# 孔あき鋼板ジベルを用いたプレキャスト床版の接合構造の

# 曲げ挙動に関する再現解析の試み

宇都宮大学 学生員

学生員 フェロー会員 正会員 正会員

○ 小幡竜馬

## Nguyen Minh Hai 藤倉修一

# 1. はじめに

鋼桁橋などの床版の取替え工事におけるプレキャスト床版(以下,PCa床版と呼ぶ)の接合方法の1つとして,接 合部に孔あき鋼板ジベルを配置し,そこに鋼繊維補強モル タル(以下,SFRMと呼ぶ)を後打ちして床版同士を接合 する方法が提案されている.既往研究では,この方法を用 いた接合構造の曲げ試験を実施し,接合構造の基本的な耐 荷性能を確認した<sup>1)</sup>が,そのメカニズムを明らかにするた めには,さらに試験データの蓄積および解析的な検討が必 要である.本研究では,上記の孔あき鋼板ジベルを用いた 接合構造の曲げ試験および,その曲げ試験体を対象とした 3次元非線形有限要素解析解析(以下,FEM 解析と呼ぶ) を実施し,曲げ試験で得られた接合構造の曲げ挙動を解析 的に再現することを試みた.

### 曲げ試験と解析の概要

#### (1) 曲げ試験

本研究で用いた曲げ試験体を図-1 に示す. 幅が 600mm の PCa 床版部材の左右のからそれぞれ 3 枚のジベル鋼板 (板厚 12mm)と橋軸方向鉄筋 (D19)8 本が打継面から 50mm 程度飛び出して配置しており、この間に SFRM を打設する ことで床版同士を接合している.ジベル鋼板の PCa 床版部 材に埋め込まれた部分には径 20mmの孔が4つ設けてあり, その内2つの孔に鉄筋(D16)を貫通させることでジベル鋼板 と PCa 床版部材とを一体化させている. 接合部側のジベル 鋼板には径 35mm の孔が上下2段あいており、この部分に SFRM が充填されることで孔あき鋼板ジベルが曲げに抵抗 する構造となっている. PCa 床版部材のコンクリートは, 圧 縮強度 (f'<sub>c</sub>) が 55.0N/mm<sup>2</sup>, 引張強度 (f<sub>tc</sub>) が 4.0N/mm<sup>2</sup>, 弾性係数 (E<sub>c</sub>) が 34.5kN/mm<sup>2</sup> である. SFRM の鋼繊維混 入率は 2.3Vol%, 載荷試験時 (材齢 3 日) の圧縮強度 (f'm) は 68.0N/mm<sup>2</sup>, 引張強度 (f<sub>tm</sub>) は 12.0N/mm<sup>2</sup>, 弾性係数 (E<sub>m</sub>)は26.7kN/mm<sup>2</sup>である.載荷試験時には、図-1に示 すように載荷スパンを 2000mm とした.

#### (2) 解析概要

本研究の解析では,汎用有限要素解析ソフト DIANA10.3 を使用した.図–1の赤色長方形で囲まれる試験体寸法の幅 1/3の解析モデルを作成し,左右の PCa 床版からそれぞれ 1 枚のジベル鋼板を接合部に配置した.主鉄筋が接合部に 飛び出した部分は省略した.解析モデルでは,PCa 床版の コンクリート,接合部の SFRM,ジベル鋼板および載荷板 にソリッド要素,鉄筋には周囲コンクリートと共有節点を 有する線要素を用いた.なお,はりの支持条件を単純支持 とし,試験時と同じ載荷位置に強制変位を与えた.

本解析では、基本的なコンクリートの構成則を土木学会のコンクリート標準示方書<sup>2)</sup>を参考にして図-2の左上のように設定した.一方、基本的なSFRMの構成則には図-2の右上のように、引張側ではコンクリートと同じモデルを用い、圧縮側では最大応力時のひずみを材料圧縮試験から



得られた値として,その後の軟化領域に直線のモデルを用いた.また,コンクリートとSFRMの引張破壊エネルギーにそれぞれ既往研究<sup>2),3)</sup>を参考にした値を用いた.さらに,ジベル鋼板及び鉄筋の構成則には完全弾塑性モデルを用いており,弾性係数を205kN/mm<sup>2</sup>,降伏強度を345N/mm<sup>2</sup>とした.

本解析では各種部材同士の接触条件をその部材同士の界 面にばね要素を配置することで表現している.このばねに 界面の法線方向および2つのせん断方向に対する単位面積 当たりの力と相対変位の関係を設定することによって,部 材間の応力伝達を模擬した(以下,界面ばね要素と呼ぶ). PCa床版部材と接合部の打ち継ぎ面におけるせん断方向と 法線方向の圧縮側には線形ばねを用い,そのばね剛性をそ れぞれSFRMの弾性係数とせん断弾性係数の値とした.ま た,打ち継ぎ面の開きを考慮するために,法線方向の引張 側に前述の図-2の上側に示す2直線引張軟化モデルを用い たが,その打ち継ぎ面の引張強度を2.0N/mm<sup>2</sup>とした.こ の引張強度は試験結果と解析結果を比較し,試行錯誤で決 めた値である.

ジベル鋼板と周辺コンクリートや SFRM, あるいはジベル孔内と孔外のコンクリートや SFRM の間の接触条件を

解析パラメーターとして、4 Case の解析を行った. Case1 では、PCa 床版部材側のコンクリートとジベル鋼板の接触 を剛結とし、接合部側のジベル鋼板と SFRM の間の界面ば ね要素にはせん断方向および引張方向のばね剛性にゼロを, 圧縮方向のばね剛性に SFRM の弾性係数を与えた.また, 接合部側のジベル孔内と孔外の SFRM を連続体とし、特別 な界面ばね要素を設けていない. これは, 接合部に作用す る曲げモーメントに対してジベル孔内の SFRM のみが抵抗 するように設定したためである.これに対して, Case2の PCa 床版部材側の設定は Case1 と同じであるが, 接合部側 のジベル孔内と孔外の SFRM の間に界面ばね要素を図-2 の右下に示すように設けて、その要素のせん断方向の応力-変位関係に,別途に実施した引抜き試験の結果に基づいた せん断応力(せん断力/2面せん断の面積)とずれ変位の関 係を与えた. また, Case3の接合部側の設定は Case2 と同 じであるが、PCa 床版部材側のジベル鋼板とコンクリート の間のずれ変位も考慮するために、ジベル鋼板とコンクリー トの間およびジベル孔内と孔外のコンクリートの間に接合 部側と同じように界面ばね要素を設けた.その時,ジベル 孔内と孔外のコンクリート間の界面ばね要素のせん断特性 は既往研究<sup>4),5)</sup>の孔あき鋼板ジベルのせん断力-ずれ変位 関係を参考にして設定した.なお Case2 と Case3 のジベル 孔内のコンクリートや SFRM 要素には圧壊による応力低下 が起こらないように、圧縮軟化領域を考慮しない図-2の左 下のように設定した. さらに, Case4 では, Case3 におけ る PCa 床版部材側のジベル孔外のコンクリートの構成則に も図-2の左下のモデルを用い、さらにその引張破壊エネル ギーを他の Case に用いた値の 100 倍にした.

## 3. 解析結果と考察

図-3の左側は載荷荷重-載荷スパン中央たわみ関係であ る.図の黒点線は試験値,実線は解析値である.試験値を表 す黒点線の挙動に着目すると,荷重が37kNでたわみが急増 している.これは打ち継ぎ面の下縁の開きが急増したため である.解析結果を表す各実線においても荷重が35~40kN 程度でたわみが急増していることから,打ち継ぎ面の引張強 度は,解析で設定した界面ばね要素の引張強度(2.0N/mm<sup>2</sup>) と同程度であると推測される.その後,黒点線におけるた わみは荷重とともに増加し,最大荷重時のたわみは11mm 程度である.最大荷重後の荷重は緩やかに低下した.

Case1の解析では、PCa 床版部材側や接合部側のジベル 孔内と孔外のコンクリートやモルタルの間に界面ばね要素 を設けていない. この解析結果を示す赤線では, 40kN 以降 の荷重--たわみ関係の傾きおよび最大荷重は試験値より大き い. そして,最大荷重時において,接合部側の上下2つの ジベル孔内の SFRM が孔面積の半分程度の領域で最大圧縮 ひずみを超えていたことが確認された.したがって,この Case の破壊状態はジベル孔内の SFRM の圧縮破壊と考え られる. つまり Case1 では, ジベル孔せん断面におけるず れ変位やせん断応力の伝達を再現できていないため、上記の ように解析値と試験値の差異が生じたと考えられる. Case2 の解析では、接合部側のみでジベル孔内と孔外の SFRM の 間に界面ばね要素を設けている. この解析結果を表す紫線 では、荷重が40kN以降の荷重-たわみ関係の傾きはCase1 より小さいが, 試験値より大きく, 最大荷重は試験値と同 程度である.一方, Case3 と Case4 の解析では接合部側に 加えて PCa 床版部材側においてもジベル孔内と孔外のコン



クリートの間に界面ばね要素を設けている.この解析結果 を表す緑線と青線は、荷重が 40kN 以降の荷重–たわみ関係 の傾きが試験値に近づいた.しかし、Case3 の最大荷重は 試験値より小さく、Case4 の最大荷重は試験値と同程度で ある.

一方,図-3の右側には Case2~4 で得られた接合部側の ジベル孔のせん断面に設けた1つの界面ばね要素のせん断 応力と載荷スパン中央たわみにの関係を示し,図中の黒破 線は界面ばね要素に設定した最大せん断応力である.図よ り,Case2 と Case4 の最大荷重時には接合部側のジベル孔 内と孔外の界面ばね要素のせん断応力が最大値に達してい るが,Case3 では最大値に達していない.そして Case3 の 最大荷重付近では PCa 床版部材側のジベル孔周辺のコンク リートで局所的な引張破壊が確認されており,これにより 荷重が低下したと考えられる.

## 4. まとめ

本研究より得られた知見を以下にまとめる.

- 1. 孔あき鋼板ジベルのジベル孔内と孔外の間に適切な界 面ばね要素を設けることによって,両者間のせん断応 力の伝達を表現することが可能である.
- 2. Case2 と Case4 の解析で得られた最大荷重は試験値に 近いことから,着目した接合構造の曲げ耐力は接合部 側の孔あき鋼板ジベルのせん断破壊によるものと考え られる.
- 3. Case3 と Case4 の荷重–たわみ関係の傾きは Case2 よ り小さく、実験値に近いことから、PCa 床版部材側の ジベル鋼板とコンクリートのずれ変位は接合構造の曲 げ剛性に影響していると考えられる.
- ジベル孔周辺のコンクリートの引張破壊は局所的なものであり、その破壊エネルギーは既往で提案された値と異なる可能性がある.

なお,本研究の一部は科学研究費補助基金 (若手研究 (B), 課題番号 18K13816) の補助を受けて実施した.

### 参考文献

- 広瀬剛ら: 孔あき鋼板ジベルを用いたプレキャスト PC 床版の接合構造に関する試験的研究,第12回複合・合成構造の活用に関するシンポジウム講演集, No.13, pp.1-8, 2017.11.
- 2) 土木学会: 2017 年制定コンクリート標準示方書 [設計編], 2018.3.
- 3) 土木学会: 超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針 (案), 2014.9.
- 4) Hai ら: 貫通鉄筋の無い孔あき鋼板ジベルのせん断力-ずれ 変位関係式の再検討, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.74, No.5, pp.IL.32-II.43, 2018.5.
  5) 田渕ら: コンクリート打継ぎ面に用いる各種ずれ止めのせん
- 5) 田渕ら: コンクリート打継ぎ面に用いる各種ずれ止めのせん 断耐力に関する実験的研究,第 39 回土木学会関東支部研究 発表会, VI-20, 2012.3.