合成部材の非線形せん断特性の数値的評価

Numerical Evaluation of the Nonlinear Shear Properties of Composite Member

瀬戸川敦* Atsushi SETOGAWA

*構造強度学研究室(研究指導教員:斉木功 准教授)

Stud shear connectors are usually used for composite girdiers in order to combine RC slabs and steel girders. Their mechanical properties, such as shear force-slip relation, are often evaluated through so-called pushout test. However, it has not been validated that the pushout test reproduces the deformation of stud shear connectors in actual structures. Therefore, we develop a numerical model and a method to correctly reproduce the deformation of stud shear connectors and evaluate their nonlinear shear properties.

Key Words: stud shear connector, periodic boundary condition, finite element analysis





1. はじめに

鋼コンクリート合成構造は鋼材とコンクリートを一体 化させることで,単体の材料で構成される構造や非合成 構造よりも優れた設計を可能にする.この一体的な挙動 を機械的に確保するためにずれ止めが設置される.ずれ 止めの挙動は構造物の挙動に大きく影響するため,全体 解析においてもずれ止めは考慮されることが望ましい. しかし,ずれ止めは構造物全体に対して非常に小さく, 陽にモデル化することは計算負荷の観点から現実的では ない.そこで何らかの要素試験を行い,計算負荷を軽減 することが求められる.

合成構造にずれ止めとして用いられる頭付きスタッド の要素試験のとしては押抜き試験が広く用いられてい る.現行の道路橋示方書¹⁾におけるスタッドのせん断耐 力算定式も押し抜き試験²⁾の結果に基づいて決定されて いる.しかし,試験方法の違いが試験結果に影響を及ぼ すことも確認されている³⁾.これは押抜き試験の境界条 件が実構造物中のスタッドの変形状態を正確に再現して いないことが原因と考えられる.そこで,本研究では合 成桁中のスタッドの変形状態を忠実に再現できる数値モ デルを開発し,スタッドの非線形せん断特性を解明する ことを目的とする.

2. 解析手法

(1) 周期境界条件

本研究では図–1 に示すような周期性を有するはりを 対象とする.橋軸方向を *x*₁,鉛直方向を *x*₂,橋軸直角方 向を *x*₃ とする.ここでは紙面の都合上,橋軸-鉛直面





内のせん断のみに限定した定式化を示す.合成桁の場合 は橋軸方向が周期方向,スタッドの間隔が周期長rとなる.周期境界条件によるせん断変形は

$${}^{\mathbf{d}}\boldsymbol{x} - {}^{\mathbf{i}}\boldsymbol{x} = \boldsymbol{r} = \left\{ \begin{array}{cc} r & 0 & 0 \end{array} \right\}^{T} \tag{1}$$

を満たすような周期境界面上の節点 i と d のペアに対して

$$\Delta \boldsymbol{u} = {}^{\mathrm{d}}\boldsymbol{u} - {}^{\mathrm{i}}\boldsymbol{u} = \left\{ \begin{array}{cc} 0 & \gamma r & 0 \end{array} \right\}^{T}$$
(2)

という相対変位によって与えられる.

相対変位による条件のみでは,図-2に示すように, 代表体積要素は剛体回転してしまい変形しない.そこで 図-3に示すような代表体積要素の断面の回転の平均を0 にするという条件を付加し,剛体回転を拘束する.つま り回転の拘束条件式は

$$g := \frac{1}{r} \int_{-r/2}^{r/2} \theta(x_1) \, \mathrm{d}x_1 = 0 \tag{3}$$

と表せる.ここで断面上の節点の変位を最小二乗近似し た面の傾きをθとすると, bを断面の切片として, 残差

$$R(x_1) := \int_A (u_1 + \theta x_2 - b)^2 \,\mathrm{d}A \tag{4}$$



図-3 断面の回転

$$\frac{\partial R}{\partial \theta} = 0 \tag{5}$$

より

$$\theta(x_1) = -\frac{\left(\int_A dA\right)\left(\int_A x_2 u_1 dA\right) - \left(\int_A x_2 dA\right)\left(\int_A u_1 dA\right)}{\left(\int_A dA\right)\left(\int_A (x_2)^2 dA\right) - \left(\int_A x_2 dA\right)^2} (6)$$

となる.ここにA は周期ベクトルと直交する断面の面積 で $A := \int \int dx_2 dx_3$ である.ここで断面積は周期方向に 変化しないものとし,原点を図心におくと

$$\int_{A} dA = A = \text{const.}$$
(7)

$$G := \int_{A} x_2 \, \mathrm{d}A = 0 \tag{8}$$

$$I := \int_{A} (x_2)^2 \, \mathrm{d}A = \mathrm{const.} \tag{9}$$

であるので, 剛体回転の拘束条件式は

$$g = \frac{1}{rI} \int_{-r/2}^{r/2} \int_{A} x_{2}u_{1} \, dA \, dx_{1}$$

= $\frac{1}{rI} \int_{V} x_{2}u_{1} \, dV = 0$ (10)

となる.ここに V は代表体積要素の体積であり $V := \int_{-r/2}^{r/2} \int_A dA dx_1$ である.これを3次元アイソパ ラメトリック要素の形状関数 $N^n(\xi_1, \xi_2, \xi_3)$ と変数変換 $(\xi_1, \xi_2, \xi_3) \rightarrow (x_1, x_2, x_3)$ のヤコビアン J を用いて離散化 すると

$$g = \sum_{n} w^{n} u^{n} = 0$$
(11)
$$w^{n} := \frac{1}{rI} \mathcal{A}_{n} \sum_{m} \int_{-1}^{1} \int_{-1}^{1} \int_{-1}^{1} x_{2}^{m} N^{m} N^{n} \det \boldsymbol{J} \, \mathrm{d}\xi_{1} \, \mathrm{d}\xi_{2} \, \mathrm{d}\xi_{3}$$

$$\mathcal{R}_n$$
: 節点 n が属する全ての要素に関する和 (12)

となる.

(2) 接触解析

材料界面に生じるずれ及び材料間の剥離を考慮するた めに接触解析を行う.鋼コンクリート合成部材では初期 状態で接触している.また,ずれによって生じる相対変 位は構造の大きさに対して非常に小さい.従って本研究 では計算負荷が小さく,アルゴルズムが比較的単純な節 点間接触を用いている.



図-4 押し抜き試験体

接触解析の定式化には penalty 法を用いており,界面 における接触力は penalty バネによって伝達される.摩 擦には Coulomb 摩擦を適用しており,摩擦力 f_f は

$$f_{\rm f} = \mu \langle -f_{\rm n} \rangle \tag{13}$$

で表される.ここに, f_n は法線方向の接触力, μ は摩擦係数, $\langle \rangle$ は ramp 関数である.

(3) 材料モデル

鋼材もコンクリートも弾塑性材料としてモデル化して いる.鋼材には von Mises の降伏基準を用いている.降 伏点までは弾性,降伏後は完全塑性としている.コンク リートには

$$f(\boldsymbol{\sigma}, \bar{\boldsymbol{\epsilon}}^p) = \sqrt{J_2} + \alpha I_1 - \kappa(\bar{\boldsymbol{\epsilon}}^p) \tag{14}$$

という Drucker-Prager の破壊基準を用いている.ここ に σ は応力, ϵ^{p} は相当塑性ひずみ, J_{2} は偏差応力の 第二不変量, I_{1} は応力の第一不変量であり, $\alpha \geq \kappa$ は Mohr-Coulomb の粘着力 c と内部摩擦角 ϕ に関連付けら れる材料パラメータである.流れ則は

$$\dot{\boldsymbol{\epsilon}}^{p} = \gamma \frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{\sigma}} \tag{15}$$

として,関連流れ則を仮定する.ここにγは整合パラ メータである.応力積分アルゴリズムにはリターンマッ ピング法を用いた.

. 押し抜き試験の解析

比較のため押し抜き試験⁴⁾をモデル化し解析を行なった.モデル化した押し抜き試験体を図-4に示す.スタッドは軸径19mm,全高120mmの頭付きスタッドであ



図-5 押し抜き試験モデル



図-6 押し抜き試験モデルのせん断力 - ずれ,荷重-ずれ関係

る.スタッドについては全モデルで同じものを使用している.この試験体は頭付スタッドの押抜き試験方法 (案)⁵⁾に準じている.解析に使用した有限要素モデ ルを図-5に示す.対称性により1/4解析としている. 従って,モデル中のスタッドは1本である.コンクリートの下端を固定し,反対側の鋼材の端に強制変位を与える.

押し抜き試験モデルで得られたせん断力 - ずれ,荷重 - ずれ関係を図-6に示す.ここで「ずれ」は実験で計 測するずれと対応するように,押し抜き方向に垂直なス タッドの中心軸を含む面と鋼材 - コンクリートブロック 界面の交線の鋼材の端の位置における相対変位とした. また,「せん断力」はスタッド表面に生じる押し抜き方



図-7 合成桁モデル

向の接触力の総和,「荷重」は強制変位を与える鋼材端 に生じる反力の総和とする.

摩擦係数 $\mu = 0.0 \text{ obs} - \text{ACC}$ は荷重とせん断力が一致 した.一方,摩擦を考慮する $\mu = 0.5 \text{ obs} - \text{ACC}$ は荷重 とせん断力の間には 13.7% の差が生じた.一般に押し抜 き試験では荷重をスタッドの本数で除したものをスタッ ド1本あたりに作用するせん断力としているが,この結 果から適切ではないと言える.また, $\mu = 0.5 \text{ obs} - \text{ACC}$ ではずれが 1.6mm までの時の荷重が $\mu = 0.0$ に比べて低 下している.これは摩擦が存在することによってより広 い範囲でコンクリートが塑性変形するためであると考え られる.せん断力については $\mu = 0.5 \text{ obs} - \text{ACC}$ では $\mu = 0.0 \text{ obs} - \text{ACC}$ では $\mu = 0.0 \text{ obs} - \text{ACC}$

4. 合成桁の解析

合成桁の解析モデルを図-7に示す.スタッドの寸 法等は押し抜き試験のものと同じである.対称性に より半解析としている.周期長(スタッド間隔),が 300,150,100,80mmの4ケースについて解析を行なっ た.合成桁モデルの変形の様子とせん断ひずみ分布を 図-8に示す.スタッドの基部周辺には特に大きなせん断 ひずみが生じている.また,ウェブにもせん断ひずみが 生じている.一方で,スタッド周辺以外の上ランジや床 版と下フランジには,ほとんどひずみは生じていない.

(1) 押し抜き試験との比較

合成桁モデル(r = 300mm)でのせん断力 - ずれ関係を 図–9に示す.比較のために,押し抜き試験モデルのせん 断力ずれ関係も示す.ここで合成桁モデルでの「ずれ」



図-8 合成桁の変形とJ2 ひずみ分布 (µ = 0.5, r = 300mm, ずれ = 6.18mm, 変形倍率 1.0 倍)



図-9 合成桁モデル (r = 300mm) のせん断力 - ずれ関係

はスタッドの中心軸を含み周期方向に垂直な面と鋼桁 -コンクリート床版界面の交線の鋼桁の端の位置における 相対変位である.また,「せん断力」はスタッド表面に 生じる周期方向の接触力の総和である.合成桁モデルで は押し抜き試験モデルよりも大きなせん断力が生じてい る.従って,押し抜き試験では合成桁中のスタッドに作 用するせん断力を正確に再現できていないと言える.ま た,押し抜き試験モデルではずれが大きくなるにつれて $\mu = 0.0$ のケースと $\mu = 0.5$ のケースの間の差が減少して いくのに対し,合成桁モデルでは差がほぼ一定である.

(2) 周期長の影響

μ = 0.0 の場合のせん断力 - ずれ関係をそれぞれ図-10 に示す.スタッド間隔が狭いほどスタッドに作用する せん断力は小さくなっている.



図-10 µ = 0.0 の場合のせん断力 - ずれ関係

5. まとめ

周期境界条件によりせん断変形状態にある合成桁中の スタッドのせん断特性の評価を行なった.また,一般的 に行われている押し抜きせん断試験についてもモデル化 し評価を行なった.

押し抜き試験モデルの解析結果から,摩擦が存在する 場合には,一般的にスタッドに作用するせん断力として 用いられている載荷荷重が実際にスタッドに作用してい るせん断力と一致しない事が分かった.また,合成桁モ デルの解析結果と押し抜き試験モデルの解析結果の比較 から,押し抜き試験でスタッドに作用するせん断力が合 成桁中のスタッドに作用するせん断力と一致しない事が 分かった.さらに,スタッド間隔の異なる解析結果から スタッド間隔が狭いほどスタッドに作用するせん断力は 小さくなることが分かった.

参考文献

- 1) (社)日本道路協会:道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編, 2012.
- 山本稔,中村正平: Studd Shear Connector の試験報告,建 設省土木研究所報告,第109号,pp.1-24,1961.
- 3) 島弘: 頭付きスタッドのせん断力とずれ変位およびスタッ ド軸方向挙動との関係に及ぼす試験方法の影響,土木学会 論文集A1(構造・地震工学), Vol.67, No.2, pp.307-319, 2011.
- 4) 島弘,渡部誠二:頭付きスタッドのせん断力 ずれ関係の 定式化,土木学会論文集A, Vol.64, No4, pp.935-947, 2008.
- 5) 頭付きスタッドの押抜き試験方法(案), JSSC テクニカ ルレポート, No35,(社)日本鋼構造協会, pp.1-24, 1996.

(2014年02月05日提出)