NaCl 溶液に浸漬したモルタルの引張軟化特性のモデル化

北海道大学	学生員	〇三浦	泰人
北海道大学	正会員	佐藤	靖彦

1. はじめに

淡水と接する環境や塩化物イオンの作用を受ける環 境にあるコンクリート構造物は、溶脱によりセメント 硬化体中の水和物が減少するという現象が生じている ¹⁾。溶脱は長期的な耐久性設計を要するコンクリート構 造物において問題視され、以前からコンクリートの変 質調査や溶脱のカルシウムイオン拡散などの解析的検 討が進められてきた^{1),2)}。一方、積雪寒冷地において凍 結防止剤などに扱われている NaClや CaCl₂ などを含む 溶液では溶脱が促進されるという報告がある²⁾。

本研究では、溶脱による水和物の減少に伴う引張特 性の変化に着目した。そこで、NaCl 溶液によるモルタ ルの2ヶ月間の短期浸漬実験を行った。浸漬後の供試 体において曲げ試験を行い、得られた荷重-変位曲線か ら引張軟化曲線を同定し、引張強度、破壊エネルギー を求めるとともに、化学分析によりCH 量とCSH 量を 測定した。さらに、水和物を変数とした引張軟化曲線 のモデル化を試みた。

2. 実験概要

使用するセメントは早強ポルトランドセメントとし、 AE 剤は使用していない。水とセメントと砂の割合は、 0.5:1:3 とした。なお、細骨材は 1.7mm のふるいを · 通過したものを使用した。40×40×160mm³の角柱供試 体を作製し、打設2日後に脱型し水中養生により120 日間養生した。浸漬実験に用いた供試体は劣化の影響 が顕著に表れるように、厚さ5mm、長さ70mm、幅30mm の薄片供試体を作製した。浸漬溶液は粉末状の NaCl とイオン交換水によって作製した。塩化物イオン濃度 を海水の半分程度の濃度である 10g/L とした。容器は 全容量 500mL のポリ容器を用い、1 つの容器に1 体の 薄片供試体を投じ、一様に溶液に接するように耐腐食 性の糸を用いて浸漬した。実験は静水状態で温度を 20℃と一定に保つ環境下で行った。なお、溶液は5日 ごとに全量交換した。以上の実験環境の下、浸漬期間 を0、5、10、15、30、45、60日として浸漬実験を行っ

4	Ŀ_	
1	<u>ب</u>	0

浸漬後の供試体を真空デシケータにより2日間乾燥 させた後、3点曲げ試験を行った。支点と荷重点直下 に1µmまで測定可能なLVDTを設置し、載荷速度を1 µm/sとした。曲げ試験により得られた荷重-変位曲線 から引張軟化曲線を同定した³⁾。本解析により引張強 度と破壊エネルギーも得られる。また、曲げ試験後の 供試体において、CHとCSHの定量分析を行った。

3. 実験結果

3.1 化学分析

供試体中の CH 量の測定結果を図-1 に示す。浸漬期 間が増すにつれて段階的な CH の減少が確認できた。 浸漬 60 日では 67%の CH が減少していた。一方、CSH は本実験において大幅な減少はみられなかった。

3.2 引張特性

引張強度の経時変化と引張軟化曲線を図-2,3 に示 す。引張強度は浸漬45日から急激に低下し、引張軟化 曲線は最大ひび割れ幅が縮小した。また、それに伴っ て、破壊エネルギーも徐々に減少し浸漬60日では健全 なものから39%程度減少していた。これは、骨材界面 において溶脱が先行して生じており、骨材とセメント ペースト層との付着が減衰していることが推察される。

4. 引張軟化曲線のモデル化



写真-1 曲げ試験環境の様子

キーワード NaCl, 溶脱, 引張強度, 破壊エネルギー, 引張軟化曲線
 連絡先 〒060-8628 北海道札幌市北区北 13 条西 8 丁目



図-4 水和物量比と変数の関係

本実験条件において、CH の減少に伴う引張特性の変 化を捉えることができた。ここでは、溶脱により劣化 したモルタルの引張軟化曲線のモデル化を図る。具体 的には、Hordijk により提案されている引張軟化式(式 -1)⁴⁾に、水和物量が変化することによる影響を考慮 する。

$$\sigma = f_{t} \left[\left\{ 1 + \left(c_{1} \cdot \frac{w}{w_{c}} \right)^{3} \right\} \cdot \exp\left(- c_{2} \cdot \frac{w}{w_{c}} \right) - \frac{w}{w_{c}} \cdot \left(1 + c_{1}^{3} \right) \cdot \exp\left(- c_{2} \right) \right]$$
(1)

ここに、 f_t : 引張強度、 w_c : 最大ひび割れ幅、 c_1 、 c_2 : 係数。

式-1 中の各変数と水和物量との関係を図-4 に示 す。いずれも水和物量の減少に対して直線的に減少す る傾向があるため、 f_{t} , w_{c} , c_{1} , c_{2} を次式により表した。

$$f_t = f_{t0} (1.659H - 0.659) \tag{2}$$

$$w_c = w_{c0} (2.670H - 1.670) \tag{3}$$

$$c_1 = c_{10} (2.025H - 1.025) \tag{4}$$

$$c_2 = c_{20} (2.718H - 1.718) \tag{5}$$

ここに、

$$H = \frac{\left(CH + CSH\right)}{\left(CH_0 + CSH_0\right)} \tag{6}$$

ここに、 f_{t0} :浸漬前の f_t 、 w_{c0} :浸漬前の w_c 、 c_{10} , c_{20} :浸 漬前の c1,c2、CH: 供試体中の CH 量、CSH: 供試体中 の CSH 量、CH₀:浸漬前の CH、CSH₀:浸漬前の CSH。 式-2,3,4,5 の近似式をそれぞれ式-1 に代入した。 また、破壊エネルギーは Hordijk の式から算出している。 CH と CSH が引張特性に及ぼす影響を同等としている が、CSH が減少した場合のこの式の妥当性は、今後の 課題である。図—5 は、実験とモデル式により求めた 破壊エネルギーとの対応を示す。両者は良く一致して いる。また、実験とモデル式の引張軟化曲線の比較を 図-6 に示す。図-3 と比較すると、本提案モデルによ り、実験結果を精度良く予測できた。

5 まとめ

本研究において、溶脱により劣化したモルタルの引 張強度、最大ひび割れ幅、破壊エネルギーを適切に予 測できる。

6 参考文献

- 1) コンクリートの化学的侵食・溶脱に関する研究の 現状, 土木学会, コンクリートシリーズ-53, 2003.
- 2) 蔵重勲,廣永道彦,庭瀬一仁:塩化物・炭酸水素 イオン共存溶液中におけるセメント硬化体の溶脱 挙動, コンクリート工学年次論文集, vol129, No.1, pp909-914, 2007.
- 3) 多直線近似法による引張軟化曲線の推定マニュア ル:日本コンクリート工学協会,コンクリートの破 壊特性の試験方法に関する調査研究委員会
- 4) Dirk Arend Hordijk: Local approach to fatigue of concrete, Graduate Thesis, Delft University of Technology.