

論文 骨材とセメント硬化体の収縮差に起因する微細損傷がコンクリートの挙動に及ぼす影響

大野 直也*1・米田 大樹*2・石田 哲也*3

要旨: 本研究は、骨材とセメント硬化体の収縮差に起因する微細ひび割れに着目し、微細ひび割れがコンクリートの挙動に及ぼす影響について、収縮量の異なる2種類の粗骨材を使用した供試体を用い検討を行った。また、それぞれ粗骨材量を変えた供試体を用意し、微細ひび割れによって影響を受けると考えられる各試験項目について検討を行った。その結果、複数の試験結果に対し、各試験の傾向を微細ひび割れの影響を考慮することで統一的に説明することができた。

キーワード: 骨材拘束, 微細ひび割れ, 乾燥収縮, 粗骨材種, 粗骨材量

1. はじめに

乾燥に伴ってコンクリートは収縮するが、この収縮が様々な要因から拘束を受けることで、コンクリートの表面や内部には微細なひび割れが生じる。乾燥に伴って生じる微細ひび割れには、目視による把握が困難なものもあるため、微細ひび割れが巨視的なコンクリートの挙動に及ぼす影響は、時に、測定誤差としてみなされてきた。しかし、測定機器や測定技術の向上により、近年、コンクリート表面や内部に発生するひび割れの性状を精度よく確認することが可能となってきた¹⁾。また、微細ひび割れがコンクリートの乾燥収縮ひずみや力学的特性に影響を及ぼす可能性が指摘されている^{2), 3)}など。著者らはこれらの報告を受け、乾燥に伴って生じる微細ひび割れは巨視的なコンクリートの挙動に影響を及ぼすものと考え、仮説の検証を行った。

本稿では、骨材とセメント硬化体の収縮差に起因する微細ひび割れに着目した。北口ら⁴⁾は、骨材収縮の小さい石灰石を使用した場合、モルタル部の収縮が骨材収縮の大きい砂岩よりも強く拘束されるため、モルタル部には微細ひび割れが多く発生することを報告している。この報告をもとに、粗骨材に石灰石と砂岩のそれぞれを用いたコンクリート供試体を用意し、各試験項目に及ぼす影響について検討を行った。また、粗骨材の体積割合を変化させた場合に、各試験項目に及ぼす影響についても検討を行った。

2. 粗骨材種による影響の検討

2.1 検討概要

本研究では、北口らの実験を参考に収縮量が明確に異なると言われていた粗骨材として、石灰石と砂岩の2種

類を用いた。ただし、骨材収縮量自体の測定は行わず、複数の試験項目を設定することによって粗骨材種の違いが巨視的なコンクリートの挙動に与える影響について、微細ひび割れ発生の観点から総合的に評価を行うこととした。

2.2 試験概要

(1) 使用材料および配合

表-1 に試験に用いたコンクリートの使用材料および配合を示す。W/C は 55% と 40% の 2 水準を用意し、単位水量と粗骨材量が一定となるようにした。粗骨材には砂岩および石灰石を使用し、粗骨材の最大寸法は 20mm とした。また、目標スランプ値は 8cm に設定し、混和剤によって調整を行った。

(2) 供試体の作製方法

コンクリートの練混ぜには二軸強制攪拌型コンクリートミキサーを用い、粗骨材、セメント、細骨材を投入後 10 秒間練混ぜ、その後水と混和剤を投入して 90 秒練混ぜる方法とした。打込みの際は 1cm 程度余盛りし、ブリーディング水が流れ出ないように配慮しブリーディング終了後に表面仕上げを行った。打込み 1 日後に脱型を行い、脱型した供試体は材齢 7 日まで 20°C、60%RH の室内にて封かん養生を行い、その後同室内にて測定材齢まで乾燥させた。

(3) 試験概要

粗骨材の種類に応じて生じる微細ひび割れが巨視的なコンクリートの挙動に与える影響として、著者らは次のような予測を行い、試験項目を設定した。

- ・多数の微細ひび割れや空隙が連結し、空気や水の通り道となることで水分逸散・表層透気係数 KT が増加する。

*1 東京大学大学院 工学系研究科 (学生会員)

*2 前田建設工業 (株) 博士 (工学) (正会員)

*3 東京大学大学院 工学系研究科 教授 博士 (工学) (正会員)

・水分逸散の増加に伴う水和反応の停滞や、供試体内部の微細損傷によって強度が低下する。

(4) 試験項目

表-2 に試験項目を示す。長さ変化試験では、7日間封かん養生を行った後、図-1 のようにコンタクトチップを貼り付けた。作業には約4時間を要し、作業終了後、基長および基準質量を測定した。

透気試験では、7日間封かん養生を行った後、図-2 のように供試体の2側面のみ乾燥を行った。透気試験はダブルチャンバー方式のTORRENT法を用いて片面を測定し、乾燥開始直後に表層透気係数および基準質量を測定した。なお、透気試験はW/C40%供試体では実施していないため、今後の検討課題としたい。

圧縮・割裂試験では、7日間封かん養生を行った後、測定材齢まで乾燥させた。また、封かん7日後に乾燥させず、水中・封かん養生をさせた供試体についても割裂試験を行った。

2.3 試験結果

図-3 から図-5 に試験結果を示す。ここで、本稿の検討項目はペースト部に生じる微細ひび割れの影響にあることから、粗骨材の影響を除去するために、基準質量からの質量減少量(g)をペースト体積(cm³)で除したものを水分逸散と定義した。

図-3 に W/C55%供試体の試験結果を示す。図-3(a) から(f)に示すように、粗骨材に石灰石を使用した供試体(以降、NL とする)は、粗骨材に砂岩を使用した供試体(以降、NS とする)よりも水分逸散・表層透気係数KT が大きくなり、乾燥収縮・圧縮強度・引張強度は小さくなった。

材齢7日以降の養生条件について、乾燥・水中・封かん養生とした供試体の引張強度を図-3(f)(g)(h)に示す。乾燥養生の引張強度は、NL<NS となり、水中養生の引張強度はNL>NS となった。また、封かん養生の引張強度は、若材齢においてNL>NS となっているものの、材齢56日に同程度となり、材齢126日にNL<NS となった。

異なる養生条件における引張強度について、粗骨材種

表-1 コンクリートの使用材料および配合

シリーズ名	W/C (%)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)					AE1 (g)	AE2 (g)	SP (g)
				水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G _s	粗骨材 G _L			
NS38.2_55	55	4.5	45	165	300	809	1016	—	3	75	—
NS38.2_40	40	4.5	42	165	413	716	1016	—	25	—	333
NL38.2_55	55	4.5	45	165	300	809	—	1031	14	23	—
NL38.2_40	40	4.5	42	165	413	716	—	1031	25	—	103

※粗骨材は5号と6号を質量比1:1で使用

※シリーズ名は、普通ポルトランドセメント(N) + 粗骨材種(S or L) + 粗骨材体積割合(%) + 水セメント比(%)

セメント(C): 普通ポルトランドセメント(密度3.13g/cm³)

細骨材(S): 寺沢工場産中目砂(表乾密度2.59g/cm³, 吸水率2.29%)

粗骨材(G_s): 東京都西多摩郡奥多摩町産硬質砂岩砕石5号・6号(表乾密度2.66g/cm³, 吸水率0.58%)

粗骨材(G_L): 埼玉県秩父市産石灰石砕石5号・6号(表乾密度2.70g/cm³, 吸水率0.46%)

AE剤(AE1): 変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤

AE剤(AE5): 高アルキルカルボン酸系陰イオン界面活性剤と非イオン界面活性剤の複合体

高性能AE減水剤(SP): リグニンスルホン酸化合物とポリオール複合体

表-2 試験項目

項目	供試体
質量変化試験	100×100×400mm 角柱供試体 150×150×530mm 角柱供試体
長さ変化試験 (JIS A 1129-5)	100×100×400mm 角柱供試体
透気試験 (ダブルチャンバー法)	150×150×530mm 角柱供試体 (W/C55%のみ測定)
圧縮・割裂試験 (JIS A 1108・JIS A 1112)	φ100×200mm 円柱供試体

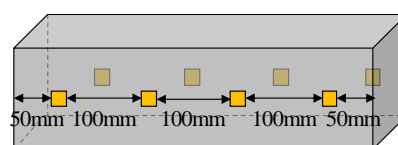


図-1 質量変化・長さ変化試験用供試体概要

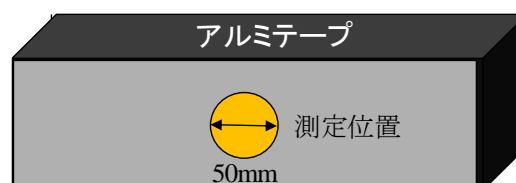


図-2 質量変化・透気試験用供試体概要

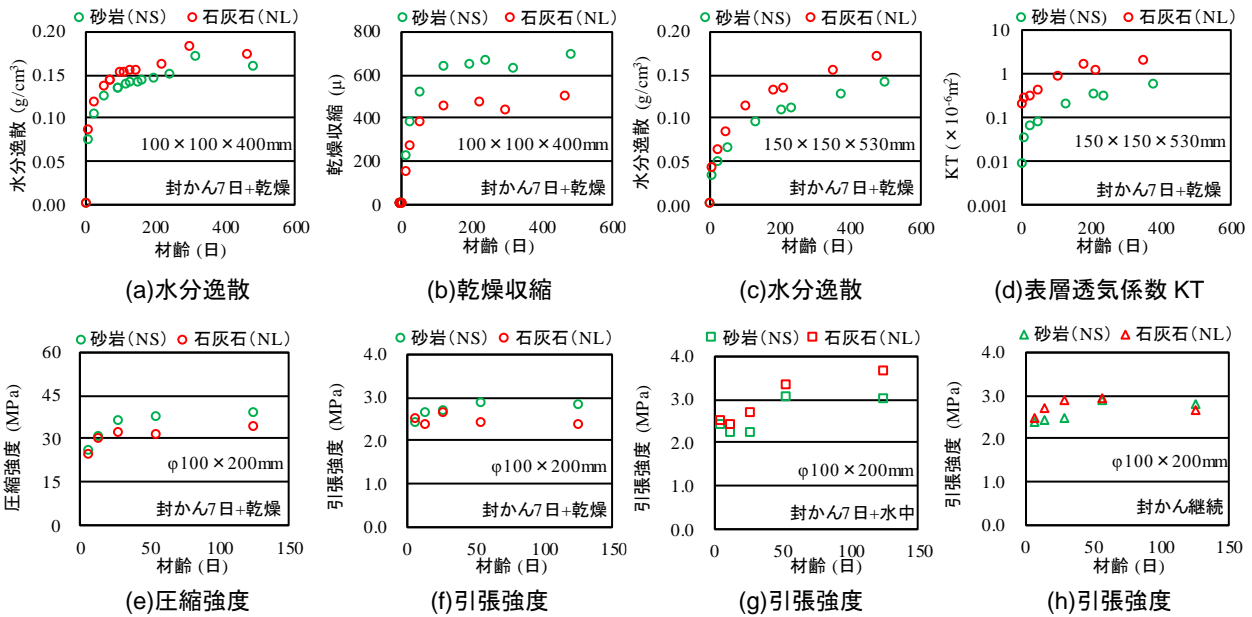


図-3 粗骨材種による各測定値への影響 (W/C55%)

ごとの比較を図-4に示す。NSでは、どの養生条件であっても材齢56日以降の引張強度に大きな差は見られない(図-4左)。一方、NLでは、養生条件によって材齢56日以降の引張強度が大きくばらつき、水中養生>封かん養生>乾燥養生の順となった。

図-5にW/C40%供試体の試験結果を示す。W/C40%の場合、乾燥収縮・圧縮強度・引張強度はW/C55%と同様にNL<NSとなったが、水分逸散は同程度となっている。また、各測定値のNSとNLの差は、W/C55%の場合よりも小さくなっている。

2.4 試験結果の考察

最初に、W/C55%供試体の試験結果について考察を行う。図-3(a)(c)(d)に示す水分逸散・表層透気係数KTは、どちらもコンクリート表面における空隙やひび割れの性状に依存し、空気を通り道となる空隙やひび割れが多い程大きな値になると推測される。骨材収縮の小さい石灰石を使用した場合、モルタル部の収縮が骨材収縮の大きい砂岩よりも強く拘束されるため、モルタル部には微細ひび割れが多く発生する⁴⁾。従って、NLは乾燥に伴うモルタル部の微細ひび割れがNSよりも多数生じたため、水分逸散・表層透気係数KTはNL>NSになったと考え

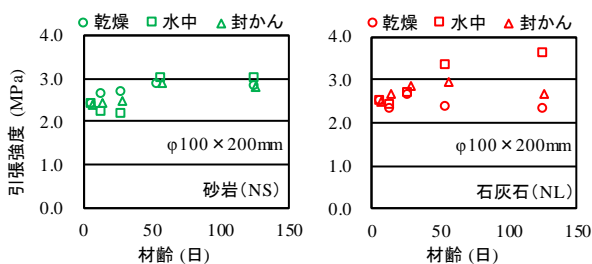


図-4 養生条件が引張強度に与える影響

られる。

一方、図-3(a)(b)に示すように水分逸散はNLの方が大きい、乾燥収縮はNLの方が小さい。乾燥に伴う骨材収縮の小さい石灰石を使用した場合、コンクリートの収縮が低減することは既往の研究でも知られている⁵⁾。さらに、最近の研究^{2), 3)}などにおいて、モルタル部分に微細ひび割れが発生すると、コンクリートの乾燥収縮は小さく測定されることが報告されている。従って、NLは石灰石自体の収縮が小さいこと、骨材周囲に多数の微細ひび割れが生じたこと等により、NSよりも水分逸散が多いにも関わらず、乾燥収縮がNSより減少したと考えられる。

また、図-3(e)から(h)に示す強度に関して考察を行う。一般に石灰石骨材を用いたコンクリートはペーストとの付着が良いことから強度の発現が良好であるとの報告⁶⁾がある。今回の実験においても、水中養生を行った場合(図-3(g))には、NL>NSになっている。一方、これまでの考察から、乾燥養生を行ったNLには多数の微細ひび割れが発生していると考えられる。既往の研究に⁴⁾よれば、乾燥に伴って微細ひび割れが発生すると、それによってコンクリートの強度やヤング係数といった力学的挙動が低下することが報告されている。そのため、図-3(e)(f)に示すように、乾燥を行ったときの圧縮強度・引張強度はNL<NSになったと考えられる。また、封かん養生を継続した場合(図-3(h))、若材齢では供試体内部に水分が保持されているため、水中養生と同様にNLが大きくなる。その後、水和の進行に伴って供試体内部の水分が消失すると、W/C55%のため大きくはないものの自己乾燥によって供試体が収縮し、骨材拘束による微細

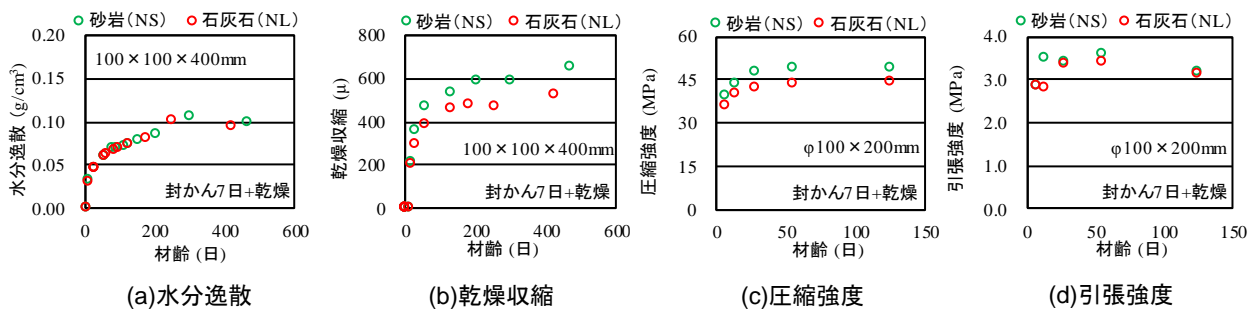


図-5 粗骨材種による各測定値への影響 (W/C40%)

ひび割れが生じる。その結果、材齢 126 日には NL<NS になったと考えられる。

乾燥・水中・封かんの養生条件に着目した図-4 に示すように、NS は養生条件による引張強度の差が小さく、NL は差が大きい。これは、北口ら⁴⁾の報告にあるように、石灰石と砂岩の骨材収縮が及ぼすモルタル部の微細ひび割れの影響と推測される。すなわち、NS は乾燥養生においても微細ひび割れが少ないために、水中・封かん養生と引張強度の差が小さくなったと考えられる。一方、NL は乾燥養生によって微細ひび割れが多く生じるため、養生条件による引張強度の差が大きくなったと考えられる。

また、遷移帯の組織構造は岩種によって異なり、砂岩の周囲には石灰石よりもポーラスな遷移帯が形成されるため、石灰石を用いたときよりも強度が低く、透気性や透水性は高くなることが報告されている⁷⁾。しかし、本試験では NL の方が透気性や透水性は高く (図-3(a)(c)(d))、強度は低い (図-3(e)(f))。すなわち、本試験結果を遷移帯の影響だけで説明することは困難であり、直接観察したわけではないが微細ひび割れの影響を考慮しなければならないと考えられる。

W/C40% 供試体の試験結果を図-5 に示す。W/C40% 供試体の水分逸散は NL と NS ではほぼ同じであり、乾燥収縮・圧縮強度・引張強度の NL と NS の差は W/C55% の場合と比べて小さくなっている。この原因として定性的には、低 W/C になるとセメント硬化体の強度や剛性が増加し、骨材拘束によって生じる微細ひび割れが減少したためと推測される。

当初の予測通り、粗骨材に石灰石と砂岩のそれぞれを用いたコンクリート供試体の試験結果は、微細ひび割れの発生が多いと考えられる石灰石を用いた場合に水分逸散・表層透気係数 KT は増加し、強度は低下した。また、各試験の傾向を微細ひび割れの影響を考慮することで统一的に説明することができた。すなわち、微細ひび割れが巨視的なコンクリートの挙動に影響を及ぼすとする既往の仮説を支持する結果が得られたと考えられる。

3. 粗骨材量による影響の検討

3.1 検討概要

前章は、粗骨材の体積割合が一定の条件における実験結果を基に考察を進めたものである。そこで本章では、粗骨材の体積割合を変化させ、次のような予測が成立するかどうか検討を行った。

- ・粗骨材量が増加するほど、コンクリート内部に生じる微細ひび割れは増加する。
- ・粗骨材量を変化させた影響は、骨材収縮の小さい石灰石を粗骨材に使用した場合の方が顕著である。

3.2 試験概要

表-3 に試験に用いたコンクリートの配合を示す。W/C は 55% のみとし、2 章で用いた配合を基準に粗骨材量を 0.5 倍 (粗骨材体積割合 23.6%) と 1.5 倍 (粗骨材体積割合 48.1%) とした。使用材料や供試体の作製方法は 2 章と同様である。試験項目や試験方法も 2 章と同様であるが、長さ変化試験は実施していないため、次回の検討課題としたい。また、TORRENT 法では空隙率を 0.15m³/m³ 一定として表層透気係数 KT を算出しているが、

表-3 コンクリートの使用材料および配合

シリーズ名	W/C (%)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ²)					AE1 (g)	AE2 (g)	SP (g)
				水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G _S	粗骨材 G _L			
NS23.6_55	55	5.6	62	204	371	1000	628	—	6	65	—
NS48.1_55	55	3.8	35	139	252	679	1279	—	21	69	—
NL23.6_55	55	5.6	62	204	371	1000	—	637	10	32	—
NL48.1_55	55	3.8	35	139	252	679	—	1298	13	53	—

実際の空隙率はペースト量が多い配合ほど大きくなるため、2章で用いた基準配合の空隙率を $0.15\text{m}^3/\text{m}^3$ とし、ペースト量の増減に比例した空隙率を早川ら⁸⁾同様に仮定してKTの修正を行った。この場合の修正係数は、粗骨材体積割合23.6%および48.1%の場合、それぞれ0.810および1.191であり、KTの測定結果に修正係数を乗じて求めたものを表層透気係数KTとして使用した。

3.3 試験結果

図-6から図-8に試験結果を示す。図-6は横軸に粗骨材体積割合をとり、材齢126日における各測定結果を示している。粗骨材種ごとに粗骨材量による影響を確認すると、NSはどの試験においても、測定値に大きな影響は見られない。一方、NLは粗骨材量の変化による測定値のばらつきが大きく、粗骨材量基準（粗骨材体積割合38.2%）のときに、水分逸散・表層透気係数KTでは最大値を、圧縮強度・引張強度では最小値をとっている。

また、図-7・図-8は、各粗骨材体積割合の供試体において2章と同様に、粗骨材種の異なる供試体の測定結果を比較したものである。図-7は粗骨材量を減らした供試体（粗骨材体積割合23.6%）の試験結果であり、NLとNSの測定値はどの試験項目においても概ね同程度となっている。

また、図-8は粗骨材を増やした供試体（粗骨材体積割合48.1%）の試験結果であり、表層透気係数KTの測定値はNLが大きく、圧縮強度と引張強度はNLが小さい。一方、水分逸散はNLの方がわずかに小さくなっている。

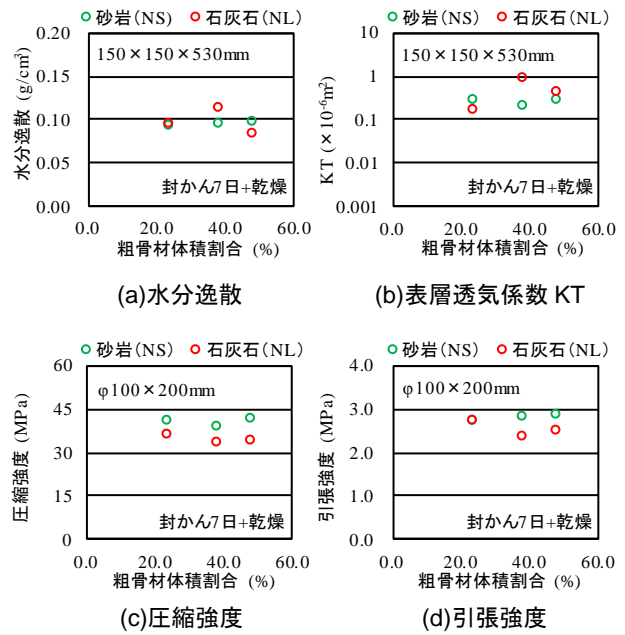


図-6 粗骨材量による各測定値への影響（材齢126日）

3.4 試験結果の考察

図-6の試験結果について考察を行う。北口ら⁴⁾は砂岩を粗骨材に使用した供試体では、砂岩が大きく収縮することで、乾燥に伴う微細ひび割れの発生が少量に留まることを報告している。また、2章の検討においても、図-4に示したように、骨材収縮によってNSは異なる養生条件での引張強度の差が小さく、乾燥に伴う微細ひび割れの発生が少ないことが推測された。このような骨材収縮の影響により、NSは粗骨材体積割合を変えたこ

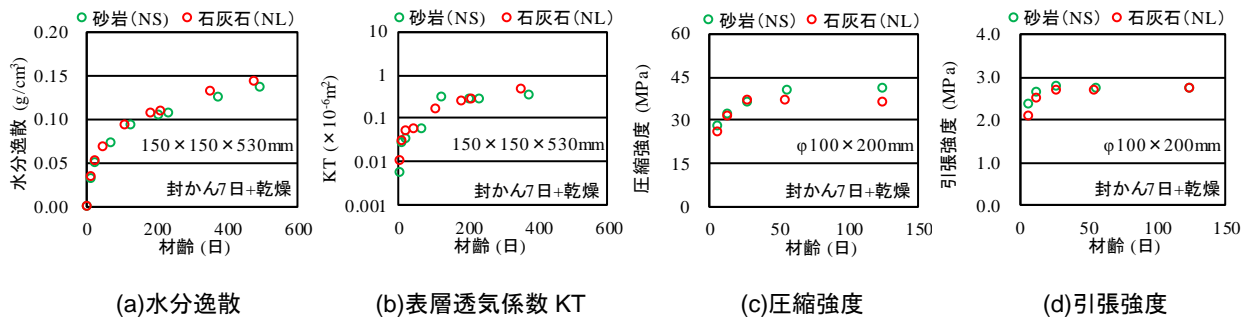


図-7 粗骨材種による各測定値への影響（粗骨材体積割合23.6%）

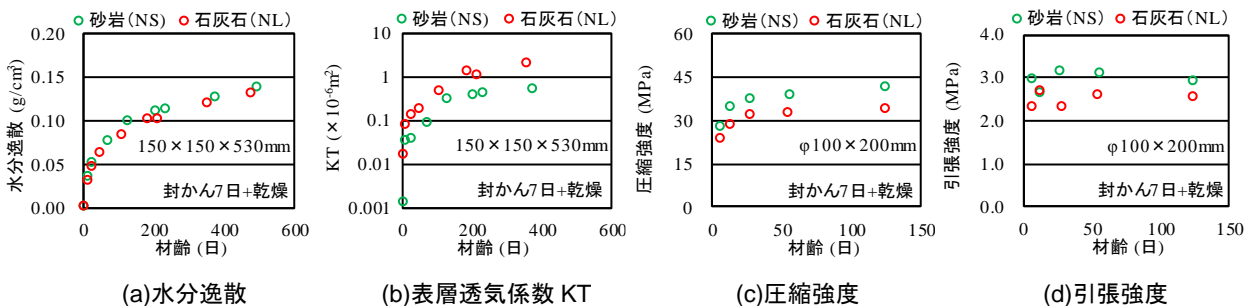


図-8 粗骨材種による各測定値への影響（粗骨材体積割合48.1%）

とによる影響が小さくなったと推測できる。一方、NLはNSよりも乾燥によって生じる微細ひび割れが多くなり、粗骨材体積割合を変化させたことによって、供試体内部のひび割れ性状に差が生じ、測定値のばらつきがNSよりも大きくなったと推測できる。

ここで、NLの挙動に着目すると、粗骨材量基準（粗骨材体積割合 38.2%）の場合に、水分逸散・表層透気係数KTでは最大値を、圧縮強度・引張強度では最小値をとっており、微細ひび割れの影響が最も大きいと考えられる。この理由について、まず、粗骨材量を減らした場合（粗骨材体積割合 23.6%）について考える。図-7に示すように、NLとNSの各試験結果は同程度の値となっている。このことから、粗骨材量を減らした場合には、NLの微細ひび割れの発生が減少したと推測される。この理由として、粗骨材量が減少したことで、モルタルが粗骨材から受ける拘束が減少し、結果として微細ひび割れの発生が抑制されたためと考えられる。

一方、粗骨材量を増やした場合（粗骨材体積割合 48.1%）、単純に微細ひび割れが増加して水分逸散と表層透気係数KTが増加する結果にはなっていない。北口らは粗骨材に川砂利を使用したコンクリートの検討によって、骨材量が多いと、水分移動経路が長くなることから中心部の乾燥が抑制され、ひび割れの進展が妨げられる可能性を指摘している。今回の石灰石を粗骨材に使用した試験においても、粗骨材体積割合を増加させていくと微細ひび割れの進展が骨材によって抑制される現象が現れるため、単純に水分逸散と表層透気係数KTが増加する結果にならなかったと考えられる。

また、図-8(a)に示す水分逸散において、NLの測定値がわずかにNSよりも小さくなっている。この理由については定かではないが、粗骨材の体積割合が半分近くを占めることや、単位水量が非常に少ないことから、粗骨材自体が保有する水分などの影響が関与している可能性が考えられる。

粗骨材量を変化させた場合、当初の予測通り各試験結果に及ぼす影響は石灰石を粗骨材に使用した供試体の方が顕著であった。これは、乾燥に伴う微細ひび割れの発生量が石灰石を粗骨材に使用した供試体で多いことに起因するものと考えられる。一方で、粗骨材量を増加させても単純に微細ひび割れの発生が増加するような結果とはならなかった。これは、粗骨材が微細ひび割れの進展を抑制する効果など複数の要因が相互に影響し合った結果と考えられ、今後より詳細な検討を行っていきたいと考えている。

4. まとめ

- (1) 石灰石を粗骨材に使用した場合、砂岩を使用した場合よりもコンクリート内部に多数の微細ひび割れが発生すると考えられる。
- (2) 上記の微細ひび割れ発生によって、水分逸散・表層透気係数は増加し、圧縮強度・引張強度は低下したと考えられる。
- (3) W/C40%では石灰石と砂岩をそれぞれ粗骨材に使用した供試体の水分逸散は同程度となり、乾燥収縮・圧縮強度・引張強度の差はW/C55%の場合と比べて小さくなった。
- (4) 粗骨材量を変化させた場合、各試験結果に与える影響は石灰石を粗骨材に使用した供試体の方が顕著であった。

参考文献

- 1) 篠野宏, 堀口直也, 丸山一平: コンクリートの乾燥により生じるひずみ分布と微細ひび割れ性状の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.454-459, 2012.
- 2) 篠野宏, Lin Mao, 丸山一平: 高温乾燥を受けたコンクリートに発生する微細ひび割れに関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.703-708, 2013.
- 3) 樋口優香, 寺西浩司: 乾燥に伴う内部ひび割れがコンクリートの乾燥収縮ひずみおよび力学的性質に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.502-507, 2014.
- 4) 北口将弘, 篠野宏, 丸山一平: コンクリートの乾燥ひび割れ発生プロセスにおける骨材の役割, 日本建築学会大会(北海道)学術講演会・建築デザイン発表会, pp.21-22, 2013.8
- 5) 兵頭彦次, 谷村充, 藤田仁, 番地成朋: 石灰石骨材がコンクリートの収縮特性に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.571-576, 2009.6
- 6) 大塩明, 加藤泰義, 川島清: 石灰石骨材を用いたコンクリートの基礎的諸物性, セメント技術年報, Vol.41, pp.106-109, 1987
- 7) 内川浩: セメントペーストと骨材の界面の構造・組織がコンクリートの品質に及ぼす影響, コンクリート工学, Vol.33, No.9, pp.5-17, 1995.9.
- 8) 早川健司, 加藤佳孝: 材料分離がコンクリートの表層透気性に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, 2011