

論文 ひび割れと凍結融解作用による損傷を有するRC要素の1軸圧縮構成則の構築

金澤 健*1・佐藤 靖彦*2

要旨：本研究では、鉄筋の存在と凍結融解作用による損傷との関連性に焦点を当て、ひび割れを有する RC 要素の 1 軸圧縮構成則の構築を試みた。すなわち、凍結融解作用を与えた RC 要素の圧縮試験から、損傷の進行方向と力学的応答の双方に異方性が生ずることを明らかにし、その挙動を評価可能な平均応力と平均ひずみとの関係を定式化した。

キーワード：鉄筋コンクリート、凍結融解作用、損傷の異方性、力学的異方性、応力-ひずみ関係

1. はじめに

凍結融解作用による損傷（以下、単に損傷とする）を有する既設建造物の構造性能は、損傷のばらつきの程度に大きく左右される。例えば、圧縮域に損傷を有する RC はりの曲げせん断試験では、曲げ破壊型のほりであっても、せん断スパン内で荷重点近傍のコンクリートが圧壊に至るせん断圧縮破壊を呈する¹⁾。著者らは、損傷のばらつきが構造性能に及ぼす影響を評価可能な手法として、材料非線形有限要素解析（以下、非線形 FEM）を用いることを考えている。

上述したような損傷に起因する破壊形式の変化を非線形 FEM で捉えるには、圧縮強度やヤング係数の低下を考慮するのみでは十分でなく²⁾、圧縮域コンクリートの力学的応答を適切に表現できる構成則を用いる必要がある³⁾。凍結融解作用による力学特性の低下を表す指標としては膨張ひずみが有用であり⁴⁾、無筋コンクリートを対象とした圧縮構成則^{4),5)}にも取り入れられている。しかしながら、膨張が等方的に生ずる無筋コンクリート⁵⁾とは異なり、RC 要素に特有の傾向として、鉄筋軸方向には膨張が抑制されることが定性的に明らかとなっている⁶⁾。損傷の異方性に付随して力学的異方性も生ずるとすれば、それを定量的に考慮可能な圧縮構成則が、非線形 FEM による的確な構造性能評価には必須である。そこで本研究では、非線形 FEM への適用を前提とし、損

傷の進行方向と圧縮力の作用方向との関係性を評価可能な 1 軸圧縮構成則の構築を試みる。

2. 実験概要

2.1 供試体諸元および実験変数

供試体は、図-1 に示すような鉄筋を 1 本中央に埋設した角柱（全 39 体）であり、鉄筋に対する圧縮力作用方向が異なる 2 つのシリーズに大別される。両シリーズに共通の実験変数は損傷度（膨張ひずみの値）とひび割れの有無（幅）であり、シリーズ 1 ではさらに鉄筋比を、シリーズ 2 では付着による内部ひび割れが損傷の進行に及ぼす影響を検討することを意図して、ひび割れ導入時の荷重回数を実験変数とした。各実験変数の組み合わせに対する供試体数は 1 体である。使用したコンクリートは、損傷を促進させるため水セメント比を 65% とし、AE 剤などの混和剤を用いていない。

実験の手順として、まず、曲げ試験（シリーズ 1）と両引き試験（シリーズ 2）によりひび割れを導入したのちに凍結融解試験を行い、続いて圧縮試験に供した。

2.2 ひび割れの導入

シリーズ 1 に対して行った曲げ試験の様子を図-2 に示す。ひび割れの位置を制御するため、供試体の上下面にはハンドカッターを用いて深さ 3mm 程度の切り欠きを導入している。供試体中央でのひび割れ幅を大きく 2

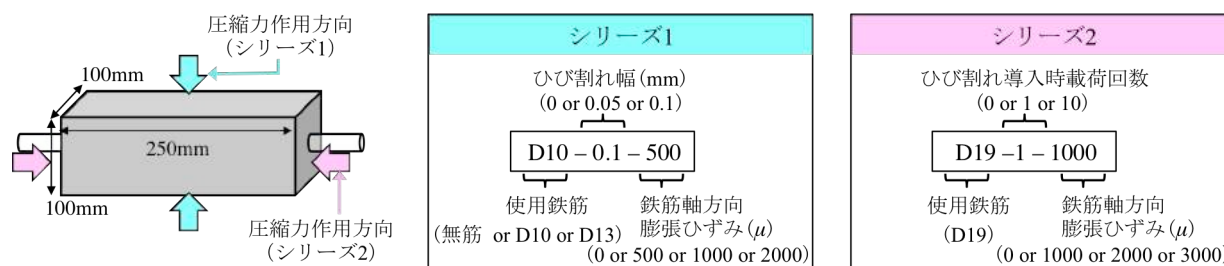


図-1 供試体諸元（左）および各シリーズの供試体名称（右）

*1 北海学園大学工学部 社会環境工学科 講師 博士(工学) (正会員)

*2 早稲田大学創造理工学部 社会環境工学科 教授 博士(工学) (正会員)

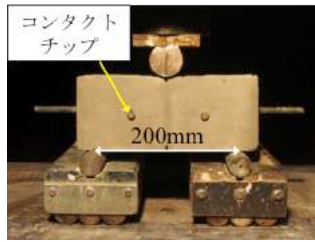


図-2 曲げ試験 (シリーズ 1)

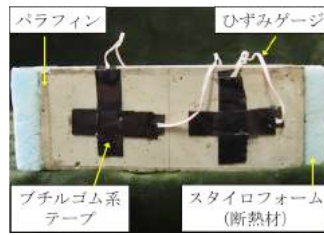


図-3 凍結融解試験前の供試体

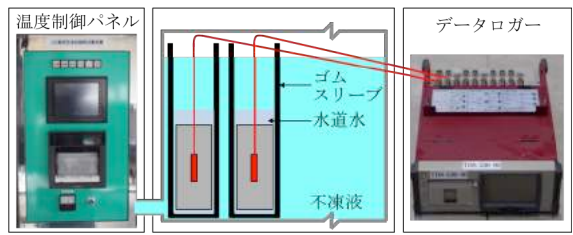


図-4 凍結融解試験概要

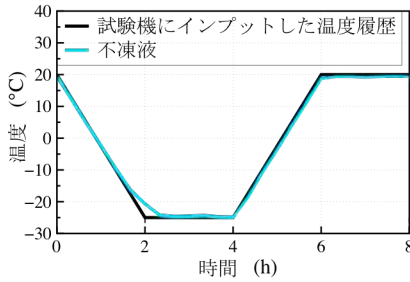


図-5 凍結融解試験の温度履歴

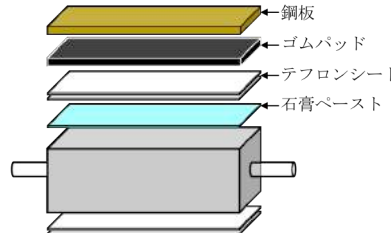


図-6 圧縮試験前の処理

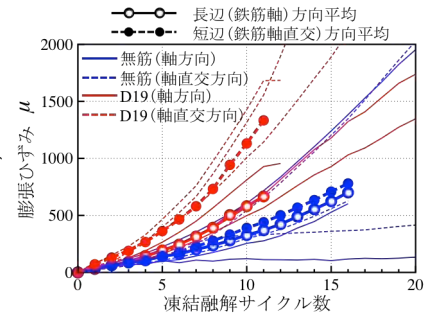


図-7 膨張ひずみの異方性

段階に制御するため、供試体表面に貼付したコンタクトチップとコンタクトストレインゲージによりひび割れ幅を測定しながら試験を行った。シリーズ 2 に対して行った両引き試験には、精密型万能試験機を用いた。鉄筋に十分なひずみを生じさせ供試体内部に付着ひび割れを導入することを目的として、鉄筋降伏荷重の 90% (約 100kN) まで載荷を行い、その後完全に除荷した。

2.3 凍結融解試験

凍結融解試験前の供試体を図-3 に示す。端部鉄筋を露出させたまま試験に供すると、急激な温度変化が生じ実環境と異なる状態になることが懸念されたため、溶解したパラフィンを用いて端部に断熱材 (スタイロフォーム) を接着させた。また、隅角部をパラフィンによってコーティングすることで、圧縮試験時の破壊の局所化を予防した。凍結融解試験中に生ずる膨張ひずみの測定には、検長 60mm の 3 線式ひずみゲージを用いた。試験中のデータの欠測を防ぐため、ゲージの貼付には 24 時間の養生を要する遅延型のエポキシ系接着剤を用い、ブチルゴム系のテープにより防水処理を施した。

凍結融解試験の概要を図-4 に示す。供試体をゴムスリーブ内に静置し、スリーブ内には供試体が浸るのに十分な量の水道水を加えた。凍結融解試験機にインプットした温度履歴を 2 サイクル目の不凍液の温度変化とともに図-5 に示す。試験中は膨張ひずみの値をデータロガーに記録し、所定の損傷度に達した供試体から随時試験を終了させた。

2.4 圧縮試験

圧縮試験には、最大 1000kN までの載荷が可能な万能試験機を用いた。図-6 に示すように、載荷板と供試体

面との摩擦を低減するために、グリスを塗布したテフロンシートを 2 枚重ねて挿入した。さらに、載荷板と供試体面との接触を均一なものとするため、供試体とテフロンシートとの間に石膏ペーストを、テフロンシートと載荷板との間にゴムパッドを挟み込んだ。なお、シリーズ 2 では圧縮力作用方向が鉄筋軸方向に一致するため、鉄筋径相当の大きさの孔を有する載荷板やゴムパッドを用いて同様の処理を施した。載荷前に 0.1MPa 程度の余圧をかけて石膏ペーストを硬化させ、その後は変位制御にて載荷を行い、載荷速度が毎秒 0.4MPa 程度となるよう手で油圧を制御した。

3. 無筋と RC との差異に着目した実験結果の整理

3.1 鉄筋の存在が膨張ひずみ特性に及ぼす影響

図-7 に、無筋・RC 要素 (シリーズ 2 より D19-0-1000, D19-0-2000, D19-0-3000 の 3 体を抜粋) から得られた凍結融解サイクル数と膨張ひずみとの関係を比較する。凍結融解試験中に測定される膨張ひずみは、同じバッチから作製した供試体でも結果が大きく異なることがあるため⁷⁾、図-7 では、1 本の膨張ひずみ-凍結融解サイクル数関係が 3 体の供試体 (ひずみゲージ 6 本) で測定されたデータの平均値として示されている。

無筋コンクリートでは、ある凍結融解サイクル数に対して長辺・短辺方向に生ずる膨張ひずみが同程度であるのに対して、RC 要素では短辺方向の膨張ひずみが卓越する傾向は、特筆に値する。この傾向は、ひび割れの有無や鉄筋比によらず、全ての RC 要素で同様に確認された。なお、シリーズ 2 では付着による内部ひび割れの影響を検討することを意図していたものの、有意な差は見

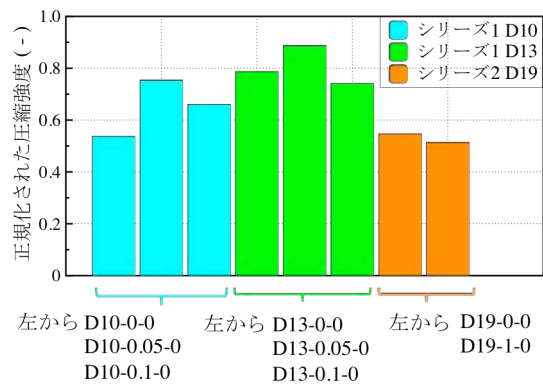


図-8 無筋円柱供試体と非損傷 RC 供試体の圧縮強度の比較

られなかった。

3.2 圧縮強度および破壊形式

RC 要素の圧縮特性を議論するにあたって、まず無筋円柱供試体との差異を明らかにしておく必要がある。非損傷無筋円柱供試体の 1 軸圧縮強度は 14.5MPa (3 体の平均値) であった。図-8 に、非損傷 RC 供試体の圧縮強度を、無筋円柱供試体の強度により正規化した結果を示す。本研究の範囲では、全ての非損傷 RC 供試体が無筋円柱供試体よりも小さい圧縮強度を示す結果となった。

この理由を考察するために、シリーズ 1 より鉄筋比とひび割れ幅が同じで損傷度のみ異なる 3 体を抜粋し、載荷終了時の様子を表-1 に示す。まず、非損傷供試体に着目すると、無筋円柱供試体の破壊形式と比較して特徴的なのは、鉄筋軸方向からの様子に着目すると明らかのように、鉄筋位置を起点として上下に進展した割裂ひび割れの存在である。終局時は、この割裂ひび割れが大

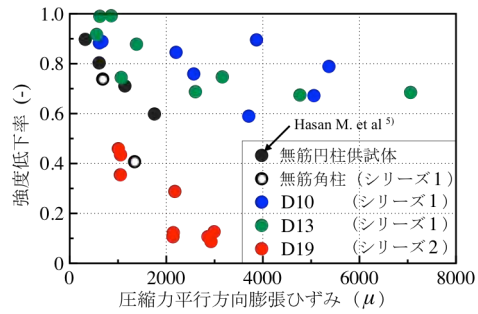


図-9 強度低下率と載荷方向の膨張ひずみ

きく開口し、供試体が左右に分断されるような挙動が観察された。一方で、損傷を有する場合には割裂ひび割れは観察されず、周囲のコンクリートが圧壊することで終局に至っている。このような損傷の有無による破壊形式の差異は、シリーズ 2 でも同様に確認された。それゆえ、非損傷供試体の圧縮強度が無筋円柱供試体のそれと比較して小さかったのは、破壊形式の差異によるものだと考えられる。なお、本研究では、供試体高さ H を直径 D で除した H/D が強度に及ぼす影響はないものと仮定した。シリーズ 1 供試体の H/D は 0.4 で、既往の研究⁸⁾で強度に影響がないとされる範囲 (2.0 ≤ H/D ≤ 8.0) からは逸脱しているものの、供試体数の制約から非損傷 RC 要素と円柱供試体の強度の比較ができなかったこと、また、図-6 に示すテフロンシートにより、加力治具と載荷面との摩擦の影響を除去していることが理由である。

割裂破壊を呈した供試体は、圧壊を呈した無筋円柱供試体と力学挙動を比較することができないため、構成則の構築は圧壊を呈した供試体を対象とする。なお、本研究の範囲では、圧縮力の作用方向によらず、非損傷供試

表-1 破壊形式の整理

損傷度 (供試体名)	破壊時の様子	破壊時の様子 (鉄筋軸方向から)	破壊形式	破壊形式 (無筋円柱供試体)
非損傷 (D10-0.05-0)			割裂	
小 (D10-0.05-500)			圧壊	
中 (D10-0.05-1000)			圧壊	
大 (D10-0.05-2000)			圧壊	

体は全て割裂破壊を呈し、損傷を有する供試体は全て圧壊を呈した。

3.3 損傷の進行方向と圧縮力作用方向との関係性

図-9 に、強度低下率と圧縮力平行方向の膨張ひずみとの関係を示す。縦軸の強度低下率とは、非損傷無筋円柱供試体の圧縮強度で正規化した値である。図-9 では、RC 要素の強度低下傾向が無筋円柱供試体とは明らかに異なり、さらには圧縮力の作用方向に依存していることが、シリーズ1と2とを比較することで確認できる。すなわち、同じ膨張ひずみに対する強度低下率を比較すると、無筋円柱供試体に対して、シリーズ1の強度低下率は小さく、シリーズ2のそれは明らかに大きい。これは、鉄筋の存在により、膨張ひずみのみならず力学的応答にも異方性が生ずることを示すものである。

3.4 平均応力と平均ひずみとの関係

本研究では、ひび割れと損傷を有する RC 要素の力学的応答を、平均応力と平均ひずみとの関係によって整理する。すなわち、いずれのシリーズでも圧壊域の局所化が観察されなかったため、膨張ひずみや圧縮ひずみが要素全体に一樣に生じているものと仮定して議論を進める。

図-10 にシリーズ1・2より、同じ鉄筋比で圧縮力直交方向の膨張ひずみ（以下、 ε_1 ）が異なる3供試体を抜粋し、その平均応力-平均ひずみ関係を示す。圧縮力の作用方向によらず、 ε_1 が大きくなるにつれ、最大強度が低下し、強い非線形性が生じていることが明らかである。

4. 損傷と力学的応答の異方性を考慮した RC 要素の1軸圧縮構成則の構築

4.1 構成則の定式化

(1) ベースとなる既往の構成則

本研究で構築する構成則は、要素試験との比較が十分なされている Collins and Vecchio のモデル⁹⁾(以下、Collins モデル、式(1))を基本形とする。Collins モデルは、ひび割れ平行方向の強度や剛性の低下を、ひび割れを含む要素の平均引張ひずみの関数として表したものである。

$$\sigma'_c = \beta f'_c \left[2 \left(\varepsilon'_c / \varepsilon'_{c0} \right) - \left(\varepsilon'_c / \varepsilon'_{c0} \right)^2 \right] \quad (1)$$

$$\beta = \frac{1}{0.85 + 0.27 \left(\varepsilon'_1 / \varepsilon'_c \right)} < 1.0$$

ここで、 σ'_c : 圧縮応力 (MPa)、 f'_c : 無筋コンクリートの1軸圧縮強度 (MPa)、 ε'_c : 圧縮ひずみ、 ε'_{c0} : 最大強度時のひずみ、 ε_1 : 平均引張ひずみである。

平均引張ひずみがひび割れの存在による力学的な非線形性を表す指標であるとするれば、損傷の影響は ε_1 (圧縮力直交方向の膨張ひずみ) によって考慮するのが自然である。それゆえ、本研究では、損傷の影響を ε_1 の関数として Collins モデルに取り入れる。

(2) 損傷による圧縮特性の非線形性の考慮

図-10 に示したように、損傷を有する RC 要素の力学的応答に見られる特徴として、非損傷コンクリートと比較して相当に小さい応力レベルから生ずる非線形性がある。これは、セメント硬化体組織の緩みにより、応力-ひずみ関係の立ち上がり下に凸の形状を呈するもので、最大強度時のひずみの増加とともに、無筋コンクリートを対象とした構成則にも考慮されている¹⁰⁾。Collins モデルは2次関数を用いた放物線型のモデルであるため、式(1)の定数2を、式(2)のように係数 γ として修正することでこの非線形性を取り入れる。

$$\sigma'_c = \beta f'_c \left[2 \left(\varepsilon'_c / \varepsilon'_{c0} \right) - \left(\varepsilon'_c / \varepsilon'_{c0} \right)^\gamma \right] \quad (2)$$

ここで、 γ : 損傷による力学的非線形性を考慮するパラメータ。

なお、最大強度時のひずみ ε'_{c0} は、要素鉄筋比や圧縮力の作用方向によらず、式(3)のように見出された。

$$\varepsilon'_{c0} = 0.002 + 0.56 \varepsilon_1 \quad (3)$$

(3) 損傷による強度低下の考慮

凍結融解作用による強度低下は、Collins モデルでひび割れの存在による強度低下を表すパラメータ β を修正することで考慮する。Collins モデルでは、強度低下率に対する平均引張ひずみの重みとして0.27が実験的に定められているものの、膨張ひずみが強度低下に及ぼす影響度は、ひび割れの存在によるものとは異なると考えられる。それゆえ、式(4)のように、膨張ひずみの影響を0.27とは異なる係数 α により取り入れることとする。

$$\beta = \frac{1}{0.85 + 0.27 \left(\varepsilon_1 / \varepsilon'_c \right) + \alpha \left(\varepsilon_1 / \varepsilon'_c \right)} < 1.0 \quad (4)$$

ここで、 α : 損傷による強度の低下を考慮するパラメータ。

構成則の定式化は、係数 α 、 γ の値を変化させ、実験から得られた平均応力-平均ひずみ関係と最もよく適合する時の値を ε_1 の関数として見出すことで行った。図-11、12 に示すように、 α 、 γ は ε_1 とよく対応していた。なお、Collins モデルをベースとして実験結果との適合を図るには、圧縮力平行・直交方向のひずみが最大強度時まで計測されていることが必要である。圧壊形式の破壊を呈した供試体では、荷重の増加に伴うコンクリートのはらみ出しにより（表-1 参照）、ひずみの計測が途中で困難となることがあった。この理由から、構成則の構築に用いることができたのは、損傷有 RC 供試体全 27 体中 17 体である。最終的に本研究で構築する構成則は式(5)である。

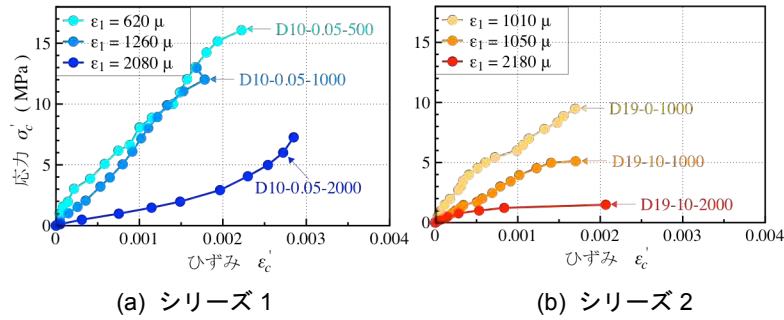


図-10 損傷を有する RC 要素の平均応力-平均ひずみ関係

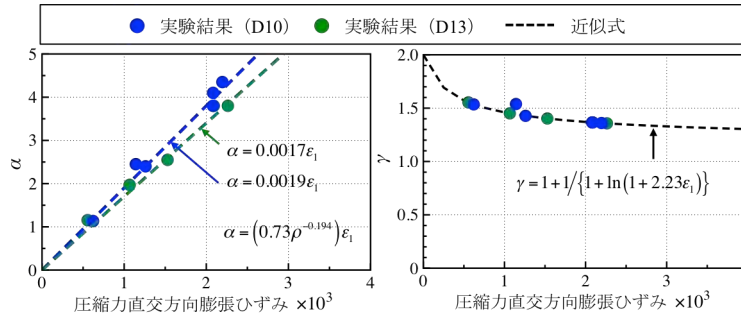


図-11 係数 α および γ の定式化 (シリーズ 1)

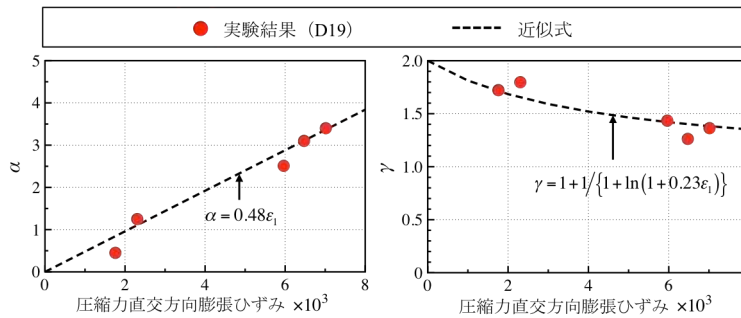


図-12 係数 α および γ の定式化 (シリーズ 2)

$$\sigma'_c = \beta f'_c \left\{ 2(\varepsilon_i/\varepsilon'_c) - (\varepsilon/\varepsilon'_c)^\gamma \right\}$$

$$\varepsilon'_{c0} = 0.002 + 0.56\varepsilon_1$$

$$\beta = \frac{1}{0.85 + 0.27(\varepsilon_i/\varepsilon'_c) + \alpha(\varepsilon/\varepsilon'_c)} < 1.0$$

圧縮力作用方向が鉄筋に対して直交する場合

$$\alpha = 0.73\rho^{-0.914} \times 10^3 \varepsilon$$

$$\gamma = 1 / \left\{ 1 + \ln(1 + 2.23 \times 10^3 \varepsilon) \right\}$$

圧縮力作用方向が鉄筋に平行な場合

$$\alpha = 0.48 \times 10^3 \varepsilon_1$$

$$\gamma = 1 / \left\{ 1 + \ln(1 + 0.23 \times 10^3 \varepsilon_1) \right\}$$

(5)

ここで、 ρ : 鉄筋比 (%) である。

4.2 実験結果との比較

図-13 では、シリーズ 1, 2 から合計 9 体を抜粋し、

式(5)から得られた応力-ひずみ関係を実験結果と比較した。図-13 より、構築した構成則は、損傷度や要素鉄筋比、圧縮力の作用方向によらず、実験結果を概ね再現可能であると言える。図-13(a)で D10-0.05-500 および D10-0.05-1000 の 2 体が実験結果とやや乖離しているが、これは実験結果の定性的傾向が他の供試体と異なったことに起因すると考えられる。すなわちこの 2 体は、膨張ひずみの大きさに対して圧縮強度が比較的大きく、構築した構成則が強度を過小評価したと思われる。

5. まとめ

- (1) 凍結融解作用を与えた RC 要素の 1 軸圧縮試験から、損傷が等方的に生ずる無筋コンクリートとの差異として、膨張ひずみの進行方向と力学的応答の双方に異方性が生ずることを明らかにした。
- (2) 膨張ひずみを損傷指標として平均応力-平均ひずみ関係に取り入れることで、上述した RC 特有の性質を

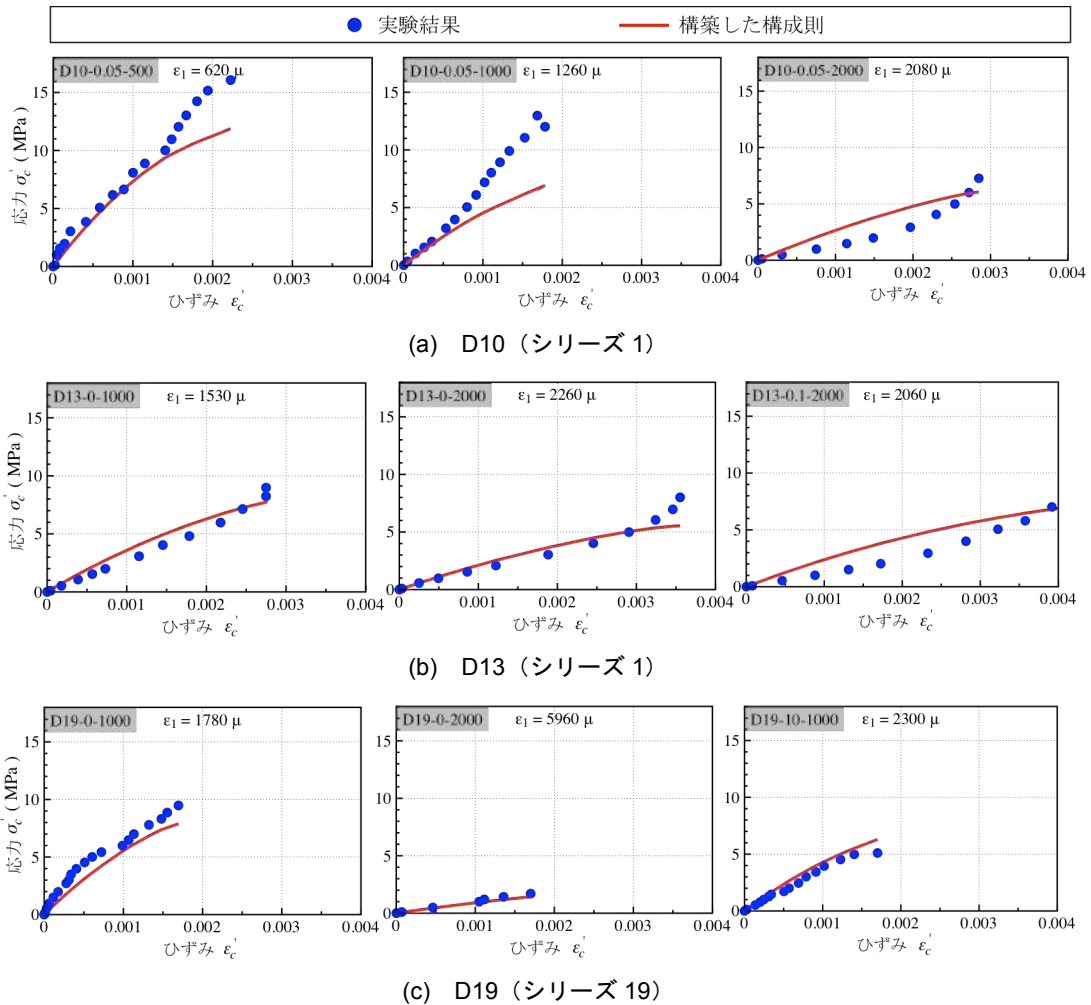


図-13 実験結果との比較

考慮した 1 軸圧縮構成則を構築した。

- (3) 構築した構成則は、要素鉄筋比や圧縮力の作用方向によらず、試験結果を概ね再現可能であった。

参考文献

- 林田宏, 佐藤靖彦: 凍害劣化域の大きさと位置に着目した RC はり部材の破壊性状, コンクリート工学年次論文集, Vol. 34, No. 1, pp. 922-927, 2012
- 林田宏, 佐藤靖彦, 小林竜太, 吉田安寿: 凍結融解作用により劣化した RC はり部材の非線形有限要素解析による構的性能評価, コンクリート工学年次論文集, Vol. 35, No. 1, pp. 901-906, 2013
- 金澤健, 佐藤靖彦ら: 凍結融解作用による損傷を考慮した RC はり部材の 3 次元非線形有限要素解析, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレードシンポジウム論文報告集, Vol. 16, pp. 381-386, 2016
- 奥山英俊, 佐藤靖彦ら: 凍結融解作用により劣化したコンクリートの圧縮特性, 土木学会第 57 回年次学術講演会講演概要集 V-546 (CD-ROM), 2002
- Hasan, M., Okuyama, H., Sato, Y., and Ueda, T.: Stress-Strain Model of Concrete Damaged by Freezing

and Thawing Cycles, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol. 2, No. 1, pp. 89-99, 2004

- 鈴木邦康, 濱幸雄, 原田彩加: コンクリートの長さ変化及び凍害劣化に及ぼす鉄筋拘束の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol. 29, No. 1, pp. 1149-1154, 2007
- 山本泰彦, 長合友造: 膨張ひずみ特性を利用した若材令コンクリートの耐凍害性評価法, 土木学会論文集, Vol. 460, pp. 75-84, 1993
- 渡辺健, 二羽淳一郎ら: 圧縮破壊の局所化を考慮したコンクリートの応力-ひずみ関係の定式化, 土木学会論文集, Vol. 725, pp. 197-211, 2003
- Vecchio, F. J. and Collins, M. P.: The Modified Compression-Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear. ACI Journal Proceedings, Vol. 83, No. 2, pp. 219-231, 1986
- Duan, A., Jin, W., and Qian, J.: Effect of Freeze-Thaw Cycles on the Stress-Strain Curves of Unconfined and Confined Concrete, Materials and structures, Vol. 44, No. 7, pp. 1309-1324, 2011