

論文 有機物含有量の高い土壌を細骨材に用いたモルタルの力学的特性

兵頭 正浩*1・横井 克則*2・藤川 智紀*3・佐藤 周之*4

要旨: 本研究では、有機物含有量の高い土壌を細骨材代替材として用いた際のモルタルの力学的特性について検討した。その結果、フレッシュな状態では、土粒子の粒度と表面張力の影響により、フロー値が小さくなった。細骨材に用いた標準砂の質量に対して、内割りで 10%の有機質土壌と置換した場合は、標準供試体と同様の強度特性を示した。土壌の置換量をさらに増加させた場合、土壌中に含まれる有機酸の影響により強く受けたと考えられ、強度発現は遅れた。しかし、標準供試体と比較して経時的な強度増進が長く続き、材齢 91 日には置換率 20%で標準供試体と同程度の強度を示すことが明らかとなった。

キーワード: 有機物, 有機質土壌, 細骨材代替材, 力学的特性, 強度特性

1. はじめに

建設廃棄物であるコンクリート塊は、建設リサイクル法のもと再生骨材¹⁾や水質浄化資材²⁾など様々な再利用・再資源化方法について検討が鋭意進められている。しかし、同じ建設廃棄物である建設残土については、平成 14 年度に 65.1%の有効利用率を確保しているが、平成 17 年度において 62.9%と、未だにこの再利用・再資源化に関する課題を残している。国土交通省によると、建設残土は「土砂および専ら土地造成の目的となる土砂に準ずるもの」、もしくは「港湾、河川等の浚渫に伴って生ずる土砂その他これに類するもの」と定義されている。建設残土の有効利用率が向上しない主たる理由としては、「土質が受け入れ工事の基準を満足しない」、「工期が搬出側と受け入れ側で一致しない」、「県境を越えた工事間利用が促進されていない」ことが挙げられる。このことから、建設残土の有効利用率を向上させるためには、建設残土の品質向上のみに傾注するのではなく、「適材適所」の考えに応じた効果的な利用方法を検討することが重要といえる。

一方、近畿・中国・四国地方は、これまでに細骨材を瀬戸内海の内海砂に大きく依存してきた。しかし、海砂の採取が瀬戸内海の生態環境に与える影響の深刻化や環境保全促進の観点から、同海近隣の各県は海砂採取を禁止している。この対応として、当該地域では国内の別地域(九州)や国外から輸入した砂を用いていた。しかし、国外のうち、例えば中華人民共和国は、平成 19 年から砂資源の輸出を禁止している³⁾。この背景の下、中国地方では海砂の代替材として真砂土、石灰炭、スラグ、砕砂などの骨材利用の検討を進めてきた^{4,8)}。

例えば服部らの研究によると、真砂土と川砂を配合した場合は、単位セメント量を通常の配合より多くすることでフレッシュ状態および硬化後の物理・力学的特性、凍結融解に対する抵抗性を確保できることを明らかにしている^{9, 10)}。しかしながら、資源の循環利用が広く進められている昨今の状況を鑑みると、真砂土のように粒度が大きいものだけでなく、粒度が標準砂より小さい土壌を細骨材代替材として使用した際の耐久性や力学的特性を含めた諸特性について、あらかじめ評価しておく必要がある。

本研究では、資材の適切な利用の可能性を判断することを目的とし、有機物が多く含まれ、粒度が小さな畑地土壌を細骨材代替材として利用した際のモルタルの諸特性について検討した。評価項目として、減水剤の影響を評価するためにフロー値を、セメントの水和による硬化の影響を評価するために密度を、強度発現特性を評価するために非破壊試験による超音波伝播速度を、そして力学的特性を評価するために破壊試験による圧縮・曲げ強度を測定した。

2. 実験概要

2.1 実験材料

本実験では、セメントの物理試験方法 (JIS R 5201-1997) に準じて作製したモルタル供試体を用いた。表 1 には各供試体の名称と配合を、表 2 には各供試体名称に対応する実施試験の一覧を示す。各試験の評価に応じた供試体を作製するために、標準砂と有機質土壌の配合率を調整した。使用したセメントは普通ポルトランドセメントであり、標準砂は JIS 規格 (JIS R

*1 鳥取大学 農学部助教 博士 (農学) (正会員)

*2 高知工業高等専門学校 環境都市デザイン工学科准教授 博士 (工学) (正会員)

*3 東京農業大学 地域環境科学部助教 博士 (農学) (非会員)

*4 高知大学 農学部准教授 博士 (農学) (正会員)

表－1 各供試体の名称と配合

供試体グループ	供試体名称※	配合 (g)				
		セメント	水	標準砂	有機質土壌	高性能減水剤
標準	SM (0%)	450	225	1350	0	0
A	SM (10%)	450	225	1215	135	0
	SM (20%)	450	225	1080	270	0
	SM (30%)	450	225	945	405	0
B	SM (3.7%-Non AD)	450	225	1300	50	0
	SM (7.4%-Non AD)	450	225	1250	100	0
	SM (11.1%-Non AD)	450	225	1200	150	0
	SM (3.7%-AD)	450	216	1300	50	9
	SM (7.4%-AD)	450	216	1250	100	9
	SM (11.1%-AD)	450	216	1200	150	9

※SMはSoil Mortarを示し、標準およびグループAの()内は標準砂1350gのうち有機質土壌で置換した割合を示す。グループBの内は標準砂1350gのうち有機質土壌で置換した割合と高性能減水剤の有無を示す。

表－2 各供試体で実施した試験名と材齢の一覧

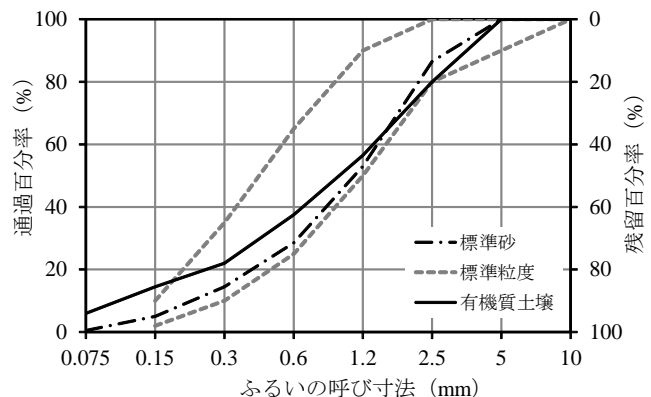
供試体グループ	供試体名称※	試験名			
		フロー	密度	超音波伝播速度	圧縮・曲げ強度
標準	SM (0%)	○	7, 14, 28, 56, 91日	7, 14, 28, 56, 91日	7, 28, 91日
A	SM (10%)	-	7, 14, 28, 56, 91日	7, 14, 28, 56, 91日	7, 28, 91日
	SM (20%)	-	7, 14, 28, 56, 91日	7, 14, 28, 56, 91日	7, 28, 91日
	SM (30%)	-	7, 14, 28, 56, 91日	7, 14, 28, 56, 91日	7, 28, 91日
B	SM (3.7%-Non AD)	○	7, 14, 28日	-	28日
	SM (7.4%-Non AD)	○	7, 14, 28日	-	28日
	SM (11.1%-Non AD)	○	7, 14, 28日	-	28日
	SM (3.7%-AD)	○	7, 14, 28日	-	28日
	SM (7.4%-AD)	○	7, 14, 28日	-	28日
	SM (11.1%-AD)	○	7, 14, 28日	-	28日

※表－1と同様

表－3 有機質土壌の基本的物性値

粗粒率	含水比	強熱減量	土粒子密度
F.M.	(%)	(%)	(g/cm ³)
2.91	15.3	9.76	2.59

5201-1997)に準拠したものを使用した。高性能減水剤は、メラミンスルホン酸系化合物が主成分のものを使用した。有機質土壌は、高知県南国市陣山地区の畑地から採取したものであり、有機質分や団粒の除去および処理は行わず、採取時の状態のものを用いた。本研究で用いた有機質土壌の基本的物性値を表－3に示す。なお、粗粒率は骨材のふるい分け試験 (JIS A 1102-2006)、含水比は土の含水比試験方法 (JIS A 1203-2003)、強熱減量は土の強熱減量試験方法 (JIS A 1226-2009)、土粒子密度は土粒子の密度試験方法 (JIS A



図－1 有機質土壌の粒度分布

1202-2009)に準拠し測定した。既往の研究で用いた真砂土の強熱減量は5%以下であり^{5,6)}、本実験で用いた有機質土壌の強熱減量は9.76%と高いことから、有機物含有量が多いことが確認できる。有機質土壌の土粒

子密度は 2.59 (g/cm³) であり、標準砂の絶乾密度は 2.64 (g/cm³) であることから、単位体積当たりの質量に大差はない。有機質土壌の粗粒率は 2.91 であり、標準砂の粗粒率 3.14 と比較すると、全体的に粒子が細かいことが確認された。また、図-1 に示した粒度分布から、標準砂と比較して 0.15mm 以下の微粒分が多いことが確認できる。

供試体の作製方法は、上述した材料を JIS 規格 (JIS R 5201-1997) に準じて練り混ぜ、モルタル供試体成形用型枠 (40×40×160mm) に充填し、テーブルバイブレータで締め固めた後に成形した。ただし、有機質土壌を高配合としたモルタル供試体は、テーブルバイブレータでの締め固めが困難であったため、供試体成形用型枠に 2 層に分けて詰め、各層を 20~30 回突き固めた後に成形した。その後、湿気箱に 24 時間静置し、脱型した後 20℃一定の恒温水槽内で標準水中養生を行った。試験材齢は、7、14、28、56、91 日を基本とし、材齢 14 日と 28 日および材齢 56 日と 91 日の密度と超音波伝播速度は、同じ供試体を用いて測定した。

2.2 実験方法

表-1 および表-2 に示すように、各種供試体を 3 つのグループに分けた。グループ A は、標準砂を有機質土壌によって内割りそれぞれ 10%、20%、30% と置換した供試体群である。評価項目は、表-3 に示したとおり密度、超音波伝播速度ならびに圧縮・曲げ強度である。グループ B は、高性能減水剤を配合した際の特性を明らかにするための供試体群である。評価項目は、密度、圧縮・曲げ強度、フロー値である。標準とは、グループ A、B と比較するための細骨材置換なしの供試体である。超音波伝播速度は超音波パルス法による固体の音速の測定方法 (JIS Z 2353-2003) に準拠し、密度は粗骨材の密度および吸水率試験方法 (JIS A 1110-2006) を参考に測定した。それ以外の試験については、セメントの物理試験方法 (JIS R 5201-1997) に準拠し測定を実施した。

2.3 測定機器

供試体の圧縮強度および曲げ強度は、コンクリート圧縮試験機を用いて測定した。超音波伝播時間は、時間測定基準が 10kHz、振動子周波数が 50kHz である超音波非破壊試験器を用いて測定した。

3. 結果と考察

3.1 有機質土壌を混入した供試体のフロー値

高性能減水剤の有無がフロー値へ及ぼす影響を評価した結果を図-2 に示す。標準供試体 (0% は AD 未配合) のフロー値は 143.4 であった。SM (3.7%-Non AD) のフロー値は 118.2 となり、SM (0%) と比較して 25.2

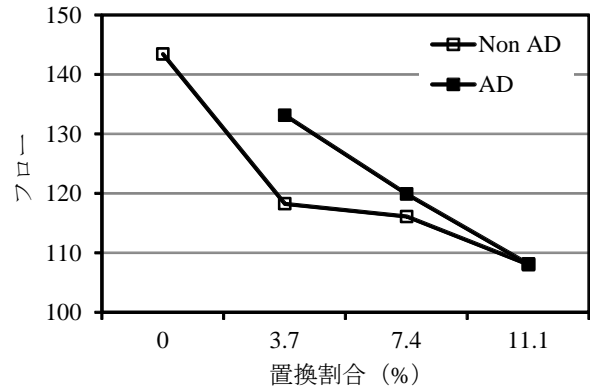


図-2 各供試体におけるフロー値

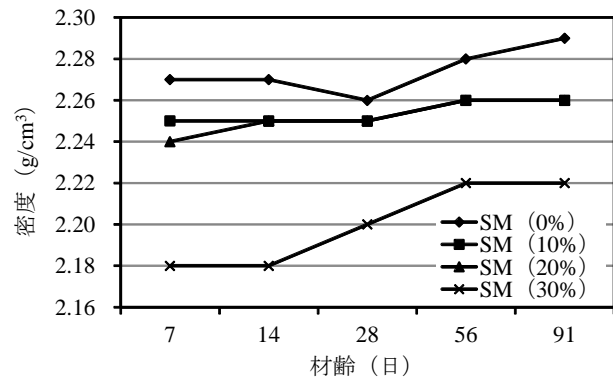


図-3 標準供試体とグループ A の密度の変化

(18%) 減少したことを確認した。また、SM (0%) と SM (6.4%-Non AD) のフロー値を比較すると、SM (6.4%-Non AD) は 27.3 (19%)、SM (11.1%-Non AD) は 35.4 (25%) 減少しており、有機質土壌の置換割合の増加に伴いフロー値が減少する結果となった。これは、置換した有機質土壌の土粒子粒径と表面張力による影響と考えられた。有機質土壌は標準砂と比較して粒度が小さいため、同質量で比較した場合には、比表面積が増加する。そのため、水分子は土粒子表面に吸着され¹⁾、流動性が低下したと推察された。

高性能減水剤の効果を評価するため、同量の有機質土壌を置換した各供試体でフロー値の差を比較した。SM (3.7%-Non AD) と SM (3.7%-AD) では 14.9、SM (6.4%-Non AD) と SM (6.4%-AD) では 3.8、SM (11.1%-Non AD) と SM (11.1%-AD) では 0.1 となり、有機質土壌の置換割合が大きくなるにつれてフロー値の差は小さくなることを確認した。この理由は、本実験で使用した有機質土壌の粒度分布にあると考えられた。使用した土壌は、シルト分および粘土分 (粒径: 0.075mm 以下) が全体の 5.6% を占めることから、高性能減水剤の陰イオンが土粒子に吸着された。その結果、本来であればセメント粒子 (粒径: 0.010mm 程度) に吸着される陰イオンが土粒子に吸着され、有機質土壌の置換量が増加することにより練り混ぜ時のセメントの分散性が低下したと考えられた。

3.2 有機質土壌を混入した供試体の密度変化

標準供試体とグループ A の経時的な密度の変化を図-3に示す。SM (0%) は、材齢 7 日で 2.27g/cm^3 を示しており、材齢 91 日で 2.29g/cm^3 まで増加した。SM (10%) および SM (20%) は、同材齢の SM (0%) と比較して若干小さい値を示しているが、材齢の進行に伴い密度が増加していることが確認できる。材齢 7 日の SM (30%) は、同材齢の他の SM (0%, 10%, 20%) と比較して顕著に密度が小さくなった。この理由は、後述するセメントの水和反応の遅れの影響と考えられた。また、SM (30%) は、SM (0%) の材齢 7 日における密度と比較すると 5% の差 (SM (0%) : 2.27g/cm^3 , SM (30%) : 2.18g/cm^3) が確認できるが、材齢 91 日では 3% の差 (SM (0%) : 2.29g/cm^3 , SM (30%) : 2.22g/cm^3) まで縮まっており、密度の増加率が最も高くなった。この原因は、以下に示すように、有機質土壌に含まれる有機酸の影響によるものと考えられた。本実験で使用した有機質土壌は、畑地で採取されたことから、カルボン酸系やリン酸系などの有機酸が肥料として使用されてきたことが考えられる。これらの有機酸が多量に含まれると、初期水和反応時にセメントの硬化遅延を引き起こす可能性がある。例えば、オキシカルボン酸のような強いキレート力を有する遅延成分は、セメントの水和初期に溶出した Ca^{2+} とキレート化合物 (錯体) を作り、セメント鉱物 (C_3S など) の表面に吸着保護膜を形成して Ca^{2+} の溶出を抑制する。その結果、セメントの水和反応が遅れることが報告されている。ただし、形成された吸着保護膜は、水和反応を完全に阻害するのではなく、保護膜内部でわずかではあるが水和生成物が生成し続け、その膨張圧や水の浸透圧により保護膜が次第に破壊され、抑制されていた水和反応が徐々に進行して硬化に至ると推定されている¹²⁾。現段階では仮定であるが、後述する圧縮・曲げ強度の経時変化においても、同様の現象が生じたと考えられる結果を得ることができた。

標準供試体とグループ B の経時的な密度の変化を図-4に示す。材齢 7 日から材齢 28 日にかけて、各供試体の密度変化量は $\pm 0.1\text{g/cm}^3$ の範囲内となり、大きな変化は認められなかった。この現象は、グループ A の SM (10%) の材齢 7 日から 28 日にかけての密度が 2.25g/cm^3 と一定の値を示していた結果と同じであった。以上の結果から、有機質土壌を少量配合した場合、高性能減水剤は密度に影響を及ぼさないことが分かった。ただし、高性能減水剤によっては有機物と反応し、セメントの分散性が低下する可能性がある。したがって、今後の課題の一つとして、有機質土壌と高性能減水剤の特徴および適応性を的確に把握する必要があると考えられた。

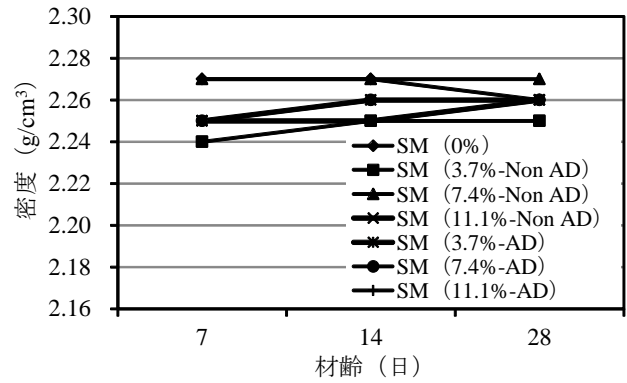


図-4 標準供試体とグループ B の密度の変化

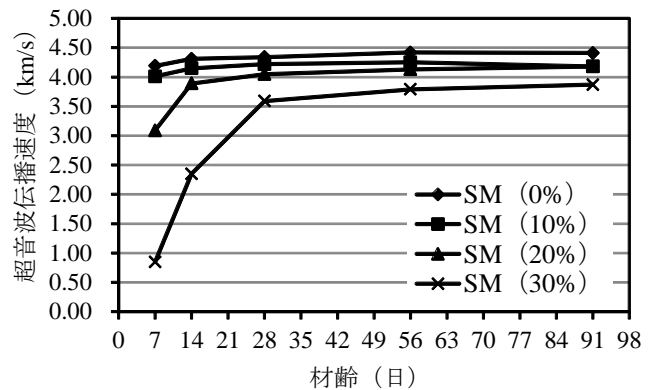


図-5 標準供試体とグループ A の超音波伝播速度の変化

3.3 有機質土壌を混入した供試体の強度発現特性

標準供試体とグループ A の経時的な超音波伝播速度の変化を図-5に示す。すべての供試体で、材齢の進行に伴い超音波伝播速度が増加していることが確認できる。SM (0%) と SM (10%) は材齢 7 日で、それぞれ 4.19km/s , 4.01km/s の値を示しており、コンクリート中の超音波伝播速度が約 4km/s であることを考慮すると、セメントの硬化が十分に進行していると考えられた。SM (20%) は材齢 7 日で 3.09km/s 、材齢 28 日で 3.89km/s となることから SM (0%, 10%) と比較してセメントの硬化が遅れていることが伺えた。ところが、材齢 91 日の値は、SM (0%, 10%) の値とほぼ同程度となっており、強度発現の遅れがほぼ解消されていることが推察できる。一方、SM (30%) では、材齢 7 日で 0.85km/s と極めて小さい超音波伝播速度であったものが、材齢 28 日では 2.35km/s となり、より小さい置換率のものと比較すると小さい値ではあるが、増加量として考えると非常に大きい値を示した。特に特徴的な点としては、材齢 14 日以降も超音波伝播速度が高い増加を示している点であり、材齢 91 日では 3.87km/s となった。

そこで、各供試体の超音波伝播速度の増加比を検討した。各供試体の材齢 7 日の超音波伝播速度を 1 とした場合、SM (0%) は、材齢 14 日で増加比が 1.03 となり、それ以降も同様の値を示し材齢 91 日で 1.05 となった。

SM (10%) ではほぼ同じ増加率であった。SM (20%) は、材齢 14 日で増加比が 1.26 となり、材齢 28 日以降は緩やかに上昇、材齢 91 日で 1.35 となった。増加比が最大だったものが SM (30%) であり、材齢 14 日で増加比が 2.76、材齢 28 日で 4.22 となった。材齢 56 日以降も増加を続け、材齢 91 日では増加比が 4.55 となった。超音波伝播速度の増加比は強度発現と密な関係にあることから¹³⁾、粘土・シルト分の多い有機質土壌の置換割合が増加することで、材齢 7 日までの初期材齢時では強度発現が小さいが、置換率 20% を超えると長期にわたって強度発現が進行することが明らかとなった。

3.4 有機質土壌を混入した供試体の圧縮・曲げ強度

標準供試体とグループ A の経時的な圧縮強度の変化を図-6 に示す。材齢 28 日以降の SM (0%) と SM (10%) は、ほぼ同程度の圧縮強度を示している。特徴としては、材齢 7 日から材齢 28 日にかけての圧縮強度の増加は大きい、以降の圧縮強度の増加は小さいことが確認できる。SM (20%) の圧縮強度は材齢 7 日で 14.3N/mm² を示し、SM (0%) および SM (10%) と比較すると、半分程度の圧縮強度となる。しかし、材齢 91 日の圧縮強度は、同程度の値となった。SM (30%) の圧縮強度は、材齢 7 日で 0.5 N/mm² と非常に小さな値を示したが、材齢 91 日で 31.1 N/mm² まで大幅に増加した。この結果は、図-5 に示した超音波伝播速度と同様の傾向を示すものであり、有機質土壌の置換率の違いにより、各供試体は初期材齢時の強度発現に違いが生じることが明らかとなった。以上の結果を整理すると、有機質土壌に含まれる有機酸の影響で初期材齢時での圧縮強度は小さい値を示すが、材齢の進行に応じて圧縮強度が増加し、材齢 91 日以降も強度が増加することが予測できる。

すべての供試体において、曲げ強度も圧縮強度とほぼ同様の強度発現特性を示した。曲げ強度と圧縮強度の比率(=曲げ強度/圧縮強度)を表-4 に示す。SM (0%) は 0.18~0.22 となり、一般的な目安といわれる比率 (0.125~0.20 (1/8~1/5)) と同程度となった。その他の供試体も 0.13~0.21 の値を示していることから、粒度の小さな土壌を細骨材代替材として用いても、圧縮強度と曲げ強度の比率は、通常の細骨材を用いた場合と同程度となることが明らかとなった。

グループ B の材齢 28 日における圧縮強度を図-7 に示す。すべての供試体で、高性能減水剤の有無は圧縮強度に大きな影響を及ぼさないことが確認できる。この結果は、高性能減水剤の陰イオンが土粒子に吸着されたため、セメントの分散性を阻害した、という推測を裏付けるものと考えられる。しかしながら、強度のばらつきは、標準砂に対する有機質土壌への置換量の増加に伴い大きくなることが明らかとなった。また、曲げ強

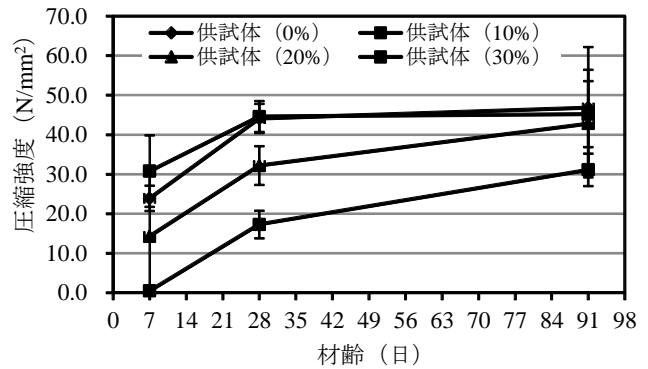


図-6 標準供試体とグループ A の圧縮強度の変化

表-4 曲げ強度と圧縮強度の比率

供試体	材齢		
	7 日	28 日	91 日
SM (0%)	0.22	0.18	0.20
SM (10%)	0.17	0.15	0.18
SM (20%)	0.13	0.18	0.18
SM (30%)	0.20	0.21	0.20

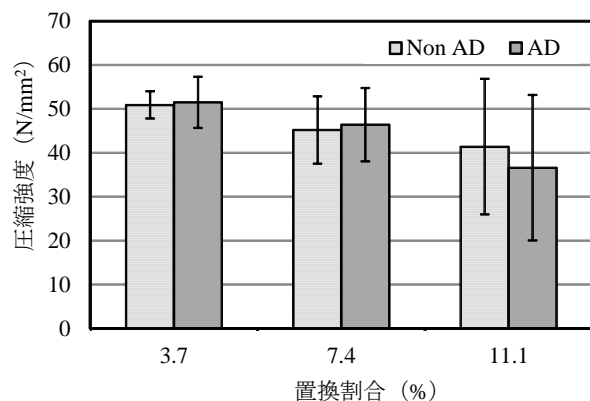


図-7 グループ B の圧縮強度の変化

度に対しても、高性能減水剤の有無は大きな影響を及ぼさないことを確認したが、有機質土壌の置換割合増加に伴い、ばらつきが生じやすくなることが確認できた。一般的に、強度は構造敏感性に属するものであり、材料中の僅かな不均一性や欠陥の空間的位置により全体としての特性値が支配される。すなわち、有機質土壌を多く含むほど、強度のばらつきが生じやすくなる可能性が示唆された。なぜなら、有機質土壌の置換割合を増加することは、土壌の団粒等により潜在的な欠陥が生じる可能性が高くなり、結果として構造敏感性に属する強度のばらつきは大きくなったと考えられる。今後、練り混ぜ時の材料の均一性に加え、水和反応の速度が低下し強度発現が安定する長期材齢時の強度特性について検討を行う必要がある。

4. まとめ

本研究では、資材の適切な利用の可能性を判断することを目的とし、有機質土壌をコンクリートの細骨材代替材として利用した際の強度特性に関して検討した。得られた知見および結論を整理すると以下の通りである。

- (1) 微粒分の多い土壌をセメントと練り混ぜると、高性能減水剤の効果が小さくなることを確認した。その要因は、本来はセメント粒子に吸着される陰イオンが、粒度の細かい土粒子に吸着されたためと推察される。
- (2) 標準砂の10%を有機質土壌と置換した供試体と標準供試体を比較した結果、密度、圧縮強度、曲げ強度に大きな差が生じないことが明らかとなった。
- (3) 有機物含有量の高い土壌を細骨材代替材として使用した場合、通常強度発現特性とは異なり、遅れて強度が発現したことを確認した。その要因は、カルボン酸系やリン酸系の有機酸が遅延剤の役割を果たしたためと考えられる。
- (4) 有機質土壌の置換割合を増加させたモルタルは、初期材齢時の強度発現が小さいが、長期にわたって強度発現が進行することが明らかとなった。
- (5) 有機質土壌の置換割合を増加させたモルタルは、含有する有機酸の影響により、初期材齢時の強度は小さい。しかし、材齢の進行に伴い、強度増加が著しくなることが確認された。

5. 今後の課題と展開

本研究は、細骨材代替材として有機物含有量が高く、粒度が小さい畑地土壌を用いた際の力学的特性について検討した。今後は、凍結融解作用などをはじめとする耐久性や、シルト・粘土分による膨潤性など、コンクリートとしての安全性を確保するための検討を進める予定である。また、本研究で対象とした土壌は採取場所や採取時期によって、粒度や密度などの物理特性や有機物質の種類などの化学特性が異なることが考えられる。そのため、コンクリートに要求される性能を適切に評価して、使用可能な細骨材代替材を選定する必要があると考えられる。

謝辞

本研究の遂行にあたり、高知大学農学部流域水工学研究室の松浦悟氏には多大なるご協力を頂きました。高知大学の松本伸介教授、佐藤泰一郎准教授には様々なアドバイスを頂きました。記して深謝の意を表します。最後に、本研究の一部は、科研費(23380143)の助成を受けたものである。最後に記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 高見新一, 下司靖明, 西森新蔵: 再生骨材を混合使用したRC部材の力学的特性に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp.1277-1282, 2003.7
- 2) 佐藤周之, 野中資博, 佐藤利夫, 桑原智之: 解体コンクリートの水質浄化資材としての利用性に関する基礎的研究, 農業土木学会論文集, Vol.73, No.4, pp.91-96, 2005.8
- 3) 片平博, 渡辺博志: 天然骨材資源の低品質化の現状と課題, コンクリート工学, Vol.46, No.5, pp.26-35, 2008.5
- 4) 井上正一, 吉野公, 黒田保, 松井信作: 真砂土のコンクリート用細骨材への適用に関する研究, 材料, Vol.49, No.10, pp.1091-1096, 2000.10
- 5) 古河幸雄, 藤田龍之, 坂田正純, 村田吉晴, 渡辺英彦: コンクリート用細骨材としてのまさ土の利用に関する基礎研究, 土木学会論文集, No.750, pp.159-170, 2003.12
- 6) 井上正一, 黒田保, 松井信作, 吉野公: まさ土を細骨材として用いたコンクリートの物性, 材料, Vol.53, No.10, pp.1077-1082, 2004.10
- 7) 岡田亮太, 松尾栄治, 樋野和俊, 浜田純夫: 細骨材を石炭灰に全量置換した転圧コンクリートの曲げ疲労強度, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp.1403-1408, 2003.7
- 8) 山中量一: 高炉スラグ骨材, コンクリート工学, Vol.46, No.5, pp.90-94, 2008.5
- 9) 服部九二雄, 柘植巳一: マサ土を細骨材として利用したコンクリートの特徴-低品質骨材の有効利用に関する研究(I)-, 農業土木学会論文集, No.144, pp.25-32, 1989.12
- 10) 服部九二雄, 柘植巳一: マサ土を細骨材として利用したコンクリートの凍結融解特性-低品質骨材の有効利用に関する研究(II)-, 農業土木学会論文集, No.160, pp.19-26, 1992.8
- 11) ダニエル ヒレル: 環境土壌物理学 - I 土と水の物理学-, pp.41-56, 農林統計協会, 2001.1
- 12) シーエムシー出版: コンクリートの混和剤技術(普及版), pp.96-105, 2006.9
- 13) 佐藤周之, 服部九二雄, 緒方英彦, 高田龍一: 初期養生温度が普通コンクリートの強度発現特性および圧縮強度に及ぼす影響, 農業土木学会論文集, No.220, pp.69-76, 2002.8