

18. 鋼構造物の非線形解析と耐震設計への応用

とりまとめ：奥井 義昭（埼玉大学）

論文題目：“鋼製円形断面橋脚の複合非線形解析における要素分割について”

著者：山口栄輝，鬼木浩二，松永寿隆，南野能克

掲載：Vol.51A，pp.1781-1787

討議[矢部正明（長大）]

1. はり要素とシェル要素を混合させた検討結果には、初期不整を考慮しても同じ結果となりますでしょうか？

2. 正負交番載荷を検討対象としていますが、1995年兵庫県南部地震で観察された断層近傍での強震記録のような波を用いた動的解析にも今回の結果は準用できますでしょうか？

回答：

1. 初期不整の影響が大きいのは局部座屈が生じる部分です。そうした部分についてはシェル要素でモデル化していますので、同様の結果が得られると考えています。

2. 動的解析はしていませんので、別途検討しないと確実な回答は難しいです。ただ、動的解析でも正負交番載荷と同じような局部座屈が生じるのであれば、準用可能と思います。

討議[橋本義和（東京ガス）]

鋼材の応力・ひずみ関係が本論文の結論に影響するかどうかを教えてくださいませんか？

回答：検討していませんので確たることは言えませんが、異なる構成側を用いると、検討結果の中には、影響を受けるものもあると思います。ただ、他の構成則でも同じような局部座屈が生じるのであれば、それほど大きな違いは生じないと思っています。

討議[内藤英樹（東北大学）]

要素分割と解析精度の関係を検討されていますが、鋼製円形断面橋脚の局部座屈挙動まで解析で再現することは必要でしょうか？お考えをお聞かせください。

回答：例えば、鉄道構造物等設計標準・耐震設計編では、鋼部材の耐震性能照査において、耐荷力が最大値の95%に低下するまでを考慮するようになっております。局部座屈は最大耐力点付近から発生しますので、局部座屈挙動まで含めて再現できる解析技術は必要と思います。

論文題目：“鋼部材の有限要素解析における局部座屈を考慮した軟化型構成則の取り扱い”

著者：山口栄輝

掲載：Vol.51A，pp.1789-1794

討議[小澤一誠（日本車輛製造），王慶雲，後藤芳顯（名古屋工業大学）]

薄肉鋼構造部材の局部座屈による軟化挙動を近似的にはり要素に軟化型の構成則を導入して扱う方法について述べられていますが、以下の点に疑義がありますのでご回答をお願いします。

1. 軟化型構成則による解析では軟化が発生すると1要素に軟化挙動が集中し周りの要素に除荷挙動が生じるため、要素境界ではひずみが不連続となります。このため、連続体を対象とした有限要素法の要素分割による収束性の議論⁷⁾⁸⁾が成立しないのは明らかであります。つまり軟化型構成則による解析では山口先生の主張されるような「精度の良い解を得るためには十分要素分割を小さくしなければならない。」という原則が存在しないのがむしろ一般的な認識と考えます。上記のような誤った原則で軟化型構成則による有限要素法の離散誤差の議論を行うのは不相当であると考えますがいかがですか？

2. 「1.」で述べたように、軟化型構成則を用いると軟化した要素境界での不連続性のため連続体として整

合性のある解は得られません。したがって、軟化の生じた局部座屈領域の物理量（特にひずみと応力）に対して精度の良い解を得ることは不可能です。したがって、軟化型構成則を用いる解析方法はすべてに整合性のある解を求めるためのものではなく特定の物理量の実用的な解を求めるための近似手法ととらえるべきです。今回の場合のような構造物では $P-\delta$ 関係を求めるのが主目的であり、この関係が精度良く求められるように要素分割とともに軟化型構成則も決める必要があります。すなわち、要素分割と構成則とは切り離せません。本論文では適当に定めた軟化型構成則に関して要素分割を議論されていますがこれらは明らかに不適当と考えます。また、局部座屈領域は部材諸元や材料特性により大きく変化することから、解析精度を論ずる場合は本論文のように $0.7b$ と固定することも不適当であります。以上2点についてご見解をお伺いします。

3. 軟化領域に1要素として座屈要素を用いる討議者らの論文に対して要素分割に起因する精度の問題点を指摘されていますが、討議者は2.で述べた観点から薄肉鋼製橋脚の $P-\delta$ 関係を精度良く求めることを第一義的に考えシェル要素による解析とのキャリブレーションで座屈要素長などを決定しています。単柱式橋脚の解析精度は詳細な検討⁶⁾から明らかのように全く問題はなく、さらに、参考文献には引用されていませんが、ラーメン橋脚¹⁰⁾の場合も同様の検討からその精度には問題ないと考えます。本論文の背景として、討議者の解析法では精度が悪い可能性があり、これを改善することに目的があるようなことが述べられていますが、どのような場合に問題が生ずるのか具体的に提示してください。

4. 局部座屈を考慮した鋼構造骨組構造物の解析に軟化型構成則を用いる手法については多く報告されています^{2),3)}が、討議者ら^{6),10)}が明らかにするまでは、「1要素に軟化挙動が集中するため要素分割数を増加させても収束せず軟化型構成則に整合する適切な要素分割長を用いなければならない。」ということについては一切明らかにされていませんでした^{2),3)}。本論文ではなぜか引用されていませんが山口先生らの論文^{11),12)}も例外ではありません。この問題の方が軟化型構成則を用い

る解析では注意しなければならないことで、取り扱いを間違えればより深刻な結果をもたらすことは明らかであります。本論文はこのような重要な本質から実務者の目を逸らせ、混乱させるような印象を受けます。軟化型構成則による鋼製橋脚の解析は実務で用いることを想定した解析であるという点に注意していただきたいと思います。以上の点についてご見解をお伺いします。

5. 本論文ではあらかじめ設定した局部座屈領域では平均応力 - 平均ひずみ関係を用いると述べられているだけで、具体的にどのような定式化を行うか一切提示されておられません。討議者の論文を批判されるのであれば具体的な定式化を示されるのが当然であると考えます。

軟化が生じた段階で座屈領域に平均応力 - 平均ひずみ関係を用いると書かれていますが、この領域において平均ひずみはどのようにして計算されるのですか？ あらかじめ定めた有限長の局部座屈領域で一部に軟化が生じた瞬間、この領域でのひずみを平均化して剛性を評価し、局部座屈領域に一樣の剛性を用いるのであれば、荷重または変位増分に対し剛性が不連続に変化する矛盾は生じませんか？ また、局部座屈領域において本来異なるはずの剛性を一樣とすることは、この領域で要素分割を小さくしたと言っても恣意的に拘束条件を付加したことに相当するはずで、その収束解にどのような意味があるのでしょうか？ このような要素を用いても局部座屈領域自体の挙動は正確には求まりません。山口先生らの方法も、結局は、3.で述べたごとく、薄肉鋼製橋脚の $P-\delta$ 関係が精度良くまるように、厄介なキャリブレーションの手続きを経て局部座屈領域の平均応力 - 平均ひずみ関係を設定するということにはならないのですか？ それとも、局部座屈領域の挙動と $P-\delta$ 関係いずれも整合性のある構成則が簡単に定まるのでしょうか？ 以上5点についてご回答下さい。

6. 6. 本論文の方法はユーザーエレメントが準備されていないような通常の商用プログラムでどのように考慮出来るかご説明お願いします。軟化型構成則を用いる方法は実用性の観点から、商用プログラムでも容易に対応出来ることが重要と考えます。討議者の方法

は一般の商用プログラムでも容易に用いることができることを念頭に置いて開発しております。

参考文献

1)~9):本論文に引用

10) 小澤一誠，王慶雲，後藤芳顯：座屈モードの局所化と隅角部のせん断変形を考慮したはりモデルによる鋼製ラーメン橋脚の解析，構造工学論文集，土木学会，Vol.48A，pp. 99-107, 2002.

11)山口栄輝，阿部圭吾，久保喜延：繰り返し水平荷重を受ける鋼製円筒橋脚中の一解析法，鋼製橋脚の非線形解析と耐震設計に関する論文集，土木学会，構造工学委員会構造工学震災調査特別小委員会，pp.197-202, 1997.

12)Yamaguchi, E., Abe, K. and Kubo, Y.: Analysis of steel bridge piers under local buckling by beam element, Proc. of 5th International Colloquium on Stability and Ductility of Steel Structures, Nagoya, Japan, Vol.1, pp.267-272, 1997.

回答：なし。

討議[斉木功（東北大学大学院）]

平均曲率を用いることで要素分割依存性を改善することが出来るとの報告でしたが平均を取る長さの依存性が出てくるのでは無いでしょうか。平均をとる長さについてお考えがあれば教えてください。

回答：なし。

討議[奥井義昭（埼玉大学）]

曲げモーメント・曲率関係の平均値を等しくして，平均を取った領域内の要素数を細かくすると，曲率の値は要素数に対して収束しなくなるものと思われます。したがって，得られた曲率の解釈に注意を払うべきと思いますが，これについて意見をお願い致します。

回答：なし。

討議[矢部正明（長大）]

単純な構造系では最大耐力以下の応答に留めることが基本と考えます。より複雑な構造系では，その耐力や変形性能特性が不明なので3次元有限要素法を用いた解析を行い，出来るだけその性状を明らかにするように努めます。これが実務設計の場の実情です。このような状況下で，コン会いの研究成果は，どのような場で用いることを想定されていますでしょうか。

回答：なし。

論文題目：“都市ガス用小口径配管の一方向地盤変位吸収能力に及ぼす曲管部と直管部の強度差の影響”

著者：橋本義和，谷田部洋，福田直樹，吉崎幸司

掲載：Vol.51A, pp.1795-1802

討議[矢部正明（長大）]

1．曲管部の製作時にひずみが生じていると思われま。す。ひずみ時効が耐力や変形性能に与える影響はどの程度でしょうか？

2．ガス配管に生じる被害は，液状化の影響と地盤の繰り返し変位とどちらが原因としては大きいのでしょうか？

回答：液状化に伴う地盤変位と地盤の繰り返し変位では外力の作用形態が異なります。また，両者の想定地盤変位量は埋設される地盤条件に依存するため，広範囲に埋設されたガス配管においては様々なケースが考えられます。さらに，液状化が発生するかどうかは埋設される地盤条件に依存するため，必ずしも全てのガス配管において懸念される事象ではありません。このような理由から，地震時のガス配管の健全性に及ぼす影響として液状化に伴う地盤変位と地盤の繰り返し変位のどちらが大きいかということについては一概には回答できません。

なお，本論文で用いた「被害」は，局所的な変形の集中を意味しております。溶接接合鋼管は高い耐震性を有することが既往の地震において確認されており，想定される地震の程度では，液状化に伴う地盤変位および地盤の繰り返し変位のいずれに対しても，漏洩に

至るような被害が生じる可能性は極めて低いと考えられます。