル骨材を活用したコンクリート製品」の開発について. コンクリートテクノ. 2007, Vol.26, No.1, p.17-21.
- 8) 清木祥平. フライアッシュを用いた高強度コンクリートの開発研究. エネルギー総研レビュー. 2009, No.15, p.14.
- 9) JIS A 5364:2004. プレキャストコンクリート製品 材料及び製造方法の通則.
- 10) 土木学会コンクリート委員会. コンクリート標準示方書[施工編]. 社団法人土木学会, 2007, p.85-86.
- 11) 水産庁監修 漁港・漁場の施設の設計の手引き[下]. 社団法人全国漁港漁場協会, 2003, p.672.
- 12) JIS A 5308:2009 レディーミクストコンクリート.
- 13) 土木学会コンクリート委員会. コンクリート標準示方書[施工編]. 社団法人土木学会, 2007, p.429-431.