

凍害によるコンクリート劣化に対する空気量を変数とする耐久性照査方法の提案

東京大学生産技術研究所 フェロー会員 〇岸 利治
東京大学大学院工学系研究科 正会員 高橋 佑弥

1. はじめに

コンクリート標準示方書では、凍結融解試験における相対動弾性係数の最小限界値と特性値を介した水セメント比との比較によって、凍害に対する照査を行うことになっている¹⁾。ここで、相対動弾性係数は水セメント比に応じて異なる値が与えられているが、コンクリート中の空気量は変数として扱われておらず、表形式で与えられた相対動弾性係数は空気量が 4～7%の普通コンクリートの場合に想定してよい値とされている。その一方で、コンクリートの耐凍害性は実際には空気量に大きく依存することが知られており、実際の施工ではコンクリートの荷下ろし時点から打込みまでの過程で空気量が減少して耐凍害性が損なわれることも懸念されている。そこで本稿では、水セメント比に加えて空気量を変数として相対動弾性係数を定式化した凍害に対する耐久性照査方法について検討した。

2. 相対動弾性係数に材料係数を直接考慮する現行の照査方法の課題

凍害に対する照査に限らず、2022 年制定版で改訂される以前の耐久性照査の課題の一つは、コンクリートの材料係数に供試体と構造物中との材料物性の差異を考慮するのに必要な値を適切に設定できないことであった。コンクリートの材料係数 γ_c は、材料物性の特性値からの望ましくない方向への変動、供試体と構造物中との材料物性の差異、材料物性が限界状態に及ぼす影響、材料物性の経時変化等を考慮して定めるものとされており、本来は照査の対象や部位によらず一律の値を用いることが望ましい。そこで、2022 年制定版では、定量的な照査方法が示されている耐久性に関する照査においては、原則として安全性に関する照査と同様にコンクリートの材料係数は 1.3 とするのがよいとした¹⁾。しかし、半定量的な照査方法の提示に留まっている凍害に対する照査では、2022 年制定版においても引き続き材料係数を 1.0 とせざるを得ない課題が残っている。

現行の凍害による内部損傷に対する照査は、凍結融解試験における相対動弾性係数の最小限界値とその設計応答値の比に構造物係数を乗じた値が、1.0 以下であることを確かめることにより行うことを原則としている。断面と気象条件に応じた相対動弾性係数の最小限界値は表形式で与えられており、最も厳しい条件では、85%以上の相対動弾性係数が求められている。一般に、供試体と構造物中との材料物性の差異を考慮する材料係数は設計値を特性値から求める際に考慮されるので、現行の凍害に対する照査においても、相対動弾性係数の特性値を材料係数で除すことで相対動弾性係数の設計応答値が与えられる。しかし、凍害に対する照査が他の耐久性照査と異なるのは、相対動弾性係数は物性を表す絶対値ではなく最大値の初期値を 100%とする相対値であることである。このことにより、良好な製造と施工を行ったとしても、材料係数を 1.3 とすると設計応答値は最大でも 77%となるため、最も厳しい条件では照査を満足する解が存在しないことになる。

2022 年制定版における示方書の改訂で、耐久性に関する照査においても、(中性化と)水の浸透に伴う鋼材腐食深さに対する照査、中性化に伴う鋼材腐食に対する照査、塩化物イオンの侵入に伴う鋼材腐食に対する照査で安全性に関する照査と同様に材料係数を 1.3 とすることが可能になり、現在は半定量的な照査方法の提示に留まっている凍害に対する照査においても、材料係数に 1.3 を考慮できる照査方法の導入が求められる。特にコンクリートの荷下ろし時点から打込みまでの過程で空気量が減少して構造物中のコンクリートの耐凍害性が損なわれる懸念については、正に供試体と構造物中との材料物性の差異を考慮する材料係数に適切な値を設定して考慮すべきであることから、その必要性は明白で喫緊の課題であると言える。

キーワード コンクリート, 耐久設計, 耐久性照査, 凍害, 相対動弾性係数, 空気量

連絡先 〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1

東京大学生産技術研究所 人間・社会系部門 TEL03-5452-6394

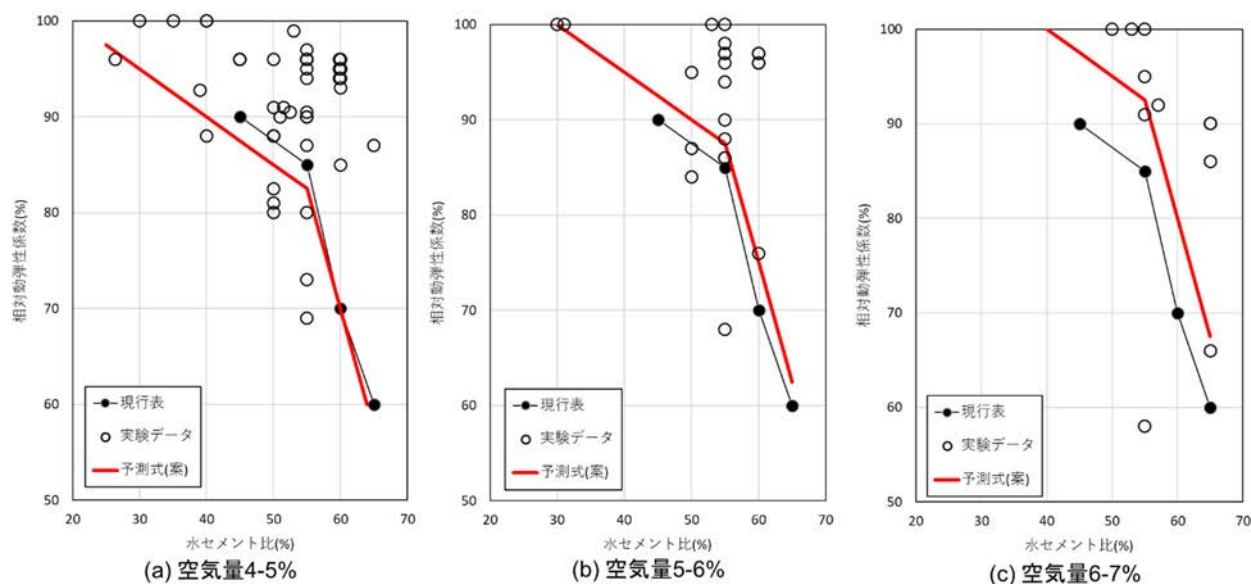


図-1 凍結融解試験による相対動弾性係数と水セメント比の関係

3. 空気量を変数とする新たな耐久性照査方法の提案

図-1に、2022年制定示方書の検討において収集された既往の実験による普通ポルトランドセメントを使用したコンクリートの水セメント比と相対動弾性係数の関係を示す²⁾。三段階に区分した設計空気量毎に整理している。凡例で現行表としたのは、示方書に表形式で与えられている相対動弾性係数とそれを満足するための水セメント比の関係を線形補完したものである。現行表で与えられている水セメント比と相対動弾性係数の関係は、空気量が4-5%であってもある程度安全側の設定となっていると言えるが、その一方で、コンクリートの荷下ろし時点から打込みまでの過程で空気量が4%を割り込んでしまうと、現行表に示された相対動弾性係数が構造物中のコンクリートでは維持されない可能性も示唆される。また、空気量が4-5%、5-6%、6-7%と大きくなるに従って相対動弾性係数が大きくなる傾向が明らかである。

従来の示方書では、耐久性に関する照査で設定する限界状態の不都合さは安全性に関する照査で想定するもののほど深刻でないことから、特性値に期待値（平均値）をとり、材料物性が特性値を外れる確率に50%を想定していた。ちなみに、安全性に関する照査では、一般に、強度の不良率として5%を想定している。これに対して、2022年制定示方書では、中性化と水の浸透に伴う鋼材腐食深さに対する照査では、材料物性が特性値を外れる確率に引き続き50%を想定しているが、限界状態に至った場合の不都合さが大きい塩化物イオンの侵入に伴う鋼材腐食に対する照査では、材料物性が特性値を外れる確率に25%を想定して特性値を設定した。そこで、コンクリートが直接損傷を受ける凍害に関しても、相対動弾性係数がばらつきにより特性値を下回る確率が凡そ25%となるように、空気量と水セメント比を変数とする相対動弾性係数の予測式を以下のように提案する。

$$E_p = 5 \cdot (a / \gamma_c - 4.5) - 50 \cdot (W/C) + 110 \quad (0.25 \leq W/C \leq 0.55, 65 \leq E_p \leq 100) \quad (1)$$

$$E_p = 5 \cdot (a / \gamma_c - 4.5) - 250 \cdot (W/C) + 220 \quad (0.55 < W/C \leq 0.65, 65 \leq E_p \leq 100) \quad (2)$$

ここに、 a ：コンクリートの空気量（%）， γ_c ：コンクリートの材料係数で、一般に1.3， W/C ：水セメント比。

図-1中に、空気量を各区分の中央値とした相対動弾性係数の算出結果を予測式（案）として太線で示す。

4. おわりに

今後、本提案式の妥当性が検証され、次回の改訂で示方書に反映されることを期待する。本提案式の考案にあたっては、コンクリート標準示方書改訂小委員会での議論が参考になったことを付記して謝意を表す。

5. 参考文献

- 1) 土木学会：2022年制定 コンクリート標準示方書 [設計編]，2023.3
- 2) 土木学会：2022年制定 コンクリート標準示方書 改訂資料 基本原則編・設計編・維持管理編，2023.3