論文 逆対称荷重を受ける PRC~RC 梁のせん断ひび割れ強度に関する 解析的検討

志村知香*1·中塚佶*2·小島一高*3

要旨: PC~RC 部材の設計において, せん断ひび割れの発生は部材の耐荷変形機構を変化させる重要 な指標と考えられるが, せん断ひび割れ強度におよぼす諸要因の影響は理論的に十分説明されていな い。本研究は, 採用した非線形2次元有限要素解析が逆対称荷重を受ける PRC~RC 梁のせん断ひび 割れ強度の推定に妥当であるかを検討すると同時に, 同強度におよぼすシアスパン比, コンクリート 引張強度, および平均プレストレスレベルの影響を解析的に調べるものである。

キーワード: せん断ひひ割れ, FEM 解析, 平均プレストレスレベル, シアスパン比, コンクリート強度

1. はじめに

プレストレストコンクリート(PC)~鉄筋コン クリート(RC)部材において,せん断ひび割れの 発生は,部材の耐荷変形機構をトラス型に変化 させる重要な指標である。ここでせん断ひび割 れとは,曲げひび割れ先端から斜めに進展する ひび割れ,ならびに梁の腹部から斜めに発生す るひび割れの両者を言う。

せん断ひび割れ強度推定式としては主応力度 に基づく算定式¹⁾や,シアスパン比など諸要因の 影響を考慮した実験式²⁾が示されているが,それ らは諸要因の影響を理論的に十分説明するもの ではない。

本研究は、単純梁を対象とした前報³⁾に引き続 き、採用した非線形2次元有限要素法(FEM)解析 が逆対称荷重を受ける PRC~RC 梁のせん断ひ び割れ強度の推定にも妥当であるかを検討する と同時に、同強度におよぼすシアスパン比、コ ンクリート引張強度、およびプレストレス量の 影響を調べるものである。 本解析では非線形 2 次元有限要素法解析ソフト(TOTAL-RC)を使用した。

コンクリートには 8 節点アイソパラメトリッ ク平面応力要素,鉄筋には弾塑性トラス要素を 用い,鉄筋とコンクリートとの間には 6 節点ア イソパラメトリック板ボンド要素を設けて付着 特性を考慮した。

本解析で仮定したコンクリートおよび付着の 材料特性を図-1~3に示す。

コンクリートの引張特性については、その引 張応力–ひずみ関係に、**図**–2(a)のように曲げ 強度(σ_{tb})を用いたモデル(以下 σ_{tb} 型という)と、 **図**–2(b)のように引張強度(σ_{ts})後に引張塑性域 を考慮したモデル(同 σ_{ts} 型)を仮定した。なお、 引張塑性ひずみ量は、曲げひずみ勾配の影響を 考慮するため、梁上下縁では引張強度時ひずみ (ε_{tb})とし、梁中央では零とした。

その他のコンクリート材料特性,鉄筋材料特性および付着特性は前報³⁾にならった。

解析における分割要素は横×高さが 15mm× 20mm 程度になるように設定し,解析は荷重増分 を∠P=5(kN)で行った。

2. 解析方法の概要

2.1 解析仮定

| *1 | 大阪大学大学院 | 工学研究科地球総合工学専攻 | | (正会員) |
|----|----------|------------------|----|-------|
| *2 | 大阪大学大学院 | 工学研究科地球総合工学専攻助教授 | 工博 | (正会員) |
| *3 | (株)竹中工務店 | 后 工修 | | (正会員) |



2.2 解析対象試験体の概要

解析で取り上げた試験体は,図-4の逆対称 荷重を受ける,長方形断面で上下対称配筋をも つ PRC~RC の既往試験体(A57⁴⁾,H84⁵⁾,K88⁶⁾, T89⁷⁾,Y03⁸⁾)である。試験体の断面等の詳細を 表-1に示す。

鉄筋種は D16~D23, 引張側鉄筋比(p,)は 1.11

~2.42%, せん断補強筋比(p_w)は0および0.26%, コンクリート圧縮強度(σ_{cb})は15.8~ 38.8(N/mm²),ならびにシアスパン比(a/d)は0.4 ~2.8 である。またPRC部材にはC種21mmの 鋼棒が断面の中心に1本配置されており、平均 プレストレスレベル(σ_g / σ_{cb})は0.07および0.14 である。



2.3 せん断ひび割れ発生荷重の判定方法

図-5に試験体 A57 および Y03 の荷重-変形 関係と、せん断ひび割れ発生荷重($_{Q_{r}}$)時のせ ん断試験区間内におけるひび割れ要素の状況を 示す。また, 図-6に試験体 Y03 の載荷点から 部材中央までを等間隔に 30 分割した測定位置 101~131 における梁せい(Y)方向相対変位の解 析結果を示す。それら図中における(1)の位置は, 解析ひび割れ要素図において初めて斜張ひび割 れが現れた,もしくは曲げひび割れが斜めに進 展し始めた時点,(2)の位置はせん断区間におけ る材軸(X)方向の各節点位置での梁上端~下端間 のY方向相対変位解析値の最大が 0.03mm を越 えた時点を示す。ここで、Y方向相対変位0.03mm 時は、実験での目視によるひび割れ判別限界が ひび割れ幅で 0.02mm 程度であることに相対変 位の弾性変形分を考慮して決めた。

試験 シア シア 引張側 引張鉄筋 引張側 せん断 平均 コンクリ-梁せい 梁幅 t₅[∦] 試験体 体数 スパン長 スパン比 圧縮強度 鉄筋 降伏強度 鉄筋比 補強筋比 プレストレス (σ_y) (D) (p_t) (p_w) レベル シリーズ (内PRC (a) (a/d) (b) (σ_{cb}) 種類と本数 名 の数) (mm) (mm) (mm) (MPa) (mm) (N/mm^2) (%) (%) (σg∕σcb) 2−¢19~ 200 A57 19 75~350 0.4~1.1 100~180 15.8~35.0 30~40 2−¢25, 345 1.98~2.25 0 0 \sim 360 1-*ф*22 H84 300, 700 1.2, 2.8 130 27.6 37 379 1.77 0 ٥ 2 250 2-D19 K88 2 600 150 300 24.4 30 2-D19 650 1.28 0 0 2 300, 600 1.5, 2.0 T89 2 34.7, 36.1 5-D23 2.42 200 400 50 950 0 0 35.5, 38.8 30, 50 3-D16 0, 0.07, 0.14 Y03 5(2)450 1.5 200~300 300 490 1.11~1.66 0.26

表-1 試験体一覧

※tb:引張緣一引張側鉄筋重心距離

図-5では、(1)および(2)のいずれの時点でも 剛性低下がみられるが、(2)の時の方が顕著であ る。また(1)時点では、図-6で示すように、Y 方向相対変位が 0.02mm 以下であるので、実験で は目視によるせん断ひび割れの確認が困難であ ると推測される。したがって、本研究では Y 方 向相対変位が 0.03mm を越えた時点をせん断ひ び割れ発生時と判定することにした。









図-5 荷重-変形関係とひび割れ図







2.4 コンクリート引張特性についての検討

コンクリートの引張塑性は、曲げ強度と引張 強度の関係で示されるように、曲げひずみ勾配 の存在によって曲げひび割れ発生荷重に影響を 与える。一方、曲げひび割れの発生はひび割れ 周辺の応力状態と関連してせん断ひび割れの発 生に影響すると考えられるが、曲げひずみ勾配 がコンクリートの引張塑性に及ぼす影響度は、 梁の引張縁では大きく、せん断応力が卓越する 梁中央部では小さいと推測される。したがって 本解析では、コンクリートの引張応力ーひずみ 特性として、 σ_x 後の塑性ひずみ量が、梁引張縁 から中立軸位置の間で ε_{cr} ~零へ線形的に減少す るモデルを用いることとした。

図-7に、 $_{s}Q_{cr}$ に及ぼすコンクリート引張特性の影響を示す。同図凡例において用いたコンクリート引張特性(σ_{b} 型, σ_{s} 型)およびプレストレス力導入の有無(PRC, RC)を示している。なお、引張特性を決定する際、 σ_{b} および σ_{s} は、既往研究に実験値が示されている場合にはその値を、示されていない場合には式(1)⁹⁾および式(2)¹⁾による算定値を用いた。同図によると、前者の解析値は実験値を大きく評価するが、後者では実験値をほぼ±20%の精度で推定できており、 $_{s}Q_{cr}$ の推定には本報での引張塑性の考慮方法が有効であると考えられる。したがって、以下の諸検討に当たっては図-2(b)の σ_{s} 型の引張特性を採用することとする。

$$\sigma_{tb} = 0.56 \sqrt{\sigma_{cb}} \qquad \cdots \cdots \vec{\mathfrak{X}}(1)$$
$$\sigma_{ts} = 0.33 \sqrt{\sigma_{cb}} \qquad \cdots \cdots \vec{\mathfrak{X}}(2)$$



図-7 Q_{cr} に及ぼす引張特性の影響

3. 解析方法の妥当性

図-8は解析による。*Q*_{cr}推定の妥当性の検討 について示したものである。図中, **RC**部材につ いては, 荒川式²⁾による計算値も併記し, 解析値 と比較している。

 sQ_{cr} の低い試験体に対して多少のばらつきがあるものの、実験値と解析値および計算値を比較した結果は、それぞれ概ね実験値の $\pm 20\%$ の範囲内であり、ほぼ同程度の精度であることがわかる。よって、本解析法は $_sQ_{cr}$ 推定に関して十分妥当なものと判断される。



図-8 ₂Q_c 推定の妥当性検討

4. 各種要因の検討

4.1 解析概要

2章において記述した試験体 Y03 と同じ断面, 寸法および載荷方法を持つ試験体を用いて,梁 の $_{s}Q_{cr}$ に及ぼす各種要因の影響を本 FEM 解析に よって調べた。図-9に解析対象試験体の概要 を,表-2に取り上げた解析要因と水準を示す。



図-9 解析対象試験体の概要

表-2 解析要因一覧

| 解析要因 | パラメータ | | |
|--|--|--|--|
| シアスパン比 a/d | 0.75,1.0,1.5,2.0,2.5,3.0,3.5 | | |
| コンクリート引張強度 σ _t (N/mm ²) | 0.25,0.5,0.75,1.0,1.25, 1.5,2.0,2.5,3.0 | | |
| プレストレスレベル _g / σ _{cb} | 0,0.02,0.04,0.06, 0.08,0.10,0.12,0.14 | | |

4.2 解析結果および考察

(1) シアスパン比 a/d の影響

試験体 Y03 と同じコンクリート材料特性を持 ち, σ_g / σ_{cb} が0である試験体について, ${}_{s}Q_{cr}$ に 及ぼす a/d の影響を調べた。図-10は異なる a/dにおけるせん断ひび割れ性状を比較したもの である。a/d が 0.75 ではせん断区間の中央に斜張 ひび割れが発生した。1.0 では引張鉄筋位置まで 曲げひび割れが入った後,ひび割れが斜めに進 展したが,曲げひび割れが引張鉄筋を横切って いないことから斜張ひび割れであると判断した。 a/d が 1.5 以上では曲げひび割れが主筋を横切っ た後にひび割れ方向が斜めとなる,曲げせん断 ひび割れが発生した。

図-11は a/d が異なるときの Q_{rr} の変化の 状況を調べたものである。また、比較のため図 中に荒川式による計算値も示している。同図の 凡例のうち, (a)~(c)は図―10に示すようなせ ん断ひび割れモードを表し、(a)は斜張ひび割れ モード,(b)は引張鉄筋位置までの曲げひび割れ から進展する斜張ひび割れモード,(c)は曲げせ ん断ひび割れモードとしている。 Q_{cr} は, a/d が 小さくなるにしたがって増大する傾向となった。 特に a/d が 0.75 および 1.0 では、1.5 以上と比較 して急激に $_{_{c}}Q_{cr}$ が増大しているが、これはせん 断ひび割れモードの違いによるものと考えられ る。また、1.5 以上についても Q_{rr} は a/d が小さ くなるにしたがって増大している。これは, a/d が大きいほど曲げひび割れ発生時せん断力が小 さくなるので、それに連続する曲げせん断ひび 割れ発生荷重も小さくなったものと推測される。 荒川式による計算値と解析値を比較すると, a/d が 0.75 において解析値が計算値を大きく上回っ ていることがわかる。荒川式が対象にするのは

(c)モードの $_{s}Q_{cr}$ であって、(a)モードの $_{s}Q_{cr}$ は推 定できないため、解析値を下回ったと考えられ る。

(2) コンクリート引張強度 σ_t の影響

試験体 Y03 と同じせん断区間(a/d=1.5)を持ち, σ_g / σ_{cb} が0である解析対象梁を用いて, ${}_{s}Q_{cr}$ に 及ぼす σ_t の影響を調べた。なお、コンクリート の材料特性を決定する際に用いる σ_{cb} は、式(2) に σ_t を代入して求めることとした。

図-12は σ_t が異なる時の $_{s}Q_{cr}$ の変化の状況 を調べたものである。なお、同図の横軸には、 σ_t と式(2)から得られる σ_{cb} を併記し、解析結果での せん断ひび割れモードは、図-10の(a)および (c)で表した。

 ${}_{s}Q_{cr}$ は σ_{t} が大きくなるに従って増大する傾向 がみられたが、その増加率にはせん断ひび割れ モードが影響した。すなわち、 σ_{t} が 1.00(N/mm²) 以下ではせん断ひび割れモードは(a) モードと なり、図-11でみられたように、比較的大き な増加率を示した。これに対し、1.25(N/mm²)以 上では(c) モードとなり、 σ_{t} の増加に対し緩やか に増大した。せん断ひび割れモードが σ_{t} の増大 に対しこのように変化するのは、コンクリート が高強度になるほど引張強度に対する曲げ強度 の比が小さくなるためと推測されるが、既往の 研究¹⁰⁾でもこれら強度の相対関係は明確になっ ておらず、本解析で σ_{t} の違いによりせん断ひび 割れモードが変化した理由は明らかではない。

(3) 平均プレストレスレベル σ_s / σ_{cb} の影響

試験体 Y03 と同じせん断区間(a/d=1.5),およ びコンクリート材料特性を持つ試験体について, ${}_{s}Q_{cr}$ に及ぼす σ_{g}/σ_{cb} の影響を調べた。図-13 は、 σ_{g}/σ_{cb} が異なるときの ${}_{s}Q_{cr}$ の変化の状況を 調べたものである。図中の(b)および(c)は図-1 0に示すようなせん断ひび割れモードを表して おり、 σ_{g}/σ_{cb} が 0.10 以下では(c)モード、0.12 以上では(b) モードとなった。これは、 σ_{g}/σ_{cb} が 高くなるほど中立軸が下がること、引張縁にか かる力がプレストレスにより相殺されて曲げひ び割れが発生しにくくなることに起因すると考 えられる。また、 σ_g/σ_{cb} が高くなるにしたがっ て $_sQ_{cr}$ もほぼ直線的に増大する傾向となり、前 述したせん断ひび割れモードの違いによる $_sQ_{cr}$ の増加率の違いは明確でない。これは、 σ_g/σ_{cb} が高くなるにしたがって徐々に中立軸が下がる ため、(c)と(b)モードの境界が曖昧になったため と考えられる。





図-11 $_{s}Q_{cr}$ に及ぼす a/d の影響 (σ_{t} =3.0, σ_{e} / σ_{cb} =0 の場合)





図-13 $_{s}Q_{cr}$ に及ぼす σ_{s}/σ_{cb} の関係 (σ_{r} =3.0, a/d=1.5の場合)

5. まとめ

逆対称荷重を受ける PRC~RC 梁のせん断ひ び割れ強度について, FEM 解析による検討から 以下の知見を得た。

- 1)コンクリートの引張特性として、引張強度後の塑性ひずみ量が梁断面引張縁から中立軸位置の間で引張側最大強度時ひずみ(*ε_c*)から零に漸減するモデルを用いることで、せん断ひび割れ発生荷重(*sQ_c*)の解析値が実験値をよく推定できることを示した。
- 2)せん断区間における梁せい方向相対変位の最 大値が、目視による判別限界を考慮した値で ある 0.03mm を越えた時点をせん断ひび割れ 発生時と判定することで、_sQ_{cr}の解析値が実 験値をよく推定できることを示した。
- 3)本 FEM 解析による_sQ_{cr}の推定は,荒川式と同 程度の推定精度を有することを示した。
- *Q_{cr}*は、シアスパン比 a/d が小さくなるほど増 大する傾向にあり、a/d が小さいときは特にせ ん断ひび割れモードの影響を受けて急激に増 大することが推測された。
- 5) _sQ_{cr}は、コンクリート引張強度 σ_iに対して増 大するが、その増加率はせん断ひび割れモー ドによって異なることが推測された。
- 6) ${}_{s}Q_{cr}$ は、平均プレストレスレベル σ_{g}/σ_{cb} に 対して直線的に増大する傾向にあることが 推測された。

謝辞

(株)トータル・インフォメーション・サービスには

種々ご配慮いただいた。付記して謝意を表す。

参考文献

- 日本建築学会:鉄筋コンクリート造建造物の靭性保証型耐震設計指針・同解説,pp.142, 1999
- 2) 荒川卓:鉄筋コンクリートはりのせん断抵 抗に関する研究、日本建築学会論文報告集, pp.437-440, 1960
- 3)小島一高,坂田博史,中塚佶:プレストレスト (鉄筋)コンクリート曲げ部材の斜めひび割れ 荷重に関する解析的検討,日本建築学会大 会学術講演梗概集,pp.791-794,2005
- 4) 荒川卓,大野和男:新載荷法による鉄筋コンクリート梁の剪断抵抗について,日本建築学会論文報告集,pp.581-584,1957
- 5) 松崎育弘, 平山明, 小林淳彦, 酒井正美: ア ンボンド工法を用いたプレストレスト鉄筋コンク リート部材のせん断抵抗および変形性状に関 する実験研究, 日本建築学会大会学術講演 梗概集, pp.1683-1684, 1984
- 6) 黒正清治,林静雄,小林克己,武居泰:鉄
 筋コンクリート梁のせん断伝達に関する
 実験研究,コンクリート工学年次論文報告
 集, Vol.10, No3, pp645-650, 1988
- 高木仁之,奥出久人,新田隆雄:せん断補 強筋の強度による梁のせん断耐力,コンク リート工学年次論文報告集, Vol.11, No2, pp75-80, 1989
- 初瀬圭児,大野義照,中川隆夫:RC及び PRC梁のせん断ひび割れ幅,コンクリー ト工学年次論文報告集,Vol.25,No2, pp433-438,2003
- 日本建築学会:鉄筋コンクリート構造計算 基準・同解説, pp54, 1999
- 10) 陣内浩, 桝田佳寛, 早川光敬, 並木哲: 180N/mm²クラスまでの高強度コンクリートの各種強度と長期力学特性, Cement Science and Concrete Technology, No57, pp.428-435, 2003