

せん断破壊したRC製面部材に対するあと施工せん断補強筋の復旧効果の検討

(一財)電力中央研究所 正会員 修(工) ○柴山 淳
 (一財)電力中央研究所 博(工) 宮川 義範
 関西電力(株) 修(工) 安藤 明宏

キーワード：応急復旧，あと施工せん断補強筋，せん断破壊，ボックスカルバート

1. はじめに

東日本大震災以降，設計地震動を超えるような地震動への対処として，構造物が壊滅的な状態に至らないことを満足する「危機耐性」の確保の必要性が耐震構造の分野で認識されている¹⁾。「危機耐性」を確保する方策の一つとして，損傷後の復旧対策を事前に検討しておくことは重要であり，これまで，おもに曲げ破壊に対する検討が行われてきた。しかしながら，地中構造物であるボックスカルバートにおいて，もっともクリティカルなモードとなるせん断破壊に対して検討された例は見られない。そこで，本研究は曲げ降伏後のせん断破壊が発生した鉄筋コンクリート(以下，RC)製ボックスカルバートの隔壁(面部材)に対する，あと施工せん断補強筋の復旧効果を実験的に検証した。

2. 一次载荷実験

まず，図-1に示す試験体に対して，荷重変位曲線において水平耐力の低下が明瞭に認められるまで静的水平载荷実験を行った。この一次载荷実験の主たる目的は，塑性ヒンジ区間に設けた打継目が構造性能に与える影響を把握することに加え，損傷過程における詳細な変位およびひずみの分布を捉えることである^{2),3)}。

2.1 試験体概要と载荷方法

試験体諸元を表-1に示す。図-1に示すように試験区間にせん断補強筋は配置していない。本試験体は，下側ハンチから100mm立ち上がった場所で打継目を設け，二度に分けて打設を行った。加力は，500kNアクチュエーター2本により頂版を押し引きする繰返し漸増载荷とした。制御は層間変形角(以下， R)による変位制御とし，各折返し点で三周することを基本パターンとした。各折返し点で三周载荷を行ったのち，±3%を二周载荷した時点で十分水平耐力が低下したと判断し，正側に押し切った($R=5.6%$)。

表-1 試験体諸元

試験区間部材厚[mm]	250
せん断スパン(a)[mm]	500
打継ぎ目より下側のコンクリート	圧縮強度[MPa] 44.0 割裂引張強度[MPa] 3.1 弾性係数[GPa] 25.8
打継ぎ目より上側のコンクリート	圧縮強度[MPa] 43.1 割裂引張強度[MPa] 2.9 弾性係数[GPa] 24.6
引張鉄筋比($\Sigma a_s/bd$)[%]	0.48
主筋降伏強度[MPa]	335
主筋弾性係数[GPa]	191
ハンチ筋降伏強度[MPa]	342
ハンチ筋弾性係数[GPa]	191
曲げ耐力時せん断力[kN]	509
せん断耐力[kN]	857
せん断裕度(せん断耐力/曲げ耐力)	1.7
あと施工せん断補強筋0.2%降伏強度[MPa]	506
あと施工せん断補強筋0.2%降伏ひずみ[%]	0.43
あと施工せん断補強筋弾性係数[GPa]	211

曲げ耐力時せん断力，せん断耐力はそれぞれ4),5)により算出

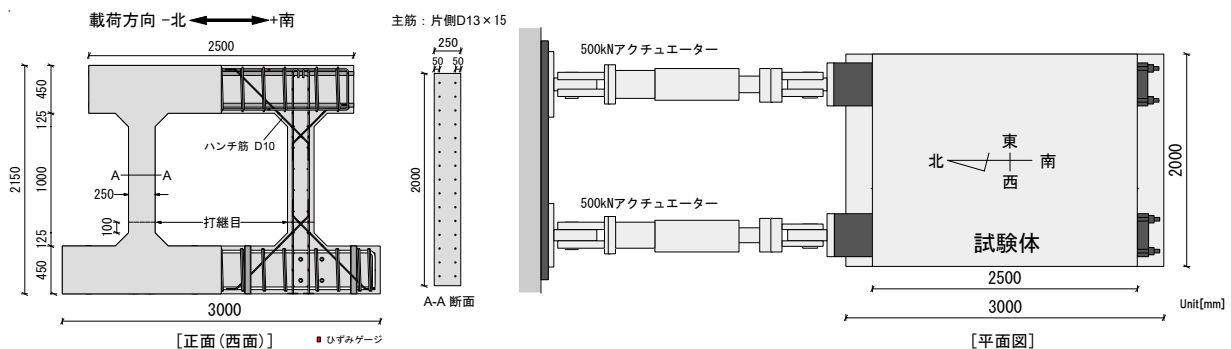


図-1 試験体図

2.2 水平荷重—水平変位関係

一次載荷実験の水平変位—水平荷重関係を図-2に示す。水平荷重は曲げ降伏によって頭打ちとなった。最大耐力到達後、せん断ひび割れの拡幅に従って耐力が低下したため、一次載荷実験での破壊モードを曲げ降伏後のせん断破壊と判断した。なお、最大耐力の発現以降に打継目の開口が確認されたが、せん断破壊に起因する耐力低下まで安定したループを描いた。

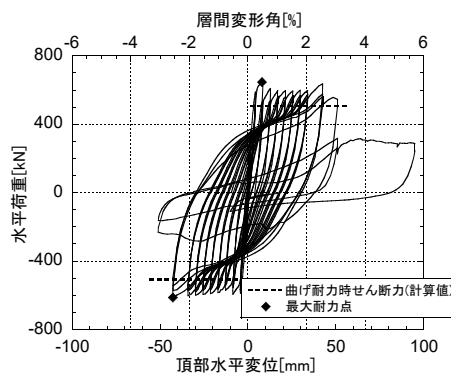


図-2 一次載荷 水平変位-水平荷重

2.3 損傷の様相

一本目の曲げひび割れは下側ハンチと鉛直部材の境界部で発生し、打継目位置での開口が先行することにはなかった。写真-1に一次載荷終了時の損傷の様相を示す。壁の上下では打継目に起因する損傷状況の違いが見られた。具体的には、打継目がない壁上側で北、南両壁に斜めひび割れが発生した状況でも、打継目がある壁下側では打継目は開口したが斜めひび割れを伴うせん断破壊の様相を呈さなかった。また、南側壁では上端の斜めひび割れから主筋に沿った割裂ひび割れが発生したが、打継目により分断され割裂ひび割れが打継目を跨ぐことはなかった。



写真-1 一次載荷終了後

3. 二次載荷実験

二次載荷実験では、一次載荷実験において曲げ降伏後にせん断破壊した鉛直部材に対するあと施工せん断補強筋による力学性能の回復を実験的に検証した。

3.1 復旧方針

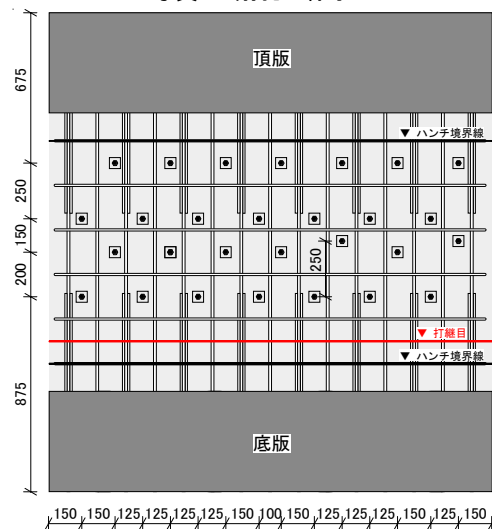
復旧対策の考え方は、発生した斜めせん断ひび割れを閉塞させる効果、部材の面外方向へのはらみ出しの拘束、および新たに水平力を負担させる補強材を追加することを基本とした。本試験体は土圧を受けない隔壁を対象としている。そこで、損傷した部材に貫通孔を設けてせん断補強筋を追加し、両端を鋼板とナットを用いて固定する方法を用いた。なお、一次載荷終了時点で壁上端が激しく損傷し、残存水平耐力がほぼゼロと判断した北側隔壁には復旧対策を行わず、南側壁のみに復旧対策を施した。



写真-2 削孔の様子

3.2 復旧対策の詳細

貫通孔の削孔には湿式のダイヤモンドコアドリルを用いた。貫通孔の施工状況を写真-2に示す。削孔径は可能な限り径を小さくすることを目標にし、最大でφ20のコアビットを用いて削孔した。あと施工せん断補強筋にはφ14mmの寸切ボルトを使用した。あと施工せん断補強筋は試験体内部の鉄筋および一次載荷により



南側壁(南面)

図-3 せん断補強筋の配置位置

発生したひび割れ上を避けて千鳥配筋とし、鉛直方向の間隔は1D(試験体部材厚さは250mm)以下になるように配置した(図-3)。あと施工せん断補強筋に直交する方向の断面積に対するせん断補強筋比は0.13%である。あと施工せん断補強筋の両端部の固定には鉄板とナットを用いた。一次载荷による部材の面外方向へのはらみ出しによってワッシャーとナットの間隙が生じる箇所には、テーパ座金を用いた。固定端のナットはダブルナットとし、トルクレンチを用いてひび割れを閉口させるように損傷した試験体コンクリートに締付け力を加えた⁶⁾。寸切ボルト1本あたりの締付け力はせん断補強筋に貼付けたひずみゲージで管理し、せん断補強筋として用いた寸切ボルトの0.2%降伏耐力の0.25倍に相当する100MPa($\epsilon \approx 500 \mu$)とした。復旧対策完了後の様子を写真-3,4に示す。また一次载荷終了時と復旧対策完了後の二次载荷開始前の南側壁西面の二次元画像計測の結果を図-4に示す。施工完了後はせん断補強筋の締付け力によってひび割れ幅が減少し、部材の面外方向へのはらみ出し量も減少した。

3.3 水平荷重—水平変位関係

二次载荷は、一次载荷で残存耐力が正側よりも低下した負側から载荷をはじめ、アクチュエーターのストローク限界まで正負に载荷した。二次载荷の水平変位—水平荷重関係を図-5に示す。最大耐力は負側一周目のサイクルで発現した307kNであり、これは一次载荷の負側残存耐力の1.88倍となった。正側一周目の载荷では一次载荷の残存耐力を下回った。(最大耐力はR=4.5%時の273kN)、負側二周目の最大耐力は209kNとなり、負側一周目の最大耐力の68%となったが、一次载荷の負側残存耐力を上回る結果となった。

3.4 せん断補強筋のひずみ性状

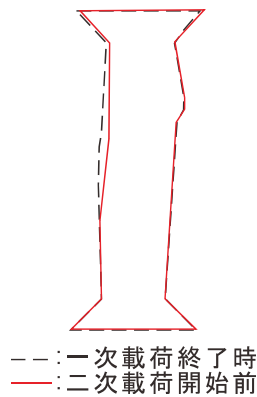
図-6に負側一周目ピーク時のあと施工せん断補強筋のひずみを示す。最上段の塑性ヒンジ区間かつ斜めひび割れを貫くあと施工せん断補強筋のひずみはすべて締付け力導入完了時点のひずみの500 μ を下回った。このことから、塑性ヒンジ区間に設置したせん断補強筋が耐力の上昇に寄与したとは考えにくい。下から2段目、3段目の割裂ひび割れを貫く位置のあと施工せん断補強筋のひずみは同じ段でもバラつきが見られたが、降伏ひずみに近いせん断補強筋もあり、最上段のせん断補強筋のひずみを上回る傾向が確認された。結果として、試験体高さ方向においてせん断補強筋のひずみに偏りが見られたが、一次载荷で水平耐力が大きく低下した状態の部材でも本研究で検討した復旧対策



写真-3 復旧対策完了後(南側壁 内空側)



写真-4 復旧対策完了後(南側壁 西面)



--: 一次载荷終了時
—: 二次载荷開始前
図-4 施工前後の比較

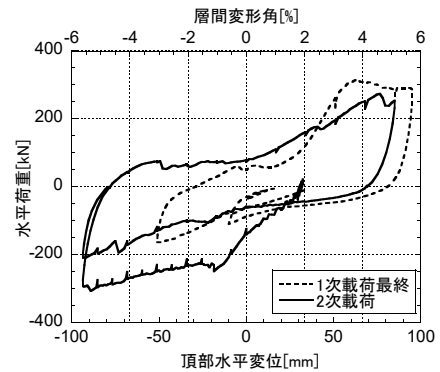


図-5 二次载荷 水平変位—水平荷重

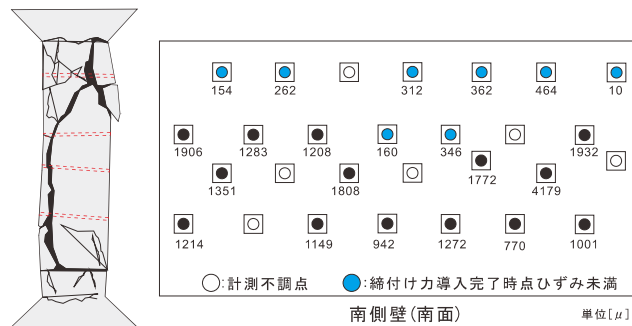


図-6 せん断補強筋ひずみ (R=-5.5%)



写真-5 南側壁の損傷の様相(左) R=-5.5%

によって水平耐力は回復した。

3.5 変形状

写真-4に示した復旧対策完了後の写真と、写真-5に示す一周目負側ピーク時の写真を比較すると、南側壁上側の右上から左下へ伸びる斜めひび割れのひび割れ幅の拡幅は見られるものの、新たに目立った損傷は発生していないことがわかる。これは、端部を鉄板とナットで固定したあと施工せん断補強筋が部材の面外方向へのはらみ出しを拘束し、曲げ変形と鉄筋の伸び出しに伴う回転変形が全変形量に占める割合が高くなったことに起因すると考えられる。

4. まとめ

曲げ降伏後にせん断破壊したRC製ボックスカルバートの面部材にあと施工せん断補強筋による復旧対策の効果を検証し、高さによってあと施工せん断補強筋のひずみに偏りは見られるものの、水平耐力が大きく低下した状態でも本研究で検討した復旧対策によって水平耐力は回復する結果を得た。今後は、復旧対策を行った南側壁の変形モード等の検討を行い、耐力が回復したメカニズムについて研究を進める予定である。

謝辞： 本研究は、電力9社，日本原子力発電㈱，電源開発㈱および日本原燃㈱による原子力リスク研究センター共通研究として実施された研究成果の一部を取りまとめたものである。関係各位に謝意を表す。

参考文献

- 1) 西村 隆義，室野 剛隆，本山 紘希，五十嵐 晃：危機耐性を高める自重補償構造の耐震性能と成立性に関する検討，第35回土木学会地震工学研究発表会講演集，2015.
- 2) 柴山 淳，宮川義範，安藤明宏，重光信宏：塑性ヒンジ区間に打継目を有する鉄筋コンクリート製ボックスカルバートの載荷実験，土木学会第71回年次学術講演概要集，第7部門，出版予定，2016.
- 3) 宮川義範，柴山 淳，安藤明宏，重光信宏：水平耐力の低下開始時点における鉄筋コンクリート製ボックスカルバートの変位分布，土木学会第71回年次学術講演概要集，第7部門，出版予定，2016.
- 4) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造の靱性保証型耐震設計指針・同解説，1997.
- 5) 二羽淳一郎，山田一字，横沢和男，岡村甫：せん断補強筋を用いないRC はりのせん断強度式の再評価，土木学会論文集，No. 372/V-5，pp. 167-176，1986.
- 6) 鈴木計夫，常松 豪，伊井敬二，中村佳史：トルクによる簡易プレストレス導入工法の実証的研究，プレストレストコンクリート技術協会 第18回シンポジウム論文集(2009年10月)