

プレストレスがPCはりのせん断破壊モードに及ぼす影響

ドーピー建設工業(株) 技術センター 正会員 ○ 田村 聖  
 ドーピー建設工業(株) 技術センター 正会員 工学博士 濱田 譲  
 東京工業大学大学院 理工学研究科 工学修士 M. Lertsamattiyakul  
 東京工業大学大学院 理工学研究科 正会員 工学博士 二羽 淳一郎

1. はじめに

せん断補強筋を配置していない矩形断面を有する鉄筋コンクリート(以下、RCと称す)はりおよびプレストレストコンクリート(以下、PCと称す)はりのせん断破壊モードは、斜め引張破壊もしくはせん断圧縮破壊に大別されると思われる。これらの破壊モードは、一般的にせん断スパン有効高さ比(a/d)が比較的大きい場合は斜め引張破壊となり、せん断スパン有効高さ比(a/d)が小さくなるのに伴って、せん断圧縮破壊へと移行するものと考えられる。しかし、著者らが既報の実験データを整理した結果<sup>1)</sup>、PCはり部材の破壊モードはRCはりとは異なり、せん断スパン有効高さ比(a/d)の大小に拘わらず、せん断圧縮破壊が支配的となることが明らかとなった。本研究は、矩形断面を有するPCはりのせん断破壊モードが斜め引張破壊からせん断圧縮破壊へと移行する際に、どの程度のプレストレス量を必要とするのかを明らかにするため、非線形有限要素法を用いて数値解析的に検討を行ったものである。

2. 解析の概要

2.1 解析供試体の諸元

解析供試体の諸元を表-1 に示す。本研究では、一般にPCはりのせん断破壊モードに比較的大きく影響を及ぼす実験要因であると考えられるせん断スパン有効高さ比(a/d)をパラメータとして、合計8つの解析ケースを設定した。

表-1 に示すとおり、せん断スパン有効高さ比(a/d)は2.75~3.50の範囲内で4水準設定した。有効高さは500mmおよび1000mmの2水準とし、引張鋼材比はそれぞれの有効高さにおいて約1.3%となるよう引張鋼材を配置した。また、載荷点および支線の支圧板の幅の大きさが解析結果に影響を及ぼすことが指摘されているため<sup>1)</sup>、本研究ではこれらの支圧板の幅と有効高さの比(r/d)が0.2程度となるよう設定した。

なお、本研究では全ての解析ケースにおいてせん断補強筋は配置していない。

2.2 材料特性

解析に用いた材料特性を表-2 および表-3 に示す。全ての解析ケースにおいて、コンクリートの圧縮強度は50N/mm<sup>2</sup>とした。その他のコンクリートの特性値は、土木学会コンクリート標準示方書<sup>2)</sup>(以下、標準示方書と称す)より、

表-1 解析供試体の緒元

| No. | a/d  | h (mm) | d (mm) | b <sub>w</sub> (mm) | p <sub>w</sub> (%) | r (mm) | r/d  |
|-----|------|--------|--------|---------------------|--------------------|--------|------|
| 1   | 2.75 | 550    | 500    | 250                 | 1.330              | 100    | 0.20 |
| 2   | 3.00 |        |        |                     |                    |        |      |
| 3   | 3.25 |        |        |                     |                    |        |      |
| 4   | 3.50 |        |        |                     |                    |        |      |
| 5   | 2.75 | 1100   | 1000   | 350                 | 1.379              | 150    | 0.15 |
| 6   | 3.00 |        |        |                     |                    |        |      |
| 7   | 3.25 |        |        |                     |                    |        |      |
| 8   | 3.50 |        |        |                     |                    |        |      |

表中の記号:

a/d : せん断スパン有効高さ比    b<sub>w</sub> : 部材厚さ  
 h : はり高さ    p<sub>w</sub> : 引張鋼材比  
 d : 引張鋼材有効高さ    r : 載荷板および支圧板の幅

表-2 コンクリートの材料特性

| 圧縮強度<br>f <sub>c</sub> (N/mm <sup>2</sup> ) | 引張強度<br>f <sub>t</sub> (N/mm <sup>2</sup> ) | 弾性係数<br>E <sub>c</sub> (kN/mm <sup>2</sup> ) | 破壊エネルギー<br>G <sub>c</sub> (N/m) |
|---|---|--|---------------------------------|
| 50.0  | 3.12  | 33   | 107                             |

表-3 PC鋼材の材料特性

| 呼び名    | 断面積<br>A <sub>p</sub> (mm <sup>2</sup> ) | 降伏強度<br>f <sub>y</sub> (N/mm <sup>2</sup> ) | 弾性係数<br>E <sub>p</sub> (kN/mm <sup>2</sup> ) |
|--------|--|---|--|
| 23mm*1 | 415.5                                    | 930   | 200  |
| 32mm*2 | 804.2                                    | 930   | 200  |

\*1 : d=500mmの解析ケースで使用

\*2 : d=1000mmの解析ケースで使用

圧縮強度の特性値に基づいて算出される値とした。また、引張鋼材には表-3に示すPC鋼材を用いた。

2.3 非線形有限要素解析の概要

本研究では、汎用有限要素解析プログラム「DIANA」を用いて、2次元の非線形有限要素解析(以下、FEM解析と称す)を行った。解析モデルを図-1に示す。解析供試体のモデル化にあたっては、対称性を考慮した1/2モデルとした。要素寸法については、全ての解析ケースにおいて50mmとした。支持条件は、支点部のX方向は可動とし、Y方向を固定した。スパン中央部についてはX方向を固定し、Y方向を可動とした。

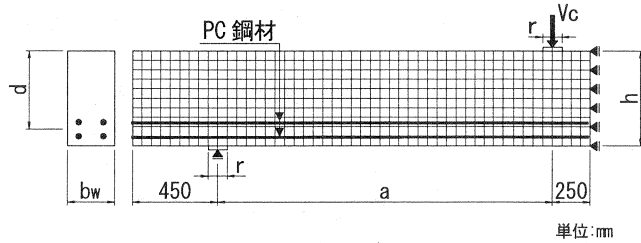
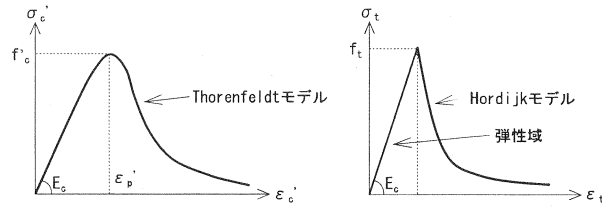


図-1 解析モデル図



(a) コンクリート圧縮モデル (b) コンクリート引張モデル

図-2 コンクリートの構成則

コンクリートは、8 節点アイソパラメ

トリック平面応力要素を用いた。荷重の荷重方法は変位制御とし、割線剛性収束法を用いて、不釣り合いエネルギーと外力エネルギーの比が0.01%となった場合に収束するものと設定した。また、ひび割れモデルは分布ひび割れモデルの1つである固定ひび割れモデルを用いた。コンクリートの構成則を図-2に示す。圧縮応力を受けるコンクリートの構成則は、Thorenfeldtモデルを用いた。一方、引張応力を受けるコンクリートの構成則は、Hordijkモデルを用いた。PC鋼材の構成則を図-3に示す。

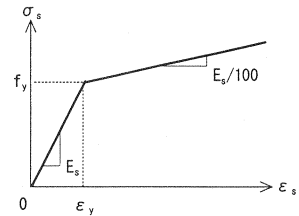


図-3 PC鋼材の構成則

PC鋼材は、降伏強度までは弾性体、それ以降は弾性係数の1/100で漸増するバイリニアモデルとした。なお、PC鋼材は埋め込み要素を用いており、コンクリート要素とは完全付着としている。

3. 解析結果

3.1 破壊モードの判定方法

本研究における2種類の破壊モード(斜め引張破壊ならびにせん断圧縮破壊)の判定方法は、ピーク応力時ひずみより次のように判定した。斜め引張破壊の場合、最大荷重に近づくにつれて斜めひび割れが発生していると思われる箇所において引張主ひずみが卓越し、荷重点付近の圧縮主ひずみが圧縮を受けるコンクリートのピーク応力時ひずみ  $\epsilon_p'$  ( $=2500\mu$ ) に達していない状態で耐力が低下する。この状態を斜め引張破壊と想定した。一方、せん断圧縮破壊の場合、引張主ひずみが卓越しても荷重が増加し、最終的に荷重点付近の圧縮主ひずみが圧縮を受けるコンクリートのピーク応力時ひずみ  $\epsilon_p'$  ( $=2500\mu$ ) に達し耐力が低下する。この状態をせん断圧縮破壊と想定した。

3.2 RC部材のせん断耐力の妥当性

本研究を行うにあたり、表-1に示す全ての解析ケースにおいて、プレストレスを全く導入していないRCはり部材としてのせん断耐力の妥当性を検討した。せん断耐力の比較を表-4に示す。表中のせん断耐力の計算値( $V_{c,cal,RC}$ )は、標準示方書のせん断耐力評価式の基礎となった式(1)<sup>3)</sup>より算出した。

$$V_{c,cal,RC} = 0.20f'_c{}^{1/3}p_w{}^{1/3}(d/1000)^{-1/4}[0.75+1.4/(a/d)]b_wd \tag{1}$$

ただし、 $V_{c,cal,RC}$ :コンクリートが負担するせん断耐力、 $f'_c$ :コンクリートの圧縮強度(N/mm<sup>2</sup>)、 $p_w$ :引張鋼材比( $=100A_p/(b_w \cdot d)$ )、 $d$ :有効高さ(mm)、 $a$ :せん断スパン長(mm)、 $b_w$ :部材のウェブ幅(mm)を表す。

表-4 セン断耐力の比較および破壊モード

| a/d  | d=500mm                                     |                        |                        |                     |                               |                         | d=1000mm                                    |                        |                        |                     |                               |                         |
|------|---|------------------------|------------------------|---------------------|-------------------------------|-------------------------|---|------------------------|------------------------|---------------------|-------------------------------|-------------------------|
|      | $\sigma'_{co}^{*1}$<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | $V_{c,cal,RC}$<br>(kN) | $V_{c,cal,PC}$<br>(kN) | $V_{c,FEM}$<br>(kN) | $\frac{V_{c,cal}}{V_{c,FEM}}$ | 破壊<br>モード <sup>*2</sup> | $\sigma'_{co}^{*1}$<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | $V_{c,cal,RC}$<br>(kN) | $V_{c,cal,PC}$<br>(kN) | $V_{c,FEM}$<br>(kN) | $\frac{V_{c,cal}}{V_{c,FEM}}$ | 破壊<br>モード <sup>*2</sup> |
| 3.50 | RC  | 139                    | ---                    | 134                 | 1.04                          | DT                      | RC  | 330                    | ---                    | 350                 | 0.94                          | DT                      |
|      | 1.0   | ---                    | 157                    | 135                 | 1.16                          | DT                      | 1.0   | ---                    | 413                    | 376                 | 1.10                          | DT                      |
|      | 2.0   | ---                    | 161                    | 194                 | 0.83                          | SC                      | 2.0   | ---                    | 433                    | 445                 | 0.97                          | SC                      |
| 3.25 | RC  | 142                    | ---                    | 144                 | 0.99                          | DT                      | RC  | 339                    | ---                    | 322                 | 1.05                          | DT                      |
|      | 1.0   | ---                    | 161                    | 143                 | 1.13                          | DT                      | 1.0   | ---                    | 429                    | 405                 | 1.06                          | DT                      |
|      | 2.0   | ---                    | 166                    | 181                 | 0.92                          | SC                      | 2.0   | ---                    | 442                    | 479                 | 0.92                          | SC                      |
| 3.00 | RC  | 147                    | ---                    | 141                 | 1.04                          | DT                      | RC  | 349                    | ---                    | 346                 | 1.01                          | DT                      |
|      | 1.0   | ---                    | 168                    | 169                 | 0.99                          | DT                      | 1.0   | ---                    | 446                    | 524                 | 0.85                          | SC                      |
|      | 2.0   | ---                    | 173                    | 177                 | 0.98                          | SC                      | ---   | ---                    | ---                    | ---                 | ---                           | ---                     |
| 2.75 | RC  | 152                    | ---                    | 146                 | 1.04                          | DT                      | RC  | 361                    | ---                    | 361                 | 1.00                          | DT                      |
|      | 1.0   | ---                    | 174                    | 169                 | 1.03                          | SC                      | 1.0   | ---                    | 467                    | 612                 | 0.76                          | SC                      |

\*1:  $\sigma'_{co}$ =RCとなっている箇所は、RC部材を示す

\*2: DT=斜め引張破壊, SC=せん断圧縮破壊

式(1)より算出した計算値( $V_{c,cal,RC}$ )とFEM解析値( $V_{c,FEM}$ )のせん断耐力の比は、0.94~1.05の範囲となっており両者のせん断耐力は、ほぼ一致する結果となった。また、表-4に示す全ての解析ケースにおいて、解析上は斜め引張破壊と判定された。

以上より、FEM解析値( $V_{c,FEM}$ )は斜め引張破壊耐力を評価する式(1)より算出した計算値( $V_{c,cal,RC}$ )とほぼ一致したことから、本研究で設定した各解析ケースのRCはり部材としてのせん断耐力および破壊モードを正確に評価していると判断した。これにより、以降では各解析ケースにプレストレスを導入し、プレストレスが破壊モードに及ぼす検討を行った。

### 3.3 PC部材のせん断耐力の妥当性

PCはり部材のせん断耐力の妥当性を検討した。せん断耐力の比較を表-4に示す。表中のせん断耐力の計算値( $V_{c,cal,PC}$ )は、コンクリートが負担するせん断耐力については式(1)を用いた。

プレストレスがせん断耐力に及ぼす影響は、一般に、標準示方書の規定に準拠し、デコンプレッションモーメントをパラメータとする係数を用いて評価(以下、 $M_0$ 法と称す)している。しかし、この評価方法によればPCはりのせん断耐力を過小評価する傾向があるため、曲げひび割れが発生するまでのせん断力の増加量( $M_{cr}/a$ )をコンクリート分担分のせん断耐力( $V_{c,cal,RC}$ )に加算する方法<sup>1)</sup>(以下、 $M_{cr}$ 法と称す)により評価した。これは、PCはり部材のせん断耐力の算定精度を $M_0$ 法と $M_{cr}$ 法と比較した場合、 $M_{cr}$ 法を用いたほうが優れるとの研究成果に基づくものである<sup>1)</sup>。その算出式を、式(2)に示す。

$$V_{c,cal,PC} = V_{c,cal,RC} + M_{cr}/a \tag{2}$$

ただし、 $V_{c,cal,PC}$ : PCはり部材のせん断耐力、 $M_{cr}$ : 曲げひび割れ発生モーメント、 $a$ : せん断スパン長を表す。

式(2)で算出した計算値( $V_{c,cal,PC}$ )とFEM解析値( $V_{c,FEM}$ )のせん断耐力の比は、0.76~1.16の範囲となっており両者のせん断耐力は概ね一致している。このせん断耐力の比の範囲は、解析上斜め引張破壊に至ったRC部材の( $V_{c,cal,RC}/V_{c,FEM}$ )場合で0.94~1.04となっており、PC部材は計算値( $V_{c,cal,PC}$ )とFEM解析値( $V_{c,FEM}$ )の差が大きくなった。これは、破壊形式の相違に拘らず、計算値のコンクリート分担分のせん断耐力評価式が、斜め引張破壊耐力を評価する式であることと、 $M_{cr}$ 法は $M_0$ 法と比較して算定精度はよいが、プレストレスがせん断耐力に及ぼす影響をまだ十分に評価できていないことが影響しているものと思われる。

### 3.4 プレストレスが破壊モードに及ぼす影響

下縁導入プレストレス量( $\sigma'_{co}$ )を表-4に示す。せん断スパン有効高さ比(a/d)を3.50および3.25と設定した解析ケースでは、下縁導入プレストレス量( $\sigma'_{co}$ )が2.0N/mm<sup>2</sup>となった時点で、有効高さの相違に関係な

く斜め引張破壊からせん断圧縮破壊へと移行した。この傾向は、せん断スパン有効高さ比(a/d)を3.00とし、有効高さが500mmの解析ケースにおいても同様であった。せん断スパン有効高さ比(a/d)を3.00とし有効高さが1000mmとした解析ケースおよび、それぞれの有効高さにおいてせん断スパン有効高さ比(a/d)を2.75とした解析ケースでは、下縁導入プレストレス量( $\sigma'_{\infty}$ )が1.0N/mm<sup>2</sup>となった時点で斜め引張破壊からせん断圧縮破壊へと移行した。以上のように、本研究の範囲においては1.0N/mm<sup>2</sup>~2.0N/mm<sup>2</sup>の範囲の下縁導入プレストレス量( $\sigma'_{\infty}$ )で破壊モードが移行する結果となった。

参考のため、FEM解析より得られた代表的な解析ケースの荷重-変位関係を図-4に示す。前述した破壊モードの判定方法より、斜め引張破壊であると判定した場合の荷重-変位関係は、終局荷重に到達した時点で耐力が低下した。一方、せん断圧縮破壊であると判定した場合の荷重-変位関係は、斜めひび割れが発生した時点で耐力が一旦低下するが、その後も荷重が増加した。このような荷重-変位関係は、せん断載荷実験時においても同様な挙動を示すと思われるが、FEM解析でもその挙動を再現できた。

文献1)の研究で収集した実験データのうち、本研究で設定した解析ケースと同様な実験要因を有する実験データを、表-5に示す。これら12個の実験データの破壊形式は、全てせん断圧縮破壊であった。特に、No.1の実験データはせん断スパン有効高さ比(a/d)を比較的大きく設定しているが、せん断圧縮破壊に至っていた。これは、今回の数値解析より得られた知見、すなわち、下縁導入プレストレス量( $\sigma'_{\infty}$ )が2.0N/mm<sup>2</sup>以上でせん断圧縮破壊が生ずるという結果と整合したものとなっている。

4. まとめ

- (1) PCはりのせん断耐力の計算値とFEM解析値の比は、RCはりのそれと比較して大きくなる結果となった。
- (2) 本研究の範囲において、PCはりの下縁導入プレストレス量( $\sigma'_{\infty}$ )の値が2.0N/mm<sup>2</sup>以上であれば、破壊モードが斜め引張破壊からせん断圧縮破壊へと移行することが確認された。
- (3) それぞれの破壊モードにおける荷重-変位関係の特徴的な挙動を、FEM解析においても再現することができた。

【参考文献】

- 1) 田村 聖, 濱田 譲, Manakan, L., 二羽淳一郎: 矩形断面を有するPCはり部材のせん断耐力評価法に関する一考察, プレストレストコンクリート, Vol.45, No.6, pp.101-110, 2003.12
- 2) 土木学会: コンクリート標準示方書〔構造性能照査編〕, pp.21-28, pp.67-72, 2002年制定
- 3) 二羽淳一郎, 山田一字, 横沢和夫, 岡村 甫: せん断補強鉄筋を用いない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
- 4) 伊藤忠彦, 山口隆裕, 池田尚治: プレキャストセグメントPCはりの曲げせん断挙動, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.16, No.2, pp.967-972, 1994

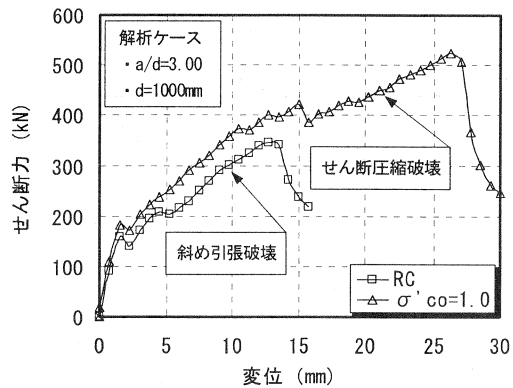


図-4 荷重-変位の関係

表-5 既往の実験データの概要<sup>1)</sup>

| No. | 研究者   | データ数 | 有効高さ (mm) | a/d  | $\sigma'_{\infty}$ (N/mm <sup>2</sup> ) |
|-----|-------|------|-----------|------|---|
| 1   | 田村 聖ら | 3    | 1000      | 3.75 | 2.6~5.8                                 |
| 2   | 渡辺博志ら | 4    | 550       | 3.00 | 8.0~16.0                                |
| 3   | 土木研究所 | 5    | 550~950   | 3.00 | 3.0~6.0                                 |