

# 能登半島地震の復興工事における廃瓦の地域コンクリートへの活用研究

代表者 石川工業高等専門学校環境都市工学科  
教授 津田 誠

## 1. はじめに

2024年1月1日16時10分に、石川県能登地方を震源とするM7.6の地震（令和6年能登半島地震）が発生し、輪島市や志賀町で震度7を観測した他、能登地方の広い範囲で震度6強を観測した。令和7年1月時点の石川県の発表によれば、地震による建物被害棟数（公費解体の対象となる半壊以上の被害棟数）は60,561棟と推計されている。また、令和7年1月に改訂された「公費解体加速化プラン」では地震による災害廃棄物の発生量は約400万tと推計されている。災害廃棄物の再生利用については、「令和6年能登半島地震に係る石川県災害廃棄物処理実行計画」（石川県、令和6年2月29日策定）において「災害廃棄物の処理にあたっては、生活環境保全等に留意するとともに、可能な限り分別、選別、再生利用等を行い、最終処分量の低減に努める」とされているが、このうち不燃物（瓦・レンガ・アスファルト等）の再生利用率は1%と再利用が進んでいない。

本稿では、不燃物のうち瓦（廃瓦）に着目し、コンクリートの細骨材代替としての利用可能性について検討した結果について報告する。

## 2. 瓦の基礎性状調査結果

### 2.1 試験に使用した瓦骨材

本検討では建物解体により生じた屋根瓦を中間処理会社にて破碎し、0~3mmに粒度調整したものを使用する。廃瓦骨材について図1に示す。



図1 廃瓦骨材（0-3mm）

### 2.2 骨材試験結果

骨材としての性能を評価するため、骨材品質・規格に関する諸量について試験した結果について表1に、粒度分布について図2に示す。JIS A 5308(2019)やJIS A 5005(2020)に規定される砂や砕砂等の天然骨材を比較すると、規格値に対し、絶乾密度は低く、吸水率は高い結果となった。また、微粒分量は砕砂の規格値は満足するが砂は満足しない結果となった。なお、人工（軽量）骨材として考えた場合は、全て規格値を満足する。

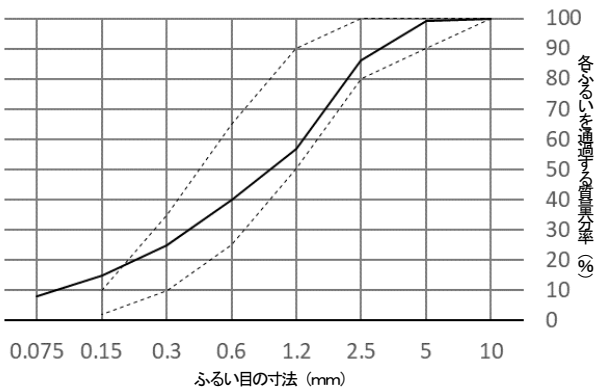


図2 粒度曲線図（0-3mm）

表1 骨材試験結果

| 試験項目  |                  | 試験結果  | 規格値      |        |  |        |
|-------|------------------|-------|----------|--------|--|--------|
|       |                  |       | 天然骨材     |        | 人工骨材   |        |
|       |                  |       | 砂        | 砕砂     | 人工軽量骨材   | 副産軽量骨材 |
| 絶乾密度  | g/m <sup>3</sup> | 2.17  | 2.5 以上   |        | H : 1.8 以上 2.3 未満, M : 1.3 以上 1.8 未満, L : 1.3 未満 |        |
| 吸水率   | %                | 6.26  | 3.5 以下   | 3.0 以上 | —  |        |
| 粘土塊量  | %                | —     | 1.0 以下   |        | 1.0 以下   | 2.0 以下 |
| 微粒分量  | %                | 7.1   | 3.0 以下   | 9.0 以上 | 10 以下  |        |
| 有機不純物 |                  | 淡い    | 同じ, 又は淡い |        | 試験溶液の色が標準色液 又は色見本より淡い                            |        |
| 塩化物量  | %                | 0.004 | 0.04 以下  |        | —  |        |
| 安定性   | %                | 2.4   | 10 以下    |        | —  | 20 以下  |

### 2.3 アルカリシリカ反応試験結果

廃瓦のアルカリシリカ反応性について確認するため、各種試験を実施した。

#### 2.3.1 化学法

図3に試験結果を示す。アルカリ濃度減少量は  $R_c$  は119 (nmol/l), 溶解シリカ量  $S_c$  は499 (nmol/l) であり、廃瓦骨材は「無害でない」骨材と判断される。

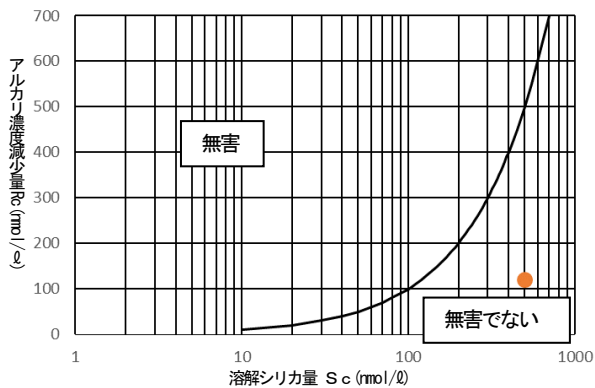


図3 化学法試験結果

#### 2.3.2 蛍光X線分析および粉末X線回折

化学成分及び鉱物組成の分析のため、蛍光X線分析および粉末X線回折を実施した。蛍光X線分析による化学組成を表3、粉末X線回折結果を図4に示す。粉末X線回折では、アルカリシリカ反応性の高い石英やクリストバライト等の鉱物の含有を示唆するピークや、非晶質なガラスを示唆する  $2\theta=15\sim35^\circ$  付近のブロードなハローが認められ、廃瓦をコンクリート骨材として使用するとアルカリシリカ反応が発生する可能性が高いことが判明した。

表3 廃瓦の化学組成 (蛍光X線分析結果)

| SiO <sub>2</sub>  | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO                           | MgO  | SO <sub>3</sub> |
|-------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|------|-----------------|
| 68.34             | 19.68                          | 4.43                           | 1.15                          | 0.80 | 0.03            |
| Na <sub>2</sub> O | K <sub>2</sub> O               | TiO <sub>2</sub>               | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | MnO  | Ig.loss         |
| 0.74              | 2.06                           | 0.87                           | 0.05                          | 0.35 | 1.00            |

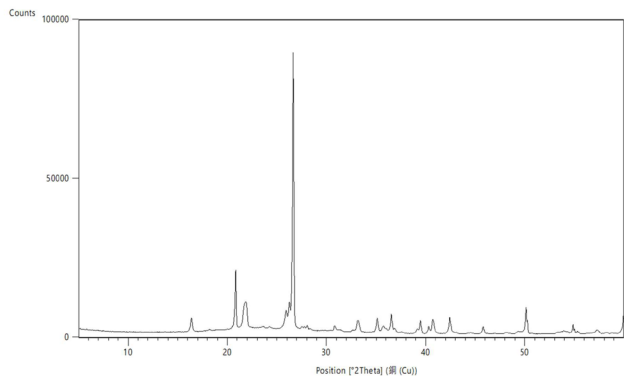


図4 粉末X線回折結果

#### 2.3.3 促進モルタルバー法 (ASTM C 1260)

骨材のアルカリシリカ反応性及びフライアッシュの抑制効果を早く確認できる試験として、促進モルタルバー法 (ASTM C 1260) を実施した。モルタルバーの作製においては、結合材中のフライアッシュの混和の有無及び細骨材中の廃瓦骨材の含有率を変更し検討を行った。試験体の配合および試験ケースについて表4および表5、促進モルタルバー法 (ASTM C 1260) の膨張率の測定結果を図5に示す。

表4 モルタルバー配合

| W/C (%) | 水 (g) | 結合材B (g) | 細骨材S (g) |
|---------|-------|----------|----------|
| 47      | 206.8 | 440      | 990      |

表5 試験ケース

| ケース番号 | 結合材B     |             | 細骨材S      |        |
|-------|----------|-------------|-----------|--------|
|       | セメント (%) | フライアッシュ (%) | 石灰石砕砂 (%) | 廃瓦 (%) |
| 1     | 100      | 0           | 0         | 100    |
| 2     | 100      | 0           | 50        | 50     |
| 3     | 100      | 0           | 70        | 30     |
| 4     | 100      | 0           | 80        | 20     |
| 5     | 100      | 0           | 90        | 10     |
| 6     | 80       | 20          | 80        | 20     |

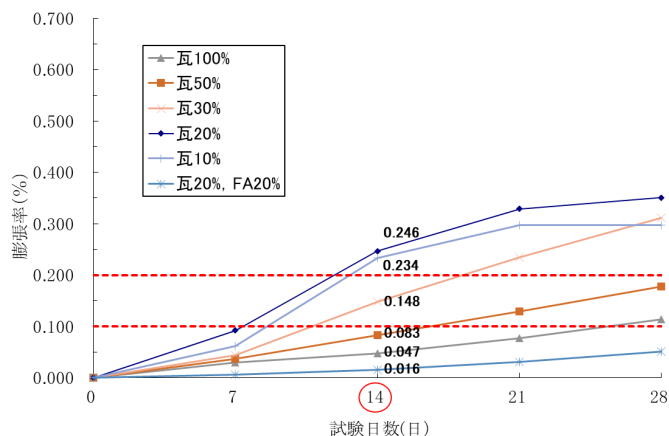


図5 膨張率測定結果 (ASTM C 1260)

供試体の膨張率を表6で判定基準としている14日目の膨張率と比較すると、ケース5 (廃瓦10%) およびケース4 (廃瓦20%) については「潜在的有害」、ケース3 (廃瓦30%) については「不明瞭」、ケース2 (廃瓦50%) および

ケース1（廃瓦100%）においては「無害」の結果となった。瓦の含有量に応じ膨張率が大きく異なる点については、ペシマムによる影響が考えられる。また、「潜在的有害」であったケース4（廃瓦20%）の比較用として、フライアッシュをセメント内割で20%使用し追加測定したケース6（廃瓦20%、FA20%）も図5に示しているが、フライアッシュを混和しなかったケース4の膨張率が0.246であるのに対し、フライアッシュを混和したケース6の膨張率は0.016となり、膨張を抑制できることを確認した。

表6 促進モルタルバー法の判定基準

| 基準            | 膨張率(14日)      | 潜在膨張性の判定 |
|---------------|---------------|----------|
| 促進モルタル        | 0.10%未満       | 無害       |
| バー法           | 0.10%~0.20%未満 | 不明瞭      |
| (ASTM C 1260) | 0.20%以上       | 潜在的有害    |

### 2.3.4 アルカリシリカ反応各種試験のまとめ

2.3.1~2.3.3までの各種試験結果から、廃瓦をコンクリート骨材として使用する場合はアルカリシリカ反応の発生が否定できないが、フライアッシュの混和により膨張を抑制できることを確認した。

## 3. 細骨材置換率の検討

### 3.1 検討の方向性

表1の通り、廃瓦骨材はJIS A 5308やJIS A 5055に規定される砂や砕砂の細骨材の基準を満足せず、軽量骨材に近い物性を示す。軽量骨材を生コンクリート工場で使用する場合は、骨材をプレウェットングして使用することが行われているが、専用の散水設備が必要となる。また、含水状態の管理が煩雑になることや骨材自身の吸水率の高さより生コンクリートのワーカビリティの制御が難しくなること等のデメリットがある。

そこで、本検討では、生コンクリート工場の設備改造や品質管理項目の増加を伴わず、かつ早期に震災廃棄物である廃瓦を利用できるようにする観点から、細骨材の一部のみを置換し骨材の吸水分は単位水量の割り増しにより対応する方針とし、各種試験を実施した。

### 3.2 廃瓦置換率および割り増し量の検討

瓦の細骨材としての代替材としての影響を評価するため、JIS A6201「コンクリート用フライアッシュ」附属書C「フライアッシュのモルタルによるフロー値比及び活性度指数の試験方法」に準拠し、気乾状態の廃瓦を使用して、表7の通り、廃瓦の置換率（6ケース）および単位水量の補正有無（2ケース）を変化させて練り混ぜおよびフロー値の計測を行った。

廃瓦置換 0%のフロー値を基準としてフロー値比を整理した結果について図6に示す。単位水量「補正あり」の場合は、各ケースにおいて、表1に示した廃瓦の吸水率分（6.26%）の単位水量を割り増した量としている。単位水量「補正なし」の場合、置換率の増加に伴いフロー値比が線形的に低下するが、単位水量「補正あり」の場合は、フロー値比の低下を抑制する傾向が見られた。なお、「補正あり」の場合においても緩やかであるがフロー値比の低下が起こったのは、多孔質であるとされている廃瓦が練り混ぜまでの短時間で完全に吸水しなかったことや吸水率自体のばらつきに起因する材料特性によるものと考えられる。

瓦置率①～案⑦（補正あり）のモルタル供試体の材齢28日の圧縮強度試験結果について図7に示す。瓦の置換割合に応じて吸水率分単位水量を割り増した「補正あり」の配合にて試験を実施しているため、各試験体の水セメント比を一定と見なせば、各ケースの圧縮強度に有意な差はなく、廃瓦を細骨材として使用する上では、置換率に関わらず強度への影響は小さいものと示唆される。

表7 モルタルフロー計測試験の各ケース配合

(単位: g)

| 瓦置換率     | セメント  | フライアッシュ | 砂（標準砂） | 瓦     | 単位水量  |       |
|----------|-------|---------|--------|-------|-------|-------|
|          |       |         |        |       | 補正なし  | 補正あり  |
| ① 0%（基準） | 337.5 | 112.5   | 1350.0 | 0.0   | 225.0 | —     |
| ② 5%     |       |         | 1282.5 | 67.5  |       | 225.4 |
| ③ 10%    |       |         | 1215.0 | 135.0 |       | 225.8 |
| ④ 15%    |       |         | 1147.5 | 202.5 |       | 226.3 |
| ⑤ 20%    |       |         | 1080.0 | 270.0 |       | 226.7 |
| ⑥ 25%    |       |         | 1012.5 | 337.5 |       | 227.1 |
| ⑦ 50%    |       |         | 675.0  | 675.0 |       | 229.2 |

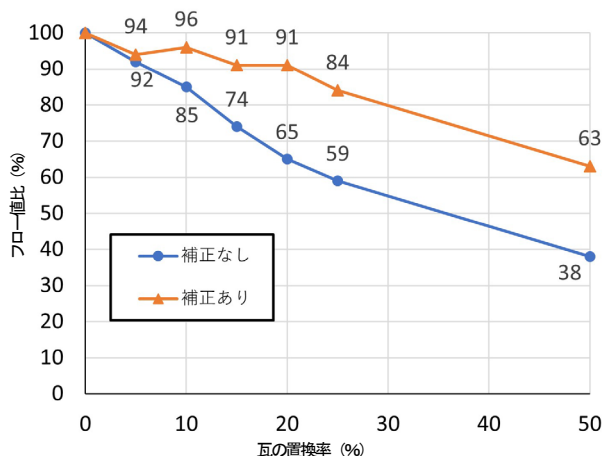


図6 廃瓦置換率とフロー値比の関係

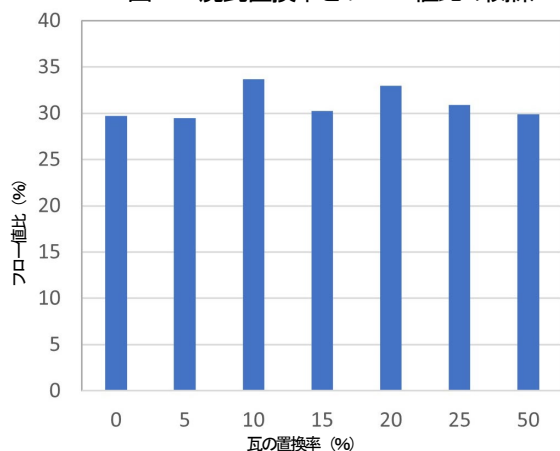


図7 モルタルの圧縮強度結果(材齢28日)

### 3.3 単位水量割り増し量の追加検討

図6の通り、吸水率を増加させた補正ありのケースにおいて廃瓦置換率20%まではフロー値比が緩やかな低下を示したことから、廃瓦置換率20%に着目し、単位水量の割り増し量を変化させフロー値を計測し、廃瓦置換率の検討時と同様に廃瓦置換率0%のフロー値を基準としてフロー値比として整理した。試験結果について図8に示す。水量の割増し率が小さい範囲(7%以下)では、フロー値比の低下が著しく、7%以上では割り増し率の増加に伴いフロー値比100%に漸近する傾向が見られた。

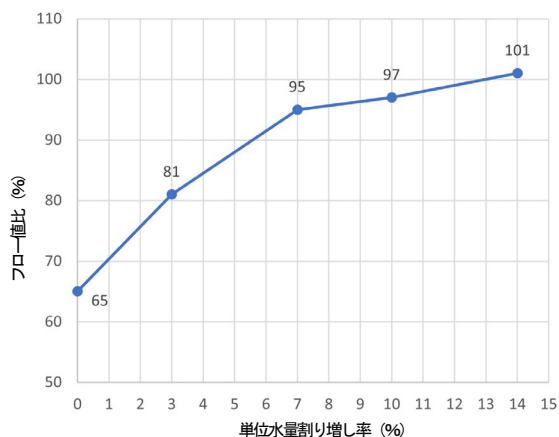


図8 単位水量割り増し率とフロー値比 (廃瓦20%)

### 3.4 細骨材置換率の検討結果のまとめ

上記の検討により、細骨材への廃瓦の置換率を20%とし、単位水量の割り増し量を10%として実機試験を行うこととした。

## 4. 実機練り試験結果

### 4.1 生コンクリート工場での試験結果

#### 4.1.1 試験配合

モルタルフロー試験練りのデータを参考に、試験練りによりコンクリート配合を検討した上で、実機練り試験を実施した。今回検討対象とする試験配合は、呼び強度21・スランプ8cm・最大粗骨材寸法25mmのプラントで営業出荷している配合であり、表8に今回の検討対象である廃瓦20%細骨材置換ケースと併せて配合を示す。ここで、試験練りにより、単位水量割り増しによるワーカビリティ改善の傾向がモルタルフロー試験よりも少ない水量で得られたため、単位水量の割り増し量は元配合単位水量の5%に変更した。これは、コンクリートの場合、粗骨材に対してが瓦を置換していないため、単位水量の割り増しが半分になったものと考えられる。

表8 試験配合 (21-8-25)

|          | 配合表 (kg/m <sup>3</sup> ) |         |     |     |     |       |      |
|----------|--------------------------|---------|-----|-----|-----|-------|------|
|          | 結合材                      |         | 水   | 細骨材 |     | 粗骨材   | 混和材  |
|          | セメント                     | フライアッシュ |     | 岩屋産 | 瓦砂  |       |      |
| 実機試験     | 234                      | 41      | 162 | 632 | 158 | 1,032 | 2.48 |
| (参考) 元配合 | 234                      | 41      | 154 | 790 |     | 1,032 | 2.48 |

#### 4.1.2 フレッシュ性状および圧縮強度試験結果

スランプをはじめとするフレッシュ性状については、品質管理のタイミングが荷卸し時であるため、図9の通り工場でのコンクリート製造後、工場内敷地内でアジテーター車のドラムを運搬時と同等の速度で回転させ、製造直後および0.5時間(30分)毎に工事現場でのフレッシュ性状測定と同様の条件となるように試料を採取した。

フレッシュ性状の測定結果について表9に示す。コンクリート標準示方書では「レディーミクストコンクリートの運搬時間は、生産者が練混ぜを開始してから運搬車が荷卸しし、地点に到着するまでの時間とし、その時間は1.5時間以内とする」とされており、製造直後こそスランプ・空気量ともに大きな値を示したが、その時間内の計測結果に着目すると、1.5時間経過時の空気量は許容値差内に収まらなかったものの、それ以外の値は許容差内であり、概ね、

通常コンクリートと同様のフレッシュ性状を有していることを確認した。

0.5 時間経過時に採取した試料を用いて圧縮強度用供試体を作製し、7 日材齢および28 日材齢で圧縮強度試験を実施した。試験結果について表10に示す。28 日材齢において、全ての供試体で呼び強度の 85%以上を確保しており、平均値も呼び強度以上であることを確認した

以上から、廃瓦を 20%細骨材と置換し単位水量を 5 %割り増したフライアッシュコンクリートは通常のフライアッシュコンクリートと同等の品質を確保していることを確認した。

表 9 実機試験 フレッシュ性状

|                  | スランプ<br>(cm) | 空気量<br>(%) | コンクリート<br>温度(℃) |
|------------------|--------------|------------|-----------------|
| 練り混ぜ直後           | 15.0         | 5.4        | 9               |
| 0.5 時間<br>(30 分) | 9.5          | 3.4        | 9               |
| 1.0 時間<br>(60 分) | 8.5          | 3.0        | 10              |
| 1.5 時間<br>(90 分) | 7.5          | 2.4        | 11              |
| 規格値              | 8.0±2.5      | 4.5±1.5    | —               |

表 10 圧縮強度試験

|                      | 圧縮強度試験結果 |        |
|----------------------|----------|--------|
|                      | 7 日材齢    | 28 日材齢 |
| 1 本目                 | 16.9     | 28.6   |
| 2 本目                 | 17.3     | 27.2   |
| 3 本目                 | 16.4     | 25.0   |
| 平均値                  | 16.9     | 26.9   |
| (参考) 試験練り時<br>瓦なし平均値 | 19.7     | 27.4   |

認した。



図 8 実機試験の状況

## 4.2 コンクリート二次製品工場での試験結果

### 4.1.1 試験配合

コンクリート二次製品工場においても実機練り試験を実施した。今回検討対象とする試験配合は、呼び強度 30・スランプフロー600mm・粗骨材最大寸法 20mmの粉体系高流動コンクリートであり、今回実機試験を実施した工場においては、縁石や自由勾配側溝製作時に使用している配合である。表 11 に今回の検討対象である廃瓦 20%細骨材置換ケースと併せて配合を示す。なお、試験練り時のスランプフロー・空気量の試験結果について表 12 に示すが、生コンクリート工場と同様、単位水量の 5 %割り増しにより、同様の流動性を確保できることを確認している。

### 4.1.2 試作品製造及び試験結果

表 11 に示した配合にて、振動機による振動締固めおよび蒸気養生を行い、細骨材を 20%廃瓦と置換した自由勾配側溝および縁石を製造した。試験結果および試作品について表 13 及び図 9 および図 10 に示す。なお、製品寸法や試験

表 12 フレッシュ性状試験結果

|             | スランプフロー<br>(mm) | 空気量<br>(%) | コンクリート温度<br>(℃) |
|-------------|-----------------|------------|-----------------|
| 実機試験        | 594×588         | 1.7        | 4.6             |
| (参考)<br>元配合 | 594×562         | 1.6        | 7.2             |
| 規格値         | 600±100         | 2.0±1.5    | —               |

表 11 二次製品工場 試験配合

|             | 配合表 (kg/m³) |         |     |            |            |     |
|-------------|-------------|---------|-----|------------|------------|-----|
|             | セメント        | フライアッシュ | 水   | 細骨材<br>藤橋産 | 粗骨材<br>板尾産 | 混和材 |
| 実機試験        | 360         | 154     | 189 | 617        | 153        | 813 |
| (参考)<br>元配合 | 360         | 154     | 180 | 770        |            | 813 |

項目・方法については（一社）北陸土木コンクリート製品技術協会の設計便覧や品質検査規定に準拠している。

試験の結果、試作品は製品協会が定める規格に対して適合していることを確認した。

表 13 試験結果

| 製品名      | 外観検査 | 曲げ耐力試験結果 (kN) |         |
|----------|------|---------------|---------|
|          |      | 1 個目          | 2 個目    |
| 自由勾配側溝   | 良    | 76(≥38)       | 76(≥38) |
| 縁石 a 種Ⅱ型 | 良    | 64(≥64)       | 64(≥64) |





図9 廃瓦入り縁石



図10 廃瓦入り自由勾配側溝

結果、生コンクリート工場における実機練り試験と同様の条件による配合修正を行うことにより、(一社)北陸土木コンクリート製品技術協会が定める規格に適合する製品を製造することが可能であると考えられる。

以 上

## 5. まとめ

本研究による成果は、以下の通りである

- (1) 廃瓦は天然資源由来の細骨材（砂・砕砂）と比較して、絶乾密度が小さく、吸水率が大きい性質を有し、砂や砕砂の JIS 規格は満足しない。ただし、軽量（人工）骨材としては規格値を満足する。
- (2) 廃瓦はアルカリシリカ反応性があり、細骨材を 20% 置換した場合にペシマムを有する。ペシマムによるアルカリシリカ反応が励起されやすい条件においても、フライアッシュをセメントの 20% 置換することにより膨張を抑制することが可能である
- (3) 廃瓦は吸水率が高く、細骨材を 20% 置換して使用する場合、単位水量を 5% 割り増しすることにより、コンクリートのフレッシュ性状を確保することが可能である。
- (4) 生コンクリート工場における実機練り試験の結果、廃瓦を細骨材の 20% 置換した場合は、単位水量を 5% 割り増しする配合修正を行うことにより、通常コンクリートとほぼ同様の品質を確保することが可能であると考えられる。
- (5) コンクリート 2 次製品工場における実機練り試験の