

塩化物環境下におけるコンクリートのスケーリング抵抗性と その評価手法に関する実験的研究

権 代 由 範

要 旨

寒冷地のコンクリート構造物は、冬期の苛酷な寒冷気象により凍結融解作用を受け、凍害を生じる。これまで、凍害による劣化は、凍結水圧作用下における組織の膨張による劣化、即ち、ひび割れや剥落・崩壊として認識されていた。しかし、近年、建築・土木コンクリート構造物において、コンクリート表層が鱗状に剥離するスケーリングが最も多く観察されるようになった。この要因として、NaClを主成分とする凍結防止剤の散布量増加が挙げられる。我が国では、1991年にスパイクタイヤの使用規制に関する法律が施行され、冬期の路面凍結の防止措置として凍結防止剤の散布量が急増し、寒冷地コンクリートは厳しい塩化物環境下に曝される機会が増加した。その結果、塩化物と凍結融解の複合作用により著しく促進されるスケーリングが顕在化し、これまで目立たなかった凍害の新たな劣化形態として注目されている。しかし、我が国では、塩化物環境下におけるコンクリートのスケーリング抵抗性評価手法は確立されておらず、寒冷地コンクリートの耐久性照査や維持管理の観点から、評価手法の確立は、緊急かつ重要な課題である。

本研究は、以上を背景に、我が国における塩化物環境下でのスケーリング抵抗性評価手法の提案を目的に実験的な検討を行ったものである。本論文では、海外において主流となっているスケーリング試験「ASTMC672法」(以下、ASTM法と略記)および「RILEM CDF法」(以下 RILEM法と略記)に着目し、スケーリングの発生性状および試験法の簡便性や有用性について相対評価を行い、我が国における汎用性および簡便性を有する試験法として、RILEM法の適用を提案している。さらに、これらスケーリング試験の実施に必要な大型設備を必要としない簡易試験法として、家庭用冷凍庫を用いた試験法を提案している。また、実構造物を対象としたスケーリング抵抗性評価手法として、コンクリートの透気性を指標とした簡易透気試験法の採用を提案している。

第1章は緒論であり、研究の背景と目的を述べている。

第2章「我が国におけるスケーリング試験法適用の提案」では、我が国におけるスケーリング抵抗性試験法の標準化に資するため、海外規格 ASTM法および RILEM法を対象に比較実験を行い、両試験法の試験条件に基づくスケーリングの発生性状や試験法の簡便性および汎用性について相対評価を行っている。得られた知見を以下に示す。

学位記番号と学位：博第45号，博士（工学）

授与年月日：平成21年3月19日

授与時の所属：大学院工学研究科建築工学専攻博士後期課程

1) ASTM 法, RILEM 法における, スケーリング量およびスケーリング発生の経時変化には大きな相違が生じる。これは, 両試験法における, NaCl 試験溶液の供給方法が, 上面吸水と下面吸水とで異なることに大きく依存し, 凍結融解に伴う試験溶液の濃縮により生じた, 試験溶液内の濃度勾配の影響に起因する。

2) スケーリング量の変動係数は, RILEM 法による場合が小さい。これは, 凍結融解を与える伝熱媒体の相違に起因する。ASTM 法は空気を媒体としているのに対し, RILEM 法はブライン液を媒体としていることから, RILEM 法は厳密な温度制御が可能であり, 試験値の変動を抑制し, より高い精度を有する試験が可能である。

3) RILEM 法は, 現行の凍結融解試験 JISA1148A 法の試験装置を準用することが可能で, 試験に用いる備品も入手し易く, 汎用性および簡便性を有する。従って, 我が国におけるスケーリング試験法として RILEM 法の適用が提案できる。

第 3 章「スケーリング試験の簡易法の提案」では, 大型試験設備を用いず, 低コストで簡易的に実施可能なスケーリング試験法として, 冷凍庫と恒温槽の間での供試体移動により凍結融解作用を与える試験法を開発, 提案している。ここでは, ASTM 法とその簡易法および RILEM 法とその簡易法の 4 試験を実施し, 各試験法によるスケーリング量, 塩化物イオン浸透深さ, 並びに歪変化について比較検討を行った。得られた知見を以下に示す。

1) ASTM・RILEM 両簡易法では, 冷凍庫の使用による急激な温度変化を生じ, 準拠法と比較して凍結融解の温度条件は苛酷となり, スケーリング量は増加傾向を示す。しかし, 水セメント比毎のスケーリング抵抗性を反映することから, 調(配)合や使用材料によるスケーリング抵抗性の相対的な比較試験として適用性を有する。

2) ASTM 簡易法は, 冷凍庫使用に加え, 試験の簡便性を考慮し供試体の小型化を図っている。スケーリング量は試験面積が小さくなると減少傾向を示すが, 水セメント比毎のスケーリング抵抗性を反映し, 相対的な比較試験として適用できる。

3) ASTM・RILEM 両簡易法の塩化物イオン浸透深さは, ASTM・RILEM 両準拠法のそれと大きな相違はなく, 簡易法の妥当性を裏付ける。また, 塩化物イオン浸透深さとスケーリング量に相関が見られ, スケーリング劣化の進行が, 塩化物イオンの浸透・拡散により促進されることを裏付ける。

4) ASTM・RILEM 両簡易法による断面内の歪変化は, 冷凍庫の温度制御能力に起因し不規則な挙動を示すが, 凍結に伴う収縮歪みを生じ, 簡易法によるスケーリングの発生は, 塩化物作用下における浸透圧に起因することを裏付ける。また, 収縮歪みの発生挙動や最大値は, ASTM・RILEM 両準拠法と近似した傾向が得られ, 簡易法の妥当性を裏付ける。

5) 冷凍庫と 20℃ に管理可能な室を用いることで、大型設備を現有しないコンクリート関連企業や研究機関においても、スケーリング抵抗性の評価が可能となる。

第 4 章「スケーリング抵抗性評価手法としての簡易透気試験法適用の提案」では、スケーリングが水や塩化物の浸透・拡散により促進され、コンクリートの緻密性に依存するという観点から、緻密性を間接的に表す指標としてコンクリートの透気性に着目し、実構造物に適用可能な簡易透気試験法の採用を提案している。ここでは、簡易透気試験法の測定条件、有用性並びにスケーリング抵抗性の評価指標としての適用性について検討した。得られた知見を以下に示す。

1) 簡易透気試験法の試験装置は、吸引鐘・真空ポンプ・差圧計・デジタルマルチメータ・パーソナルコンピュータから構成され、透気性指標値は、吸引鐘内の真空度の低下量と低下時間の平方根から求まる勾配を「簡易透気係数」として算出できる。

2) 簡易透気試験の試験条件として、試験面シール幅をチャンバー外周 60mm、部材端から吸引鐘中心までの距離を 150mm 確保することで、従来、30% 程度の試験値の変動が見込まれる透気試験において、変動係数 15% を実現した。また、測定対象の部材厚さの影響は、厚さ 100mm 以上の部材であれば、無視できる。

3) 簡易透気係数は、養生条件により異なるコンクリートの表層組織の緻密性を反映し、さらに、実用実績に優れたトレント透気係数、室内試験により得られるアウトプット透気係数と対応関係を示すことから、簡易透気試験法の有用性が認められる。

4) 簡易透気係数は、ASTM 法によるスケーリング量と対応関係を示すことから、実構造物コンクリートを対象としたスケーリング抵抗性評価手法として、適用性を有する。

第 5 章は本論文の結論であり、本研究により得られた成果を述べている。

主指導教員 月 永 洋一

Experimental Study on Scaling Resistance and that Evaluating Methods of Concrete Exposed to Chloride Environment

Yoshinori GONDAI

Abstract

In cold regions, concrete structures suffer from frost damage caused by freeze-thaw action during severe cold winter. In general, deteriorations by frost damage have been recognized as the crack, spalling or degradations which are caused by the expansion of the internal structures developed by unfrozen water pressure during freezing. In recent years, however, the termed scaling that surface layers of concrete are scaled off by delamination, have been observed in concrete structures. This will be attributed to the increased spread of de-icing salts, mainly composed of sodium chloride (NaCl), on road surfaces. In Japan, strict limitations on the use of studded tires from 1991 resulted in a rapid increase in the use of de-icing salts to prevent road surfaces from freezing. Because of this, concrete structures in cold regions are now exposed to a more severe chloride environment than ever. As a result, scaling of concrete has existed clearly because it is synergistically promoted by the combined freeze-thaw action with the chloride ion penetration, which is recognized as a form of frost damage often observed. Japan currently has no technical method regulated to evaluate concrete scaling resistance under the chloride environment. Thus, the establishment of such test methods is an urgent and important subject from the viewpoints of concrete durability, as well as maintenance and management of concrete in cold weather regions.

In this background, the experimental study was conducted for testing the scaling resistance in a chloride environment. In this paper, ASTM C672 and RILEM CDF were examined for testing scaling, which are in popular use outside Japan. These tests were compared from the ease of use and testing utility, and the application of RILEM CDF was proposed as an available test method in Japan. In order to perform these scaling tests rapidly and without requiring the use of large controlled chamber, test method utilizing a home freezer was proposed. As a technique to evaluate scaling resistance of actual structures, test method for the air permeability of concrete was proposed as an index.

Section 1 shows the introduction of this paper and describes the background and purpose of this research.

Section 2 "Proposal of the Scaling Test Method Applicable in Japan" introduces the companion experiments using the overseas standards ASTM C672 and RILEM CDF, in order to

contribute to the standardization of the scaling resistance test method in Japan. Both tests were examined to determine their ability to assess the development of scaling, their ease of use and availability of the test conditions. The following results were obtained.

1) The amount and the development of scaling over the passage of time differed greatly between ASTM C672 and RILEM CDF. Since the different procedures are adopted in supplying and penetrating the NaCl water solution, from the top surface of test specimen in ASTM method and the bottom surface in RILEM method, this difference may result from the influence of concentration gradient of the test solution caused by the condensation during freeze-thaw cycles.

2) The coefficient of variation regarding the amount of scaling measured was smaller for the RILEM CDF method. This is considered to be greatly attributed to the different heat transfer media used in applying the freeze-thaw action. Different from the ASTM C672 method using air as transfer media, the RILEM CDF method uses brine liquid. As a result, the RILEM CDF method allows for more strict temperature control and suppresses the variation of test values, resulting in higher test accuracy.

3) For the RILEM CDF method, the test equipment used in the current freeze-thaw test JIS A 1148 A, is accordingly applied. The test does not require any other instruments difficult to get in hand and is broadly applicable and easy to use. Accordingly, the adoption of RILEM CDF method is proposed as the scaling test method adaptable in Japan.

Section 3 "Proposal of a Simplified Test Method for Scaling Resistance" discusses a test method developed to conduct freeze-thaw test not requiring large test facilities, instead of works simply by moving the specimens between a freezer and a thermostatic chamber. This scaling resistance test can be performed easily and at low cost. In this research, four kinds of tests, using the standard and simplified ASTM C672 method and the standard and simplified RILEM CDF method, were examined. The amount of scaling, chloride ion penetration depth and strain change were compared in each test method and the following results were obtained.

1) In the simplified ASTM and RILEM methods, the temperature conditions for freeze-thaw are more severe than in those of the standard methods, because of the drastic temperature changes in a freezer. As a result, the amount of scaling tends to increase. However, the simplified methods accurately reflect the scaling resistance in different water-cement ratio and are, therefore, applicable to relative comparisons of scaling resistance.

2) For the simplified ASTM method test, small specimens were used for convenience with a freezer. The smaller the test surface area, the less the amount of scaling. However, this method accurately reflects the scaling resistance in different water-cement ratio and is therefore applicable to relative comparisons.

3) The chloride ion penetration depth observed by the simplified ASTM and RILEM methods was not significantly different from that observed by the standard ASTM and RILEM methods. This means the reasonability for the adoption of the simplified methods. In addition, a correlation was found between the chloride ion penetration depth and the amount of scaling. This supports the conclusion that scaling is promoted by the penetration and diffusion of chloride ions.

4) Strain changes by the simplified ASTM and RILEM methods showed irregular behaviors depending on the temperature control capacity of the freezer, but contraction strains were observed in freezing. Thus, the simplified methods support the conclusion that scaling can be influenced by osmotic pressure. Since the observed contraction strain and its maximum values were approximately the same as those observed in the standard ASTM and RILEM methods, the use of the simplified methods was judged available and promising.

5) By using a freezer and the chamber maintained at 20°C, scaling resistance can be easily evaluated in concrete companies and research institutes and so on with no large test facilities.

Section 4 "Development of a Rapid Air Permeability Test Method to Evaluate Scaling Resistance of Concrete" introduces a rapid air permeability test method. Since scaling is promoted by the penetration and diffusion of water and chloride, it therefore depends on the rigidity and permeability of concrete. By considering the air permeability, a rapid air permeability test method was developed applicable to actual concrete structures. This air permeability test method was examined in different testing conditions and the availability and validity were investigated. The following results were obtained:

1) The test equipment used to apply the rapid air permeability test, consisted of a vacuum chamber, a vacuum pump, a differential pressure gage, a digital multi-meter, and a personal computer. The air permeability index value can be calculated with the gradient of the reduction of the vacuum pressure versus the square root of its duration in the vacuum chamber, which was designated as the "rapid air permeability factor."

2) For the rapid air permeability test, the sealing width of 60 mm was secured around the chamber and a distance of 150 mm was secured from the specimen edge to the center of the vacuum chamber. These test conditions reduced the coefficient of variation to 15% in the air permeability test, in contrast to that of 30% always expected. The influence of the thickness can be ignored if the specimen thickness is 100 mm or more.

3) The rapid air permeability factor accurately reflects the tightness of a concrete surface layer structure, depending on the curing conditions. In addition, this factor was found to be in

good compatibility with the Torrent air permeability factor and output air permeability factor. As a result, the usefulness of the rapid air permeability test method was proven.

4) The rapid air permeability factor was also found to be compatible with the amount of scaling tested by the ASTM C672 method. Therefore, the application of the rapid air permeability test method for actual structures, as a technique for evaluating and diagnosing concrete scaling resistance was judged promising.

Section 5 is the conclusion of this paper and describes the results of this research.

Professor(Chairperson) Youichi TSUKINAGA