

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}・中塚侑^{*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：せん断ひび割れ、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_b)を用いたモデル(以下 σ_b 型という)と、図-2(b)のように引張強度(σ_u)後に引張塑性域を考慮したモデル(同 σ_u 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_u)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。

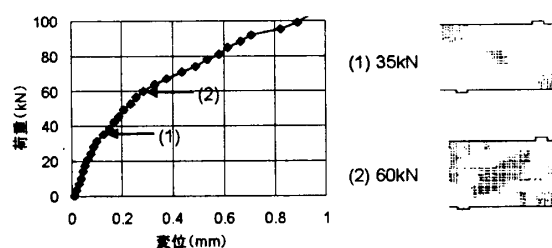
解析における分割要素は横×高さが 15mm×20mm 程度になるように設定し、解析は荷重増分を $\Delta P=5(kN)$ で行った。

2. 解析方法の概要

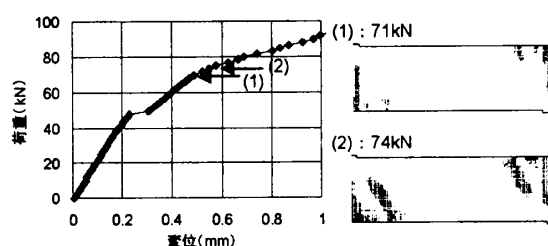
2.1 解析仮定

-
- | | |
|--------------------------------|-------|
| *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 工修 | (正会員) |

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)の時のほうが顕著である。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を越えた時点を生断ひび割れ発生時と判定することにした。



(a) 試験体 A57, $a/d=0.4$



(b) 試験体 Y03, $a/d=1.5$

図-5 荷重-変形関係とひび割れ図

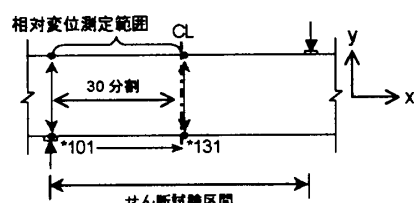
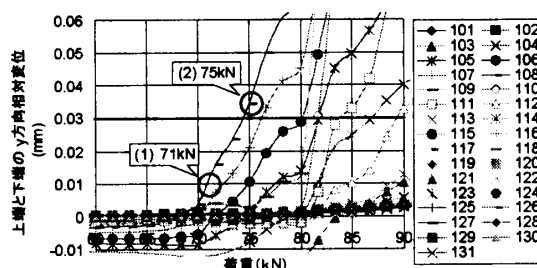


図-6 Y03 試験体の Y 方向相対変位
(Y03, $a/d=1.5$)

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-ひずみ特性として、 σ_{cr} 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、 sQ_{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_{tb} 型, σ_{ts} 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_{tb} および σ_{ts} 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)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、 sQ_{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_{ts} 型の引張特性を採用することとする。

$$\sigma_{tb} = 0.56\sqrt{\sigma_{cb}} \quad \cdots \cdots \text{式(1)}$$

$$\sigma_{ts} = 0.33\sqrt{\sigma_{cb}} \quad \cdots \cdots \text{式(2)}$$

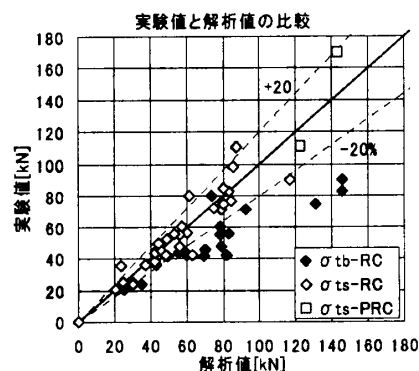


図-7 sQ_{cr} に及ぼす引張特性の影響

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。

Q_{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±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 Q_{cr} 推定に関して十分妥当なものと判断される。

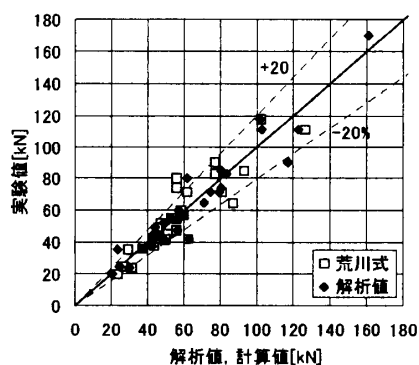


図-8 Q_{cr} 推定の妥当性検討

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 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。

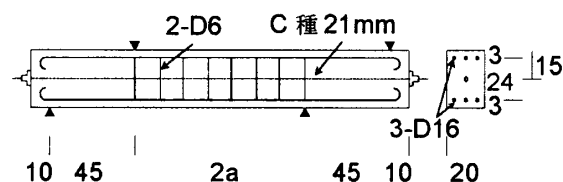


図-9 解析対象試験体の概要

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 σ_g / σ_{cb}	0.0, 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、 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_{cr} 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 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_{cr} 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 ${}_sQ_{cr}$ であって、(a)モードの ${}_sQ_{cr}$ 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、 ${}_sQ_{cr}$ 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_{ω} 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 ${}_sQ_{cr}$ 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_{ω} 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。

${}_sQ_{cr}$ 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 $1.00(\text{N/mm}^2)$ 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、 $1.25(\text{N/mm}^2)$ 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_g/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、 ${}_sQ_{cr}$ 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 ${}_sQ_{cr}$ 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-10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。

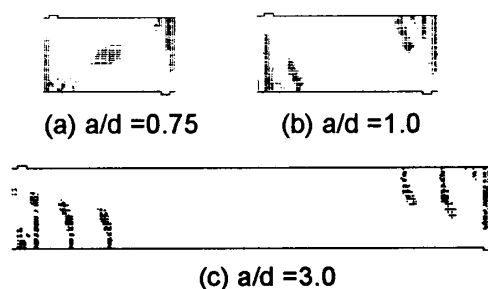


図-10 せん断ひび割れ性状
($\sigma_t=3.0$, $\sigma_g/\sigma_{cb}=0$ の場合)

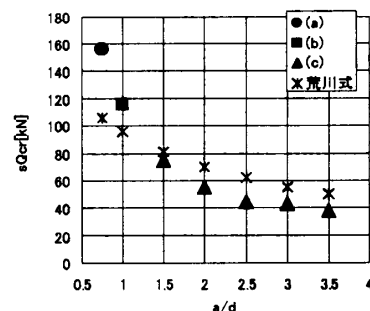


図-11 ${}_sQ_{cr}$ に及ぼす a/d の影響
($\sigma_t=3.0$, $\sigma_g/\sigma_{cb}=0$ の場合)

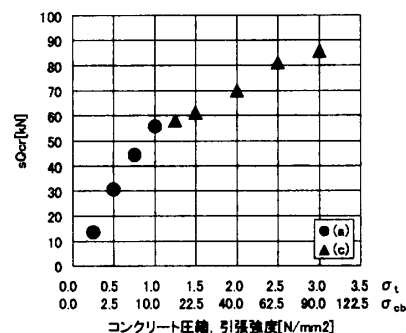


図-12 ${}_sQ_{cr}$ に及ぼす σ_t の影響
($a/d=1.5$, $\sigma_g/\sigma_{cb}=0$ の場合)

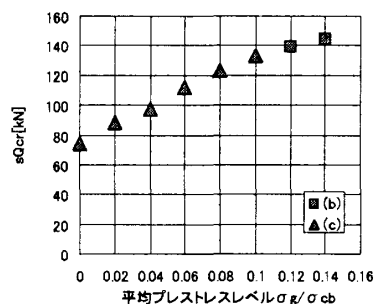


図-1.3 Q_{cr} に及ぼす σ_g / σ_{cb} の関係
($\sigma_f = 3.0$, $a/d = 1.5$ の場合)

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_{cr})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(Q_{cr})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 を越えた時点を生断ひび割れ発生時と判定することで、 Q_{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 Q_{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。
- 4) 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) Q_{cr} は、コンクリート引張強度 σ_f 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) 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

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の靱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, 中塚佑: 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, pp.645-650, 1988
- 7) 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, pp.75-80, 1989
- 8) 柳瀬圭児, 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, pp.433-438, 2003
- 9) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説, pp.54, 1999
- 10) 陣内浩, 榊田佳寛, 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