

鉄筋コンクリート壁式橋脚のせん断耐力に関する数値解析的検討

Numerical simulation on shear strength of reinforced concrete wall-type pier

(株)ドーコン ○正会員 吉田 安寿 (Yasukazu YOSHIDA)
(株)ドーコン 正会員 小林 竜太 (Ryuta KOBAYASHI)
(株)ドーコン 正会員 南波 宏介 (Kousuke NANBA)
(株)ドーコン 正会員 工藤 浩史 (Hiroshi KUDO)

1. はじめに

既設構造物の耐震性能照査を行う場合には、対象とする部材の非線形領域を含めた耐荷性状を精度良く予測する必要がある。一般には、道路橋示方書等の設計式を用いて部材の各種耐力値が算定されるが、これらは設計的に安全側に評価されるように配慮されていることから、実際の構造物では設計耐力以上の余剰耐力を有している場合が多い。しかしながら、合理的かつ効果的な耐震補強対策を実施するためには、対象とする構造物の実耐荷力や破壊性状を把握し、それらを反映させた形で耐震性能照査を実施する必要がある。そこで、本論文では主に河川橋で多く見られる鉄筋コンクリート壁式橋脚の橋軸直角方向のせん断耐力に着目して検討を行うこととした。

壁式橋脚の橋軸直角方向は、せん断スパン a と有効高 d の比であるせん断スパン比 a/d が一般に小さく、そのせん断耐荷機構は a/d が大きい棒部材とは大きく異なるものと考えられる。しかしながら、道路橋示方書におけるせん断耐力算定式は、棒部材を対象としたものであり a/d が小さい場合にコンクリートが負担するせん断力が向上する効果、いわゆるディープビーム効果が反映されないため耐力を過小に見積ることになる。

このような観点から、本検討では鉄筋コンクリート壁式橋脚の橋軸直角方向せん断耐力に着目し、実態に近い耐荷性状や破壊性状を把握することを目的として非線形有限要素解析を用いた数値解析的な検討を実施した。

2. 解析対象の概要

本検討では、昭和 40 年代に架橋された実在する橋梁の鉄筋コンクリート壁式橋脚を解析対象とした。対象とした橋梁の上部工形式は、橋長 30.70 m、支間長 15.00 m、幅員 12.7 m の 2 径間連続 RC ホロースラブであり、支承条件は橋脚上が固定の 1 点固定形式で設計水平震度 $kh=0.15$ で耐震設計されている。橋脚の形状寸法は、橋軸方向幅 0.80 m、橋軸直角方向幅 9.95 m、高さ 5.00 m の矩形断面であり、せん断スパン比 a/d は約 0.5 である。

橋脚の配筋は、軸方向主鉄筋が D19@125 mm 間隔、帯鉄筋が D13@300 mm 間隔で配置されており、軸方向主鉄筋および帯鉄筋の段落しは行われていない。なお、橋脚が負担する上部工死荷重反力は約 4,500 kN である。

基礎工は直接基礎であり、フーチングは橋軸方向幅 3.50 m、橋軸直角方向幅 10.95 m、厚さ 0.80 m である。なお、支持層は比較的締まった砂礫層地盤であり、耐震設計上の地盤種別は I 種地盤に区分される。

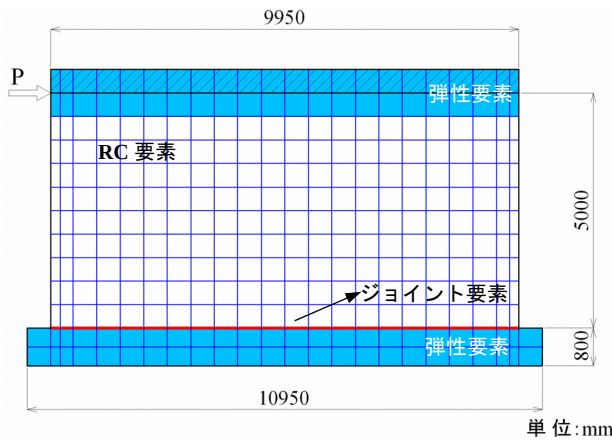


図-1 解析モデル（要素分割図）

表-1 コンクリートの材料物性値

単位体積重量 (kN/m ³)	圧縮強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)
23.0	21.0	1.75	20.5

表-2 鉄筋の材料物性値

単位体積重量 (kN/m ³)	降伏強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)
77.0	345.0	200.0

3. 数値解析の概要

3. 1 数値解析モデル

本数値解析では壁部材に対する解析実績が多く、数多くの載荷実験との比較検証を通してその精度が確認されている非線形有限要素解析コード WCOMD を使用した。

図-1 には要素分割図を示している。本解析では壁式橋脚を 2 次元平面応力場問題として取り扱うものとし、有限要素には 8 節点アイソパラメトリック要素を用いた。要素寸法は 50cm×50cm を標準寸法とし、軸方向鉄筋の降伏やコンクリート圧壊が生じる壁端部に対しては若干細かく要素分割した。フーチングは主たる塑性化は生じないものと判断して弾性要素を適用することとしたが、フーチングからの軸方向鉄筋の抜け出しや界面におけるずれ、減り込みを考慮するために壁とフーチングの境界面には RC ジョイント要素を定義している。また、載荷点近傍は局所的な応力集中を防止するために、仮想的に剛性を高くした弾性要素を用いてモデル化した。載荷荷

重は、橋脚天端の全節点に対して水平方向に強制変位を与える静的方向荷重とし、1 ステップ当たり 0.1 mm 刻みの増分解析を行った。また、本解析では橋脚の自重の影響を考慮すると同時に、上部工死荷重反力 ($R_d = 4,500$ kN) に相当する軸力も作用させている。図中、斜線でハッチングされた要素は上部工死荷重反力を载荷するためのダミー要素であり、所定の軸力が载荷されるように単位体積重量を調整している。なお、境界条件は、フーチング下面の全節点に対して完全拘束とした。

3. 2 材料構成則の概要

本解析では、コンクリートの構成則と鉄筋の構成則を重ね合わせた鉄筋コンクリート(RC)要素を用いてモデル化を行っている。コンクリートに発生するひび割れは、分散ひび割れモデルを用いて表現しており、ひび割れが生じたコンクリートおよび鉄筋の構成則には、要素内の平均応力-平均ひずみの関係で与えている。

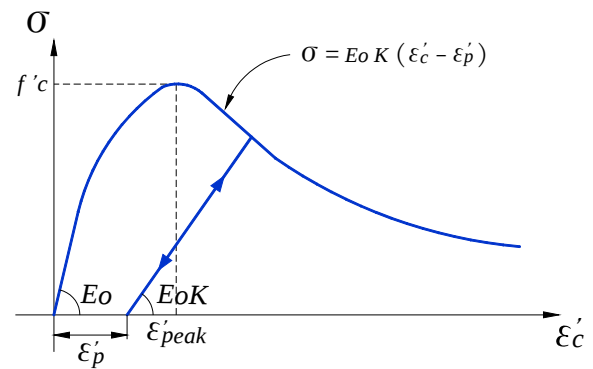
図-2 にはコンクリート要素に用いた材料構成則を示している。ひび割れ発生前のコンクリートには弾塑性破壊モデルを適用し、ひび割れは主引張ひずみが限界引張ひずみに達した時点で発生するものとした。ひび割れ発生後のコンクリートにはコンクリートと鉄筋間の付着作用に伴うテンションステイフニング効果やひび割れ面におけるせん断伝達モデル、ひび割れ直交方向において圧縮剛性が低下する現象が考慮されている。また、コンクリート中の鉄筋に対しては、平均降伏強度が鉄筋単体の降伏強度よりも低下する現象が考慮されている。

なお、壁部においては、鉄筋の付着作用によってひび割れの分散が期待できる領域 (RC ゾーン) とひび割れが局所化する領域 (無筋ゾーン) を区分して表現するために、鉄筋コンクリート要素と無筋コンクリート要素を壁厚方向にオーバーラップさせている。ここで、鉄筋コンクリート要素における付着パラメータは $C = 0.4$ と仮定し、無筋コンクリート要素は引張破壊エネルギーと要素寸法から破壊力学上の要件を満たすべく引張応力解放率を決定している。表-1、表-2 には、本解析で用いたコンクリートおよび鉄筋の材料物性値を示している。

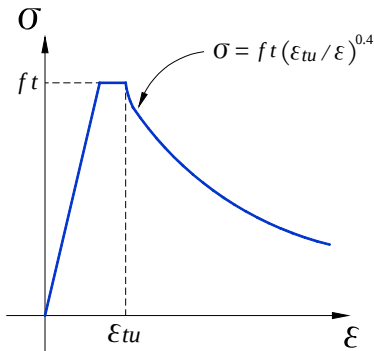
4. 数値解析結果および考察

図-4 には解析で得られた荷重点位置における水平荷重-水平変位関係を示している。なお、図中には道路橋示方書に準拠して算定した設計せん断耐力値も併せて示した。ここで、点線で示した設計せん断耐力は道路橋示方書【耐震設計編】におけるせん断耐力値であり、実線で示した設計せん断耐力は道路橋示方書【下部構造編】におけるフーチング部材の設計で用いるせん断耐力値である。フーチング部材のせん断耐力算定式では、せん断スパン比 a/d に応じてコンクリートが負担するせん断耐力の割り増しと斜め引張鉄筋 (帯鉄筋) が負担するせん断耐力の低減効果が考慮されている。

図より、水平荷重-水平変位関係に着目すると、せん断ひび割れの発生が確認された水平荷重 11,000 kN まではほぼ線形的に荷重が増加したが、その後若干荷重が低下するが再び増加する挙動を示し、引張側軸方向鉄筋の降伏を伴いながら最大水平荷重 16,700 kN に到達した。



(圧縮応力下の応力-ひずみ関係)



(引張応力下の応力-ひずみ関係)

図-2 コンクリート要素の材料構成則

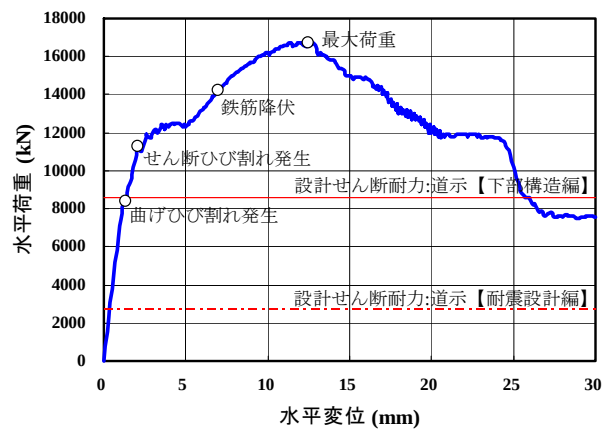


図-4 水平荷重-水平変位関係

なお、最大荷重以降は比較的緩やかに荷重が低下した。

一方、設計せん断耐力値と比較すると、道路橋示方書の耐震設計編および下部構造編で算出されるせん断耐力値はそれぞれ $P_{s1} = 2,762$ kN, $P_{s2} = 8,604$ kN であり、いずれも解析で得られた最大荷重値の 50 % 以下の値となっており、過小評価されていることが分かる。

道路橋示方書におけるせん断耐力算定式は、梁のような棒部材を対象として提案された設計式であることから、壁式橋脚の橋軸直角方向のようなせん断スパン比 a/d の小さい部材には過度に安全側の評価になることが明らかとなった。したがって、既設構造物の耐震補強等、対象構造物の耐荷力を精度良く把握・予測するためには、適切な手法を用いて評価する必要があるものと考えられる。

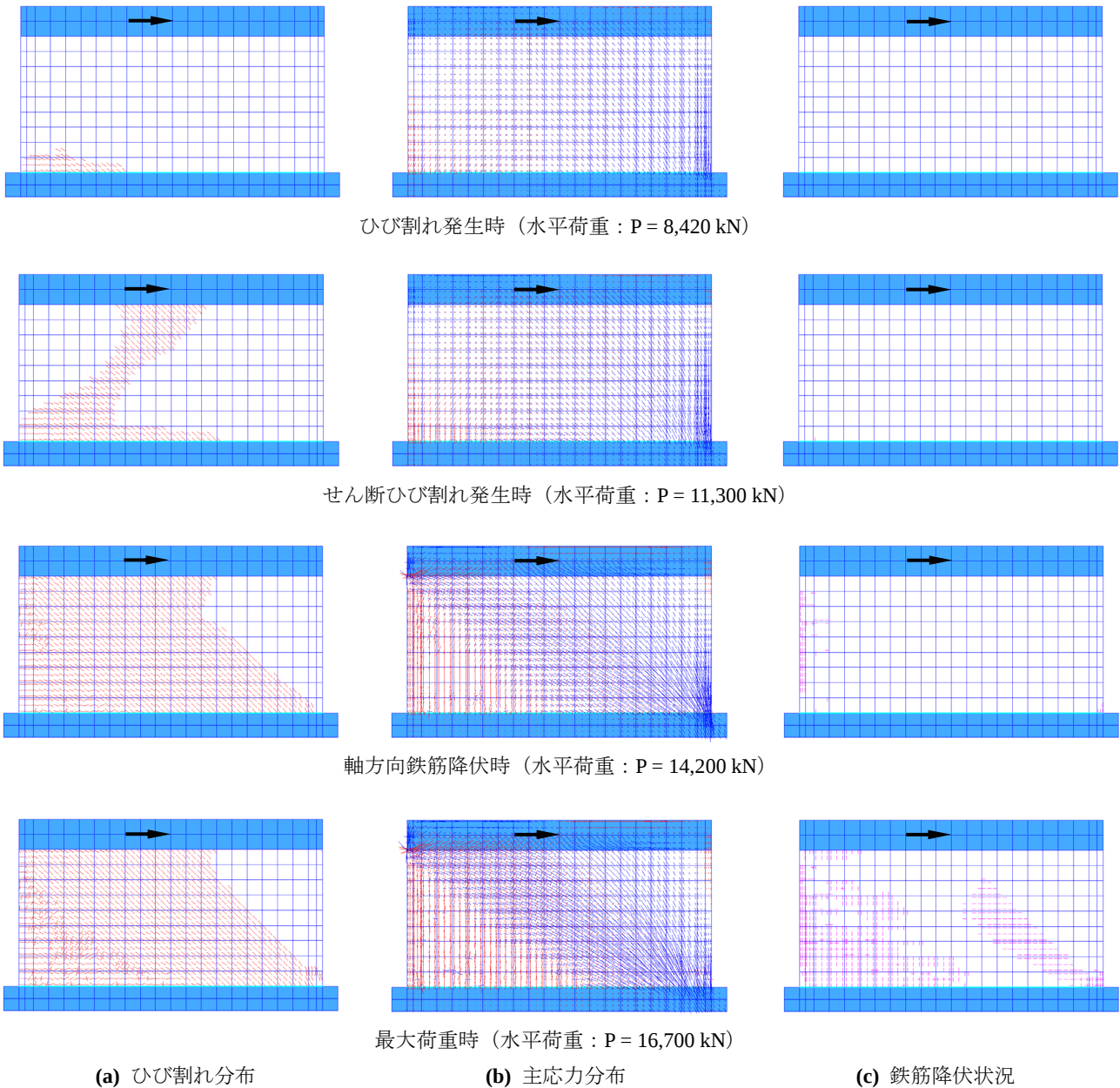


図-5 各イベントにおけるひび割れ分布, 主応力分布, 鉄筋降伏状況

図-5 には解析で得られた各イベントにおける橋脚のひび割れ分布, 主応力分布, 鉄筋降伏状況を示している。主応力分布では赤線が最大主応力(引張), 青線が最小主応力(圧縮)を示しており, 鉄筋降伏図では鉛直線が主鉄筋降伏を, 水平線が帯鉄筋の降伏状態を表している。

図より, ひび割れ分布に着目すると, 荷重初期には壁基部に水平方向の曲げひび割れが発生するが, 荷重の増加とともに徐々に斜めひび割れに移行して, 最終的には壁基部の圧縮縁に向かってひび割れが進展する状況が捉えられている。次に, 主応力分布に着目すると, 荷重初期には柱の曲げ挙動に類似した主応力分布を呈しているが, 引張側荷重点から圧縮側壁基部に向かう明瞭な圧縮ストラットが出現してトラス的な耐荷機構が形成されていることが確認できる。なお, 本解析では最終的に圧縮側壁基部の圧壊によって破壊に至り解析を終了している。

鉄筋の降伏状況に着目すると, 引張側の軸方向鉄筋の

降伏を伴いながら, 最大荷重時には圧縮ストラット領域の帯鉄筋が降伏状態に至っていることが確認できる。

5. まとめ

本検討では鉄筋コンクリート壁式橋脚の橋軸直角方向せん断耐力に着目し, 実態に近い耐荷性状や破壊性状を把握することを目的として数値解析的な検討を実施した。本解析より得られた知見を要約すると以下の通りである。

- 1) せん断スパン比の小さい壁式橋脚直角方向のせん断耐力は, 棒部材を対象とした道路橋示方書式で算定した設計せん断耐力よりも数倍大きく, 設計耐力値は過度に安全側の評価になる可能性がある。
- 2) 壁部材は斜めひび割れ発生後もコンクリートが圧縮力に抵抗し, トラス的な耐荷機構が形成される。
- 3) 壁部材のせん断耐力を実態に近い状態で評価するためには, 非線形有限要素解析の実施が有効である。