

# 論文 再生骨材および多量のフライアッシュを使用したポーラスコンクリートに関する研究

本田 陵二<sup>\*1</sup>・牛尾 仁<sup>\*2</sup>・水口 裕之<sup>\*3</sup>・小栗 晶子<sup>\*4</sup>

**要旨：**産業副産物の有効利用として元電柱の再生骨材と多量のフライアッシュを使用してポーラスコンクリートを作製し調査、検討した。フライアッシュ置換率が 60%以上のポーラスコンクリートの圧縮強度は、骨材の違いによる影響はほとんど見られないことが考えられる。また再生骨材を用い、フライアッシュ置換率 60%のポーラスコンクリートで 10MPa を超え、植生重視の護岸で使用できると考えられる。フライアッシュ置換率 50%までのポーラスコンクリートは、フライアッシュを使用していないポーラスコンクリートと比べて静弾性係数は大きくなった。

**キーワード：**ポーラスコンクリート、再生骨材、多量のフライアッシュ

## 1. はじめに

高度成長期に多量に建設されたコンクリート構造物はその解体期を迎え、コンクリート廃材が多く排出されている。コンクリート廃材は、2005 年度で 3215 万トンが搬出され、再資源化率は 98.1%と高い<sup>1)</sup>。しかし再生細骨材として利用されているのは 11.3%に過ぎず、コンクリート廃材の多くは路盤材として再利用となっており、今後の道路整備計画の縮小や他の産業のリサイクル品の利用等により、その需要が伸びることは考えにくい。特にコンクリート電柱は、経年劣化だけでなく交通事故等による破損もあり、今後も造り続けられていくことが予想される。また、更なる高度利用が再生資源の有効利用という面からも緊急の課題である。

また、石炭火力発電所から多く排出されるフライアッシュは、セメント原料等利用されつつあるが、まだ十分な用途が開発されていない。ポーラスコンクリートは、W/C が小さく細骨材も使用しないため、単位セメント量

が大きくフライアッシュの多量使用によりコスト削減にも繋がると思われる。

ポーラスコンクリートは、連続空隙を多く持ち、透水性・透気性が大きく、その空隙構造によって従来のコンクリートにはない多様な性能がある。植生重視のポーラスコンクリートならば、再生骨材や多量のフライアッシュを使用しても要求性能を満足させられる可能性がある。

本研究では、産業副産物である元電柱の再生骨材とフライアッシュを多量に使用して、植生重視の目標空隙率が 20%のポーラスコンクリートを作製し調査、検討した。試験はフライアッシュ置換率および締固め方法を決める予備試験と予備試験の結果から各種試験を行う本試験に分けて行った。

## 2. 試験概要

### 2.1 使用材料および配合

セメントには密度 3.16g/cm<sup>3</sup> および比表面積 3270 cm<sup>2</sup>/g の普通ポルトランドセメントを使用

表-1 フライアッシュの試験成績

| 品質     |                   | JIS A 6201<br>による規定<br>(フライアッシュⅡ種) |        | 試験値  |
|--------|-------------------|------------------------------------|--------|------|
|        |                   |                                    |        |      |
| 二酸化ケイ素 | %                 | 45.0以上                             |        | 66.1 |
| 湿分     | %                 | 1.0以下                              |        | 0.13 |
| 強熱減量   | %                 | 5.0以下                              |        | 2.3  |
| 密度     | g/cm <sup>3</sup> | 1.95以上                             |        | 2.24 |
| 粉末度    | 比表面積<br>(プレーン値)   | cm <sup>2</sup> /g                 | 2500以上 | 3878 |
| フロー値   | %                 | 95以上                               |        | 105  |
| 活性度指数  | 材齢28日             | %                                  | 80以上   | 84   |
|        | 材齢91日             | %                                  | 90以上   | 98   |

表-2 粗骨材の試験成績

| 骨 材     | 普通骨材                      | 再生骨材      |
|---------|---------------------------|-----------|
| 再生骨材の品質 | -                         | M級        |
| 表乾密度    | (g/cm <sup>3</sup> ) 2.58 | 2.52      |
| 絶乾密度    | (g/cm <sup>3</sup> ) 2.54 | 2.41      |
| 吸水率     | (%) 1.7                   | 4.6       |
| 実積率     | (%) 58.7                  | 59.8      |
| 単位容積質量  | (kg/L) 1.49               | 1.44      |
| 粗粒率     |                           | 6.21 5.99 |
| 微粒分量    | (%) 0.1                   | 1.12      |
| すりへり減量  | (%) 18.7                  | 12.3      |

\*1 (株)セイア 企画開発室 博 (工) (正会員)

\*2 (株)セイア 企画開発室 (正会員)

\*3 徳島大学大学院 ソシオテクノサイエンス研究部教授 工博 (正会員)

\*4 徳島大学大学院 先端技術科学教育部知的力学システム工学専攻 (正会員)

表-3 ポーラスコンクリートの配合（予備試験）

| 配合名 | フライアッシュ置換率 (%) | 単位量 (kg/m <sup>3</sup> ) |      |         |      | SP剤添加率 (%) | 測定フロー値 |
|-----|----------------|--------------------------|------|---------|------|------------|--------|
|     |                | 水                        | セメント | フライアッシュ | 粗骨材  |            |        |
| N0  | 0              | 113                      | 378  | 0       | 1464 | 0          | 160    |
| N30 | 30             | 108                      | 252  | 108     |      | 1.80       | 173    |
| N50 | 50             | 104                      | 174  | 174     |      | 2.44       | 190    |
| N70 | 70             | 100                      | 100  | 234     |      | 2.00       | 175    |
| R0  | 0              | 104                      | 347  | 0       | 1477 | 0          | 173    |
| R30 | 30             | 99                       | 232  | 99      |      | 1.66       | 174    |
| R50 | 50             | 96                       | 160  | 160     |      | 1.91       | 171    |
| R70 | 70             | 92                       | 92   | 215     |      | 1.84       | 172    |

表-4 ポーラスコンクリートの配合（本試験）

| 配合名 | フライアッシュ置換率 (%) | 単位量 (kg/m <sup>3</sup> ) |      |         |      | SP剤添加率 (%) | 測定フロー値 |
|-----|----------------|--------------------------|------|---------|------|------------|--------|
|     |                | 水                        | セメント | フライアッシュ | 粗骨材  |            |        |
| N0  | 0              | 113                      | 378  | 0       | 1464 | 0          | 157    |
| N30 | 30             | 108                      | 252  | 108     |      | 1.44       | 195    |
| N50 | 50             | 104                      | 174  | 174     |      | 1.39       | 179    |
| N60 | 60             | 102                      | 136  | 205     |      | 1.36       | 165    |
| R0  | 0              | 104                      | 347  | 0       | 1477 | 0          | 188    |
| R30 | 30             | 99                       | 232  | 99      |      | 0.99       | 193    |
| R50 | 50             | 96                       | 160  | 160     |      | 0.96       | 191    |
| R60 | 60             | 94                       | 125  | 188     |      | 1.25       | 174    |

した。

表-1 にフライアッシュの試験成績にを示す。密度 2.24g/cm<sup>3</sup>および比表面積 3878cm<sup>2</sup>/g のフライアッシュⅡ種を使用した。

表-2 に粗骨材の試験成績を示す。普通骨材には、粒径 5～15mm、表乾密度 2.58g/cm<sup>3</sup>、吸水率 1.7%および実積率 57.9%の香川県三豊市財田町財田産の砕石 1505、再生骨材には表乾密度 2.52g/cm<sup>3</sup>、吸水率 4.6%および実積率 59.8%の再生骨材 M 級を使用した。再生骨材は、コンクリート電柱をジョークラッシャで砕き、分級したものを水洗いして使用した。

混和剤には、ポリカルボン酸エーテル系の化合物を主成分とする高性能 AE 減水剤を使用した。

使用したポーラスコンクリートの予備試験の配合を表-3 に、本試験の配合を表-4 に示す。配合名は、先頭が普通骨材の場合は N、再生骨材の場合は R で後ろの数字はフライアッシュ置換率である。フライアッシュは内割で使用した。この配合は河川護岸で使用することを想定して、ポーラスコンクリートの目標空隙率は 20%、水セメント比は 30%および設計基準強度は材齢 91 日で 10MPa とした。

## 2.2 コンクリートの練混ぜ、供試体の作製、養生および試験

コンクリートの練混ぜは、容量 60L の強制水平 2 軸ミ

表-5 振動タンバの仕様

|          |          |
|----------|----------|
| 電源（三相交流） | 60Hz     |
| 回転数      | 3600回転/分 |
| 起振力      | 150kg    |
| 質量       | 11kg     |

キサを使用し、セメント、フライアッシュおよび粗骨材を入れて 30 秒間練混ぜを行い、水と高性能 AE 減水剤を加えてさらに 90 秒間練混ぜた。

供試体は円柱供試体 φ100×200mm を圧縮試験用に各材齢で 5 本ずつ、空隙率試験用に 2 本ずつおよび pH 溶出試験用に 2 本ずつ作製し、角柱供試体 100×100×400mm を曲げ試験用に 5 本ずつ作製した。

締固めは、現場での打設を想定して表-5 に示す振動タンバを用いた。供試体と接触する加圧板は円柱供試体の型枠に入るよう φ95mm、角柱供試体には 95×395mm のものを用いた。

締固め方法は、ほぼ等しい 2 層に分け、ポーラスコンクリートを均してから、予備試験では各層を円柱供試体は 1 層当たり 5 および 10 秒で締固め、本試験では目標空隙率となるよう、予備試験の結果から決定した時間で締固めた。

供試体は、打設から 24 時間後に脱型を行った。養生方法は、河川護岸で使用することを想定しているため、気温 20±1℃の標準養生水槽室内で供試体を湿布し、1

週間に1回の割合で供試体に散水した。圧縮試験用の養生期間は、予備試験で7日および28日、本試験で7日、28日および91日、硬化後の空隙率試験および曲げ試験用は28日とした。

セメントペーストフロー試験は、JIS R 5201の方法に従って行った。ポーラスコンクリートを練混ぜ後、5mmの網ふるいに入れ、棒バイブレータで振動を与えてセメントペーストを落とし、そのセメントペーストで試験を行った。

空隙率試験は、フレッシュコンクリートと硬化コンクリートの2種類を行った。フレッシュコンクリートには、JCI-SPO4の方法<sup>2)</sup>に基づき行った。ポーラスコンクリートを容器に振動タンパで締固めた後注水し、質量の変化より連続空隙率を算出した。全空隙率は、算出した連続空隙率に、試験によって得られた空気量を加えたものである。振動タンパの時間は事前に円柱供試体と同様の目標空隙率となるよう実験を行い1層当たり6秒とし2層に分けて行った。硬化コンクリートには、JCI-SPO2-1の方法<sup>2)</sup>に基づき行った。

圧縮強度試験はJIS A 1108の方法に基づき、アムスラ一式圧縮試験機を用いて行った。圧縮強度試験用供試体の上面および下面を平面とするためセメントペーストでキャッピングを行った。

静弾性係数は、CSG 強度の試験の方法<sup>3)</sup>に基づき行った。図-1に静弾性係数計測方法を示す。変位計は供試体の軸方向に対して平行に取り付けた。取付け位置は、供試体の全ひずみが測定できるように、試験機に干渉しない固定部分と稼働側加圧板の間に取付けた。図-2は静弾性係数を求めるための応力-ひずみ曲線を示す。点線は応力-ひずみ曲線、実線は応力-ひずみ曲線の直線区間の接線である。応力-ひずみ曲線の直線区間を弾性領域とし、その傾きを静弾性係数とした。この計測方法の場合、試験機の上下の加圧板と、供試体の上下面とのなじみから機械特性による初期のひずみが発生するため、計算時に原点補正を行った。

曲げ強度試験はJIS A 1106の方法に基づき、アムスラ一式圧縮試験機を用いて行った。

アルカリ溶出試験は、ポーラスコンクリートのアルカリ溶出試験方法(案)<sup>4)</sup>に基づき行った。

### 3. 予備試験結果と考察

#### 3.1 振動タンパによる締固めの1層当たりの時間

図-3にN50の振動タンパによる1層当たり時間を変化させて締固めた硬化コンクリートの空隙率の試験結果を示す。横軸は振動タンパによる1層当たり時間、縦軸は硬化コンクリートの空隙率である。両者ともに目標空隙率に届いていないため、本試験では各層を円柱供試

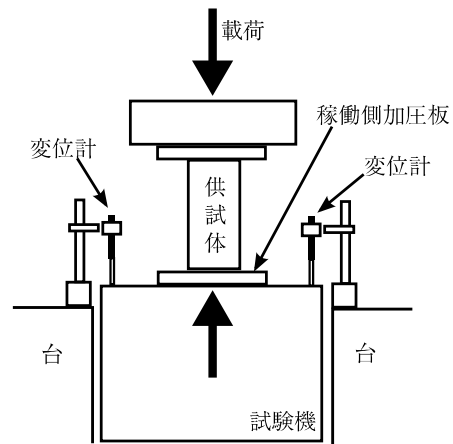


図-1 静弾性係数計測方法

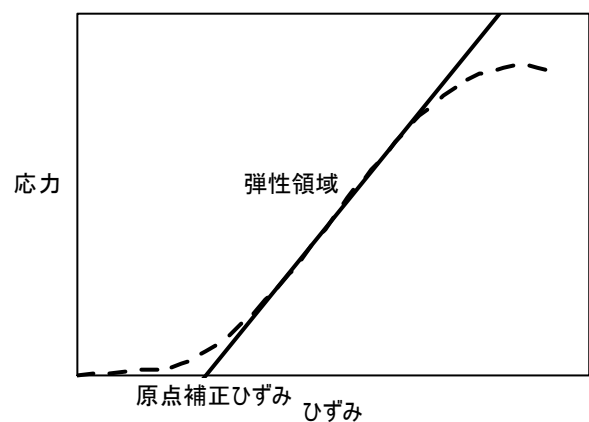


図-2 応力-ひずみ曲線

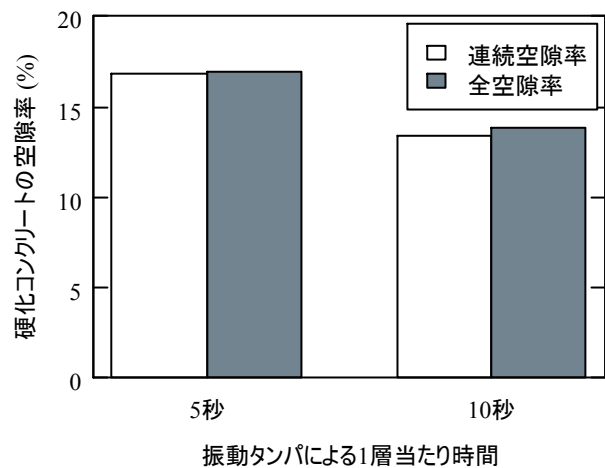


図-3 振動タンパによる1層当たり時間を変化させて締固めた硬化コンクリートの空隙率(N50)

体は1層当たり2秒および角柱供試体は1層当たり4秒で締固めることとした。

#### 3.2 圧縮強度

図-4に予備試験の材齢7日および28日の圧縮強度を示す。普通骨材を使用した配合および再生骨材を使用した配合ともにフライアッシュ置換率30%であるN30およびR30がフライアッシュ置換率0%であるN0およびR0

より大きい結果となっている。これは N0 および R0 が他の配合と違い高性能 AE 減水剤を使用していないためだと考えられる。フロー値を高性能 AE 減水剤の使用量で調整しているが、高性能 AE 減水剤を使用すると、セメントペーストを突き棒で突いた際に硬かったが、フロー試験器で振動を与えると滑らかに広がった。つまり、フロー性状の違いが強度増進に繋がった原因の一つと考えられる。

また普通骨材を使用した配合および再生骨材を使用した配合ともにフライアッシュ置換率が大きくなるほど長期強度の伸びが大きくなった。これはフライアッシュのポゾラン反応による影響だと考えられる。

普通骨材を用いた配合の圧縮強度と再生骨材を用いた配合の圧縮強度の比較では、普通骨材を用いた配合の圧縮強度が大きくなっており、従来のコンクリートと同様な結果となっている。フライアッシュ置換率が大きくなるほど普通骨材を用いた配合と再生骨材を用いた配合の圧縮強度の差は小さくなる傾向となり、N70 および R70 では R70 の方が圧縮強度は大きくなっている。ポーラスコンクリートの圧縮強度は、使用した骨材の違いよりも、フライアッシュ置換率の増大によるセメントペーストの影響が大きいことが考えられる。N70 および R70 でも材齢 28 日で 8MPa 程度であり、材齢 91 日で 10MPa を超えない可能性があるため、本試験ではフライアッシュ置換率 60%に下げることにした。

## 4. 本試験結果と考察

### 4.1 空隙率

図-5 にフレッシュコンクリートの空隙率の試験結果を示す。全空隙率はすべての配合で目標とした 20%前後になっている。連続空隙率は、全空隙率に比べてすべての配合 4～5%ほど小さくなっている。この原因は 2 つ考えられる。1 つ目は、連続空隙率は試料を詰めたエアメータに水を入れて測定する。エアメータの側面および底面と試料の間に独立空隙ができるために連続空隙率が小さくなったと考えられる。2 つ目は、エアメータに水を入れた時、空気は上面しか出ることができないので、詰まって出られない空気があると考えられる。

図-6 に硬化コンクリートの空隙率の試験結果を示す。すべての配合で連続空隙率および全空隙率はほぼ同じ値となっている。これは従来の結果と同様である<sup>5)</sup>。

フレッシュコンクリートおよび硬化コンクリートの空隙率は値が違うものの、同様の傾向となっている。これは、締固め時に体積比で同じエネルギーを与えているが、円柱供試体型枠の底面および側面の面積はエアメータの底面および側面の面積よりも体積比で大きいため、せき板効果によりフレッシュコンクリートの空隙率よ

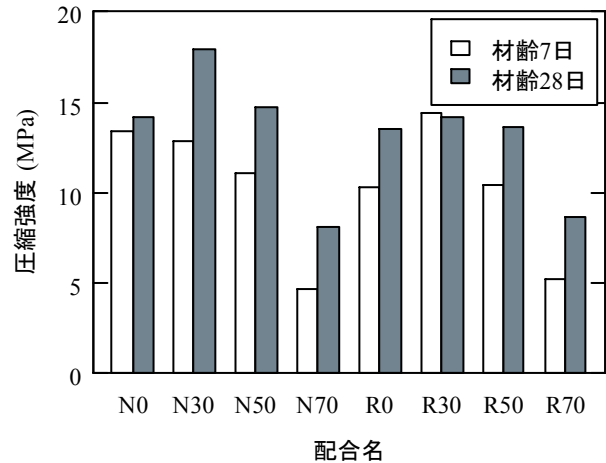


図-4 圧縮強度（予備試験）

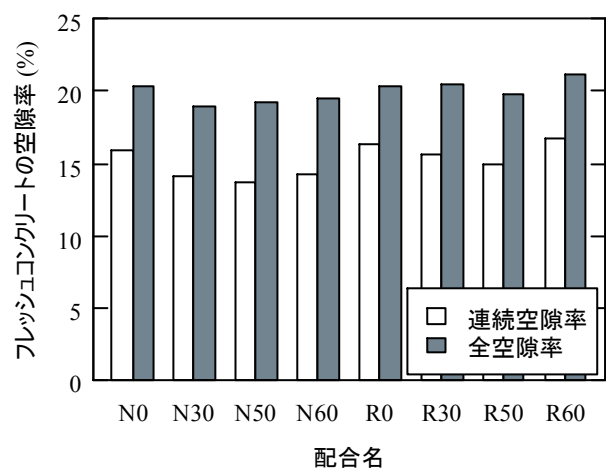


図-5 フレッシュコンクリートの空隙率

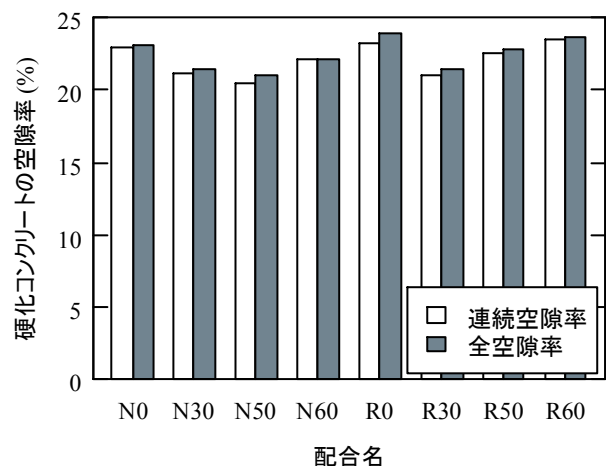


図-6 硬化コンクリートの空隙率

りも硬化コンクリートの空隙率が大きくなったと考えられる。

### 4.2 圧縮強度

図-7 に材齢 7 日、28 日および 91 日の圧縮強度の試験結果を示す。予備試験と同様の結果となっている。

N60 と R60 の結果および図-4 の予備試験の N70 と R70 の結果から、フライアッシュ置換率が 60%以上のポーラスコンクリートの圧縮強度は、骨材の違いによる影響はほとんど見られないことが考えられる。

N60 および R60 でも 10MPa を超えており、再生骨材およびフライアッシュ置換率 60%の多量のフライアッシュを使用したポーラスコンクリートでも植生重視の護岸で使用できると考えられる。

#### 4.3 静弾性係数

図-8 に材齢 28 日の静弾性係数の試験結果を示す。N30 が最も大きい値となっている。これは圧縮強度と同じ結果である。フライアッシュ置換率が 50%の N50 および R50 は、フライアッシュ置換率が 0%の N0 および R0 よりも大きく、R50 は再生骨材で最も大きい値となっている。圧縮強度と同様に、フロー性状の違いが静弾性係数に影響しているのではないかと考えられる。

#### 4.4 曲げ強度

図-9 に材齢 28 日の曲げ強度の試験結果を示す。R50 を除きフライアッシュ置換率が大きくなると曲げ強度

は小さい値となっている。またフライアッシュ置換率 60%を除き再生骨材を使用した配合の曲げ強度は、普通骨材を使用した配合の曲げ強度より小さくなっている。これは従来のコンクリートと同様な結果となっている。R60 は N60 よりも曲げ強度が大きくなっている。これは圧縮強度の試験結果と同様にフライアッシュ置換率が 60%までになると普通骨材と再生骨材の差よりもセメント使用量の影響が大きいものと考えられる。

#### 4.5 アルカリ溶出試験

図-10 にアルカリ溶出試験結果を示す。全ての配合で pH は材齢とともに減少している。材齢 28 日では pH11 程度の強アルカリ域にある。材齢 91 日ではすべての供試体で pH11 を下回った。普通骨材の pH はフライアッシュ置換率が大きくなるほど減少している。これは一般的にフライアッシュの pH はセメントの pH より小さいためにセメント使用量が小さくなると pH も小さくなったと考えられる。再生骨材の pH ではフライアッシュ置換率による差はほとんどない。再生骨材に付着している元コンクリートのセメントペーストのアルカリの影響と考

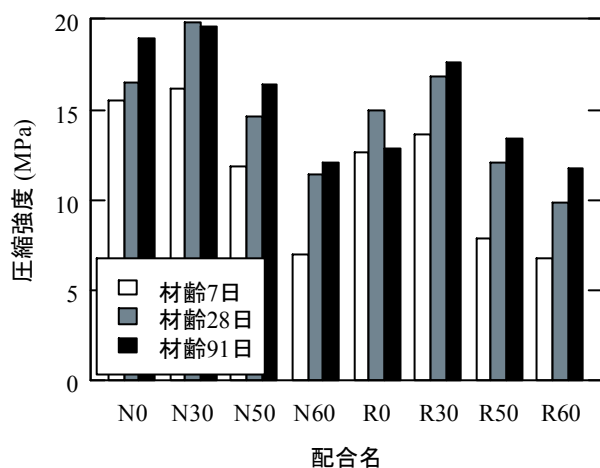


図-7 圧縮強度

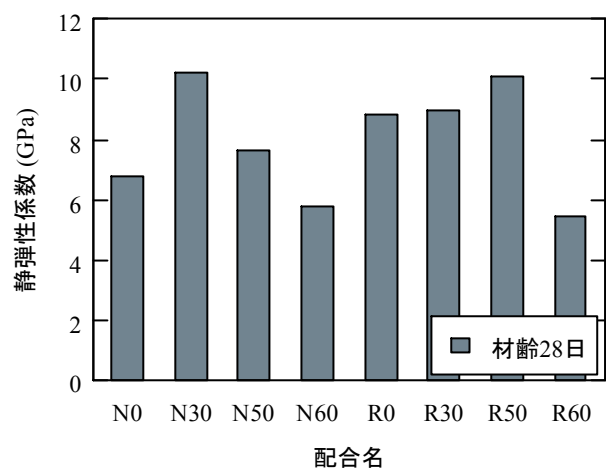


図-8 静弾性係数

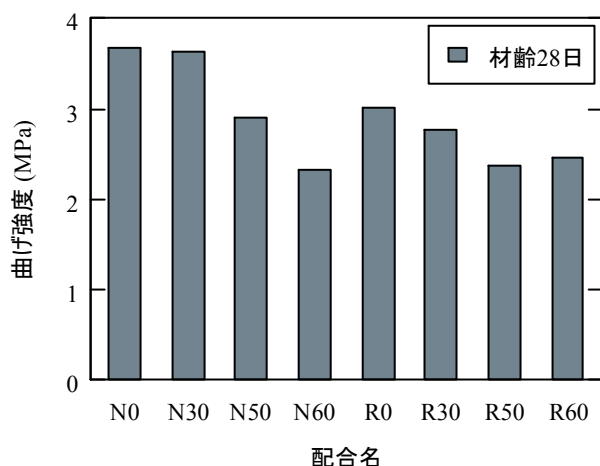


図-9 曲げ強度

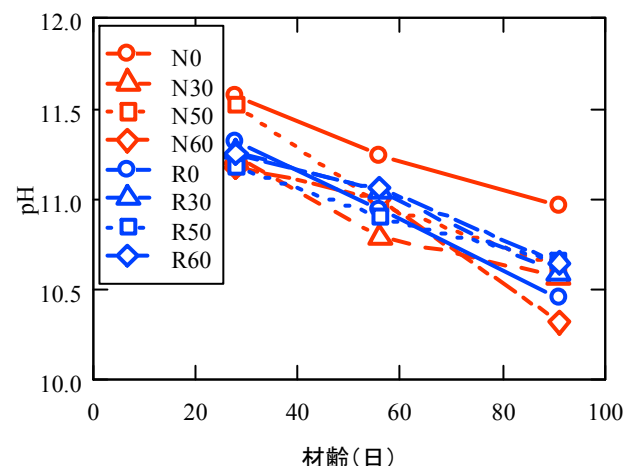


図-10 アルカリ溶出試験

えられるが今後の検討課題である。

## 5. まとめ

本研究では、再生骨材と多量のフライアッシュを使用したポーラスコンクリートの調査し、圧縮強度、静弾性係数、曲げ強度、アルカリ溶出について検討を行った。以下の結果を得た。

- (1) フライアッシュ置換率が 60%以上のポーラスコンクリートの圧縮強度は、骨材の違いによる影響はほとんど見られないことが考えられる。
- (2) 再生骨材を用い、フライアッシュ置換率 60%のポーラスコンクリートで 10MPa を超え、植生重視の護岸で使用できると考えられる。
- (3) フライアッシュ置換率 50%までのポーラスコンクリートは、フライアッシュを使用していないポーラスコンクリートと比べて静弾性係数は大きくなった。

## 参考文献

- 1) 国土交通省，平成 17 年度建設副産物実態調査結果について：  
<http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/region/recycle/pdf/fukusanbutsu/jittaichousa/H17sensus.pdf>
- 2) (社) 日本コンクリート工学協会，JCI 規準集 (1977～2002 年度)，pp.578-588，2004.4
- 3) 台形 CSG ダム技術資料作成委員会，台形 CSG ダム技術資料， pp.36-37，2003.11
- 4) (社) 土木学会四国支部 四国における産業副産物を利用した環境保全型護岸等の調査研究委員会，石炭灰を利用した環境保全型河川護岸に関する手引き (案)，pp.150-151，2009.11
- 5) 本田陵二ほか：ポーラスコンクリートの乾湿繰り返し抵抗性に関する一検討，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.28，No.1，pp.1421-1426，2006.7