

論文 凍結融解作用によるコンクリートの質量変化に関する文献的検討

長谷川 拓哉*1・千歩 修*2

要旨: スケーリングの予測手法構築のための基礎的検討として、既存の JIS A 1148 (ASTM C 666) A 法の質量変化率のデータを収集・整理し、各種要因が質量変化率に及ぼす影響を検討した。その結果、質量変化率は、水セメント比の影響が大きいこと、空気量の確保はスケーリングを低減することに有効であること、吸水率が高い骨材は、質量変化率を大きくすることなどの知見を得た。

キーワード: 凍結融解作用, スケーリング, 質量変化率, JIS A 1148 A 法

1. はじめに

寒冷地におけるコンクリート構造物の維持管理を考える上で、凍害の劣化予測は重要である。凍害劣化の予測に関係する研究として、これまでいくつかの提案があるが^{例えば 1),2)}, いずれも相対動弾性係数の低下が主な対象とされてきた。しかし、凍害の劣化現象は、スケーリング、ポップアウトなどがあり、これらは相対動弾性係数の低下とは異なる傾向を示し、別の予測手法が必要と考えられる。特にスケーリングは、近年、寒冷地において、融雪剤などの影響で問題となっており、その予測手法が求められている。しかし、スケーリングの予測手法を検討された事例はあるものの³⁾, まだ十分に確立されているとはいえないのが現状である。

予測手法の構築をする上で、コンクリートのスケーリングに影響する要因を明らかにする必要がある。そこで本論文では、予測手法構築を目指した基礎的な検討として、既存の JIS A 1148 (ASTM C 666) A 法の質量変化率のデータを収集・整理し、各種要因が質量変化率に及ぼす影響を検討した結果を報告する。

2. 本研究における JIS A 1148 (ASTM C 666) A 法によるスケーリング抵抗性評価の位置づけ

スケーリングの試験法は、ASTM C 672 法, RILEM CDF 試験などが代表的なものとしてあげられ、その試験データの蓄積も進んでいる。しかし、我が国では、JIS A 1148 (ASTM C 666) A 法 (以下「A 法」) が一般に行われており、この試験結果に基づいてコンクリートのスケーリング抵抗性評価ができれば有用性は高いと考えられる。

しかし、A 法によってスケーリング評価を行うことには議論のあるところである。A 法の結果は、実環境下での劣化との対応が明らかではなく、実環境に比べ厳しすぎるという意見がある。また、試験条件のわずかな違い

によって結果が大きく異なる場合があり、ASTM, JIS の適用範囲にもある通り、コンクリートの相互比較のための試験として位置づけられている。しかし、厳密な試験条件の管理の下で注意深く試験が行われるのであれば、A 法の結果は、そのコンクリートの「耐凍害性のポテンシャル」と考えられる。

ここで、A 法でスケーリングの評価を行うことを考えた場合、通常の測定を行うだけでは、直接的なスケーリング量の評価は困難である。剥離片の管理が困難であるとともに、A 法で通常測定される質量には、スケーリングの他、試験体の含水状態など質量が変化する要因が複合的に表れていると考えられるからである。スケーリング量の評価を行うには、湯浅ら⁴⁾のように水中重量を測定し体積によってスケーリング量を表すなどの工夫が必要となる。しかし、質量変化となって表れるコンクリートより失われた質量は、スケーリングの影響が大きいことは明白である。A 法での質量変化率は、絶対量としての評価は困難であるが、あるコンクリートのスケーリング抵抗性評価という観点においては、十分に指標になると考えられる。本検討では、そうした考え方の下、コンクリートの質量変化率をスケーリングの一つの指標として検討を行うこととした。なお、JIS A 1148 では、「質量減少率」とされているが、本論文では、減少だけでなく増加も含めて「質量変化率」としている。データの表示として、質量減少をしている場合、+ の符号として表すこととした。

なお、A 法で評価できるのは、そのコンクリートの「スケーリング抵抗性のポテンシャル」と考えられ、実環境下におけるスケーリング抵抗性との関係性はまた別の議論が必要と考えられる。これについては今後の課題と考えている。

*1 北海道大学大学院工学研究科 空間性能システム専攻 准教授 博士 (工学) (正会員)

*2 北海道大学大学院工学研究科 空間性能システム専攻 教授 工学博士 (正会員)

3. 収集したデータの概要

表-1 に収集したデータの概要を、表-2 にデータの水セメント比ごとの内訳を示す。ここでは、基本となる傾向を把握するため、普通ポルトランドセメント、普通骨材を用いた普通コンクリートを対象とし、試験体形状、養生などの条件が同一のものを収集した。試験データは、北海道大学建築材料学研究室（講座）で 1978～2007 年の 30 年間に行われた実験によるデータとした。これは同一の試験機関のデータによることによって、できるだけばらつきとなる要因を排除することを意図している。

収集したデータは、水セメント比では 70～25% の範囲のものが得られた。データ数は、W/C55% のものが最も多かった。また、使用された骨材は、概ね JIS A 5308 に規定される範囲のものであったが、粗骨材の一部で規定を外れるものがあつた。

なお、収集したデータは、注意深く試験が行われ、試験相互の比較ができると仮定し、以下の検討を行う。また、空気量について、空気量 3% 未満を nonAE コンクリート、3% 以上を AE コンクリートとして扱うこととした。

4. 結果と考察

4.1 質量変化率と相対動弾性係数の関係

図-1 に、水セメント比ごとの質量変化率と相対動弾性

係数の関係を示す。凍害劣化パターンとして次の 3 つがあると考えられる。

- I 相対動弾性係数は変化せず、質量変化率だけ変化するもの
- II 相対動弾性係数と質量変化率が同時に変化するもの
- III 相対動弾性係数は変化するが、質量変化率はほとんど変化しないもの
- IV 相対動弾性係数も質量変化率もほとんど変化しないもの

I および IV は耐凍害性が良好、III は耐凍害性が極めて低いもの、II はその中間のものと考えられる。また、IV は低水セメント比の場合である。III の質量変化率がほとんど変化していないのは、スケーリングが生じる前に相対動弾性係数が低下し、早期に試験が終了したことが主な原因と考えられる。また、I は相対動弾性係数が大幅には低下しておらず、耐凍害性が良好と評価されるものである。II では、内部組織の膨張劣化と同時にスケーリングが生じている場合と考えられる。

このように、質量変化率と相対動弾性係数の低下は連動しておらず、それぞれ別々に進行していることが確認できる。つまり、スケーリングは、内部組織の膨張劣化が生じていない場合でも進行しており、相対動弾性係

表-1 収集したデータの概要

試験機関	北海道大学 建築材料学研究室(講座)
試験時期	1978～2007年
試験法	ASTM C 666 (JIS A 1148) A法
W/C	70～25%
使用材料	セメント 普通ポルトランドセメント
	粗骨材 吸水率1.61～3.13%の普通骨材
	細骨材 吸水率1.01～2.54%の普通骨材
	混和剤 AEコンクリートの場合: AE剤、AE減水剤または高性能AE減水剤 一部にAE助剤使用
養生	2週水中養生
試験体形状	75×75×400mm
試験条件	塩化物を使用しない

表-2 データの内訳

W/C(%)	データ数
70	12
～60	7
～50	40
～40	7
～30	9
～20	7
計	82

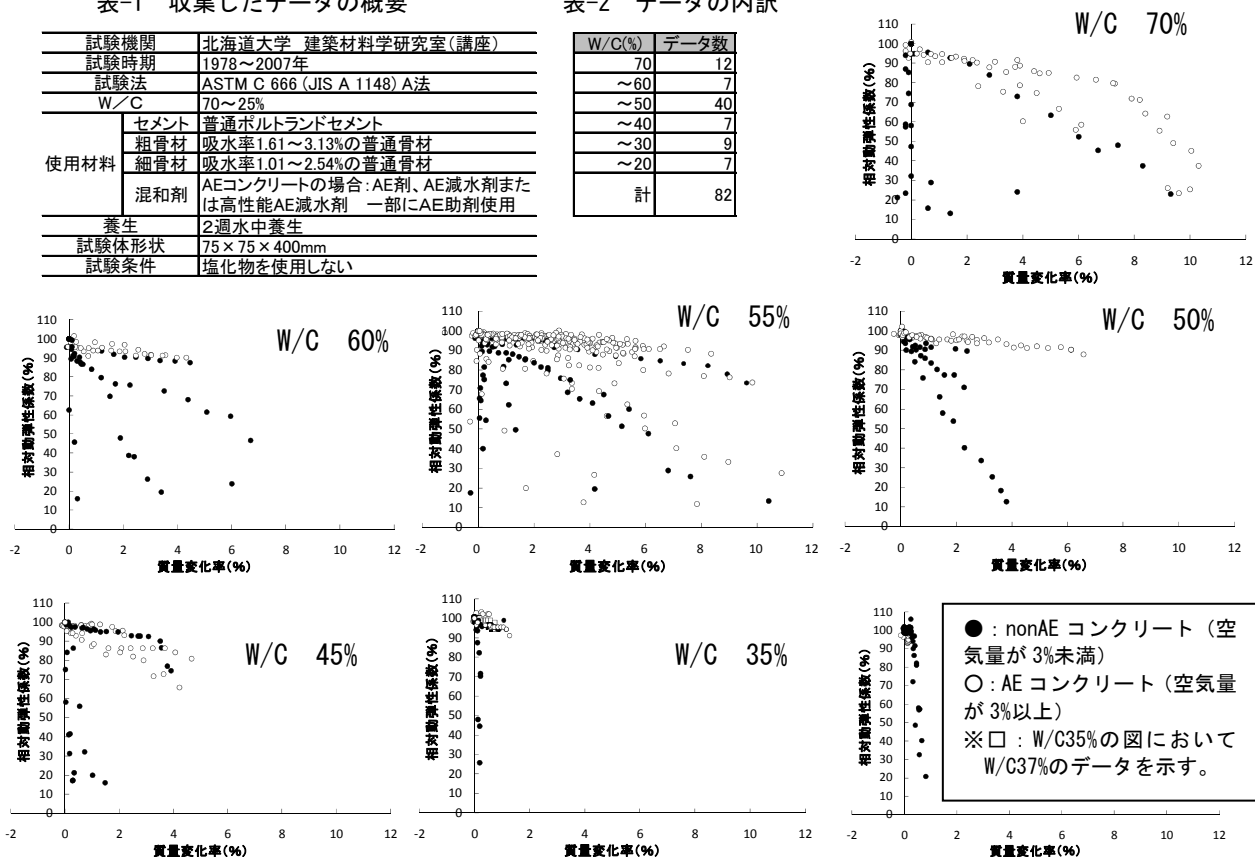


図-1 水セメント比ごとの質量変化率と相対動弾性係数の関係

の指標だけでは全ての凍害劣化予測を行うことは困難であるといえる。

コンクリート種別ごとにみると、AEコンクリートは、一部を除きⅠまたはⅣに分類される。ⅡとⅢに分類されるAEコンクリートは、吸水率が高い骨材などが原因で耐凍害性が低いと考えられる。

4.2 水セメント比の影響

図-2に、水セメント比ごとのサイクルと質量変化率の関係を示す。図より、同じ水セメント比では、相対動弾性係数が低下していない場合（図中の○）、質量変化率の増加の傾きは一定範囲内にあることがわかる。これから、調査より質量変化率をある程度の精度で予測できる可能性があると考えられる。相対動弾性係数が低下している場合（図中の△）、質量変化率が早期に大きくなる傾向がある。これは、内部組織の劣化でひび割れが生じ、試験体内に水分が流入しやすくなり、スケーリングの進行が加速されていることなどが原因と考えられる。

水セメント比で比較すると、水セメント比が大きいほど質量変化率が大きくなっていることが確認できる。

ここで、水セメント比ごとに、相対動弾性係数が低下していないAEコンクリートのデータを抽出し、原点を通る直線に回帰させた。水セメント比とこの回帰直線の傾きの関係を図-3に示す。この回帰直線の傾きは、1サ

イクルあたりの質量変化率を示している。図-3より、水セメント比と1サイクルあたりの質量変化率は、高い相関がみられることがわかる。水セメント比25%を除き両者の関係を直線で回帰すると、(1)式で表すことが出来る。

$$W_D = 0.65(W/C) - 21.7 \quad (1)$$

ここに W_D : 1サイクルあたりの質量変化率 (%/サイクル)

W/C : 水セメント比 (%)

(1)式のx切片は33.4%となり、A法でスケーリングが生じる水セメント比の限界は概ね35%前後にあると考えられる。これよりも低い水セメント比の場合、スケーリングがほとんど生じないため、相対動弾性係数の低下の有無にかかわらず、質量変化率として表れていないと考えられる。

高い水セメント比で相対動弾性係数が低下している場合、水セメント比と質量変化率の関係は明確ではなかった。内部組織が膨張劣化を生じている場合、何がスケーリングの支配的な要因となっているかについては、今後検討する必要があると考えられる。

4.3 空気量の影響

空気量がスケーリングに及ぼす影響は、空気量が多く

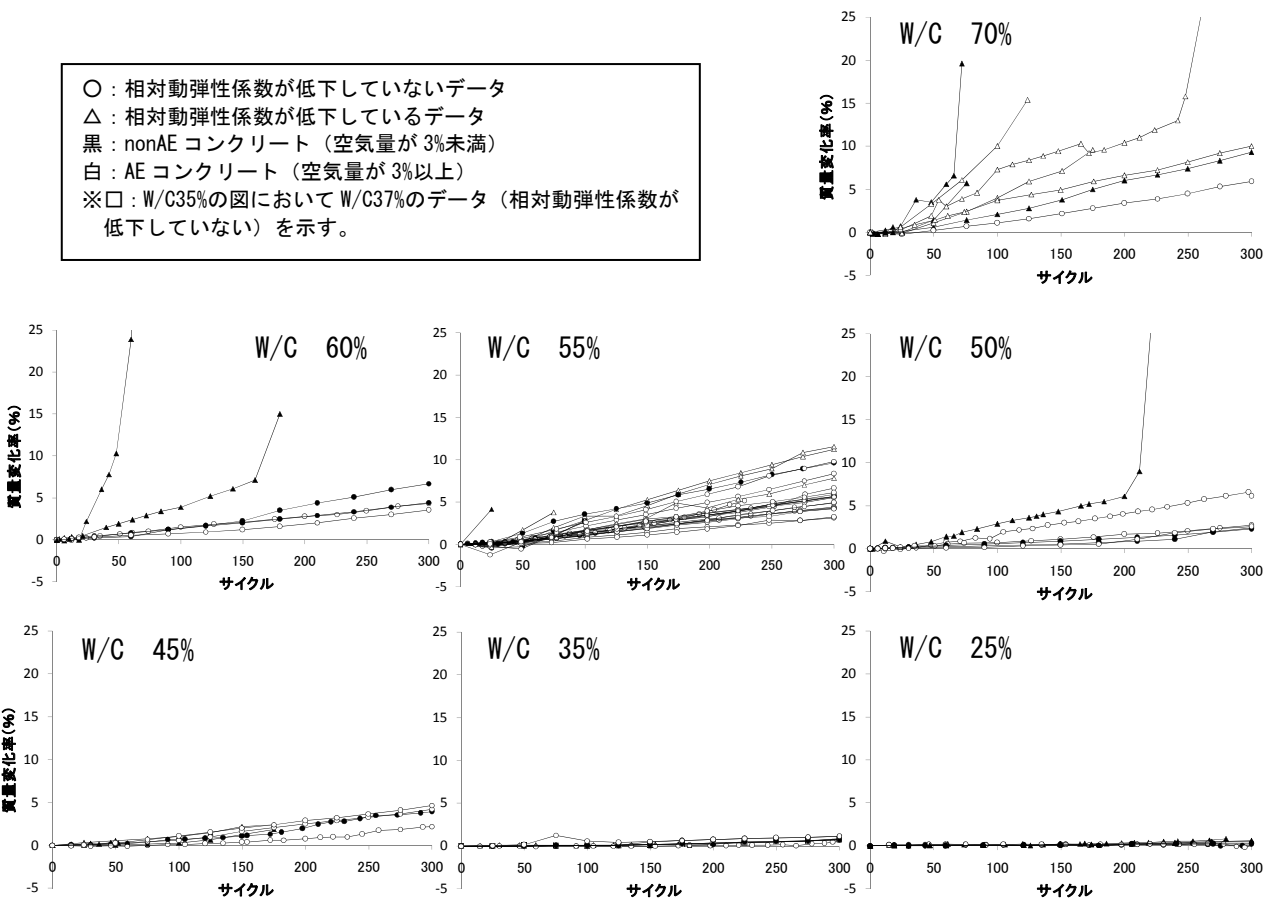


図-2 水セメント比ごとの質量変化率

なるほどスケールリングは低減される傾向があることが指摘されている^{4),5)}。普通コンクリートであれば4.5%を目標空気量とすることが多く、また空気量を増量しても結果に大きな違いがみられない^{4),5)}ことから、ここでは、AEコンクリートとnonAEコンクリートの比較をすることとした。

同一材料、同一水セメント比で、AE（空気量4.5%程度）とnonAE（2%程度）の両条件で試験を行ったものを抽出し、両者の質量変化率の関係を図-4に示す。これから、水セメント比によらず、AEコンクリートの質量変化率は同じ条件のnonAEコンクリートの約6割程度に低減される傾向がみられる。このことから、空気量の確保は、スケールリングを低減する上で有効と考えられる。

4.4 骨材の吸水率の影響

図-2より同じ水セメント比で、相対動弾性係数の低下がなければ、質量変化率の増加の傾きは一定範囲内にあるといえる。ここで生じている結果のばらつきは、使用材料、施工状況、試験条件などが影響していると考えられる。このうち、影響が大きいと考えられる材料の影響について検討することとした。

凍害劣化は、骨材の吸水率と関係が深いことが指摘されている^{例えば6)}。そこで、データ数が最も多い水セメン

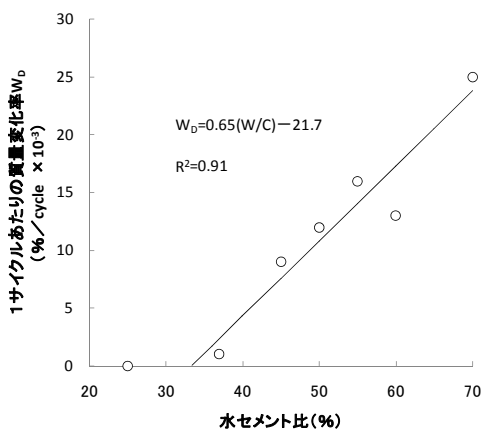


図-3 水セメント比と1サイクルあたりの質量変化率の関係

表-3 骨材の吸水率の影響の分析に用いたデータ

300サイクル時の質量変化率	骨材の吸水率		300サイクル時の質量変化率	骨材の吸水率	
	細骨材の吸水率	粗骨材の吸水率		細骨材の吸水率	粗骨材の吸水率
2.1	1.01	2.35	3.1	1.81	2.47
5.2	2.54	2.59	6.7	1.81	2.11
6.7	1.81	2.47	4.3	1.81	2.87
5.9	1.81	2.47	4.9	1.81	2.37
5.7	1.81	2.47	4.3	1.81	2.20
4.9	1.26	2.69	3.3	1.81	2.88
4.4	1.26	2.69	4.2	1.81	2.00
11.2	1.44	3.13	5.6	1.81	2.47
11.6	1.44	3.13	9.8	1.81	3.14
5.6	1.81	0.41	6.1	1.81	1.87
5.6	1.81	1.75	9.6	1.45	1.99
5.5	1.81	0.49			

ト比55%のAEコンクリートを対象とし、300サイクル時の質量変化率を目的変数とし、粗骨材と細骨材の吸水率を説明変数とする重回帰分析を行った。対象としたデータを表-3に、実測値と回帰式による予測値の関係を図-5に示す。全部のデータを対象とした場合、重相関係数は0.21と低く、骨材の吸水率によって質量変化率の違いを説明することは難しい結果となっている。ここで、骨材の吸水率が2.2%以上のデータのみを抽出し、再度重回帰分析を行った。その結果、図-5中に示す通り、重相関係数は0.71に向上した。この結果から、骨材の吸水率が高い場合、特に粗骨材の吸水率が大きい場合は、質量変化率に大きな影響を与えると考えられる。しかし、骨材の吸水率が小さい場合は、質量変化率への影響は明確ではなく、骨材の吸水率以外の要因を考える必要があると考えられる。

4.5 他機関データとの比較

これまでの検討は、北海道大学で行われた試験データを用いたものであるため、他機関データと比較を行うこととした。他機関データは、日本コンクリート工学協会、日本建築学会など関連学会誌の文献調査により、AEコンクリートで相対動弾性係数の低下がないものを抽出した^{7)~15)}。300サイクル時の質量変化率について、(1)

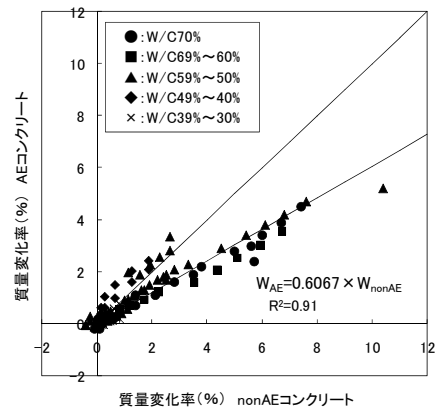


図-4 AEコンクリートとnonAEコンクリートの質量変化率の関係

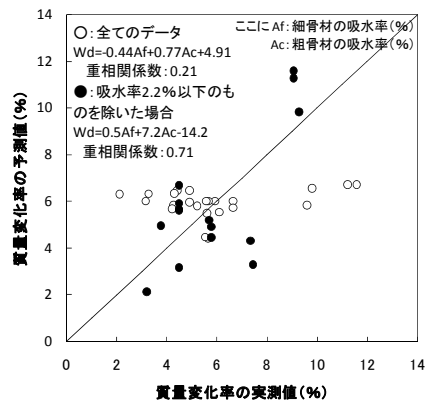


図-5 W/C55%の質量変化率の実測値と骨材の吸水率に基づく回帰式による予測値の関係

式による予測値と文献調査に基づく実測値の関係を図-6に示す。これによれば、一部外れている値があるものの、比較的良好な相関が得られていると考えられる。このことから、A法の試験相互の比較は実用上差し支えのない範囲で可能と考えられる。今後さらにデータを蓄積することで、調査から質量変化率を推定する手法が構築できる可能性があると考えられる。

5. まとめ

JIS A 1148 (ASTM C 666) A法の試験データに基づき、各種要因がコンクリートの質量変化率に及ぼす影響を検討した結果、以下の知見を得た。

- 1) 質量変化率は、水セメント比の影響が大きく、水セメント比が大きくなれば質量変化率が大きくなる。また、水セメント比が35%前後以下になると、質量変化率が0に近くなる。
- 2) AEコンクリートの質量変化率は、同じ条件のnonAEコンクリートの約6割程度となり、空気量の確保はスケールリングを低減することにより有効である。
- 3) 吸水率が高い骨材は、質量変化率を大きくする。

謝辞

本研究の一部は、大林都市研究振興財団の研究助成「表面粗さ簡易測定によるコンクリート構造物の凍害劣化進行・美観低下予測」(研究代表者：長谷川拓哉)により実施した。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 浜幸雄, 松村光太郎, 田畑雅幸, 富板崇, 鎌田英治: 気象因子を考慮したコンクリートの凍害劣化予測, 日本建築学会構造系論文集第523号, pp.9-16, 1999.9
- 2) 石井清, 江川頭一郎, 堤知明, 野口博章: 凍結融解作用を受けるコンクリートの劣化予測に関する研究, 土木学会論文集 No.564/V-35, pp.221-232, 1997.5
- 3) 遠藤裕丈, 田口史雄, 嶋田久俊: スケールリング劣化抵抗性の予測・判定手法の一提案, 日本コンクリート工学協会 コンクリートの凍結融解抵抗性の評価方法に関するシンポジウム論文集, pp.23-30, 2006.12
- 4) 湯浅昇, 笠井芳夫, 松井勇, 鎌田英治: 若材齢から乾燥を受けたコンクリートの耐凍結融解性, 日本建築学会構造系論文集第526号, pp.9-15, 1999.12
- 5) 鮎田耕一: 海岸コンクリート構造物の凍害に関する研究, 北海道大学学位論文, 1986
- 6) 麓隆行: 高吸水率細・粗骨材の使用がコンクリートの凍結融解抵抗性に及ぼす影響, 日本コンクリート工学協会 コンクリートの凍結融解抵抗性の評価

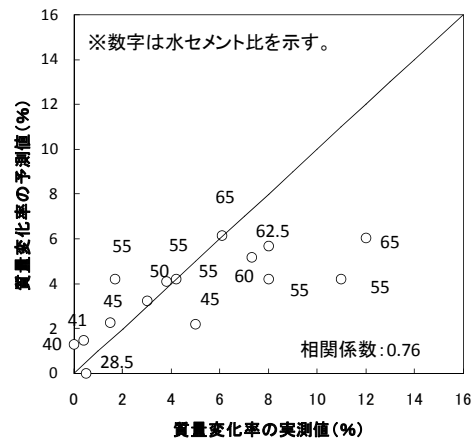


図-6 文献調査による質量変化率と(1)式による予測値の関係

方法に関するシンポジウム論文集, pp.49-54, 2006.12

- 7) 福留和人ほか: 高炉スラグ微粉末を混入した水中不分離コンクリートの凍結融解抵抗性, コンクリート工学年次論文報告集 12-1, pp.685-690, 1990
- 8) 三浦律彦ほか: 空気量, 気泡分布, 細孔分布が高強度コンクリートの耐凍結融解抵抗性に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文報告集 12-1, pp.679-684, 1990
- 9) 高橋正行ほか: 凍結防止剤がコンクリートの凍結融解抵抗性におよぼす影響, コンクリート工学年次論文報告集 13-1, pp.701-704, 1991
- 10) 月永洋一ほか: 塩分作用下でのコンクリートの凍害劣化に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集 13-1, pp.705-708, 1991
- 11) 城田常雄ほか: 表面被覆を施したコンクリートの耐凍害性, コンクリート工学年次論文報告集 17-1, pp.831-836, 1995
- 12) 板橋洋房, 三浦尚: 凍結防止剤の作用を受けたコンクリートの凍害劣化に及ぼす乾燥の影響, コンクリート工学年次論文報告集 18-1, pp.913-918, 1997
- 13) 長谷川拓哉ほか: 鉄筋コンクリート造集合住宅における仕上塗材の老朽度判定方法の検討 その2 促進試験及び暴露試験に基づく検討, 日本建築工学会大会論文集, pp.25-28, 2000.10
- 14) 権代由範ほか: 凍結融解試験法の違いによる塩化物作用下でのコンクリートの耐凍害性評価, 日本コンクリート工学協会 コンクリートの凍結融解抵抗性の評価方法に関するシンポジウム論文集, pp.89-96, 2006.12
- 15) 菅原隆: 表層部緻密化コンクリートの凍結融解抵抗性に関する実験的研究, 日本コンクリート工学協会コンクリートの凍結融解抵抗性の評価方法に関するシンポジウム論文集, pp.55-62, 2006.12

