#### 研究成果報告書 科学研究費助成事業



今和 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

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等に ついては、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

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, 安全性の観点からか,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 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.

#### 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.

#### 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  $\phi$  139.8mm, 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 供試体の載荷実験では載荷点における水平 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方向繰り返し載荷のパターン与え 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を一定に載荷した.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 の静的繰り返し載荷実験や加振実験など多数







図2 載荷点に与えた水平変位と軸力比の履歴

の実験で検証されている<sup>例えば1),2)</sup>.鋼管は構成則 に3曲面モデルを導入した厚肉シェル要素 S4R で表す.構成則の詳細については(3)で述べる. 充填コンクリートは、損傷塑性モデルを導入し た8節点ソリッド要素で表す. 塑性理論を用い る損傷塑性モデルでは、ひび割れ発生後の繰り 返しによるひび割れの開閉挙動を表すことがで きないため、コンクリートには引張による塑性 ひずみが蓄積し、精度が著しく低下する.この ような問題が生じるのを防ぐため、ここでは、 充填コンクリートの主要な水平ひび割れ発生位 置に、図1に示すように仮想ひび割れモデルを 水平に挿入してひび割れの開閉挙動を表した. 仮想ひび割れモデルの界面はハードコンタク トモデルに基づくコンタクトペアでモデル化 し、接触・離間・滑り挙動が表されるようにし ている.このとき,接触したひび割れ界面の摩 擦挙動はクーロン摩擦モデルで表している.鋼 管と充填コンクリート界面の接触・離間・滑り 挙動も同様にモデル化する.

(3)鋼材の構成則

CFT 柱の鋼管では無充填柱の鋼管と異なり充 填コンクリートにより局部座屈変形の進展が 抑制されるので,最大耐力到達後も荷重の低下 が小さい.その結果,繰り返し載荷で鋼管に蓄 積する塑性ひずみは非常に大きくなる.そのた め,ここでは,鋼管の構成則に限界局面拡大型 3曲面モデルを用いた<sup>3</sup>.限界局面拡大型 3曲

面モデルは塑性ひずみが大きな領域での鋼材の繰返し硬 化挙動に対応した従来の三曲面モデル<sup>4)</sup>を改良したモデ ルである.ここでは最大点荷重点以降の相当応力と相当 塑性ひずみの関係の定義とともに,限界曲面拡大領域に おける繰り返しに影響する硬化係数に改良を加えた.

1軸真応力と対数塑性ひずみの関係については,図3に 示すように定義した.この関係は図4に示すように限界 曲面拡大型3曲面モデルをシェル要素に導入した解析に よる鋼管試験片の引張試験を解析して得られた公称応力 と工学ひずみの関係が一致するように決定した.このと き鋼管製造時の加工で生じる残留塑性ひずみの影響も考 慮した.CFT 鋼管柱では塑性ひずみ応答が無充填鋼管柱よ りさらに大きくなるので,電縫鋼管によるCFT柱では残 留ひずみの影響をより正確に扱う必要があると考え,鋼 管の製造工程<sup>55</sup>を反映したシェル要素による解析で残留 塑性ひずみを算定し,鋼管の構成則に初期塑性ひずみと して導入した.

限界曲面拡大型 3 曲面モデルの拡大領域の繰り返し挙動として、1 軸の真応力と対数ひずみの履歴挙動を図 5 に示す. 拡大領域における繰り返し挙動については、移動硬化 1/2,等方硬化 1/2 の混合硬化の構成則を用いている. ここでは、拡大領域の繰り返しに影響する硬化係数を無充填鋼管柱と CFT 柱の繰り返し挙動に一致するように改良を加えた. 具体的には以下の通りである. 応力点が不連続曲面の内側にある場合の硬化係数 h は  $h=h_{in} \cdot \delta_{in}/(\delta_{in}-\delta)$ で表される. ここでは  $h_{in}=\kappa_{exp}E/100$ とし、 $\kappa_{exp}$ を図 6 に示すように塑性ひずみに対する指数関数で定義した. ここでの  $C_1\sim C_3$ の定数は同定パラメータである.

(4)実験供試体の繰り返し挙動

コンクリート無充填鋼管柱とCFT 柱の実験結果と解析結果 の比較として、水平復元力と水平変位の関係を図7に示す. 図7(a)より、コンクリート無充填鋼管柱については、実験結 果と解析結果は序盤から終盤までの全領域において精度よく 一致している.一方、CFT 柱については、図7(b)より、解析



36 限界曲面拡入域のハラ メータの変動



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 δ<sub>0</sub>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<sub>0</sub>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<sub>0</sub>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よく一致しているこ 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<sub>0</sub>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<sub>0</sub>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>

- 後藤芳顯, 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) 後藤芳顯,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) 後藤芳顯,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) 後藤芳顯, 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, 讃井一将: 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	4.巻
後藤芳顯,水野剛規,王慶云,鈴木森晶	77
2.論文標題	5 . 発行年
ケープ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	2021年
3.雑誌名	6 . 最初と最後の頁
土木学会論文集A1	73-92
掲載論文のDOI(デジタルオプジェクト識別子)	査読の有無
なし	有
オープンアクセス	国際共著
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	

〔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

<u> </u>			
	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
---------	---------