

論文 硫酸劣化を考慮した持続荷重を受ける無筋コンクリートはりの破壊解析

渡部 孝彦*1・佐藤 靖彦*2

要旨：下水道施設における RC 構造物の硫酸劣化問題に関する研究が数多くなされているが、構造物の寿命の予測ができるまでには至っていない。本研究では、無筋コンクリートはりを対象に、持続荷重下で硫酸の影響を受ける場合のひび割れ進展を追跡できる解析法を開発した。その方法は、硫酸劣化により変化するセメント水和物量・空隙量に基づき材料特性値を低下させ、RBSM による構造解析と有限体積法による物質移動・反応解析を組み合わせたものである。パラメトリック解析を通じて、本手法の特徴を把握した。

キーワード：無筋コンクリート, 硫酸劣化, 破壊解析, パラメトリック解析

1. はじめに

近年、我が国では下水道施設の老朽化問題が顕在化している。国土交通省の調査によると、下水道施設が首都圏で本格的に整備され始めたのは 1940 年代ごろであり、建設延長はその後徐々に伸び、2000 年ごろにピークを迎えている¹⁾。今後も敷設 50 年を越える下水道施設は増加する状況にある。しかし、下水道施設は、地中において化学的作用と力学的作用を同時に受けるため、その維持管理は容易ではない。合理的な維持管理の実施を可能とする新しい技術の開発が望まれる。

三浦らは、Ca 溶脱や硫酸劣化によるモルタルのメゾスケールでの硫酸溶液浸漬実験と力学実験を行い、セメント水和物量・空隙量と各材料特性値との関係を明らかにした上で^{2), 3)}、化学的要因により劣化したモルタルの力学挙動を再現できる解析法を開発した(図-1 参照)^{4), 8)}。

著者らは、この解析法を、持続荷重を受ける無筋コンクリートはりのひび割れ進展・破壊解析が可能なシステムへと拡張した。本論文において、解析法の概要を示す

とともに幾つかの感度解析結果に基づき本解析法の特徴を把握する。

2. 解析方法

2.1 解析対象

著者らの最終的なターゲットは、下水道 RC 構造物の残存耐力予測であるが、本論文では、一定荷重下で硫酸による劣化が進行し破壊に至る無筋コンクリートはりを対象とした。

2.2 解析フロー

本解析のフローを図-2 に、概念図を図-3 に示す。本研究では、構造解析と硫酸劣化解析を交互に実施することで、持続荷重下での変形の増加と破壊の再現を試みる。具体的には、三浦らが開発したシステム^{4), 8)}を、材料モデルの設定、構造解析、硫酸劣化解析を順番に実行させるシステムへと拡張した。

図-3 に示すように、コンクリートはりが、ある荷重下で化学的侵食を受けると、強度と弾性係数が低下するため荷重が低下する(図-3(a)の A から B)。その荷重低下を補うために、はりは変形を増加させることで内力を作り出す(図-3(a)の B から C)。図-3(a)中の B において、三浦らが見出したセメント水和物量・空隙量と材料特性値との関係式から、硫酸劣化後の引張強度、せん断強度、弾性係数、破壊エネルギーを求め、その情報を、応力-ひずみ関係もしくは応力-変位関係に反映させる。すなわち、硫酸による「材料の劣化」を「力学的性質の変化」として表現する。このことを概念的に示したものが図-3(b)である。劣化程度が小、中、大と進むにつれ、応力と変形の関係が変化し、実際の応力は、図-3(b)の実線のごとく推移することになる。

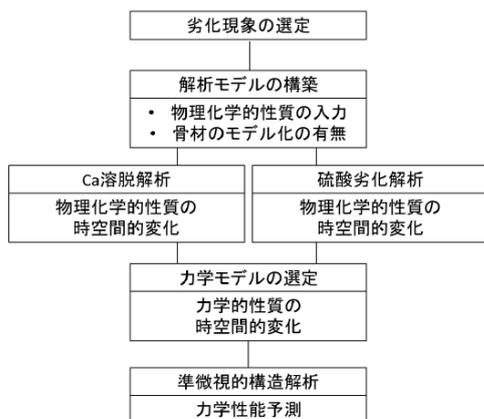


図-1 化学—力学連成解析システム⁸⁾

*1 北海道大学大学院工学院 北方圏環境政工学専攻 (学生会員)

*2 北海道大学大学院工学研究院 北方圏環境政策工学部門 准教授 工博 (正会員)

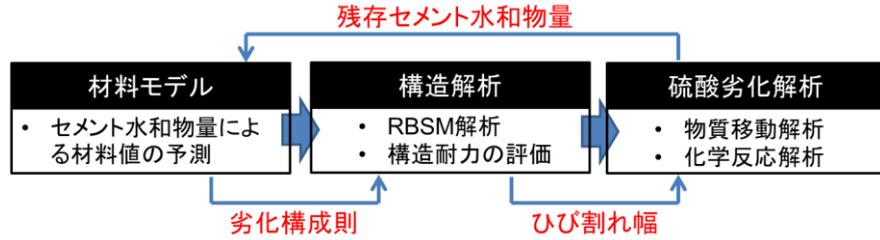
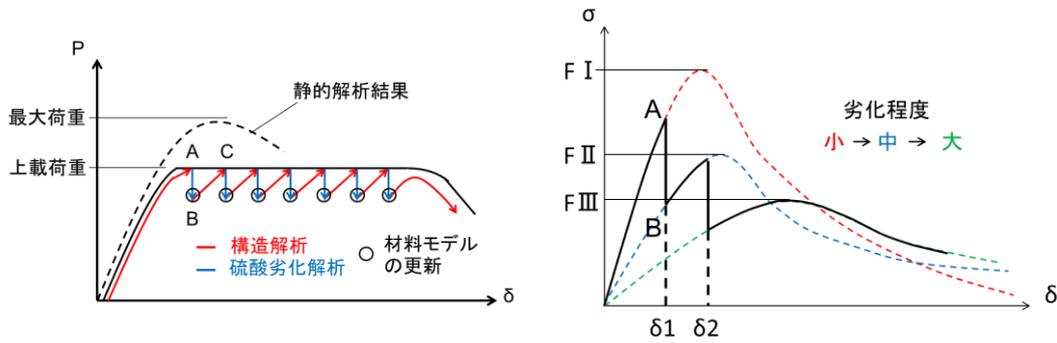


図-2 本解析のフロー



(a) はり全体の荷重-変位関係

(b) 要素の応力-変形関係

図-3 本解析における荷重・変位の推移（左）と応力変化の概念図（右）

このシステムにおける構造解析は、硫酸劣化を反映させた材料モデルを用いた剛体バネモデル（以下 RBSM）による静的解析である。一方、硫酸劣化解析は、有限体積法による物質移動解析と化学反応解析であり、経過時間に応じた硫酸イオンの浸透による濃度計算と硫酸イオンとの化学反応によって減少する水和物量の算出を行う。

2.3 材料のモデル化

三浦らは、硫酸による劣化機構を、空隙緻密化過程と膨張ひび割れ過程の二つに分けて整理している³⁾。物理的性質の変化は、緻密化過程においては空隙率により、膨張ひび割れ過程においては析出物量により説明できるとしており、緻密化過程では空隙率を変数とした関数 ω_d を導入することで劣化した材料特性値を予測し（式(1)）、膨張ひび割れ過程では析出物の生成に伴うセメント水和物の減少量を変数とした関数 ω_e によって硫酸劣化の影響を考慮する（式(2)）。材料特性値（弾性係数、引張強度、せん断強度、破壊エネルギー）は実験によって得られた係数（表-1）を式(1),(2)に用いることでそれぞれ求められる。

2.4 RBSM による構造解析

RBSM は Kawai によって開発された構造解析手法である⁵⁾。その特徴は、要素間に垂直バネ、せん断バネを設け、バネの破壊により要素境界でのひび割れを表現することにある（図-4）。本解析で用いたコンクリート構成則を図-5に示す。

表-1 実験係数⁸⁾

実験係数	E	f_t	f_s	G_f
k	1.5	1.2	1.8	1.0

空隙緻密化過程

$$\frac{F}{F_0} = \omega_d(1 - \omega_e) \exp\left(-k \frac{\Delta p}{p_0}\right) \quad (1)$$

膨張ひび割れ発生過程

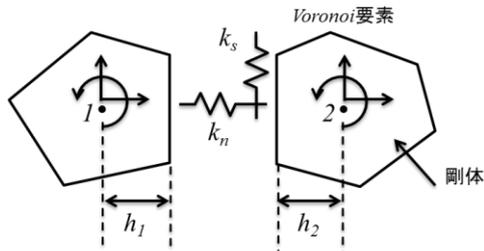
$$\frac{F}{F_0} = \omega_d(1 - \omega_e) \exp\left(-k \frac{0.25p_0}{p_0}\right) \quad (2)$$

F, F_0 : 変化後、初期の材料特性値（弾性係数 E , 引張強度 f_t , せん断強度 f_s , 引張破壊エネルギー G_f ）、 ω_d, ω_e : 影響度係数、 k : 材料値ごとの実験係数（表-1）、 p_0 : 初期空隙率（%）、 Δp : 空隙変化率（%）

劣化による構成則の変化度を示す一例として、浸漬日数を 0 日、200 日、400 日とした場合の引張応力とひび割れ幅関係を図-6に示す。この構成則は、要素寸法を 20~30mm 程度とした RC はりの曲げせん断解析を通じてその妥当性が確認されたものである⁶⁾。

2.5 有限体積法による硫酸劣化解析

硫酸劣化解析は、物質移動解析と化学反応解析からなる。その流れを図-7に示す⁸⁾。硫酸イオンの物質移動解析には、Fick の拡散方程式を修正した修正拡散方程式を支配方程式として使用している（式(3)）。



k_n : 垂直ばね、 k_s : せん断ばね、
 h_1, h_2 : 母点から要素境界辺に下ろした垂線の長さ

f_c : 圧縮強度、 ϵ_0 : 圧縮ピークひずみ、 ϵ_{cu} : 最大圧縮ひずみ、 γ_0 : せん断ピークひずみ、 γ_u : 最大せん断ひずみ、 ϵ_t : 引張ピークひずみ、 ϵ_{tu} : 最大引張ひずみ

図-4 要素間のバネの定義

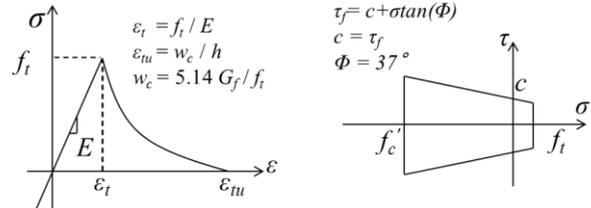
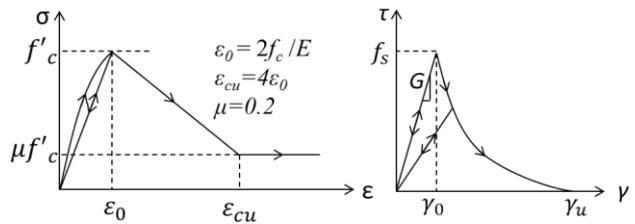


図-5 圧縮・引張・せん断構成則

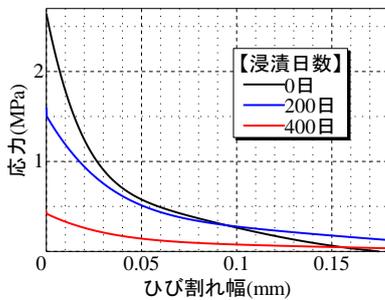


図-6 劣化による引張軟化曲線の変化

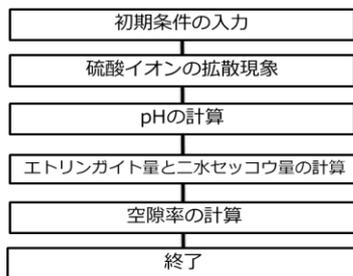
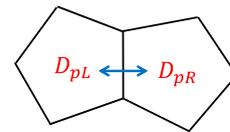


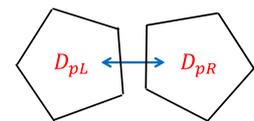
図-7 硫酸劣化解析フロー⁴⁾

$$\overline{D}_p = \frac{D_{pL} + D_{pR}}{2} \quad (4)$$

$$\overline{D}_w = \alpha \frac{D_{pL} + D_{pR}}{2} \quad (5)$$



(a) ひび割れがない場合



$$\overline{D}_w = \alpha \overline{D}_p$$

(b) ひび割れがある場合

図-8 拡散係数の求め方

$$\frac{\partial(p_p \cdot C_{liq})}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\overline{D}_w \frac{\partial(p_p \cdot C_{liq})}{\partial x} \right) + \frac{\partial C_{sol}}{\partial t} \quad (3)$$

C_{liq} : 液相中の硫酸イオン濃度 (mol/l)、 C_{sol} : 固相中の硫酸イオン濃度 (mol/l)、 p_p : セメントペースト中の空隙率 (%)、 \overline{D}_w : ひび割れ幅を考慮した硫酸イオンの拡散係数 (mm^2/sec)

ここでは、各要素での硫酸イオンが、セメント水和物である CH および C-S-H と化学反応し減少することを考慮し、消費項が加わっている。次に残存セメント水和物から pH の推定を行い、pH の大きさから析出物が異なることより、エトリンガイト、二水石膏の析出

量を計算し、空隙の変化を計算する。

また、構造解析から引き渡されるひび割れ幅は、拡散係数の算出(図-8)に使用される。本解析では、隣接する要素間のイオンの移動は、2つの要素の拡散係数 (D_{pL} , D_{pR}) を平均した \overline{D}_p (式(4)) により支配されると考え、もし要素間にひび割れが生じている場合には、 \overline{D}_p に割増係数 α を掛けることでその影響を考慮する(式(5)) こととした。なお、この拡散係数の考え方の妥当性は、実験結果との比較を行うなどして今後検討する予定であるが、本研究では、次章において、割増係数 α を変数としたパラメトリック解析を通じて、拡散係数が寿命に及ぼす影響を把握することとする。

表-2 解析モデル諸元

断面(mm)		支点間距離 (mm)	要素数	要素サイズ (mm)	E (MPa)	f_t (MPa)	f_s (MPa)	G_f (N/mm)	インターバル (日)	硫酸イオン 濃度(mg/l)
高さ	幅									
200	200	1800	2000	約25	31000	2.67	5.13	0.091	30	2500

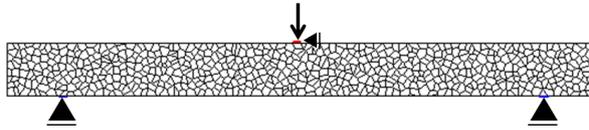


図-9 要素分割図

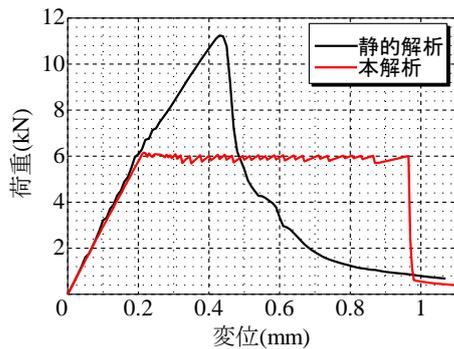


図-10 荷重-変位曲線

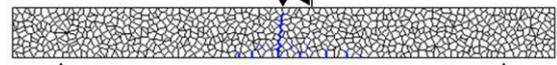
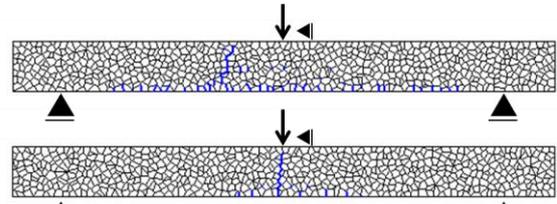


図-11 ひび割れ進展図
(上：連成解析，下：静的解析)

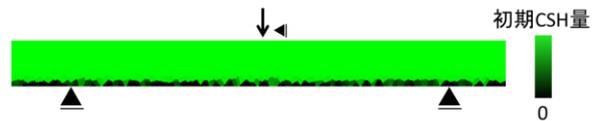


図-12 破壊時のC-S-H分布

3. 無筋コンクリートはりの破壊解析

3.1 解析モデル諸元

本研究では、200mm×200mmの正方向断面を有する長さ2mの無筋コンクリートはりを対象とした。無筋コンクリートはりは、単純支持され中央に集中荷重を受ける。図-9に要素分割図を示す。RBSMにおいて、ひび割れ進展はメッシュ形状に大きく左右されることから、ボロノイ要素分割手法を用いてその影響を軽減した。

母点は、乱数で発生させている。各バネに与えた材料特性値の初期値は、表-2に示されている。ただし支点周りの要素は、支点での破壊が起こらないよう通常材料値の2倍の値を与えてある。なお、本解析では自重は考慮していない。

解析では、変位制御により静的耐力の約50%である6kNを持続的に作用させた状況で、はりの下面から境界要素の硫酸イオン濃度が2500mg/lに保たれるよう硫酸を供給した。なお、この値は、一般的な下水道施設の水中の硫酸イオン濃度が50~400mg/lであるものの、海水の流入等が起こる箇所では海水の硫酸イオン濃度が2700mg/lと高いため、下水道施設の中でも部分的には高い硫酸イオン濃度値を示すこともあるという事実を参考に定めた。構造解析と硫酸劣化解析を相互に実施する際、硫酸劣化解析で劣化を進行させる時間増分が必要となるが、この増分をインターバルと呼び、

30日に設定した。インターバルが解析結果に影響を及ぼすと考えられるため、その感度に関しては後ほど検討する。

3.2 解析結果

図-10に、単調に破壊に至らしめた解析(静的解析)と構造解析と硫酸劣化解析とを相互に行った解析(連成解析)に得られた荷重と変位との関係を示す。上載荷重6kNに達する前では静的解析と同様の経路をたどっており、その後上載荷重を維持したまま変位が大きくなっている。これは硫酸劣化解析により減少した荷重が応力の再分配を繰り返すことで所定の荷重を維持していることによる。

また、連成解析においては、静的耐力時の変位の2倍以上となる1.0mmあたりで急激に荷重が低下している。過去に行われた硫酸浸漬試験によって劣化したモルタル供試体の曲げ試験によると、浸漬日数が長いほど最大ひび割れ幅が増加傾向にあることがわかっており⁸⁾、本研究の連成解析において、静的解析よりも変位が増加した事実と符合する。また、終局時の挙動が静的解析結果に比べ脆性的な理由は、引張破壊エネルギーの低下が原因と考えられる。

静的解析と連成解析の破壊時のひび割れ性状を、図-11に示す。連成解析では、ひび割れが広範に発生している。これは、下縁のC-S-Hの減少がスパン全長にわたって見られる事実と符合する(図-12参照)。

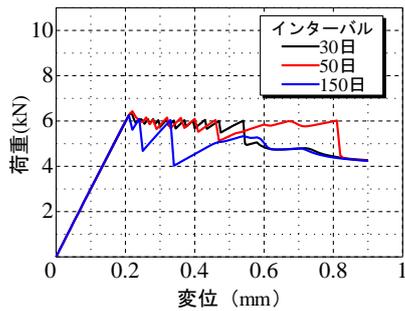


図-13 荷重-変位曲線

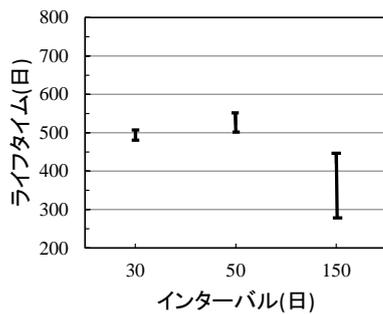


図-14 インターバルの比較

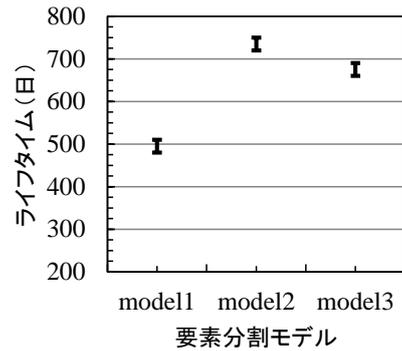


図-15 要素分割モデルの比較

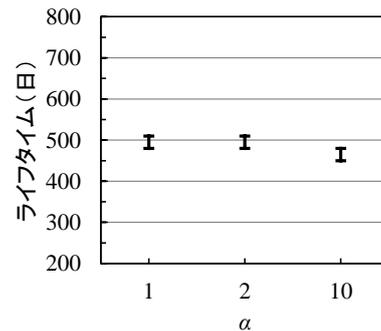


図-16 係数 α の比較

いずれの場合も、対象が無筋コンクリートであるため、最終的には、1本のひび割れがはり上縁に達し、破壊に至っている。しかし、静的解析と連成解析とではその位置が異なる。静的解析では、曲げモーメントが最大の位置のひび割れが進展しているが、連成解析では、その位置が左側に移動している。これは、劣化が、スパン全体に一樣に起こるものではないことを示している。

3.3 パラメトリック解析

ここで、解析結果に影響を及ぼすと考えられる構造解析と硫酸劣化解析のインターバルと拡散係数をパラメータとした感度解析を行う。その目的は、本解析法の特徴を把握することにある。なお、各ケースにおいて、要素分割の影響も調べるために、乱数を3回発生させ3つのモデルを作成した。それらを、Model 1, Model 2, Model 3と呼ぶ。初期値としてインターバルを30日、拡散係数の割り増し係数を2.0、モデルをModel1に設定しおり、各変数の影響はそれぞれ順に変更していくことにより感度を調べた。

(1) インターバルと要素モデルの影響

インターバルは先に示した30日に加え、50日、150日を設定した。ここで構造解析における強制変位量がインターバルに比べ大きすぎると、硫酸劣化解析の劣化による反力の減少よりも1ステップの荷重による反力の上昇が上回ってしまうため、強制変位量はインターバル30日では0.005mm、50日、150日では0.01mm

とした。

荷重-変位曲線と破壊に至った日数（以下、ライフタイム）の比較をそれぞれ、図-13、図-14に示す。インターバルの違いのため持続荷重載荷中の挙動は異なっているものの破壊時の変位はおおむね一致している。しかしライフタイムには変化が生じている。なお、図-10と図-13の解析結果が異なっているのは両者に異なるメッシュのモデルを使用しているためであり、ライフタイムに幅が生じているのは、破壊がインターバル期間で起こっていると想定されるので、単一の値として求められないためである。

また、図-13に示す3種類の要素モデルに対する解析結果によれば、要素分割の違いもライフタイムに影響を及ぼすことがわかる。なお、3つのモデルの静的破壊荷重は、12.3、12.6、12.8kNとばらつきが極めて小さく、ライフタイムのばらつきは、静的耐力のばらつきによるものではなく、材料劣化に起因するものであることがわかる。すなわち、要素分割の違いが材料劣化の分布に影響を及ぼし、破壊断面が変化することで、ライフタイムが大きく異なったものと考えられる。本解析は無筋コンクリートを対象としているため、曲げひび割れの発生位置が破壊荷重に大きく影響する。

(2) 拡散係数の影響

式(4)に示したひび割れ幅による拡散係数の割増係数を、1.0、2.0、10とした場合のライフタイムを図-16に示す。 α が1.0と2.0とでは違いが見られず、 α を

10とした場合、ライフタイムが若干短くなるという結果となった。本解析手法では、拡散係数はライフタイムに大きな影響を及ぼす要因ではないことがわかった。

各モデルと各パラメータにおける破壊時のひび割れ進展図を確認すると、ライフタイムが大きく異なる場合にはひび割れ位置に相違が見られた。

以上、無筋コンクリートに対する解析結果より、劣化による変位の増加や、静的載荷とは異なるひび割れの性状など、劣化時の構造物の特徴を再現できる可能性を示した。今後は、ライフタイムの妥当性評価に関して検討を深めたいと考えている。

4. まとめ

本研究は硫酸劣化が生じる下水道構造物のライフタイム予測を解析的に行うことを目標として、構造解析と硫酸劣化解析を組み合わせた解析法を開発した。解析法は、無筋コンクリートを対象としたパラメトリック解析を通じて、連成解析におけるインターバルならびに要素分割のライフタイムに及ぼす影響は比較的大きく現れるが、ひび割れの影響を含めた拡散係数の影響は小さく現れるといった特徴を有していることが明らかとなった。

謝辞

本研究を行うにあたり、名古屋大学助教 三浦泰人博士に貴重なアドバイスを頂きました。ここに心より深謝致します。また、本研究の一部は、内閣府総合科学技術・イノベーション会議の「SIP インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」(管理法人：NEDO)によって実施されました。

参考文献

- 1) 国土交通省「下水道事業のストックマネジメント実施に関するガイドライン-2015年版」
http://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewerage/crd_seweraqe_tk_000135.html
- 2) 三浦泰人, 佐藤靖彦: メソスケールでの Ca 溶脱により変化するモルタルの力学的性質と物理化学的性質の関係性評価, コンクリート工学論文集, Vol.25, pp.109-118, 2014
- 3) 三浦泰人, 佐藤靖彦, 中村光: 硫酸劣化したモルタルのセメント水和組織の変質と準微視的力学的性質との関係, コンクリート工学論文集, Vol.26, pp.1-9, 2015
- 4) Yasuhiko Sato, Taito Miura, and Hikaru Nakamura : Meso-scale Modeling of Mechanical Properties of Chemically Deteriorated Mortar, Proceedings of Mechanics and Physics of Creep, Shrinkage and Durability of Concrete and Concrete Structures, 2015
- 5) Kawai, K. : New element models in discrete structural analysis, Journal of the society of naval Architects of Japan., 141, pp.187-193, 1977
- 6) Yasuhiko Sato and Khalid Farah : Modeling Flexural Behavior of RC Beams Strengthened with FRP by Using RBSM, Proceedings of 4th International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering (CD-ROM), 2014
- 7) Kohei Nagai, Yasuhiko Sato, Tamon Ueda : Mesoscopic Simulation of Failure of Mortar and Concrete by 2D RBSM, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.2, No.3, pp.359-374, Oct. 2004
- 8) 三浦泰人: セメント系複合材料の準微視的力学—力学連成解析システム, 北海道大学学位論文, 2015