

学位論文題名

Constitutive Law for Transferred Shear force and Relative Displacement Relationship of Shear Connector in Steel-Concrete Sandwich Beam

(鋼コンクリートサンドイッチはりにおけるシアコネクタの
伝達せん断力-相対変位関係に関する構成則)

学位論文内容の要旨

鋼コンクリートサンドイッチ構造は合成構造の一種である。外殻鋼板に囲まれたコアコンクリートは、鋼板と一体となって挙動するが、合成構造としての挙動はコンクリートと鋼板との界面のせん断抵抗に大きく影響される。合成構造としての長所を生かし、サンドイッチ構造は、沈埋函、シールドトンネル、連続地中壁、橋梁床版などに適用されている。

形鋼やスタッドがシアコネクタとして良く使われる。合成構造の最も重要な問題は、いかにしてシアコネクタの強度および変形挙動を推定するかである。サンドイッチ構造の解析においても、シアコネクタの伝達せん断力と相対変位関係を用いて、合成作用が考慮される必要がある。これまで、シアコネクタの伝達せん断耐力に関する研究はあるが、伝達せん断力-相対変位関係に関する研究は著者らの研究を除いて見られない。

以上の背景を考慮し、対称2点載荷のサンドイッチ構造単純はり供試体を用いた形鋼シアコネクタの一連の実験および解析を実施することにより、本研究が行なわれた。本研究の目的は以下のとおりである。

1. シアコネクタの詳細な挙動およびその影響因子を解明すること
2. シアコネクタの挙動として、伝達せん断力-相対変位関係、および、曲率分布性状を解明すること
3. 伝達せん断力-相対変位関係、曲率分布を推測するための力学モデルを開発すること

実験における変数は、次のとおりである；1) シアコネクタの高さ、2) コンクリート強度、3) シアコネクタの厚さ、4) シアコネクタの基盤鋼板(サンドイッチ構造の外殻鋼板)の厚さ、5) シアコネクタの形状

第1章は、本研究の目的と全体構成を説明している。サンドイッチ構造のシアコネクタに関連する既往の研究に関しても、第1章で述べられている。実験変数、供試体の詳細、その他実験に関することは第2章で述べられている。実験結果に基づき、第3章では、シアコネクタの伝達せん断力-相対変位関係と曲率分布の影響因子が明らかにされ、それらを再現できる力学モデルが提示されている。さらに、提案されたモデルの検証もあわせて行なわれている。

以下に本研究の主要な成果を示す。形鋼シアコネクタの伝達せん断力-相対変位関係、および、シアコネクタ鉛直部の曲率分布に関する実験結果を表現する力学モデルとして、剛性が k の弾性床上にある、曲げ剛性がシアコネクタの等価剛性 $(EI)_{eq}$ である弾性はり考えた。シアコネクタの等価剛性は、シアコネクタ自身の剛性とシアコネクタ周囲のコンクリートの有効剛性の和からなる。シアコネクタの相対変位は伝達せん断力に比例して増加する。そして、伝達せん断力がある値 Q_c に達すると、弾性床の剛性とシアコネクタの等価剛性が急に減少し、その後は伝達せん断力とともに徐々に減少する。

実験結果から、弾性床の剛性とシアコネクタ周囲のコンクリートの有効剛性とはコンクリートの弾性係数に比例すること、シアコネクタの高さはシアコネクタの等価剛性には影響がないこと、シアコネクタの厚さが増すほど、シアコネクタ自身の剛性が増すので等価剛性も増すことが明らかになった。また、シアコネクタの相対変位には、シアコネクタ基部でのフランジ鋼板（外殻鋼板）の回転による変位の増加分を考慮する必要があり、その回転剛性は、実用上フランジ鋼板の曲げ剛性と比例関係を仮定できることが示された。シアコネクタの形状に関しては、L形鋼、左右逆向きのL形鋼、T形鋼の間では、周囲コンクリートによるシアコネクタの先端の水平部に対する拘束効果は、概ね同等であること、I形鋼の場合、水平部がないのでそれに対する拘束効果は期待できないことが明らかになった。そのため、I形鋼の場合、シアコネクタの等価剛性は、L形鋼、逆向きL形鋼、T形鋼の場合より小さくとる必要がある。

シアコネクタ周囲のコンクリートに作用する圧縮力の影響に関しては、シアコネクタの等価剛性が急減する時の伝達せん断力 Q_c が圧縮力の増加とともに増加するが、たとえば、圧縮力が0に近い値でも Q_c は0とならないことが明らかとなった。また、 Q_c の値は、コンクリートの圧縮強度の1/2乗、周囲のコンクリートの有効厚さ（有効剛性から計算される厚さ）、シアコネクタの厚さ、シアコネクタの高さの-0.8乗に比例すると近似できることを示し、定式化を行った。

シアコネクタの鉛直部はその形状にかかわらずS字状に変形することが曲率分布から明らかとなった。L形鋼、逆向きL形鋼、T形鋼の曲率分布性状は似ていたが、I形鋼の場合、シアコネクタの基部から20mmの付近で負の曲率のピークがあり、他と異なっていた。曲率分布の差異は、シアコネクタへの周囲のコンクリートから作用する力の分布性状の違いが原因であると推測された。実験結果から、シアコネクタの基部から70mm付近より上の部分では、曲率は概ね0であることが確認された。換言すれば、70mm以上の部分は、伝達せん断力には影響を及ぼさないことが示された。

本研究の実験的研究成果に基づき、シアコネクタの伝達せん断力と相対変位の関係だけでなくシアコネクタの鉛直部の曲率分布（すなわち、シアコネクタの変形形状）を計算できる力学モデルを提案した。モデルによる予測結果は、実験結果と良く適合することが確認された。このモデルに基づいて、鋼コンクリートサンドイッチ構造を有限要素解析する際に必要な構成則が導かれる。

第4章は総括であり、本研究で得られた成果を要約している。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 角 田 與史雄
副 査 教 授 佐 藤 浩 一
副 査 教 授 城 攻
副 査 教 授 佐 伯 昇
副 査 助 教 授 上 田 多 門

学 位 論 文 題 名

Constitutive Law for Transferred Shear force and Relative Displacement Relationship of Shear Connector in Steel-Concrete Sandwich Beam

(鋼コンクリートサンドイッチはりにおけるシアコネクタの
伝達せん断力-相対変位関係に関する構成則)

鋼コンクリートサンドイッチ構造は、外殻鋼板に挟まれたコアコンクリートが鋼板と一体となって挙動する合成構造であり、近年、高流動コンクリートが開発されたこと等により、その適用範囲が拡大しつつある。合成構造としての挙動は、コンクリートと鋼板との界面のせん断抵抗に大きく影響されるので、鋼コンクリートサンドイッチ構造の解析において、シアコネクタの強度および変形挙動は最も重要な問題の一つである。しかしこれまで、シアコネクタの伝達せん断耐力に関する研究は行われているが、伝達せん断力-相対変位関係に関する研究は著者らの研究を除いて他には見られない。

本研究は、鋼コンクリートサンドイッチはりの対称2点載荷による一連の実験に基づいて、シアコネクタの挙動と主要因子の影響について調べ、伝達せん断力-相対変位関係および曲率分布性状を解明し、その予測モデルを構築し構成則として提案したものである。

第1章では本研究に関連する既往の研究、本研究の目的および論文の構成が述べられている。第2章では、実験方法が述べられている。実験変数は、シアコネクタの高さ、厚さおよび形状、コンクリートの強度、および外殻鋼板の厚さである。第3章では実験結果に基づきシアコネクタの挙動と各実験変数の影響が詳細に論じられ、それらの挙動を予測するための力学モデルが提案されている。第4章は結論である。

以下に本研究の主要な成果について述べる。

はじめに実験結果より、伝達せん断力がある限界値 Q_c 以下の範囲では、伝達せん断力-相対変位関係はほぼ線形であること、伝達せん断力が Q_c を超えると、伝達せん断力の増加に伴って剛性が低下していくこと、シアコネクタの鉛直部はS字状に変形すること、シアコネクタの基部から70mmより先の部分は曲率がほぼ0であり、伝達せん断力にほとんど影響しないことなど、基本性状を明らかにしている。

次に、伝達せん断力が Q_c 以下の範囲における伝達せん断力-相対変位関係の剛性およびシアコネクタの曲率分布について詳細に検討し、その挙動を予測するための力学モデルとして、シアコネクタが、剛性 k の弾性床上にある、曲げ剛性が等価剛性 EI_{eq} である弾性ばりにモデル化できることを明らかにするとともに、等価剛性 EI_{eq} がシアコネクタ自身の曲げ剛性とシアコネクタ周囲のコンクリートの有効剛性 EI_{con} の和からなること、弾性床の剛性 k と周囲コンクリート有効剛性 EI_{con} はコンクリートの弾性係数に比例すると仮定できること、シアコネクタの厚さはシアコネクタ自身の剛性への影響として考慮するだけでよいことなどを明らかにしている。さらに、シアコネクタの相対変位には、外殻鋼板の回転による変位の増加分を考慮する必要があること、その際の回転剛性は鋼板の曲げ剛性に比例すると仮定できること、シアコネクタの形状の影響としては、L形、逆L形およびT形は上端回転固定のモデル、I形は上端自由のモデルとすべきことなどを明らかにしている。以上の知見をもとに、弾性床の剛性 k およびシアコネクタの等価剛性 EI_{eq} の定式化を行い、伝達せん断力が Q_c 以下の場合に対する力学モデルを提案している。

次に、伝達せん断力-相対変位の線形関係が成立しなくなる限界伝達せん断力 Q_c の値について検討し、 Q_c はシアコネクタ周囲のコンクリートに作用する圧縮力が大きい程大きいこと、また、コンクリートの圧縮強度の1/2乗、周囲コンクリートの有効剛性 EI_{con} に対応する有効厚さ、シアコネクタの厚さ、およびシアコネクタの高さの-0.8乗に比例すると仮定できることを明らかにし、 Q_c の算定式を構築、提案している。

また、伝達せん断力-相対変位関係の剛性が低下する、伝達せん断力が Q_c を超える範囲に対しては、前述のモデルにおける弾性床の剛性 k およびシアコネクタの等価剛性 EI_{eq} の、伝達せん断力の増加に伴う減少過程として捉えることによって定式化を行っている。

最後に、本研究で構築した力学モデルがシアコネクタの伝達せん断力-相対変位関係および曲率分布に対し、線形・非線形の全範囲にわたって良い適合性をもつことを示し、鋼コンクリートサンドイッチ構造のシアコネクタに対する構成則として提案している。

以上を要するに、著者は、従来未解明であった鋼コンクリートサンドイッチはりにおけるシアコネクタの伝達せん断力-相対変位関係に関する挙動について実験的に解明し、多くの新知見を得るとともに、その構成則を与えるための力学モデルを提案したもので、構造工学の発展に貢献するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。