

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 26 日現在

機関番号：18001

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420439

研究課題名(和文) ASR劣化したプレテンションPC部材に対する劣化診断の高度化に関する研究

研究課題名(英文) A study on advancement of ASR diagnosis for ASR deteriorated pretension PC girder

研究代表者

富山 潤 (TOMIYAMA, Jun)

琉球大学・工学部・准教授

研究者番号：20325830

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、ASR劣化したプレテンションPC部材に対する劣化診断の高度化を目的に以下の研究を行った。第1段階は、ASR劣化に起因した材料劣化予測手法の開発、第2段階は、ASR膨張に対して、コンクリートとPC鋼より線の付着モデルの提案、第3段階では、ASR劣化したプレテンションPC部材の耐荷性能が評価可能な非線形有限要素法の検討を行った。第1段階では、材料劣化予測の可能性を示し、第2段階では、付着モデルを提案した。第3段階では、ASR劣化したプレテンションPC桁の曲げ破壊試験を行い、非線形有限要素法において耐荷性能の予測が可能であることを示した。

研究成果の概要(英文)：In this study, we have performed the following studies for the purpose of the advancement of the deterioration diagnosis for the pre-tension PC member that ASR deteriorated. As the first stage, the materials deterioration prediction technique due to ASR deterioration have been examined. In next stage, a bond mode between concrete and PC strand considering ASR expansions has been proposed. At the final stage, we have performed the bending test of the pre-tension PC beam that ASR deteriorated, and a possibility of prediction on the load bearing capacity of it using Non-linear finite element analysis has been shown.

研究分野：コンクリート工学

キーワード：アルカリシリカ反応 プレテンションPC部材 劣化診断 数値解析 付着特性

1. 研究開始当初の背景

アルカリシリカ反応(ASR)が生じたコンクリート内部には ASR ゲルの膨張により無数の微細ひび割れが生じ、さらに劣化が進行するとコンクリート表面にひび割れが達し、耐久性上問題となる有害なひび割れまで成長する場合がある。さらに膨張が進行するとコンクリート内部の鋼材破断やコンクリートと鋼材の付着力の低下など、構造物の耐荷性能に影響を及ぼすことも知られている。特にプレテンション方式のプレストレスコンクリート(以下、PC)構造は、コンクリートとPC 鋼より線の付着力により、プレストレスを導入することから他の構造方式に比べ、ASR 劣化に対して注意を要するといえる。

これまで多くの研究者が ASR 劣化したコンクリート構造および材料に関する研究を行っているが、プレテンション方式の PC 構造に対する研究は少なく、対応すべき重要課題の一つである。

本研究室では、ASR 劣化したプレテンション PC 桁を実構造物から切り出し、耐荷力試験や岩石学的試験による劣化診断などを通して、ASR 劣化したプレテンション PC 桁の総合的な劣化診断に関する研究を行っている。さらに、それらと併せて数値解析的アプローチの検討も行い、劣化評価の推定に関する研究も行っており、今後も研究内容を発展させ、実験、数値解析の両アプローチを活用し、互いをフィードバックしながら、ASR 劣化したプレテンション PC 構造の総合的な診断技術の確立が必要である。

2. 研究の目的

本研究では、ASR 劣化したプレテンション PC 構造に着目し、3 段階の研究テーマを掲げ、高精度な診断技術の確立を目指す。まず第 1 段階として、物質移動・化学反応・吸水膨張・ひび割れ発生を表現可能な解析手法の開発(コンクリートの材料劣化の予測)。第 2 段階として、ひび割れが生じたコンクリートと PC 鋼より線の付着強度の低下に関する構成モデルの作成(付着性能低下の予測)。第 3 段階として、ASR 劣化を模擬した(あるいは生じさせた)プレテンション PC 桁を作製し、耐荷性能評価(劣化度の異なる試験桁を対象とした耐荷性能評価)を実施する。最終的にそれらを総括し、ASR 劣化を表現可能な 3 次元数値解析手法の開発あるいは既存の数値解析手法(有限要素法)の高度化を検討する。

3. 研究の方法

(1) 第 1 段階(コンクリート材料の劣化予測)

ASR によるコンクリート材料の劣化を予測するために、骨材スケールを考慮可能な損傷力学モデルの概念を導入したボクセル有限要素法(DM-VFEM)をベースとした数値解析モデルの高度化と材料劣化の予測方法を検討した。DM-VFEM は、骨材スケールを考慮可能な解析手法で、ASR に関係するコンクリート内部の水溶液中の Na⁺、K⁺および OH⁻イオンなどの移動(拡散)やその量に応じた骨材

の膨張およびひび割れ進展、さらに、ひび割れを考慮したイオンの拡散係数の修正を達成して解くことができる。損傷力学では、いくつかのパラメータが存在する。平成 26 年度は、そのパラメータを決定するための実験と本手法の妥当性を検討する。

解析方法(弱連成解析)

連成解析の手順を図 - 1 に示す。まず、非定常拡散問題を解き、ASR に関与するイオン濃度(仮想的)の濃度分布を求める。次に、イオン濃度の空間分布の解析結果から ASR 膨張モデルを用いて膨張力を決定する。膨張力によって引張応力が限界値に達した領域をひび割れと判断する。ひび割れと判断された領域の拡散係数は損傷程度に応じた拡散係数に置き換える。ここから再び非定常拡散解析を解いていく手順を繰り返すことで、イオン拡散・ひび割れ進展解析の連成解析を行う。

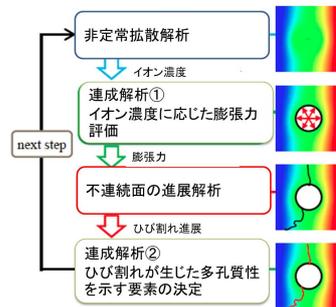


図-1 連成解析フローチャート

損傷力学モデルの概要

損傷モデルでは連続体損傷力学を導入し、損傷変数 D を用い、要素剛性を段階的に減少させるモデルである。

損傷変数は 0 ≤ D ≤ 1 であり、D=0 のときには健全な状態を示し、D=1 は最終的な破壊状態を表す。損傷に伴う微小空間の発達に材料の剛性低下を引き起こすため、本研究では、次式に示す損傷変数により損傷状態を表す。

$$D = (E_0 - E) / E_0 \quad (1)$$

ここで、E₀ は非損傷状態の弾性係数、E は損傷後の弾性係数である。C^e を等方弾性テンソルとし、損傷を考慮した材料構成則を一般化すると、以下ようになる。

$$\sigma = (1 - D)C^e \varepsilon \quad (2)$$

各種モデル

(ア) ひび割れ拡散モデル

ひび割れた要素の拡散係数 k は、損傷パラメータに応じ大きくし、ある一定量になると収束するとした式(3)を用いた(図-2(a))。

$$k = k_0 + \alpha \{1 - \exp(-\beta \times D)\} \quad (3)$$

ここで、k₀ は健全時の拡散係数、α は k の収束値を表す係数、β は拡散係数の最大値への収束速度を表す係数である。

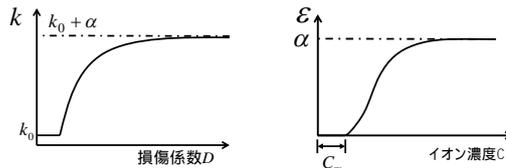
(イ) 膨張モデル

ASR 膨張は、反応生成物である ASR ゲルの吸水膨張によるものであるが、本研究では、

ASR ゲル量がイオン濃度に比例すると仮定し、また、ASR ゲル生成後、吸水膨張までの潜伏期を考慮した式(4)に示す等方ひずみを膨張モデルとして提案する(図-2(b)).

$$\left. \begin{aligned} C_{alkali} < C_{TL} \quad \varepsilon = 0 \\ C_{alkali} \geq C_{TL} \quad \varepsilon = \alpha \{1 - \exp(-\beta(C_{alkali} - C_{TL}))\} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

ここで、 α は膨張量の最大を表現する係数、 β は膨張速度を表現する係数、 C_{alkali} は ASR に関するイオン濃度、 C_{TL} は閾値である。



(a) 拡散モデル (b) 膨張モデル

図-2 ひび割れ要素の拡散係数・膨張モデル

(ウ) アルカリ消費モデル

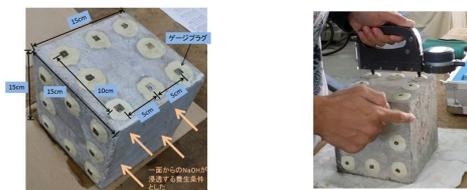
ASR では、アルカリシリカゲルを生成する際に、アルカリを必要とする。本研究では、反応が生じた位置の ASR に関するイオン濃度を C として、アルカリ消費を簡易的に考慮した式(5)を用いた。

$$C = C_E - \gamma \quad (5)$$

ここで、 C_E は濃度拡散より得られる ASR に関するイオン濃度、 γ は ASR に伴うイオン消費量(濃度)である。

実験概要

ASR 膨張試験には、反応性骨材として、ヒン岩を用いた(粗骨材)。コンクリートは、水セメント比(W/C)=60%とした。試験体サイズは、15×15×15cm の立方体とし、1面よりアルカリ(NaOH)を浸透させ、養生温度は、40℃とした(図-3)。また、試験体表面にゲージプラグを基長 10cm となるように貼り付け、コンタクトゲージを用いて所定の時期に膨張量を測定した。また、アルカリイオンの拡散係数も測定した。



(a) 試験体 (a) コンタクトゲージ法
図-3 実験概要

(2) 第2段階(付着性能低下の予測)

< 研究当初の計画 >

ASR 劣化したコンクリートと PC 鋼より線の付着性能評価に関する引き抜き試験を行い、付着モデル(構成モデル)を提案する。なお、ASR 劣化は粗骨材起因と細骨材起因でひび割れの生じ方が異なることが考えられるため、粗骨材、細骨材それぞれに起因した試験体を用意する。実験は、劣化度の異なる数ケース

の試験体に対し実施し、数値解析に適用可能な構成モデルを提案する。コンクリートは、W/C=35%程度(設計基準強度 50MPa)とする。コンクリートの ASR 劣化は、粗骨材起因と細骨材起因の2水準とし、高温のアルカリ溶液に浸漬し、膨張を促進させ、所定の膨張量における付着モデルを検討する。

試験体には、既往の研究を参考に反応性骨材として、ガラスカレットを用いた。また、膨張量は、基長 15cm になるようにゲージプラグを内部に埋め込み、コンタクトゲージで膨張量を測定した(図-4,5 参照)。

試験体のケースは、普通コンクリート(JIS プレテン PC 桁の上部工の標準配合)と水ガラスカレットと NaOH 溶液を混和し強制的に ASR を生じさせるコンクリートの2水準とした。また、等価 Na_2O 量として、10kg/m³にするために NaOH 溶液を使用する。

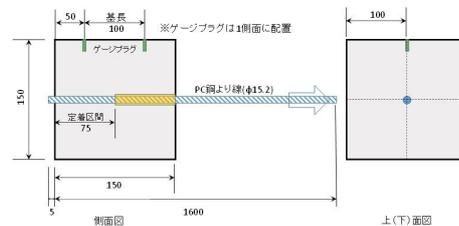


図-4 試験体概要(mm)

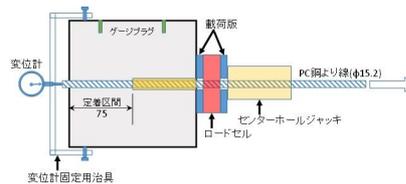


図-5 引抜き試験概要

< 計画変更 >

当初予定した計画通りに、試験体が膨張せず、また、引き抜き試験の精度的な問題が生じ、想定された結果を得ることができなかった。そこで、JIS 桁(BS22)の桁長さ 4m の試験体を作製し、プレストレス導入時のコンクリートひずみを測定し、導入プレストレスと合う付着応力 すべりモデルを推定した。

(3) 第3段階劣化度の異なる PC 試験桁を対象とした耐荷性能評価)

< 当初計画 >

劣化度の異なる ASR 劣化を模擬したプレテンション PC 桁を作製し、曲げ試験を実施し、耐荷性能評価を行う。劣化度のレベルや水準は、平成 26-27 年度の結果より決定する。試験体は JIS 桁とし、試験体サイズを決定する。最終的にそれらを総括し、ASR 劣化を表現可能な3次元数値解析手法の開発あるいは既存の数値解析手法の高度化を検討する。

< 計画変更 >

平成 26 年、27 年の実験結果が想定通りの結果を得ることができなかったため、ASR 劣化したプレテンション PC 中空床板橋の劣化桁に対して、非線形有限要素法による耐荷性

能評価法の検討を行った。

対象橋梁

対象橋梁は1989年3月に供用開始された1径間プレテンションPC中空床板橋(6連桁)である。本橋梁は、供用から27年が経過し、ASRに起因する橋軸方向のひび割れが顕著に表れ(図-6)、耐久性や耐荷性能の低下が懸念されている。劣化の特徴として、川下側(G4,G5,G6)の3主桁のみ劣化が生じ、川上側(G1,G2,G3)の3主桁は外観上健全である。

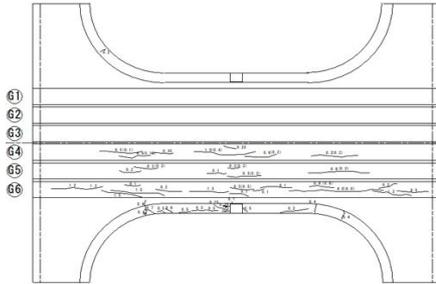


図-6 損傷図

解析方法(非線形有限要素法)

解析に使用した材料モデルと非線形解析手法(midas_FEA)の概要を以下に示す。

- ・構成モデル: 全ひずみコンクリートモデル
- ・ひび割れモデル: 回転ひび割れモデル
- ・コンクリート圧縮モデル: 放物線モデル
- ・コンクリート引張モデル: Hordijkモデル
- ・鉄筋: 完全弾塑性モデル
- ・PC鋼より線: 3直線モデル
- ・非線形解析: ニュートンラプソン法

図-7にコンクリートとPC鋼より線の付着応力すべりモデルの模式図を示す。すべりの閾値をBS22(4m)のプレストレス導入試験より推定した。

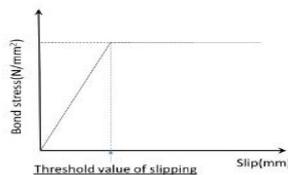


図-7 付着応力すべりモデル

4. 研究成果

(1) 第1段階(コンクリート材料の劣化予測)

ASR膨張試験

図-8に膨張試験の結果(1例)を示す。このように長期間計測に関わらず有害な膨張を確認することはできなかった。膨張試験では、1面よりアルカリ(NaOH)を浸透させている。この面より浸透したアルカリ量を測定し、アルカリイオンの拡散係数を算出した。図-9に表面(暴露面)からの距離とアルカリ量の関係を示す。浸透量から回帰分析によって拡散係数を求めた。その結果、拡散係数は、 $0.514(\text{mm}^2/\text{day})$ を得た。

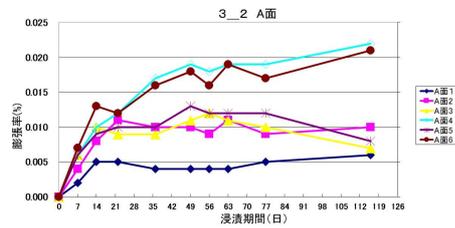


図-8 膨張試験の結果(1例)

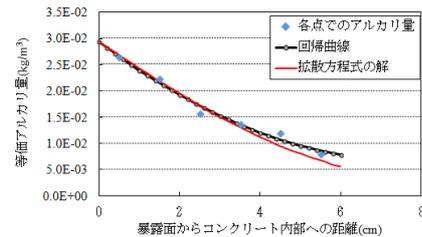


図-9 水溶性アルカリ量測定結果

ボクセル有限要素法

(ア) 2相コンクリートモデル

本研究では、反応性骨材と非反応性骨材の割合を任意に決定することのできるボクセルモデルを構築した(図-10)。

(イ) 解析条件

$150 \times 150 \times 150(\text{mm})$ の立方体を三方向に各75分割したボクセルモデルを使用する。時間刻みは0.5dayとした。図-11のような拘束条件とし、モルタルに $0.5\text{kg}/\text{m}^3$ の内在アルカリを考慮し、式(4)の閾値を $0.5\text{kg}/\text{m}^3$ とした。モルタル、骨材の材料特性を表-1に示す。解析は、反応性骨材100%、50%、20%の3ケースで検討した。結果は100%と50%のみ示す。

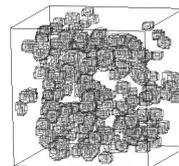


図-10 2相コンクリートモデル

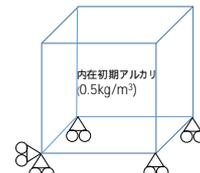


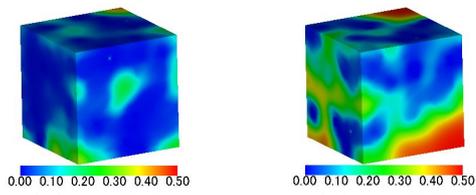
図-11 境界条件

表-1 材料定数

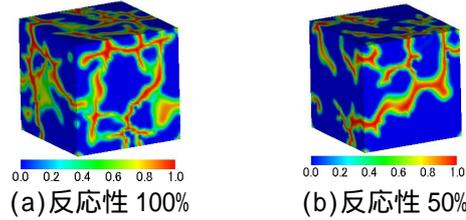
	モルタル	反応性粗骨材	非反応性骨材
拡散係数 (mm^2/day)	1.0	10.0	10.0
弾性係数 (GPa)	20.0	60.0	60.0
引張強度 (MPa)	4.0	ひび割れない	ひび割れない

(ウ) 解析結果及び考察

図-12に反応性骨材100%、50%の250日目のASRに關与するイオン濃度分布を示す。これより反応性骨材の量に応じた反応に伴うアルカリ量の消費の違いにより、領域全体のイオン濃度分布が異なることがわかる。また、図-13に反応性骨材100%および50%の250日目のひび割れ(ひび割れ損傷係数)の状況を示す。これより、反応性骨材の量に応じたひび割れ発生状況の違いが確認できる。したがって、本手法においてASRに起因する材料劣化の予測が将来的に可能であると考えられる。



(c)250 日目 (反応性 100%) (d)250 日目 (反応性 50%)
図-12 ASR に関するイオン濃度の経時変化



(a)反応性 100% (b)反応性 50%
図-13 ひび割れ損傷図 (損傷係数表示)

(2) 第 2 段階 (付着性能低下の予測)

計画を変更した BS22(4m)のプレストレス導入時の有効プレストレスを測定し、付着応力 すべりモデルを変化させた解析結果と比較することで、モデルを決定した。図-14 に実測による有効プレストレスと解析結果の比較を示す。これらの結果から、本研究では、図-15 に示す付着モデルを決定した。

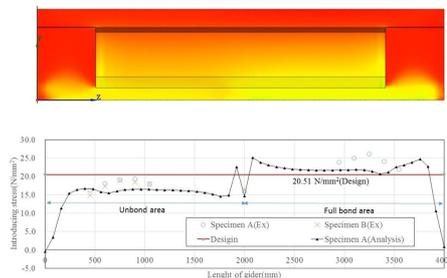


図-14 有効プレストレス



図-15 付着モデル

(3) 第 3 段階

(劣化度の異なる PC 試験桁を対象とした耐荷性能評価)

ASR劣化したプレテンション PC 桁の耐荷性能評価の一例 (実験結果との比較)

劣化試験桁は、桁長さ 13.2m である。桁より採取したコンクリートコアを用いた圧縮強度およびヤング係数は表-2 の通りである。比較のために健全桁の値を示している。耐荷力試験として、JIS A 5363 に準拠した曲げ載荷試験が行われた。曲げ破壊試験の概要図は図-16 に示す通りである。荷重-たわみ曲線を図-17 に示す。この結果より、ASR に健全な部材に比較して、部材の剛性が弾性域および塑性域ともに低下していることがわかる。また、表-2 から、弾性係数の値にばらつきがあることがわかる。このため、ASR 劣化したコンクリート構造物の非線形有限要素解析を精度よく行うためには、ひび割れを考慮したコンクリートの弾性係数が必要となる。本研究では、ひび割れの方向や量を考慮した弾性係数の求め方のひとつとして、均質化法を用いた方法を提案した。

ひび割れを考慮したコンクリートの弾性係数が必要となる。本研究では、ひび割れの方向や量を考慮した弾性係数の求め方のひとつとして、均質化法を用いた方法を提案した。

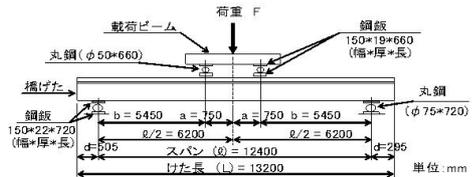


図-16 曲げ破壊試験の概要図

表-2 圧縮強度および弾性係数

試験桁	圧縮強度(MPa)	静弾性係数(GPa)
劣化試験桁	44.3	8.3~21.5(平均:15.2)
健全試験桁	60.9	37.7
設計基準強度	49.3	

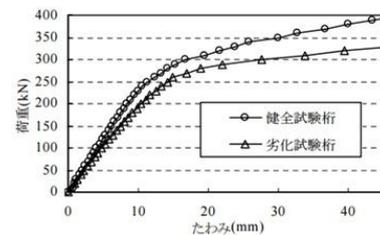


図-17 荷重 たわみ曲線

本研究では、図-18 のようにひび割れ密度と弾性係数の低減率を求めている。ASR 劣化したプレテンション PC 桁の曲げ破壊試験の非線形解析には、健全試験桁の弾性係数に劣化桁のひび割れ密度 9.9m^2 に対する低減率 0.74 を乗じた値を用いている。

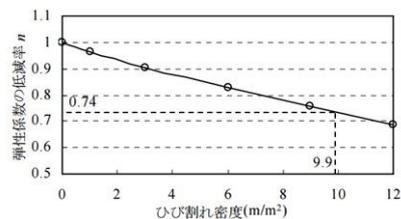


図-18 均質化弾性係数の低減率

解析ケースを概説する。

- ・劣化試験桁 (解析 1): コンクリートの弾性係数として測定結果 (平均値) を与えている (表-2). 設計上の有効プレストレスを導入。付着モデルなし。
- ・劣化試験桁 (解析 2): コンクリートの弾性係数として、ひび割れ密度から求めた均質化弾性係数を用いた場合 (図-18). 設計上の有効プレストレスを導入。付着モデルなし。
- ・劣化試験桁 (解析: 有効プレストレス):

劣化試験桁（解析2）に等しい。

- ・劣化試験桁（解析：プレストレス 90%）：有効プレストレスの10%低減考慮
- ・劣化試験桁（解析：プレストレス 80%）：有効プレストレスの20%低減考慮
- ・劣化試験桁（すべりあり）

解析結果の一例を図-19に示す。この結果より、劣化試験桁（実験）の結果に対して、ひび割れ方向と量を考慮に入れた均質化弾性係数を用いている劣化試験桁（解析2）は良好な一致を示しているが、実構造物より採取したコンクリートコアより求めた弾性係数を用いている劣化試験桁（解析1）は初期剛性から全く合わないことがわかる。

以上の結果より、ひび割れ密度と均質化法との組み合わせにより、ASRに起因した材料劣化が予測できる可能性が示された。

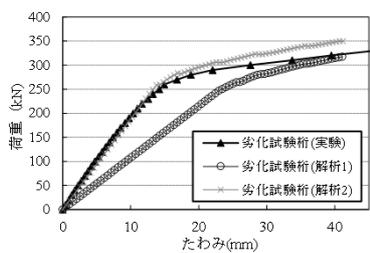


図-19 荷重 - たわみ曲線

ASR劣化したプレテンションPC桁の耐荷性能評価の一例（実験結果がない場合）

3.3.1 で示した橋梁の桁に対して、耐荷性能評価を行った概要を以下に示す。

- #1：健全桁：コンクリートの弾性係数，圧縮強度，残存プレストレスなど全て健全とし，材料特性は設計値を用いた。
- #7：既往の研究を参考に G4 桁から物性値を決定（軸直角方向の圧縮強度 $\times (1/0.85)$ ，軸直角方向の弾性係数 $\times (1/0.7)$ ）
- #8：既往の研究を参考に設計値から弾性係数を決定（圧縮強度 $\times 1$ ，弾性係数 $\times 0.7$ ）
- #9：#7の有効プレストレスを20%低減
- #10：#8の有効プレストレスを20%低減

図-20に耐荷力予測の結果を示す。これまでの結果より、本桁の耐荷性能は、図中のハッチングした領域にあると予想される。

上記に、第1段階～第3段階の順に研究成果を示した。当初計画とは異なったところもあるが、本研究で提案している数値解析の方法を用いて、ASR劣化したプレテンションPC部材の耐荷力評価が可能であると考える。今後も研究を行い、さらなる高度化を目指す。

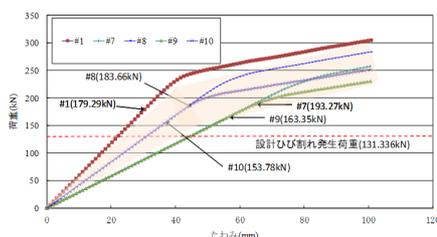


図-20 荷重 - ひずみ曲線（予想範囲）

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1件)

吉次優祐，富山潤，松浦葵，藍檀オメル，ASR劣化したプレテンションPC橋の振動特性評価に基礎研究，日本コンクリート工学年次論文集，Vol.38，No.1，pp.211-2116，2016

〔学会発表〕(計 5件)

富山潤，浅井光輝，久保善司，損傷力学ベースボクセル FEM を用いたアルカリシリカ反応の膨張挙動解析の基礎研究，土木学会第18回応用力学シンポジウム講演概要集，pp.199-200，2015年5月17日，金沢大学（石川県，金沢市）

松浦葵，藍檀オメル，富山潤，迫田泰治，浅井光輝，ASR劣化したプレテンションPC桁橋の劣化調査および損傷理論を導入したボクセルFEMを用いた膨張予測の基礎検討，土木学会西部支部沖縄会，第4回技術研究発表会，PDF，2014年10月30日，琉球大学（沖縄県，西原町）

布木勇人，富山潤，藍檀オメル，吉次優祐，アルカリシリカ反応のペシマム現象に関する数値解析的検討，土木学会西部支部沖縄会，第5回技術研究発表会，PDF，2016.1 吉次優祐，富山潤，藍檀オメル，渡嘉敷直彦，松浦葵，平田淳貴，劣化したコンクリート橋の振動特性評価に関する基礎研究，土木学会西部支部沖縄会，第5回技術研究発表会，PDF，2016年1月13日，琉球大学（沖縄県，西原町）

富山潤，浅井光輝，久保善司，吉次優祐，布木勇人，藍檀オメル，損傷理論を導入したボクセル有限要素解析によるアルカリシリカ反応の膨張挙動解析，土木学会全国大会第71回年次学術大会，V-525 CD-ROM，2016年9月8日，東北大学川内北キャンパス（宮城県，仙台市）

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0件)

取得状況 (計 0件)

〔その他〕

6. 研究組織

(1) 研究代表者

富山 潤 (TOMIYAMA Jun)

琉球大学・工学部環境建設工学科・准教授
研究者番号：20325830

(2) 研究分担者

久保 善司 (KUBO Yoshinori)

金沢大学・環境デザイン学系・准教授
研究者番号：50324108

(3) 連携研究者

浅井 光輝 (ASAI Mitsuteru)

九州大学・工学研究院・准教授
研究者番号：90411230