

令和 5 年 6 月 2 日現在

機関番号：53701

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K14817

研究課題名（和文）鋼橋の進行性破壊が生じる超大歪領域での鋼材の新しい材料構成則の開発

研究課題名（英文）Development of constitutive model of steel material in large strain region where progressive collapse of steel bridge occurs

研究代表者

水野 剛規（Mizuno, Yoshinori）

岐阜工業高等専門学校・その他部局等・准教授

研究者番号：90585093

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：鋼橋の延性き裂の発生に起因した崩壊現象をFE解析において予測するには、延性き裂が発生するまでのひずみ集中部における大ひずみ領域までのひずみ応答を再現できる材料構成則を用いる必要がある。そのため、局部座屈によりき裂が発生しうる大きな相当塑性ひずみが生じるCFT柱の局部座屈部を対象に、引張試験の最大荷重点を超える大ひずみ領域での鋼材の硬化現象を適切に表現できる材料構成則の検討を実施した。ここでは最大点荷重点以降の相当応力と相当塑性ひずみの関係や大ひずみ領域における繰り返し挙動を検討した。さらに、実験と解析の整合性を確認した上で、ひずみレベル100%以上の相当塑性ひずみの応答を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

大ひずみ領域での鋼材の正確な材料構成則が明らかでないため、FE解析で塑性ひずみや応力の応答を精度よく算定できない。延性き裂発生直前までの大ひずみ領域でのひずみ応答を求める高精度な鋼材の材料構成則を用いれば、想定外の事態での構造物内のひずみの急激な上昇を予測し、これを抑制する手だてを講じることで、構造物のリダンダンシーやロバスト性を高めることが可能になる。そのため、鋼材に延性き裂が発生する大ひずみ領域までのひずみ応答を再現可能な材料構成則の検討を行った。

研究成果の概要（英文）：To predict failure of steel bridges through FE analysis, which is caused by occurrence of ductile cracks, it is essential to employ a constitutive model that is capable of reproducing the strain response up to the large strain region where strain concentrates until ductile cracks occur. Thus, we targeted a local buckling section in a CFT column where large equivalent plastic strain enough to cause cracks due to local buckling occurs, and investigated a constitutive model. This model can appropriately express the hardening of steel material that occurs in the large strain region that exceeds the maximum load point during tensile tests. Herein, we investigated the relationship between the equivalent stress and the equivalent plastic strain beyond the maximum load point as well as the repeated behaviors in the large strain region. After confirming the consistency between the experiment and the analysis, the response of equivalent plastic strain at a strain of 100% or more was confirmed.

研究分野：構造工学

キーワード：材料構成則 延性き裂 相当塑性ひずみ

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

鋼橋の大規模崩壊へと進展する可能性がある接合部の部材破断は、通常、塑性ひずみの集中により発生した延性き裂を起点として生じる。このような延性き裂の発生に起因した崩壊現象を予測するには、延性き裂が発生するまでの部材におけるひずみ集中部の塑性ひずみや応力の応答を定量的に把握することが重要である。しかし、現状では大ひずみ領域での鋼材の正確な構成則が明らかでないため、FE解析で塑性ひずみや応力の応答を精度よく算定できない。現在、鋼材の構成則の多くは鋼材の引張試験を基に設定されているので、ネッキングにより試験片の変形の一様性が失われる最大荷重点以降の正確な挙動が十分解明されていない。したがって、通常、安全性の観点から、最大荷重点での真応力に漸近するように相当応力と相当塑性ひずみの関係を仮定している場合や最大荷重点の真応力に到達後一定値を保持すると仮定している場合が多い。しかし、実現象としては最大荷重点到達後も真応力は少なくとも上昇する定性的な特性が知られているので、このような仮定を導入した現状の構成則モデルは適当であるとはいえない。したがって、現状では、鋼部材の延性き裂発生に至るメカニズムを解明し、これを防止するための構造工学的手法を検討することができない状態にある。

2. 研究の目的

このような部材破断を引き起こす延性き裂発生を予測するには、き裂発生時にひずみ集中部に生じる非常に大きな塑性ひずみの履歴や応力場をFE解析により正確に解析し、これらを指標として判定しなければならない。しかし、現状の解析で用いられている材料構成則は高々20%程度の相当塑性ひずみ領域までの精度しか検証されておらず、延性き裂が発生する100%を超える領域での精度は明らかに期待できない。このように、延性き裂発生の要因は塑性ひずみの集中であるが、大ひずみ領域までのひずみ応答を再現可能な信頼性のある鋼材の材料構成則が存在しない。そのため、本研究では、鋼部材における延性き裂発生までの大ひずみ領域での応答を高精度に算定可能な鋼材の材料構成則の開発を目的とする。

3. 研究の方法

延性き裂発生個所においては、ひずみレベル100%以上の相当塑性ひずみが生じていると考えられる。ここでは、繰り返し材料挙動を高精度に表現できる材料構成則として信頼性のある3曲面モデルを用いて、局部座屈によりき裂が発生しうる大きな相当塑性ひずみが生じるCFT柱の局部座屈部を対象に、引張試験の最大荷重点を超える大ひずみ領域での鋼材の硬化現象を適切に考慮できるように3曲面モデルを改良する。これより、小さい塑性ひずみ領域から大ひずみ領域までのFE解析に一貫して適用できる高精度の繰り返し材料構成則の適用性を検討する。

4. 研究成果

(1) 概要

対象とするCFT供試体を図1に示す。鋼管は、外径 $\phi 139.8\text{mm}$ 、径厚比パラメータは $R_t=0.065$ である。ここでは縮尺の制約からベンディングロール鋼管ではなく電縫鋼管を用いた。供試体は、コンクリート無充填鋼管柱とCFT柱の2体とした。CFT柱の充填コンクリートは、下ベースプレート上面から頂部プレートまで鋼管にフル充填した。これらの供試体の荷重実験では荷重点における水平変位とともに鉛直荷重を制御した。水平変位については、両供試体とも図2に示す振幅漸増型水平1方向繰り返し荷重のパターンを与えた。鉛直荷重については各供試体で異なるパターンを与えた。コンクリート無充填鋼管柱については、柱の軸力比を -0.5 (引張)~ 0.11

(圧縮)の範囲で、水平変位の振幅に合わせて変動させた。CFT柱については、圧縮側の軸力比 0.5 を一定に荷重した。また、柱基部のひずみ及び変位はデジタル画像相関法により計測した。

(2) 解析モデル

CFT柱を精緻なシェル・ソリッド要素でモデル化したCFT柱供試体モデルを図1に示す。このモデルの精度は鋼管に局部座屈を伴うCFT柱の静的繰り返し荷重実験や加振実験など多数

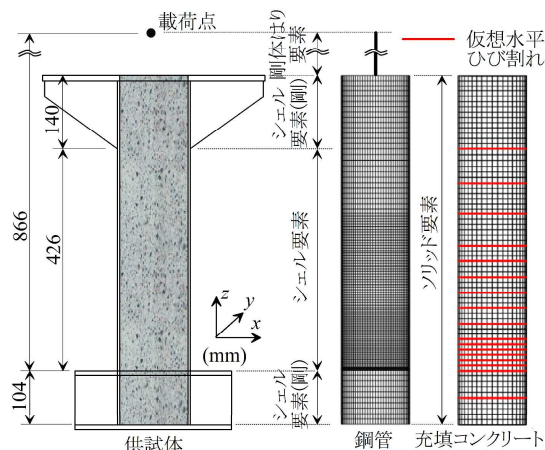


図1 CFT供試体と解析モデル

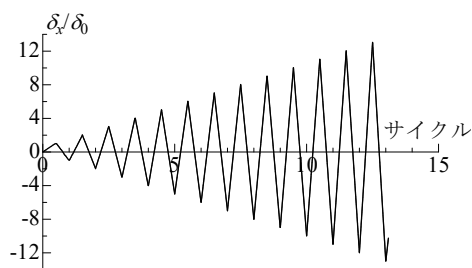


図2 荷重点に与えた水平変位と軸力比の履歴

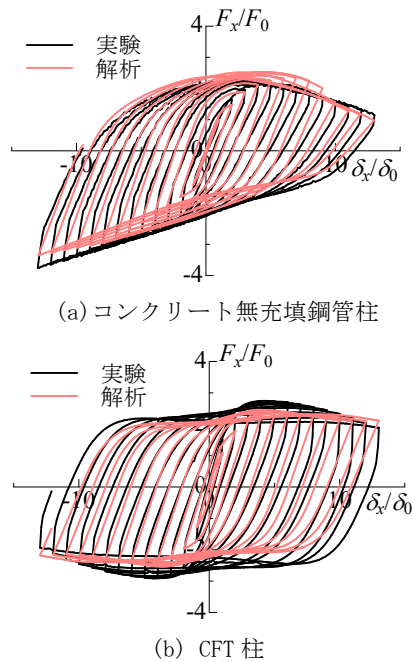


図7 水平復元力と水平変位の関係

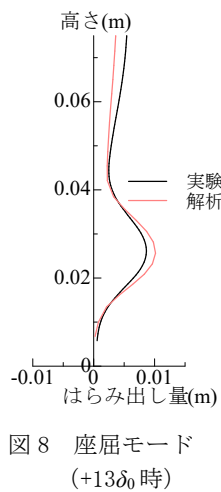


図8 座屈モード (+13 δ_0 時)

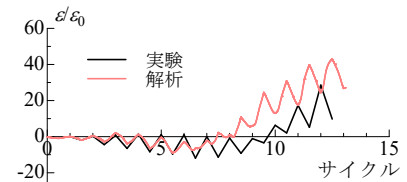


図9 軸方向ひずみとサイクルの関係

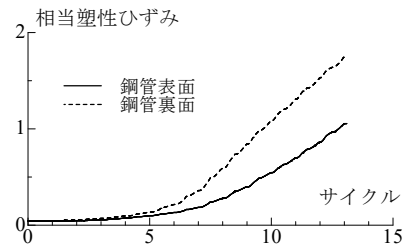


図10 相当塑性ひずみとサイクルの関係

の水平復元力が実験よりもやや下回っているものの、かなり大きな振幅である最大振幅 $13 \delta_0$ まで全般的にほぼ精度よく履歴挙動が再現されている。

(5) 大ひずみ領域でのひずみの応答

CFT柱の局部座屈部は充填コンクリートにより座屈の進展が抑制され、繰り返しにより大きな相当塑性ひずみが生じる。局部座屈部を対象に大ひずみ領域でのひずみの応答を確認する。図8に、CFT柱供試体の+13 δ_0 時における解析と実験の座屈モードを比較して示す。図8より、最大振幅である+13 δ_0 時においても座屈モードの実験結果と解析結果は比較的良好に一致していることが確認できる。これより全般的に解析は実験のひずみの状態をある程度再現できていると考えられる。つぎに、最も大きなひずみが生じた座屈頂部における鋼管表面(外側)における軸方向ひずみとサイクルの関係を実験結果と比較して図9に示す。図9より、軸方向ひずみは序盤から中盤まで実験と解析はよく一致しており、中盤以降の局部座屈の進展により圧縮から引張に移行する挙動も再現されている。

実験では鋼管表面のひずみしか計測できないので、このときの鋼管裏面のひずみを解析により求めた。鋼管表面(外側)と鋼管裏面(内側)の相当塑性ひずみとサイクルの関係を図10に示す。図10より、鋼管表面では+13 δ_0 時に100%程度の相当塑性ひずみが生じており、一方鋼管裏面では+13 δ_0 時に180%程度のさらに大きな相当塑性ひずみが生じていることが確認できる。以上より、本研究で検討した鋼材の材料構成則を用いることにより、比較的信頼性の高い状態でひずみレベル100%以上の相当塑性ひずみを求めることができると考えられる。

<参考文献>

- 1) 後藤芳顕, Ghosh Prosenjit Kumar, 川西直樹: 充填コンクリートとの相互作用を考慮した円形断面鋼製橋脚の繰り返し挙動のFEM解析, 土木学会論文集A, Vol. 65, No. 2, pp. 487-504, 2009.
- 2) 後藤芳顕, 関一優, 海老澤健正, 呂正林: 地震動下のコンクリート充填円形断面橋脚における局部座屈変形の進展抑制機構と耐震性向上, 土木学会論文集A1(構造・地震工学), Vol. 69, No. 1, pp. 101-120, 2013.
- 3) 後藤芳顕, 海老澤健正, 佐々木克仁, 神田信也, 松原拓朗, 田島仁志: コンクリートを充填したSM570材による鋼製橋脚の繰り返し荷重下の終局挙動のFE解析, 土木学会論文集A1(構造・地震工学), Vol. 75, No. 2, pp. 175-193, 2019.
- 4) 後藤芳顕, 王慶雲, 高橋宣男, 小畑誠: 繰り返し荷重下の鋼製橋脚の有限要素法による解析と材料構成則, 土木学会論文集, No. 591/I-43, pp. 189-206, 1998.
- 5) 西村宣男, 竹内修治, 村上茂之, 讚井一将: 電縫鋼管の製造工程における降伏応力の変化と残留応力, 鋼構造論文集, Vol. 4, No. 13, pp. 53-62, 1997.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 後藤芳顯, 水野剛規, 王慶云, 鈴木森晶	4. 巻 77
2. 論文標題 ケーブル式崩壊防止装置の上路式トラス橋への適用性に関する検討	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 土木学会論文集A1	6. 最初と最後の頁 73-92
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------