

平成 30 年 5 月 21 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2017

課題番号：15K14017

研究課題名(和文) 合成部材の構造性能評価の高精度化に向けた数値要素試験の開発

研究課題名(英文) Development of numerical element test for improving accuracy of structural performance evaluation of composite members

研究代表者

齊木 功 (Saiki, Isao)

東北大学・工学研究科・准教授

研究者番号：40292247

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)：微視構造を持つ梁の平均物性評価のための周期境界条件および剛体回転拘束の方法を提案した。このとき、せん断遅れ変形のためにせん断剛性が過小評価されること、また、せん断遅れ変形を拘束することで精度を改善できることを、微視構造を直接的にモデル化した境界値問題との比較により確認した。提案手法を弾塑性と接触を考慮した鋼コンクリート合成桁に適用し、押し抜き試験に変わる荷重ずれ変位関係を得ることができた。これにより、摩擦や付着がずれ止めの性能に及ぼす影響を定量的に評価できた。代表体積要素の周期長を変更することで、ずれ止め間隔が性能に及ぼす影響も評価できた。

研究成果の概要(英文)：A periodic boundary condition and a method of the constraint of rigid body rotation for evaluating the average mechanical properties of beams with microscopic structure have been proposed. For this, the fact that the shear rigidity is underestimated due to the shear lag deformation and that the accuracy can be improved by constraining the shear lag deformation have been confirmed through comparison with the boundary value problem of models with explicit microscopic structure. The proposed method applied to steel-concrete composite girder considering elasto-plasticity and contact has been able to predict shear force-slip relation without pushout test. The proposed method has also been able to estimate quantitatively the effect of friction and bonding on the performance of the shear connector. By changing the periodic length of the representative volume element, the influence of the interval of shear connectors on their performance has been able to be evaluated.

研究分野：計算力学・複合構造・構造工学

キーワード：均質化法 合成部材 せん断剛性 弾塑性 接触解析 剛体回転 せん断遅れ 複合構造

1. 研究開始当初の背景

鋼とコンクリートの一体化は、複合構造としての性能を発揮する前提条件であり、結合部の性能を保証することは最も重要な事項の一つである。結合部にはずれ止めが用いられるが、これを含む結合部の性能は、押抜試験等の要素実験の結果を根拠とした経験式によってなされている。押抜試験では、鋼コンクリート界面に平行で互いに逆向きの力を鋼部分とコンクリート部分に作用させることで一面せん断状態を作り出している。このとき、荷重と反力の作用点が一致しないために偏心载荷となり、モーメントが作用することが避けられない。偏心载荷によるモーメントがずれ止めの耐力や剛性の評価結果に影響を及ぼすことは実験により確認されている¹⁾。このような偏心载荷は実際の合成桁で生じるとは考え難く、現状の要素実験では実際の合成部材における応力状態を忠実に再現できていない。また、実際の合成部材では、せん断力だけではなく、はりとしての曲げモーメントが作用しており、コンクリート部には圧縮や引張が発生し、終局耐力を考える状況では、ずれ止めに対する拘束効果等の相互作用も無視できないと申請者は考えている。しかしながら、これらの条件を押抜試験で再現することは技術的に困難である。

2. 研究の目的

実際の合成部材における変形状態を再現可能な数値要素試験を開発することを目的とする。特に、非均質断面梁のせん断剛性評価の試みは、均質断面の梁に比べてこれまで十分とは言えない。例えば円形断面の半径方向に非均質な梁といった限定された条件におけるせん断補正係数が Steinboeck et al.¹⁾により報告されている程度であり、任意形状断面に適用可能な手法は報告されていない。これに対して、著者らは均質化法で定義される代表体積要素に剛体回転拘束を組み込むことにより、せん断剛性を数値的に評価する方法を提案した²⁾。この方法によれば、非均質断面の梁のせん断剛性評価も原理的には可能であり、実際に2次元梁に対しての結果も示している。本稿では、この方法を3次元梁に適用する際の問題を提起し、Timoshenko 梁のせん断剛性評価について考察する。

3. 研究の方法

(1) Timoshenko はりおよび Mindlin 板のせん断剛性評価手法の開発

各種ずれ止めを含む合成はりおよび合成板のせん断特性評価のための最初のステップとして、均質化法に基づく非均質 Timoshenko はりおよび Mindlin 板の線形問題に限定したせん断剛性評価手法の開発を行う。この手法の開発には、申請者が開発してきた非均質 Kirchhoff 板の平均剛性評価法を発展させることで行う。ただし、前述の未解決問題に関連して、せん断変形を代表体積要

素に与えるための面外方向相対変位に加えて、何らかの剛体回転を拘束するための境界条件を与えなければならない。これに対して、Gruttmann and Wagner²⁾は、代表体積要素の境界面の点対称位置にある節点同士に拘束条件を導入するという方法を提案している。しかし、この方法では、得られる結果が代表体積要素の長さ依存することを申請者は経験している。代表体積要素の長さが長くなると、内部の断面は徐々に回転し、剛性の低い曲げ変形でつり合いを保ち、その結果、剛性は過小評価される。そこで、代表体積要素の任意の断面において、断面内のすべての点の位置から回帰される平面の傾きを断面の回転と定義し、全断面の回転を体積平均の意味で拘束する。これは、Timoshenko 梁において、まだ限定された解析対象に対してではあるが、代表体積要素の長さ依存しない結果を導くことを確認している。

(2) 非線形性を含む構造要素の数値要素試験の開発

複合構造が有する弾塑性の材料挙動および異種材料の付着・剥離・摩擦といった複雑な現象を再現するために、3.1. で開発した平均せん断剛性評価手法を、弾塑性・接触の非線形性を考慮できるように拡張し、数値要素試験を開発する。ここで、鋼やコンクリートの弾塑性の非線形性については、他の研究者らによる長年の研究成果があるが、これらの材料の界面における付着・剥離・摩擦に関しては、これまであまり研究されていない。これに対して、申請者は過去に受けた研究費により界面の力学特性の解明を行ってきた。この中で、コンクリート中に丸鋼を埋め込むことにより、鋼コンクリート界面の端部をなくした実験方法を考案した。この試験により、端部における応力集中の影響を排除し、これまでない正確な界面の力学モデルの構築が可能となった。本研究においても、必要に応じてこの実験を追加で行うことで、界面の力学モデルを再構築して利用する。

(3) 複合構造の数値要素試験の精度検証

3(2)の非線形性を含む構造要素の数値要素試験の開発を引き続き行うとともに、数値要素試験で用いている弾塑性および接触を考慮した非線形有限要素解析の結果を、申請者や他の研究者が過去に行った各種ずれ止めの要素実験の結果と比較することにより、その精度と妥当性を確認する。ここで、耐力や荷重 - ずれ変位関係の比較に加えて、ずれ止め周辺の応力状態などについても詳細に検討し、解析の高精度化を図る。

(4) 要素試験における境界条件の影響評価

3(2)で構築した数値要素試験を用いて、曲げモーメントがない状態で合成はりや板の非線形せん断挙動を解析する。この結果を従来の要素実験の結果と比較することによ

り、要素実験が持つ剛な境界や、偏心荷荷に伴うモーメントによって生じる界面法線方向の圧縮・引張が合成梁や合成版の耐荷力や荷重 - ずれ変位関係に及ぼす影響を定量的に評価する。

4. 研究成果

非均質梁のせん断剛性評価について得られた成果を以下に述べる。

図-1 に示す2種類の材料が断面の2方向に分布する均質断面を有する梁のせん断剛性を評価することを考える。材料1および2のせん断弾性係数はそれぞれ $G_1 = 1, G_2 = 10^{-3}$ とし、両材料の Poisson 比をともにゼロとする。

断面を $40 \times 40 = 1,600$ の要素に分割し、梁の軸方向に4要素とした。このモデルを非均質モデルと呼び、非均質モデルの代表体積要素に対して一様せん断変形を与えたときの変形(変形倍率 0.2 倍)を図-2 に示す。図中のコンターは面外せん断ひずみ γ_{13} の分布を示す。剛性の小さい材料2の面外、面内のせん断変形が大きくなっており、材料1が剛体回転している。この結果から求められるせん断剛性は 0.0178783 であり、大雑把に見積もった材料1のみのI形断面のウェブに相当する部分のせん断剛性(ウェブ面積 $\times G_1 = 0.08$)に比べて明らかに小さい。

そこで、面内のせん断変形、すなわちせん断遅れ変形を拘束するために、材料1および2を等方弾性体から直交異方弾性体に置き換え、それぞれの x_1 - x_2 面におけるせん断弾性係数のみをもとのせん断弾性係数の $r = 10^4$ 倍として一様せん断変形を与えた。このときの変形を図-3 に示す。図中、面外せん断ひずみ γ_{13} 分布と G_1 で無次元化した面外せん断応力 σ_{13} 分布を示した。この図より、非均質モデルは断面全体で面外せん断変形を呈しており、かつ、剛性の大きな材料1が主にせん断力を受け持っていることが確認できる。この結果から、せん断遅れ変形を拘束した非均質モデルのせん断剛性は 0.0852 となった。

この非均質モデルに関して参照可能な理論解はないため、梁の曲げせん断の境界値問題をソリッド要素で解析し比較することとする。具体的には非均質モデルの断面を有し、図-4 に示すような長さ $l = 5$ の単純支持梁のスパン中央に大きさ P の集中荷重が作用する問題を対象とする。線形問題なので荷重の大きさに意味はないが、 $P = G_1 A = 1$ とした。断面高さのスパンに対する比は $1/5$ であり、面外せん断変形の影響がある程度大きくなることを目論んだ。有限要素分割は、問題の $x_1 = 0$ 面に関する対称性を利用し、 $x_1 = -2.5$ から荷重点の $x_1 = 0$ の範囲を非均質モデルと同様に1辺 0.025 の立方体形状のソリッド要素に分割した。断面内 $40 \times 40 = 1,600$ 分割、軸方向 100 分割とし、総要素数は 16 万となった。単純支持(回転自由、鉛直変位拘束)は、局所的な変形を極力避けるために、

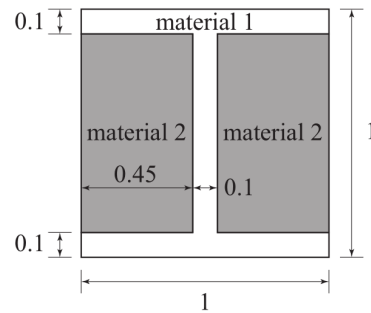


図-1 非均質モデル

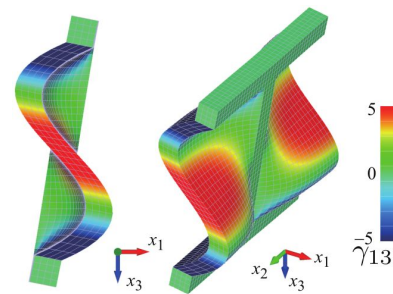


図-2 非均質モデルの一様せん断変形

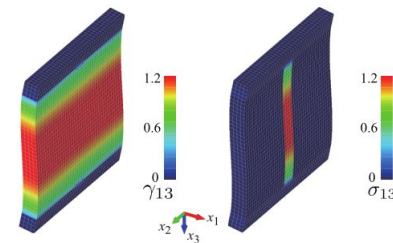


図-3 非均質モデルの一様せん断変形 $r = 10^4$

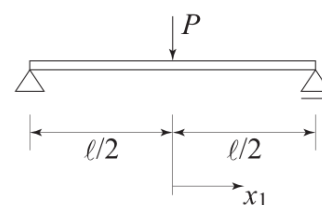


図-4 曲げせん断の境界値問題

支点 ($x_1 = -2.5$) にある節点すべてを鉛直方向に拘束することでモデル化した。対称条件は $x_1 = 0$ 面において x_1 方向に拘束することで考慮した。その他は剛体変位を拘束するために、最低限の拘束条件を与えた。中央集中荷重に関しても、局所的な変形を極力避けるために、材料1のウェブに相当する面(上下中心部 0.1×0.8)に単位面積当たりの分布荷重を等価節点外力として与えた。

このときの変形の様子を G_1 で無次元化した面外せん断応力とともに図-5 に示す。この図から、せん断力は材料1のウェブに相当する部分が主に伝達していることがわかる。

次に、本解析によるせん断剛性をを用いた梁と上記ソリッド要素による結果を、たわみにより定量評価することを考える。軸方向位置 (x_1) とたわみの関係を図-6 に示す。同図に

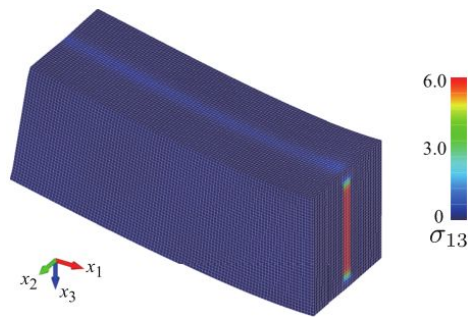


図-5 ソリッド要素による梁の変形

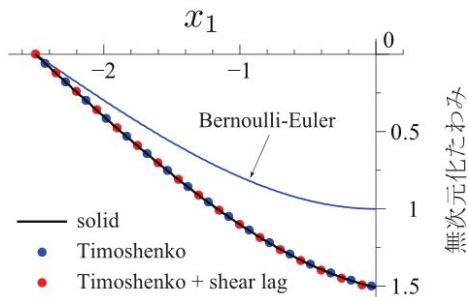


図-6 非均質モデルの曲げせん断のたわみ

は

- 1 Bernoulli-Euler 梁
- 2 ソリッド要素による有限要素解(断面中央位置)
- 3 本手法で求めたせん断剛性を用いた Timoshenko 梁
- 4 3 にせん断遅れを考慮

の4ケースにおけるたわみを示しており、それぞれのたわみは Bernoulli-Euler はりの荷重載荷点におけるたわみで無次元化して表している。なお、任意形状断面のせん断遅れは著者らが提案した方法³⁾により考慮している。図-6 から、荷重載荷点におけるせん断変形によるたわみは曲げによるものに対して 0.5 倍程度となっていることがわかる。ソリッド要素によるたわみと本解析によって評価したせん断剛性を用いた梁理論のたわみは、図では重なっており、また、本例題ではせん断遅れによるたわみの変化は全体的なたわみに比較して小さい。そこで、 $x_1 = -2.0, -1.5, -1.0, -0.5, 0.0$ におけるソリッド要素によるたわみ(ケース2)に対するケース1, 3, 4 のたわみの相対差を表-1 にまとめた。本解析 (Timoshenko 含む) のたわみのソリッド要素のたわみに対する差は 10^{-3} のオーダーであった。

なお、矩形断面の梁で図-4 に示す曲げせん断の境界値問題を解いたところ、ソリッド要素によるたわみに対する本解析によるたわみは、荷重載荷点で相対差 1.1×10^{-3} であった。均質な矩形断面の梁におけるこの差は、中央に載荷している集中荷重による局所的な変形によるものと考えられ、非均質断面の梁である本例題における誤差の限界の一つの目安と考えられる。本手法による非均質断

面のせん断剛性評価を用いた梁のソリッド要素に対する精度がこの目安と同じオーダーであることから、本手法によるせん断剛性は十分な精度を有すると考えられる。

本研究では、均質化理論を梁に適用して軸方向には一様な非均質断面を有する梁のせん断剛性を評価する方法について議論した。非均質断面のせん断剛性を評価する際に生じる問題点について述べ、その原因が面外せん断とせん断遅れが同時に生じることであることを考察し、せん断遅れを拘束することでせん断剛性が評価できることを示した。最後に本手法によって評価した面外せん断剛性を用いた梁の曲げせん断の境界値問題の解析結果をソリッド要素による解析結果と比較することにより、本手法の妥当性を示した。

せん断遅れの拘束は、本研究では penalty 法の考え方に基づき面内せん断剛性を大きくすることで行った。面内剛性を大きくする目安としては、本論文の範囲内では $r = 10^4$ 程度で充分であったが、解析対象によってはこの倍率が最適とは限らない。

本手法の構築には、断面内の材料の構成について何ら制限を設けていないことから、本論文での検証例は限られているものの任意の非均質断面の梁に適用できると考えている。今後はより複雑な非均質断面に関する適用が可能であることを示していくとともに、軸方向にも非均質な梁へ適用できるよう発展させたいと考えている。さらに、本研究では妥当性検証を第一の目的と考え、梁理論で考慮していない Poisson 効果を除外するためにすべて Poisson 比がゼロで検討を行った。面外せん断におよぼす Poisson 比の影響については別途検討したい。

<引用文献>

- 1) Steinboeck, A., Kugi, A. and Mang H. A.: Energy-consistent shear coefficients for beams with circular cross sections and radially inhomogeneous materials, Int. J. Solids Struct., Vol.50, pp.1859-1868, 2013.
- 2) 齊木 功, 鎌 一彰, 山田真幸, 瀬戸川敦, 岩熊哲夫: 非均質な Timoshenko 梁の平均物性評価, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol.68, No.2, pp.161-169, 2012.
- 3) 齊木 功, 西井大樹, 岩熊哲夫, 任意断面梁のせん断遅れ解析のための半解析的手法, 土木学会論文集 A2, Vol.71, pp.1_11-1_18, 2015.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計2件)

1. 齊木 功, 新井晃朋, 山本剛大, 岩熊哲夫, 非均質断面梁のせん断剛性評価に関

する一考察，土木学会論文集 A2, 査読有，Vol.73, pp.I_23-I_31, 2017.
https://www.jstage.jst.go.jp/article/jscejam/73/2/73_I_23/_article/-char/ja/

2. 齋木 功，西井大樹，岩熊哲夫，任意断面梁のせん断遅れ解析の高精度化，土木学会論文集 A2, 査読有，Vol.72, pp.I_53-I_62,2016.
https://www.jstage.jst.go.jp/article/jscejam/72/2/72_I_53/_article/-char/ja/

〔学会発表〕(計5件)

1. 山田 真幸，齋木 功，トルク型せん断試験におけるモルタルの乾燥収縮の影響に関する実験と考察，土木学会年次学術講演会，2017年9月，九州大学．
2. 齋木 功，西井 大樹，岩熊 哲夫，任意断面梁のせん断遅れを考慮できる梁要素の定式化，土木学会年次学術講演会，2017年9月，九州大学．
3. 西井大樹，齋木 功，岩熊哲夫，均質化法によりせん断遅れを考慮した一般化梁とその有限要素の構築，土木学会東北支部技術研究発表会，2017年3月，東北工業大学．
4. 高橋一生，齋木 功，岩熊哲夫，鋼・コンクリート界面の破壊を考慮した複合構造の有限要素解析の再現性の検証，土木学会東北支部技術研究発表会，2017年3月，東北工業大学．
5. 新井晃朋，齋木 功，岩熊哲夫，軸方向に非均質な Timoshenko 梁の平均せん断剛性，土木学会東北支部技術研究発表会，2017年3月，東北工業大学．

〔その他〕

ホームページ等

<http://mechanics.civil.tohoku.ac.jp/research.html>

6. 研究組織

(1)研究代表者

齋木 功 (SAIKI, ISAO)

東北大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：40292247