論文　再生骨材 RC40 を使用したポーラスコンクリートの試作

遠藤　典男[*1]・丸山　健太郎[*2]

要旨：本文は，市販されている最大寸法が 40(mm)の再生骨材の，粗骨材とともに細粒分の細骨材も使用したポーラスコンクリート（PoC）を作製するにあたり，細粒分に含まれる土の混合割合が細骨材の密度，モルタルと PoC の性状，強度に与える影響に対して考察した。モルタルに混合した土は，粘土とシルトを含む砂であり粘着力を有しているため，土の混合割合が増加するのに伴いモルタルの流動性は低下するが，圧縮強度の変化は小さい。モルタルの流動性低下に起因し，PoC のモルタルは塊状となり，主として粗骨材表面へのモルタル付着が不十分なことにより，土が混合されていない PoC の強度に比し，半分程度に減少した。

キーワード：ポーラスコンクリート，再生骨材，土混合モルタル

1. 緒　言

わが国において，コンクリート構造物が解体され発生するコンクリート塊の再資源化率は 99%を上回り，その多くがリサイクルコンクリート材（以下 RC 材と記す）として道路の新設工事や拡幅工事の際の路盤材に適用されたり，一部は埋め戻し材として適用されている。しかしながら，財政的見地や社会的要望の変化から，今後は道路の新設工事が減少すると予想され，RC 材の需要は減少すると考えられる。一方，高度経済成長期に建設されたコンクリート構造物の老朽化に伴う解体により廃コンクリートが発生し，大量の RC 材が生産されると予想される。

このような見地から，RC 材の利用拡大を目的に様々な取り組みがなされており，RC 材をコンクリートの粗骨材として利用する際の JIS 規格も制定された。しかしながら，制定された JIS 規格においては，RC 材をコンクリートの粗骨材として利用する場合，原コンクリートの品質，RC 材表面の凹凸除去，等の詳細な規定，さらにはレディミクストコンクリート製造工場やコンクリート二次製品製造工場において RC 材を使用する場合には新たなストックヤード確保の必要，等の問題があり，路盤材以外の需要は増加していないのが現状である。

現在，RC 材を路盤材として使用する場合，「舗装再生便覧」[1)]において最大粒径が 40(mm)，30(mm)，20(mm)の粒度調整がなされた 3 種類に対しては種々な規定がなされている。ここで，「舗装再生便覧」では，粒径の大きい粗骨材に対しては密度，吸水率，擦り減り量，修正 CBR95%値，不純物などに対しては規定されており，5(mm)ふるいを通過する細粒分に対しては，その質量割合，塑性指数，等が規定されている。また，RC 材を路盤材や埋め戻し材として使用する場合，20～40(mm)程度の粗い粒径の粗骨材から，細かい粒径のコンクリート小片や土等が混在していたほうが，単位容積質量が大きくなり，締め固めた際に密度が大きくなる。さらに，RC 材において 5(mm)ふるいを通過するような細粒分は，RC 材の製造過程のみ考えると解体時や破砕段階で発生する微細なコンクリートの小片が多いと考えられるが，RC 材の細粒分は，コンクリートの小片に加え，少なくない量の土が混合される場合も多い。この土は，構造物の解体時にコンクリートに付着，あるいは解体材とともに重機で運搬されたもの，さらには RC 製造会社内での作業時や移動時に混合されたもの等，種々な場所で種々な土が混合される可能性がある。ここで本文において，土粒子と有機物等が混合されたものを総称して土と記し，コンクリート小片と比較的粒径の大きい砂の両者が混合されたものをコンクリート小片と記す。

このような見地から，本研究では要求強度の小さいポーラスコンクリート（以下 PoC と記す）の材料として，現状において下層路盤の材料として最も使用量が多く，一般的に広く流通されていると考えられる，最大粒径が 40(mm)で粒度調整された RC 材（以下，RC40 材と記す）を対象とし，PoC への適用を検討する。現在流通している RC 材は，路盤材料として使用するにあたっての JIS が規定されているが，これを用いて PoC を作製するには 5(mm)ふるいを通過するような細粒分が多すぎる。このため，市販の RC40 材を粒度調整し，細粒分を減量することで，RC 材の細粒分もモルタルの材料として使用し，PoC を作製することができるのではと考えた。

*1 長野工業高等専門学校　環境都市工学科　(正会員)
*2 長野工業高等専門学校　技術支援部　(正会員)

RC 材を使用し PoC を作製する先行研究としては，5(mm)ふるいに残量するような粒径の大きい粗粒分のみを使用し，主として強度特性を評価したものが報告されている[2)~5)]。そこで，本研究は 5(mm)ふるいに残留する大粒径の骨材に加え，通過するような細粒分をも含めた RC 材を使用し PoC を作製し，細粒分の組成（土と微細なコンクリートの小片の混合割合）が強度と流動性に対する影響評価を目的とする。ここで，セメントと土を混合し軟弱地盤の改良や道路路盤に用いる技術は既に確立されて実用化されているが，このような場合，土の強度向上を目指すものであり，土に比し僅かなセメントを混合するのみである。一方，PoC の結合材として用いるモルタルは，一般に要求強度が大きく，また，土，あるいは細粒分はセメントの質量の 2～3 倍程度まで混合する場合がある。このため，セメントと水，および土，コンクリート小片を混合した場合，特に粘性土が混合された場合のモルタルと PoC の性状と強度は不明確であり，土の混合割合とモルタルの流動性と圧縮強度を評価した後，PoC の性状と圧縮強度に対して考察する。

市販されている RC40 材を適用し，細粒分の一部を減量し，PoC を作製することで，コンクリート製造工場において新たな設備投資をすることなく RC 材の用途拡大と利用推進が期待できると考えられる。

2. 使用した RC 材の物理諸量に関する考察

2.1 購入した RC 材について

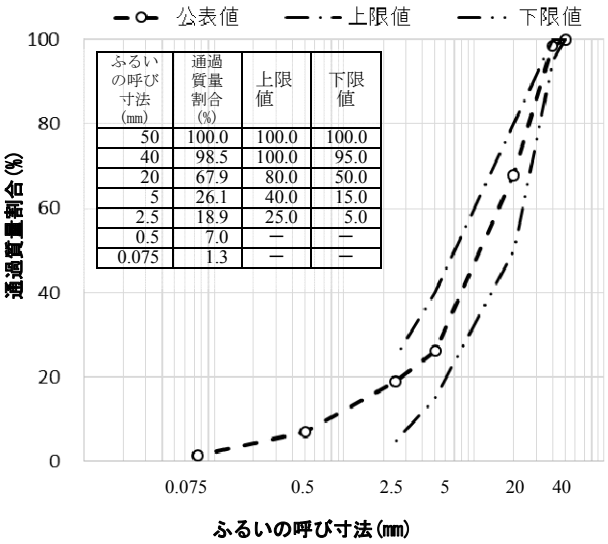
図－1 に PoC を作製するため製造販売会社にて購入した RC 材を示す。先述したように，細粒分にはコンクリート小片に加え大量の土が含まれていることが確認できる。販売会社に確認したところ，購入した RC 材は長野県において，再生砕石等に対する建設資材の材料一括承認を得ており，その多くは下層路盤材に適用されている，とのことであった。

表－1 に RC 材の物理諸量を（表中に試験で準拠した JIS 番号も記す），**図－2** にふるい分け試験結果（JIS A1102 に準拠）より得られた粒度加積曲線を示す。**表－1** で記した公表値と**図－2** に記す粒度加積曲線は，RC 材製造販売会社が長野県に対して再生砕石等の建設資材として一括承認を申請した際の試験結果である。ここで，**表－1** には筆者らが確認のために実施した試験結果を計測値として併記する。同表において密度試験は概ね公表値と同程度になった。これに対し，後述するように購入した RC 材は，5(mm)ふるい残留分のみを使用するため，単位容積質量と実積率は公表値と計測値が大きく異なっている。このような理由により，PoC の単位量計算で用いる物性値は，**表－1** に示す計測値を適用する。

図－1　使用した RC 材

表－1　RC 材（粗骨材）の物理諸量

試験項目	公表値	計測値
表乾密度[JIS A1109] (g/cm³)	2.37	2.41
絶乾密度[JIS A1109] (g/cm³)	2.22	2.29
吸水率[JIS A1109] (%)	7.0	5.2
単位容積質量[JIS A1104] (kg/l)	1.56	1.31
実積率[JIS A1109] (%)	70.3	57.2
5(mm)ふるい通過分[JIS A1102] (%)	26.1	－
擦り減り減量[JIS A5001] (%)	30.8	－



ふるいの呼び寸法(mm)	通過質量割合(%)	上限値	下限値
50	100.0	100.0	100.0
40	98.5	100.0	95.0
20	67.9	80.0	50.0
5	26.1	40.0	15.0
2.5	18.9	25.0	5.0
0.5	7.0	－	－
0.075	1.3	－	－

図-2　公表値の粒度加積曲線

図－2 内に記す表における上限値と下限値は，最大粒径が 40(mm)の再生砕石として望ましい粒度の範囲を「舗装再生便覧」より抜粋しプロットした値である。**表－1** において，5(mm)ふるい通過分は全 RC 材質量の 26.1(%)と多量の細粒分が含まれていることがわかる。ここで，購入した RC 材は全質量に対する，5(mm)ふるいを通過する細粒分の質量割合が非常に多いため，この材料をそのまま使用して PoC を作製する場合には，配合を工夫しても PoC として機能し得るような空隙が得られないと判断した。また，**図－2** に示される RC 材の上限値を鑑みるに，下層路盤材へ使用する場合，さらに細粒分が多い

RC 材も適用できることになる。ここで，5(mm)ふるい通過する細粒分の粒度分布に関して，RC 材の全質量に対して 5(mm)ふるい通過 2.5(mm)ふるい残留分は 7.2(%)であり，2.5(mm)ふるい通過分は 18.9(%)である。したがって，5(mm)ふるいを通過する細骨材の全質量に対して，後者のような細粒分は 72.4(%)にも達していることになる。このように RC 材の，特に細骨材に細粒分が多いことに起因し，PoC の作製に際してはモルタルの性状変化を評価する必要があると考えた。

一方，確認のためのふるい分け試験において，5(mm)ふるい通過 2.5(mm)ふるい残留分の全てがコンクリート小片であり，2.5(mm)ふるい通過分はコンクリート小片と土が混合していることがわかった。

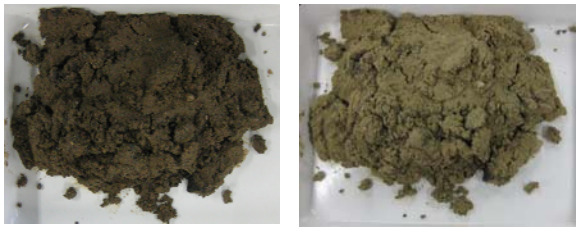
以上のことを勘案し，購入した RC 材のうち 5(mm)ふるい残留分を粗骨材として PoC の作製に使用した。また，モルタルに対する細粒分の組成の影響を評価するため，事前に 2.5(mm)ふるいを通過する細粒分に関して，コンクリート小片と土の混合割合を後述する割合で変化させ，細粒分の密度とモルタルの流動性，圧縮強度を評価したうえで PoC を作製する。

2.2 PoC 作製に使用した細骨材について

細骨材に混合した土を**図-3** に示す。同図(a)は湿潤状態であり，(b)は絶乾状態である。この土は，長野高専グランドにて採取した土であり，土採取時における触感では，湿潤状態では粘性を有し，乾燥状態では堅固に硬化する土と感じられた。この土の工学的性状を把握するため，土粒子の密度（JIS A1202 に準拠），土の粒度（JIS A1204 に準拠），および土の液性限界・塑性限界（JIS A1205 に準拠）を測定した。その結果，土粒子の密度は 2.683(g/cm^3)，塑性限界 w_P=20.6(%)，液性限界 w_L=30.2(%)，塑性指数 I_p（=w_P-w_L）=9.6(%)であった。また，**図-4** に粒径加積曲線を示す。上記の物性値測定結果，および**図-4** より使用した土は砂が 70.6(%)を占めており砂に分類される [6]ことになるが，粘土とシルトが 24.6(%)を占めることから湿潤状態では粘性も有することになる。

さらに，土の pH がセメントと水の水和反応に影響を与えることが懸念されたため，以下の方法で pH を計測した。すなわち，200(g)の蒸留水に 2.5(mm)ふるいを通過した土 200(g)を混合し，24 時間経過後に pH を計測した。その結果，pH は 8.4 と弱アルカリ性の土であり，モルタルに混合した場合でも水和反応に影響を与えることはないと判断した。

表－2 に細骨材密度とモルタルの流動性を評価するために使用した，コンクリート小片と土の含有割合を変化させた 6 種類の細骨材の絶乾状態の質量を示す。一般的なコンクリートに使用する骨材の質量の基準は表乾状態であるが，土ではこのような概念が無いために絶乾状態の質量を記した。同表において，5(mm)ふるい通過 2.5(mm)ふるい残留分を細骨材 S_1 とし，2.5(mm)ふるい通過分を細骨材 S_2 とした。2 種類の細骨材 S_1，S_2 の混合割合は，**図－2** に示されるように 5(mm)ふるいを通過する全質量に対して，5(mm)ふるい通過 2.5(mm)ふるい残留分が 27.6(%)，2.5(mm)ふるい通過分が 72.4(%)であることから，この割合と乖離しないよう，細骨材 S_1 を 25.0(%)，細骨材 S_2 を 75.0(%)とした。細骨材 S_1 に関しては，筆者らが購入した RC 材に対して実施したふるい分け試験結果から，全てがコンクリート小片であったので，ふるい分け試験後の試料をそのまま使用した。細骨材 S_2 はふるい分け試験において，コンクリート小片と土の混合物であり，土と RC 材の混合割合が不明である。このため，両者の混合割合が既知となるよう，土の混合割合を細骨材 S_2 の全質量に対する混合した土の質量割合とし，同表に示すように 20(%)刻みで変化させた。



(a) 湿潤状態　　(b) 絶乾状態

図-3　モルタルに混合した土

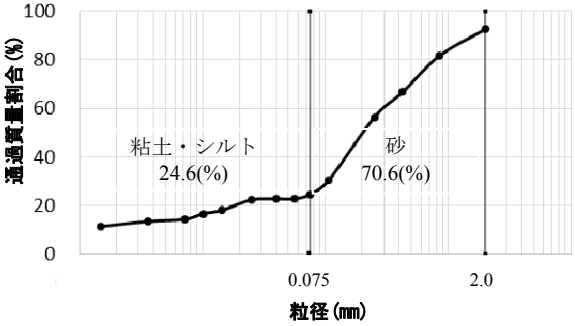


図-4　土の粒径加積曲線

表－2　細骨材の粒度

種類	細骨材 S_1(g) 5(mm) ～ 2.5(mm)	細骨材 S_2 2.5(mm) ～ 0(mm)	
		RC 材(g)	土(g)
S-0	1,250	3,750 (100%)	0 (0%)
S-20	1,250	3,000 (80%)	750 (20%)
S-40	1,250	2,250 (60%)	1,500 (40%)
S-60	1,250	1,500 (40%)	2,250 (60%)
S-80	1,250	750 (20%)	3,000 (80%)
S-100	1,250	0 (0%)	3,750 (100%)

図-5 に表-2 で記した細骨材 S-0～S-100 の表乾密度と絶乾密度を示す。密度は，JIS A1109 に準拠して試験を行った。密度試験に当たり，土に粘着力を有するような粒径の小さい成分が含まれていることから，特に土の混合割合が多い細骨材では，表乾状態の判断が難しいと予想した。しかしながら，混合した土の主成分が砂であったこと，さらに細骨材 S_1 も混合されていたことで，表乾状態を判断することができたと考えられる。同図において，土粒子の密度が細骨材 S_1 とコンクリート小片の密度より大きいことから，土の混合割合の増加に伴い，表乾密度，絶乾密度も大きくなっている。また，各細骨材において表乾密度と絶乾密度の差を比較すると，概ね 0.1(g/cm^3)程度であった。このため，モルタル，PoC 作製時において特にコンクリート小片のひび割れ等の微視的構造の相違による影響が小さく，配合時には密度の相違のみを考慮すれば良いと考えた。

3 モルタルの性状，強度

表-3 にモルタルの配合を示す。同表中，モルタル種類の下に表-2 で記した細骨材の種類(S-i)を示した。ここで，(S/C)はセメント(C)に対する細骨材(S)の質量割合で表される細骨材粉体比あり，事前の研究成果[8]と予備実験より，(S/C)が 2.0，水セメント比(W/C)が 40(%)程度であると，細骨材の性状によりモルタルの流動性が変動しても，PoC の作製が可能な配合となることが検証されていたため，モルタルと PoC の作製は同表に示す値を用いた。なお，使用した水(W)は水道水(水の密度：ρ_w=1.00(g/cm^3))を，セメントは普通ポルトランドセメント(セメントの密度：ρ_c=3.15(g/cm^3))を用いた。練り混ぜにあたって，表－3 に示す細骨材は絶乾状態で混合し，水を十分に吸水させた状態で 24 時間以上静置する。モルタルの各材料を混合するのに先立ち，JIS A1111 に準じて細骨材の表面水を測定し，水量の補正を行った後，練り混ぜを行った。練り混ぜは手練りで行い，フロー試験実施後，型枠に 2 層に分けて充填し，突き棒で各層 15 回ずつ締め固めた。

図-6 に 15 打フロー値を示す。フロー値の測定は JIS R5201 に準拠し測定した。土の混合割合が増加するのに伴いフロー値は斬減しており，土の混合割合が 100(%)のモルタルは，試験前後で形状が変化しないような著しく硬いモルタルとなった。表－3 に示すモルタルの配合では，土の混合割合が 80(%)と 100(%)では，細骨材の単位量は大差ないが，後者は細骨材 S_2 中に小粒径の RC 材が混合されていないことに起因し，混合した土に含まれる微細な粒子である粘土とシルトの粘着力が卓越することで，流動性が著しく小さくなると考えられる。

図-7 に土の混合割合を変化させたモルタルの圧縮強度を示す。モルタルの圧縮強度は，JIS A1108 に準拠し，

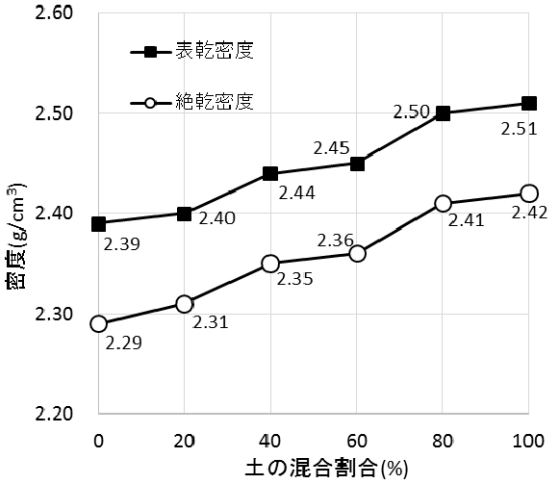


図-5　細骨材の密度

表－3　モルタルの配合

種類	(W/C) (%)	(S/C)	単位量(kg/m^3)		
			W	C	S
M- 0 (S-0)	40	2.0	257	643	1287
M-20 (S-20)	40	2.0	258	645	1290
M-40 (S-40)	40	2.0	260	651	1301
M-60 (S-60)	40	2.0	261	652	1304
M-80 (S-80)	40	2.0	264	659	1318
M-100 (S-100)	40	2.0	264	660	1321

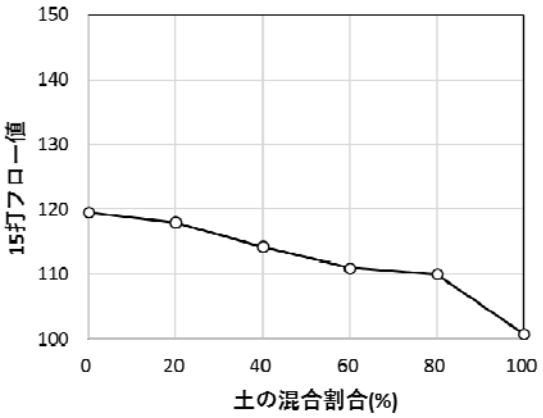


図-6　15 打フロー値

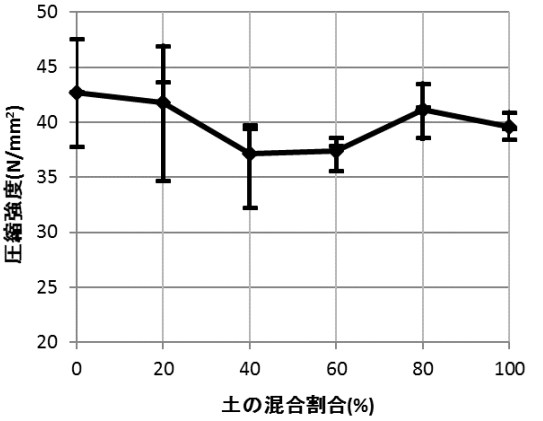


図-7　モルタルの圧縮強度

表－4　PoC の配合

種類	粗骨材最大寸法 (mm)	(W/C) (%)	(P/G)*1 (%)	(V_a/V)*2 (%)	(S/C)	単位量(kg/m³)			
						水 W	ｾﾒﾝﾄ C	細骨材 S	粗骨材 G
P-0 (M-0)	40	40	28.2	25	2.0	46	114	229	1,379
P-20 (M-20)	40	40	28.3	25	2.0	46	115	230	1,379
P-40 (M-40)	40	40	28.5	25	2.0	46	116	231	1,379
P-60 (M-60)	40	40	28.6	25	2.0	46	116	232	1,379
P-80 (M-80)	40	40	28.9	25	2.0	47	117	234	1,379
P-100 (M-100)	40	40	29.0	25	2.0	47	118	235	1,379

*1　粗骨材 G に対するモルタル P の質量割合

*2　全体積 V に対する空隙体積 V_a の体積割合

直径 50(mm)，高さ 100(mm)の円柱供試体を用い，標準養生した後，材齢 28 日における強度である。モルタルの強度に関しては，水セメント比が 40(%)であること，セメントに対する細骨材の混合割合(S/C)が 2.0 であり，比較的細骨材量が少ないモルタルではあるが，土の混合割合が増加しても若干の強度低下が生じるのみであり，有意な差ではないと判断した。なお，モルタルの配合 M-0～M-40 で作製した供試体の圧縮強度はばらつきが大きいが，これは細骨材 S_2 に混合したコンクリート小片においてモルタル片と小石の混合割合や粒径分布の相違の影響が，配合 M-60～M-100 で作製したものに比し大きくなったとと思われる。また，配合 M-60～M100 で作製した供試体表面には，後述する空隙の存在を確認した。

ここで，**図-6**，**図-7** の結果より，PoC の作製に適したフロー値[7]が 130 程度であること，圧縮強度も全ての種類の細骨材を使用した場合でも 40(N/mm²)程度が得られており，PoC の作製が可能であると判断し，モルタルは**表-3** に示す配合を用いた。

4 PoC の作製と性状，強度

表-4 に PoC の作製に用いた配合を示す。同表中，配合種類の下に，**表-3** で記したモルタルの配合種類(M-i)を示した。同表に示すように，粗骨材最大寸法が 40(mm)と粒径が大きいことに起因し，設計空隙率(V_a/V)を 25(%)とした。また，参考文献 7)より，空隙率が 25(%)で水セメント比が 30(%)の場合に圧縮強度が 10(N/mm²)程度であり，表-4 に記す配合の水セメント比が 40(%)であることから，予想圧縮強度を 7(N/mm²)とした。

図-8 に PoC の性状を示す。練り混ぜ時における粗骨材の磨り減りの影響を避けるため，PoC 供試体は全て手練りで作製した。締め固めは，型枠に 3 層に分けて打設し，各層ごと 15 回突き棒で締めた固めた後，最上面に木製板を敷き，型枠バイブレータで 15 秒間振動させた。同図(a)は配合 P-0 で作製された供試体であり，この配合は細骨材 S_2 が全てコンクリート小片で，全く土が混合されていない細骨材を使用して打設したものである。この配合は PoC の作製に適すると考えられるフロー値であったため，モルタルが粗骨材全面に付着するとともに，粗骨材の間にも適度な空隙の存在が確認できる。一方，同図(b)は細骨材 S_2 が全て土である細骨材を使用した配合 P-100 を用いて作製した PoC である。同図(b)に示すように，粗骨材の間の空隙に塊状のモルタルが存在しており，塊上のモルタル中にも空隙が確認でいる。これは，**図-6** に示されるようにモルタルの流動性が小さいことに起因し，粗骨材に表面には十分付着しないことで，塊状のモルタルが形成されたと考えられる。

(a)　配合 P-0　　(b)　配合 P-100

図-8　PoC の性状

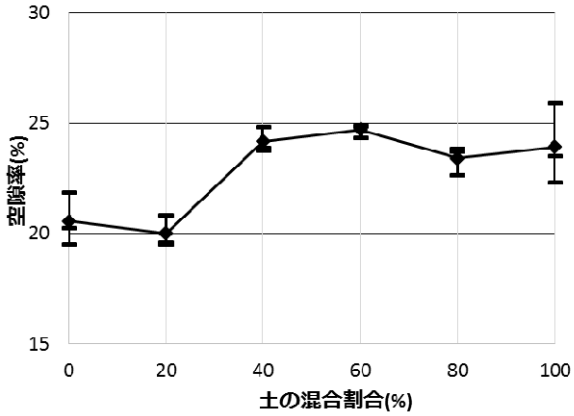


図-9　空隙率

図-9 に PoC 供試体の全空隙率を示す。PoC の空隙は参

考文献 7)に準じて計測した。同図において，土の混合割合が 0(%)，20(%)の配合 P-0，P-20 で作製された供試体の空隙率は，設計空隙率よりも 5(%)程度小さくなってしまったが，これは練り混ぜと締め固めの際に粗骨材の凸部が削られモルタル分が増加した影響と思われる。一方，土の混合割合が 40(%)以上の配合 P-40～P-100 で作製された供試体では，ほぼ設計空隙率となっている。しかしながら，PoC の締め固め方法が全ての供試体で同一であるため，これらの供試体も先述の配合で作製した供試体と同程度の空隙となると考えられるが，**図-8(b)**で確認できるように，モルタル塊に存在する空隙，および粗骨材とモルタルの間で十分な付着がなされなかったことにより空隙率が大きくなったと考えられる。なお，本文では土の混合割合が配合 P-20～P-100 の供試体に対する写真は割愛したが，配合 P-40～P-80 で作製した供試体は，土の混合割合が増加するのに伴い，同様な現象が顕著に現れるようになった。

図-10 に各配合で作製された PoC 供試体の圧縮強度を示す。PoC の圧縮強度は，JIS A1108 に準拠し，直径 125(mm)，高さ 250(mm)の円柱供試体の上部のみをペーストキャッピングし，標準養生した後，材齢 28 日における強度である。**図-9** に示したように，土の混合割合が 0(%)，20(%)である配合 P-0，P-20 で作製した供試体は設計空隙率よりも小さな空隙率ではあるが，5.5(N/mm^2)程度の圧縮強度となり，予想圧縮強度（7(N/mm^2)）よりも小さな値となった。一方，配合 P-100 で作製した供試体では配合 P-0，P-20 で作製した供試体の半分程度の圧縮強度であった。これは，土の混合割合に依存せず，モルタルの圧縮強度が 40(N/mm^2)程度を有していたことから，PoC の圧縮強度の低下は，先述したように流動性の低下に起因した粗骨材表面へのモルタル付着が不十分なことが大きく影響したと考えられる。さらに，破壊性状に関しては，圧縮強度が比較的大きい配合 P-0，P-20 で作製した供試体は，圧縮試験において最大荷重を示した後も原型を留めており，粗骨材とモルタルの接触面にひび割れが発生したことにより破壊したと考えられる。これに対し，配合 P-80，P-100 で作製した供試体では，最大荷重を示した後，一気に崩壊しており，モルタルと骨材の接触が不十分なことが破壊性状にも影響を与えたと考えられる。

5 結　言

本研究は，市販されている最大寸法が 40(mm)の再生骨材において，粗骨材に加え再生骨材に混合される細粒分を細骨材として使用した PoC を作製するにあたり，土の混合割合がモルタルと PoC の性状，強度に与える影響に対して考察するものであり，得られた知見を以下に記す。

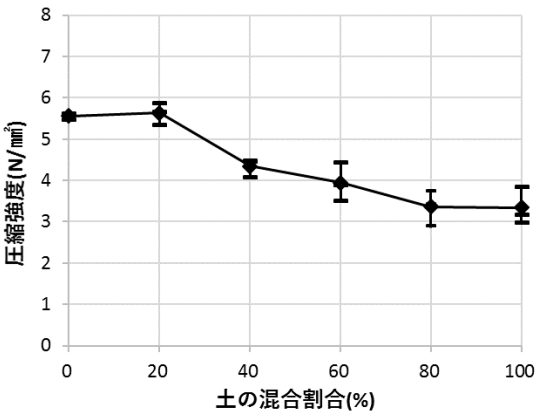


図-10　PoC の圧縮強度

モルタルに混合した土は，粘土とシルトを含む砂で粘着力を有しているため，土の混合割合が増加するのに伴いモルタルの流動性は低下するが，圧縮強度の変化は小さい。モルタルの流動性の低下に起因し，PoC のモルタルは塊状となり，粗骨材との表面へのモルタル付着が不十分となり，土が混合されていない PoC の強度の半分程度に減少した。

最後に，土の物性値を計測する実験において貴重なご助言と実験指導をしていただいた，長野高専の松下英次博士と塚田千夏技術職員の両氏に深甚なる謝意を表する。

参考文献

1) 日本道路協会編：舗装再生便覧，丸善出版，2010
2) 添田，大和，江本：ポーラスコンクリートへの再生骨材の適用性に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.20，No.2，pp.1117-1122，1998
3) 音野，国枝，古川，六郷：低品質再生骨材を用いたポーラスコンクリートの力学的特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.1，pp.1149-1154，2002
4) 小畠，梶尾，佐藤，大森：再生骨材を使用した舗装用ポーラスコンクリートに関する研究，土木学会第 57 回年次学術講演会，V-231，2002
5) 畑中，湯浅，三島：再生骨材を用いたポーラスコンクリートの圧縮強度性状に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文集，第 570 号，pp.31-36，2003
6) 地盤工学会編：土質試験の方法と解説，地盤工学会，2000
7) 日本コンクリート工学協会：ポーラスコンクリートの設計・施工法の確立に関する研究委員会，(社)日本コンクリート工学協会，2003
8) 例えば　丸山，遠藤，塩原：再生骨材 RC40 を用いたポーラスコンクリート作製における土試料混入の影響，長野工業高等専門学校紀要，第 50 号，pp.1-10，2016