

論文 軽量コンクリートの吸水性状と耐凍害性の関係について

毛 継沢^{*1}・鮎田 耕一^{*2}・猪狩 平三郎^{*3}・松井 敏二^{*4}

要旨：練混ぜ前の軽量粗骨材の含水率、コンクリートの水セメント比及び養生条件などの要因が軽量コンクリートの吸水性状や耐凍害性に及ぼす影響について検討した結果、軽量粗骨材の含水率がコンクリートの吸水性状に大きな影響を与えて耐凍害性を支配すること、凍結融解作用を受ける前に気中乾燥をしたり、軽量粗骨材の含水率が15%、20%と高い場合でも水セメント比を低くしたりすることにより耐凍害性は向上することなどが明らかになった。

キーワード：軽量コンクリート、吸水性状、耐凍害性、含水率、水セメント比、養生条件

1. はじめに

一般に軽量コンクリートの耐凍害性は普通コンクリートに比べて低く、寒冷地における軽量コンクリート構造物の普及の障害となっている。軽量コンクリートの耐凍害性に影響を及ぼす要因については、JIS A 1148「コンクリートの凍結融解試験方法」などの急速凍結融解試験によって多くの検討がなされてきている。例えば、練混ぜ前の軽量骨材の含水率を低くすることや凍結融解試験を行う前に気中で乾燥させることなどにより、軽量コンクリートの耐凍害性は向上すること^{1)~3)}などが明らかにされている。また、実際の寒冷環境下での軽量コンクリートの暴露試験の結果も骨材の含水率が低いほど耐凍害性が高くなること⁴⁾を示している。

田村らは、膨張頁岩を原料とした非造粒型の軽量骨材を用いて高強度軽量コンクリートの凍害機構を検討し、凍結融解の繰返し作用により軽量骨材自体も膨張収縮し、軽量コンクリートの凍結融解作用による劣化に影響を及ぼすこと⁵⁾を明らかにしている。筆者らの軽量粗骨材単体の凍結融解試験を行った結果でも、骨材の物性がコンクリートの耐凍害性に大きく影響を及ぼすこと⁶⁾を示している。

上述のように軽量粗骨材の含水条件や変形挙動による骨材自体の耐凍害性がコンクリートの耐凍害性に大きく影響を及ぼすことが明らかにされている。しかしながら、コンクリートの練混ぜ及び凝結中の軽量骨材の吸水挙動がコンクリートの耐凍害性に及ぼす影響についてはまだ明らかにされていない。

そこで本研究では、練混ぜ前の軽量粗骨材の含水率、コンクリートの水セメント比及び養生条件などの要因が軽量コンクリートの吸水性状に及ぼす影響について検討し、それらと軽量コンクリートの耐凍害性との関係を明らかにすることを目的とした。

2. 実験概要

2.1 使用材料及び配合

使用材料を表-1に示す。非造粒型軽量粗骨材（絶乾密度1.26g/cm³）を用い、練混ぜ前の含水率は0%（絶対乾燥）、10%、15%、20%及び30%の5水準で、骨材の表面水を吸水性の布で拭き取ってから使用した。含水率30%の軽量粗骨材は製造工場でプレスオーキングされたものである。他の水準は、骨材を絶乾状態にした後、吸水させることによって含水率を調整した。コンクリートの配合を

*1 北見工業大学大学院 工学研究科物質工学専攻（正会員）

*2 北見工業大学 工学部土木開発工学科教授 工博（正会員）

*3 北見工業大学 技術部技術長

*4 ドーピー建設（株）北海道支社技術部設計課課長代理（正会員）

表-2 に示す。水セメント比は 30%, 40%, 50% の 3 水準を設定した。細骨材は表面乾燥飽水状態で使用した。コンクリートのスランブは 8.0±2.0cm, 空気量は 5.5±1.5%となるよう高性能 AE 減水剤及び AE 助剤の添加量を設定した。

2.2 練混ぜ方法

コンクリートの練混ぜは、強制パン型ミキサ（容量 55L）を用いて行った。練混ぜ方法は、粗骨材、細骨材及びセメントを投入し、15 秒間空練りし、ミキサを一時停止、水ならびに高性能 AE 減水剤と AE 助剤を投入して計 120 秒間練り混ぜた。

2.3 養生条件

打込み後、型枠のまま恒温恒湿室（室温 20℃、

湿度 80%）に 1 日間置き、その後脱型し表-3 に示す水中養生（水温 20℃、記号 W28）及び水中養生後気中乾燥（室温 20℃、湿度 60%、記号 W14+A14）の 2 種類の養生を行った。後者は凍結融解試験の前に 14 日間気中乾燥期間をとることを推奨している ASTM STP 169 C を参考にし、凍結融解作用を受ける前の気中乾燥が含水率の異なる軽量粗骨材を用いたコンクリートの吸水性状、又は耐凍害性に及ぼす影響について調べるために設定したものである。

2.4 試験項目

(1) スランブ

コンクリートをミキサから排出後、コンクリート用シャベルで均一となるまで練り直し、JIS A

表-1 使用材料

セメント(C)	普通ポルトランドセメント(密度：3.16g/cm ³ ，比表面積：3370 cm ² /g)	
細骨材(S)	陸砂(表乾密度：2.63 g/cm ³ ，吸水率：1.78%，粗粒率：2.65)	
粗骨材(G)	非造粒型軽量粗骨材(最大寸法：15mm，絶乾密度：1.26g/cm ³ ，24h 吸水率：9.3%)	
混和剤	高性能 AE 減水剤	ポリカルボン酸エーテル系複合体
	AE 助剤	変性アルキルカルボン酸複合体

表-2 配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)			G(軽量粗骨材)		
		W	C	S	単位量(L/m ³)	含水率(%)	
						目標値	実測値
30	44.1	155	517	726	350	0	0
						10	9.3
						15	15.1
						20	18.0
						30	31.2
40	46.8	160	400	811	350	0	0
						10	9.3
						15	14.8
						20	18.9
						30	31.2
50	48.1	166	332	852	350	0	0
						10	9.3
						15	14.7
						20	18.5
						30	31.2

表-3 養生条件

記号	養生条件
W28	材齢 28 日まで水中養生
W14+A14	材齢 14 日まで水中養生→材齢 27 日まで気中乾燥→材齢 28 日まで水中養生

1101 「コンクリートのスランプ試験方法」に準拠し求めた。

(2) 空気量

JIS A 1116「フレッシュコンクリートの単位容積質量試験方法及び空気量の質量による試験方法(質量方法)」に準拠し求めた。

(3) 圧縮強度

JIS A 1132 「コンクリートの強度試験用供試体の作り方」に準拠し、 $\phi 10 \times 20\text{cm}$ の円柱供試体を作製した。圧縮強度は、水中養生を行った後、材齢 28 日に JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」に準拠し求めた。

(4) 質量

2 種類の養生を行った $10 \times 10 \times 40\text{cm}$ のコンクリート供試体の脱型時及び材齢 14, 27, 28 日における質量を測定し、脱型時の質量を基準としてコンクリートの質量増加率を求めた。質量は脱型時及び気中乾燥の場合は気中乾燥状態で、水中養生の場合は表面乾燥飽水状態で測定した。

(5) 耐久性指数

$10 \times 10 \times 40\text{cm}$ の角柱供試体を用い 2 種類の養生を行った後、JIS A 1148「コンクリートの凍結融解試験方法」に準拠し、水中における 1 サイクル 4 時間の急速凍結融解試験を材齢 28 日から行った。相対動弾性係数が 60% になるサイクル数、又は 300 サイクルのいずれか小さいものから耐久性指数を求めた。

(6) スケーリング率

凍結融解試験の所定サイクル毎にコンクリート供試体（水セメント比 40%）から剥離したモルタル及び破壊した粗骨材の微粉末を採取し、その絶乾質量を測り、スケーリング量とした。スケーリング率は凍結融解試験終了後のコンクリート供試体の絶乾質量を基準として求めた。

3. 実験結果及び考察

3.1 練混ぜ前の軽量粗骨材の含水率が軽量コンクリートの吸水性状と耐凍害性に及ぼす影響

図-1 に練混ぜ前の軽量粗骨材の含水率と材齢 28 日まで水中養生を行った軽量コンクリートの

圧縮強度の関係を示す。水セメント比 30% の場合、軽量粗骨材の含水率にかかわらず、各コンクリートの圧縮強度はほぼ同程度で高い値を示しているが、水セメント比 40% と 50% の場合では、用いる軽量粗骨材の含水率が低いほど、圧縮強度が高くなる傾向にある。水セメント比 40% と 50% のコンクリートは水セメント比 30% のそれと比べて単位水量が多いので、含水率の低い軽量粗骨材がコンクリートの練混ぜ及び凝結中にセメントペースト中の水分を吸収し、セメントペーストの実際の水セメント比が低くなった結果、圧縮強度が高くなったと考えられる。

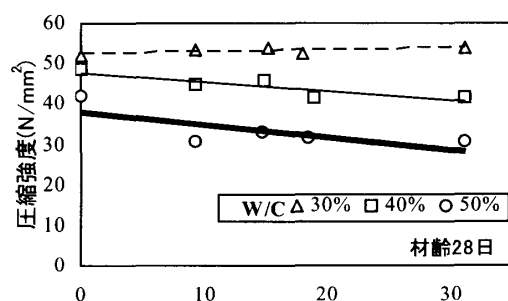


図-1 練混ぜ前の軽量粗骨材の含水率とコンクリートの圧縮強度の関係

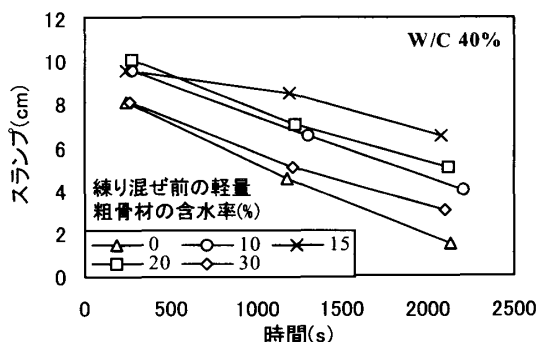


図-2 スランプの経時変化

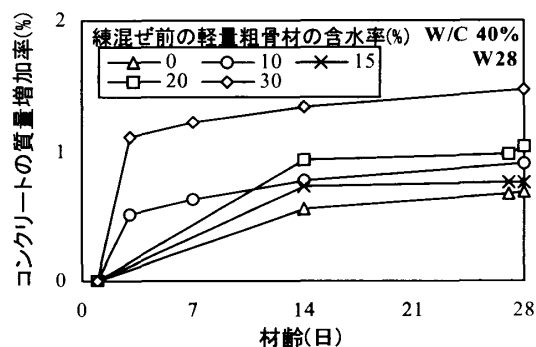


図-3 コンクリートの質量増加率

図-2 に水セメント比 40%のコンクリートのスランプの経時変化を練混ぜ前の軽量粗骨材の含水率ごとに示す。いずれのコンクリートも時間の増加に伴い、スランプが減少している。特に、含水率が低い軽量粗骨材（0%と 10%）はセメントペーストから多く吸水するので、スランプロスが大きかった。

図-3 に材齢 28 日まで水中養生を行った水セメント比 40%のコンクリートの質量増加率を練混ぜ前の軽量粗骨材の含水率ごとに示す。いずれのコンクリートも最初の 14 日間まで質量が多く増加し、その後の質量増加は緩やかである。絶乾状態の粗骨材を用いた場合にコンクリートの質量増加率は最も低く、含水率 30%の粗骨材の場合では最も高かった。

図-4 に練混ぜ前の軽量粗骨材の含水率と材齢 28 日まで水中養生を行ったコンクリートの質量増加率の関係を水セメント比ごとに示す。水セメント比 30%の場合では、軽量粗骨材の含水率にかかわらず、各コンクリートの質量増加率はほぼ同程度で低い値を示しているが、水セメント比 40%と 50%の場合では、練混ぜ前の軽量粗骨材の含水率が高ければ、材齢 28 日までの吸水によりコンクリートの質量は増加している。

以上のように練混ぜ前の軽量粗骨材の含水率がコンクリートの吸水性状に大きな影響を与えているが、これは図-1 に示した圧縮強度と同じく、含水率の低い軽量粗骨材を用いると、コンクリートの練混ぜ及び凝結中に骨材がセメントペースト中の水分を吸い、その結果材齢 14 日以降ではコン

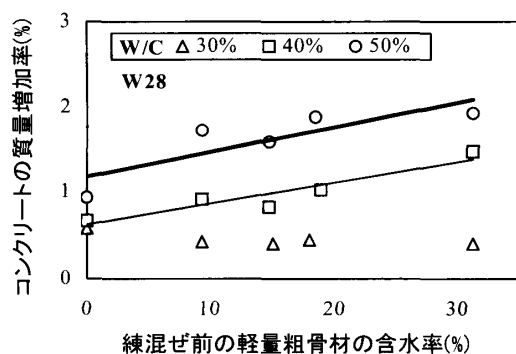


図-4 練混ぜ前の軽量粗骨材の含水率とコンクリートの質量増加率の関係

クリートの組織が緻密になり、吸水しにくくなったと考えられる。軽量粗骨材の吸水によるセメントペースト組織の変化を直接調べることは容易ではないが、今後水セメント比の変化などから検討したい。

図-5 に練混ぜ前の軽量粗骨材の含水率と水中養生 28 日を行ったコンクリートの耐久性指数の関係を示す。いずれの水セメント比の場合も、粗骨材の含水率が高いほど、耐久性指数は低下し、コンクリートの耐凍害性は練混ぜ前の軽量粗骨材の含水率に支配されている。これは図-4 に示すように含水率の高い軽量粗骨材を用いたコンクリートは吸水しやすく、凍結融解作用の繰返し作用により劣化しやすくなるためであろう。また、骨材の含水率が高いほどその引張強度は小さくなり、凍結融解作用を受けると凍結で生じた圧力により崩壊しやすい⁵⁾ためと考えられる。なお、一般にコンクリート構造物の耐凍害性を満足するためには 60 以上の耐久性指数が要求されるが、それに対応している練り混ぜ前の軽量粗骨材の含水率は 14~17%以下で、水セメント比が高いほど、軽量粗骨材の含水率を低くすることが必要である。

図-6 に練混ぜ前の軽量粗骨材の含水率と水中養生 28 日を行った水セメント比 40%のコンクリートの凍結融解 300 サイクル終了時のスケーリング率の関係を示す。粗骨材の含水率 30%のコンクリートは凍結融解 10 数サイクルでひび割れを生じて破壊したため、図中に示していない。また、粗骨材の含水率 20%の場合には、凍結融解 200 サイクル経過後にひび割れで一部コンクリート片が

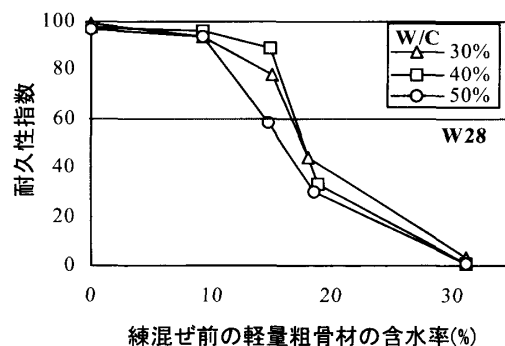


図-5 練混ぜ前の軽量粗骨材の含水率とコンクリート (W28) の耐久性指数の関係

剥落したため、図中には凍結融解 228 サイクル終了時の結果を示している。練混ぜ前の軽量粗骨材の含水率が高ければ、凍結融解作用によりコンクリートのスケーリング率は増加している。これは上述のように含水率の低い軽量粗骨材を用いたコンクリートでは、練混ぜ及び凝結中に骨材の吸水によりセメントペーストが緻密になった結果、コンクリートの強度は高く、かつ吸水が少なくなるため、スケーリングを起こしにくくなったと考えられる。

3.2 軽量コンクリートの吸水性状と耐凍害性に及ぼす水セメント比の影響

図-7に水セメント比と水中養生 28 日後のコンクリートの質量増加率の関係を練混ぜ前の軽量粗骨材の含水率ごとに示す。いずれの軽量粗骨材を用いた場合も、水セメント比が高いほど、コンクリートの質量増加率が大きく、多く吸水している。

図-8に材齢 28 日まで水中養生後凍結融解試験を行ったコンクリートの水セメント比と耐久性指数の関係を練混ぜ前の軽量粗骨材の含水率ごとに示す。軽量粗骨材の含水率が低い場合 (0%と 10%)

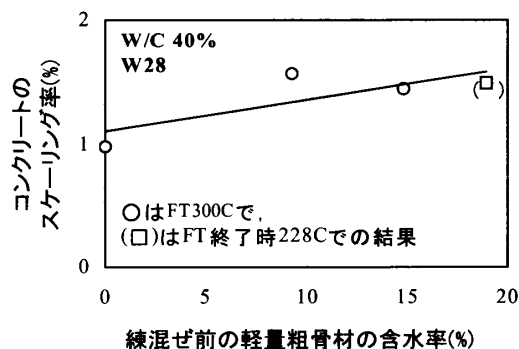


図-6 練混ぜ前の軽量粗骨材の含水率とコンクリートのスケーリング率の関係

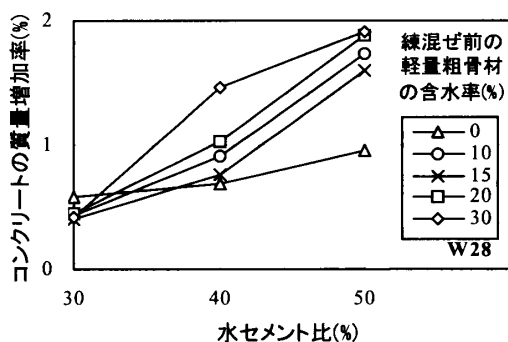


図-7 水セメント比と質量増加率の関係

では、水セメント比にかかわらず耐久性指数は 90 以上であり、耐凍害性は極めて良好である。含水率の高い軽量粗骨材 (30%) を用いたコンクリートの耐久性指数はいずれの水セメント比の場合も極めて低くかった。上述の含水率 (0%, 10%, 30%) の軽量粗骨材を用いたコンクリートの耐久性指数は極めて良好であったが非常に低下したため、水セメント比による耐久性指数の差は見られなかった。一方、含水率 15%と 20%の軽量粗骨材を用いた場合では、水セメント比が高いと、耐久性指数は低くなる傾向にある。水セメント比が高いほどコンクリートの強度は低く、かつ吸水が多くなるため、含水率が 15%と 20%の軽量粗骨材を用いた場合には、耐久性指数に水セメント比の影響が現れたと思われるが、含水率が 15%以下であれば、水セメント比が 50%でもコンクリートの耐凍害性が得られている。

3.3 軽量コンクリートの吸水性状と耐凍害性に及ぼす気中乾燥の影響

表-4に材齢 28 日まで 2 種類の養生を行った各種軽量コンクリートの脱型時の質量を基準とした

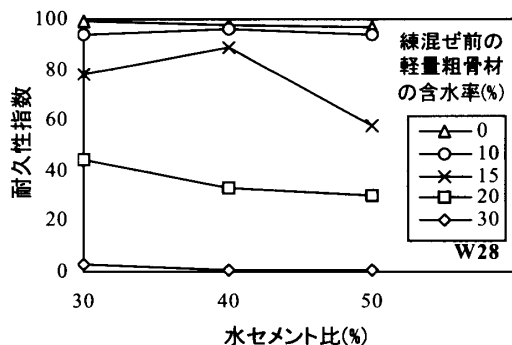


図-8 水セメント比と耐久性指数の関係

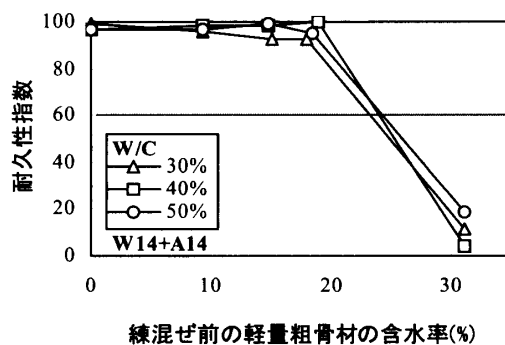


図-9 練混ぜ前の軽量粗骨材の含水率とコンクリート (W14+A14) の耐久性指数の関係

表-4 各種軽量コンクリートの質量増加率(%)

骨材の含水率(%)	W/C 30%		差(ポイント)	W/C 40%		差(ポイント)	W/C 50%		差(ポイント)
	W28	W14+A14		W28	W14+A14		W28	W14+A14	
0	0.59	0.34	0.25	0.68	0	0.68	0.95	-0.15	1.10
10	0.43	-0.28	0.71	0.91	-0.31	1.22	1.73	0.04	1.69
15	0.40	-0.40	0.80	0.76	-1.06	1.82	1.59	0	1.59
20	0.45	-0.61	1.06	1.03	-1.26	2.29	1.88	-1.31	3.19
30	0.41	-1.03	1.44	1.47	-0.45	1.92	1.92	-2.14	4.06

注：脱型時のコンクリートの質量を基準とする。

質量増加率、また養生条件による質量増加率の差も併せて示している。水中養生後気中乾燥を行ったコンクリート(W14+A14)ではコンクリート内部の水分が蒸発し、水セメント比や練混ぜ前の粗骨材の含水率が高いほど、水中養生だけを行ったコンクリート(W28)の質量増加率との差は大きくなっている。

図-9に練混ぜ前の軽量粗骨材の含水率と水中養生後気中乾燥を行ったコンクリート(W14+A14)の耐久性指数の関係を示す。いずれの水セメント比の場合も、練混ぜ前の軽量粗骨材の含水率が20%以下であれば、耐久性指数は100近くになり、耐凍害性が良好であり、水中養生だけを行ったコンクリート(図-5)に比べ、凍結融解試験前の気中乾燥により耐凍害性は向上することが確認された。

4. 結論

練混ぜ前の軽量粗骨材の含水率(0%, 10%, 15%, 20%, 30%の5水準)、コンクリートの水セメント比(30%, 40%, 50%の3水準)及び養生条件(水中養生、水中養生後気中乾燥の2水準)などの要因が軽量コンクリートの吸水性状や耐凍害性に及ぼす影響について検討した結果から、次のことが明らかになった。

(1)練混ぜ前の軽量粗骨材の含水率がコンクリートの吸水性状に大きな影響を与え、含水率が高ければ、コンクリートは多く吸水する。また、軽量粗骨材の含水率が高いほど、コンクリートの耐久性指数は低下し、スケール率は高くなり、コンクリートの耐凍害性は練混ぜ前の軽量粗骨材の含水率に支配される。水中養生を28日間行った軽量コンクリートの場合では、耐凍害性が確保でき

る粗骨材の含水率は14~17%以下であった。

(2)練混ぜ前の軽量粗骨材の含水率が15%と20%の場合には、水セメント比が高いほど、コンクリートは吸水しやすく、耐凍害性は低下する傾向にあった。他の含水率(0%, 10%, 30%)の場合には、水セメント比による耐久性指数の差は見られなかった。

(3)凍結融解試験前の気中乾燥により練混ぜ前の軽量粗骨材の含水率が20%以下であれば、コンクリートの耐凍害性が良好であり、気中乾燥の効果が確認された。

参考文献

- 1) 藤木英一ほか：軽量コンクリートの凍害劣化機構に関する研究，土木学会論文集，No.627/V-44，pp.239-250，1999.8
- 2) 三浦隆広，菊池雅史，小山昭男：超軽量コンクリートの諸性質に及ぼす骨材含水率の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.22，No.2，pp.235-240，2000.6
- 3) 橘大介，今井実：高強度軽量コンクリートの耐凍害性改善方法について，土木学会論文集，No.496/V-24，pp.51-60，1994.8
- 4) 毛継沢ほか：寒冷環境下に暴露した軽量コンクリートの耐凍害性に及ぼす各種要因の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.1，pp.1581-1587，2004.6
- 5) 田村一美ほか：高強度軽量コンクリートの凍害機構に関する一考察，コンクリート工学論文集，Vol.6，No.2，pp.77-83，1995.7
- 6) 毛継沢ほか：密度の異なる軽量粗骨材の耐凍害性について，セメント・コンクリート論文集，No.57，pp.260-265，2004.2