

# ひび割れを有する RC 床版の押し抜きせん断挙動に関する実験的検討

コンクリート研究室 佐伯奈都美

指導教官 下村匠 助教授

## 1. はじめに

先行ひび割れを有する RC はり部材の耐荷機構に関しては、せん断耐力および靱性が健全な部材よりも優れるケースがあることが既往の研究にて報告され、そのメカニズムについてもタイドアーチの耐荷機構を用いて解明されている。一方、先行ひび割れを有する RC 床版の場合、面部材の押し抜きせん断耐荷機構自体が複雑な現象であるとともに、腐食ひび割れや ASR による膨張ひび割れ等のクラックパターンの違いによりもたらされる耐荷性能の優劣の報告が様々となっており、未だにその耐荷機構には不明瞭な点が多い。

本研究では、ひび割れ断面の形状および方向性による影響を受けた RC 床版の押し抜きせん断挙動について載荷試験を行い、既往の研究報告とともに検討を行いその応力伝達機構を明らかにすることを目的とする。

## 2. 実験概要

### 2.1. 試験体概要

先行ひび割れを有する試験体は、ひび割れを模擬したプレート部材を部材内部に埋め込み作製した。試験は 2 シリーズで構成し、第 1 シリーズではひび割れ断面形状およびひび割れの方向性の影響について検討をするため、プレートを平板と波板の 2 種類を使用し、配置方向を水平、垂直の 2 方向として計 4 体を作製した。第 2 シリーズでは第 1 シリーズで得られた知見を基に、2 方向の先行ひび割れの及ぼす影響と、ひび割れ位置の影響について検討するために計 3 体作成した。

試験体の諸元は、各耐力を土木学会標準示方書に基づき算定し、押し抜きせん断破壊が先行するように決定した。リファレンス試験体概要図を図 1、試験体概要を表 1、プレート配置概要を表 2

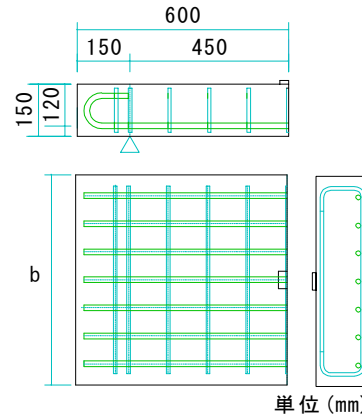


図 1 試験体概要

表 1 試験体諸元

シリーズ	1	2
$b$ (mm)	600	900
$L$ (mm)	1200	
$l$ (mm)	900	
$h$ (mm)	150	
$d$ (mm)	主筋	120
	配力筋	133
$p$ (%)	主筋	2.07
	配力筋	0.48
$f_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	24	
$f_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	370	

表 2 プレート配置概要

試験体名	形状	方向	位置
REF1	-	-	-
PL	平板	縦	載荷板端から $d/2=60\text{mm}$
W1-V	波板	縦	載荷板端から $d/2=60\text{mm}$
W1-H	波板	横	引張鉄筋上面
REF2	-	-	-
W2-1	波板	縦	載荷板端から $d/2=60\text{mm}$
W2-2	波板	縦	載荷板端から $d/4=30\text{mm}$ ( $3d/4=90\text{mm}$ )

に示す。各シリーズは試験体幅のみ変更しているが、その他の諸元は同値である。

### 2.2. 載荷概要

載荷は 2 辺支持で  $50 \times 50\text{mm}$  の載荷版により一点集中載荷で行った。計測項目は、鉄筋ひずみ、中央および支点変位、プレートを配置した試験体はひび割れ断面におけるせん断変形量を把握するため、非接触変位計を用いてプレート中央におけるひび割れ幅とせん断変位量の計測を行った。試験終了後、第 1 シリーズおよび W2-2 試験体は、試験体を切断し内部のひび割れ状況の観察を行った。

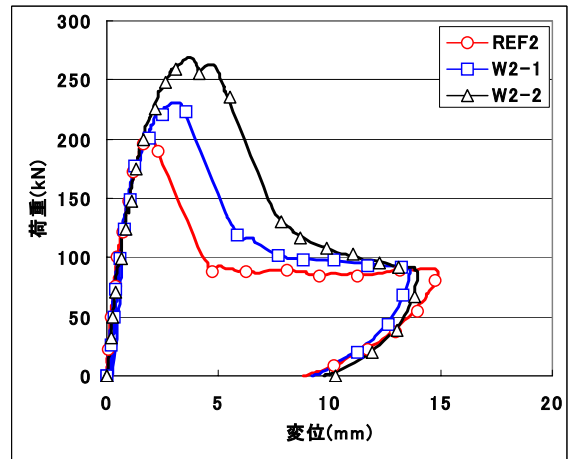
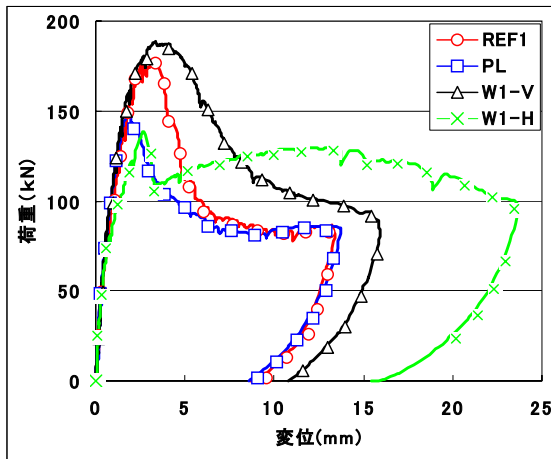


図2 荷重-変位関係 (左図：第1シリーズ, 右図：第2シリーズ)

### 3. 試験結果

#### 3.1. ひび割れ形状の影響

図2, 図3に各シリーズの荷重-変位関係および切断面ひび割れ状況を示す。

平板を垂直に配置したケースでは耐力がリファレンスの約2割程度低下した。これは既往の研究と同じ傾向を示している。一方、波板を垂直に配置したケースでは耐力の向上が見られた。

PLのひび割れ状況では、せん断ひび割れは模擬ひび割れ面に阻害され、その後プレートに沿って進展している。W1-Vでは載荷点から模擬ひび割れへ進展する斜めひび割れ以外にも、模擬ひび割れ面の外側に進展する斜めひび割れと、載荷板下端部と模擬ひび割れ端部を結ぶ経路にひび割れが確認できる。

これは、PL試験体ではひび割れ発生とともにひび割れ面のせん断変位が増加するが、波板形状の場合凹凸部の接触面にせん断伝達力が生じ、部材の変形による耐力低下に抵抗したためと考えられる。波板の場合には凹凸部で大きなせん断伝達力が働くために、最終的に載荷点と波板端部に働く引張力が卓越して新たなひび割れが発生し、破壊に至ったものと推測される。

#### 3.2. ひび割れ方向の影響

W1-Hはシリーズ1の中で最も耐力の低下が著しい試験体となった。しかしながら、最大荷重以降の挙動が他の試験体と異なり、試験体の耐荷機

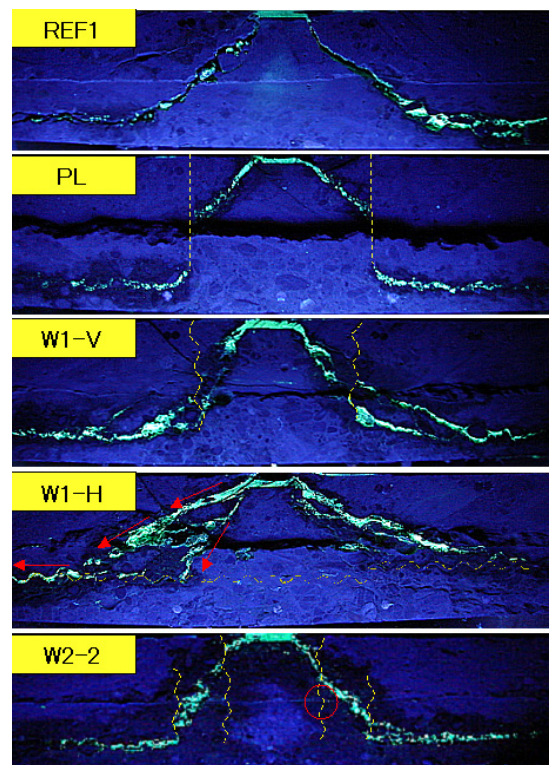


図3 切断面ひび割れ図

構が変化したと考えられる。試験体内部では載荷点近傍からひび割れが発生しており、これらがアーチクラウンを形成することによって、荷重低下後の軟化がタイドアーチ的耐荷機構へと遷移したと推測される。このようなひび割れ状況は、水平方向に亀裂を有するはり部材と類似している。

#### 3.3. ひび割れ位置の影響

第2シリーズの結果より、先行ひび割れの距離が載荷点に近いほど耐力は向上している。既往の

研究との比較により、ひび割れ面形状が平滑のケースとは逆の関係性となることが示された。

W1-V および W2-2 のひび割れ状況より、ひび割れ位置  $X$  が荷点に近ければひび割れ面を貫通するひび割れが主要ひび割れなり、 $X$  が荷点よりも遠ければ荷板端とひび割れ端部に生じるひび割れが主要なひび割れとなっている。

模擬ひび割れ面に作用するせん断伝達力の大きさにより、ひび割れ面を介して進展する斜めひび割れと、荷点端部とひび割れ端部を結ぶ経路のどちらかのせん断耐力の劣る経路で破壊が生じる。これらの経路は先行ひび割れの位置により耐力の大小関係が入れ替わるため、どちらの経路で破壊するかの見極めが必要となる。

#### 4. 押し抜きせん断耐力評価法

##### 4.1. 破壊経路の判定

本研究の試験で明らかとなった範囲内では、先行ひび割れを有する RC 床版の押し抜きせん断破壊では、終局を決定する破壊経路として少なくとも以下の 4 点について検討しなければならない

- ① 先行ひび割れ亀裂面で発生するせん断耐力を含む押し抜きせん断耐力(経路 A)
- ② 先行ひび割れ面を介して発生するひび割れのせん断耐力 (経路 B)
- ③ 荷板端—亀裂面端部に生じるひび割れのせん断耐力 (経路 C)
- ④ 先行ひび割れ面上ですべりが生じるときのせん断耐力 (経路 D)

これらの検討を行うにあたり、既往の研究より提案されている前田・松井の式、仲山・中村の算定式を用いた。仲山・中村の式は前田・松井の式に貫通ひび割れの耐力への影響度を考慮したものであり、PL 試験体の耐力は仲山・中村の式を用いて評価可能である。

##### 4.2. ひび割れ面に生じるせん断耐力

せん断伝達力が働く有効面積の定義を行う。ひび割れ発生後、部材を図 4 に示すように ABC の 3 要素として考えると、要素 A の部分は斜めひび

割れにより部材から分離されるので、斜めひび割れ以降の残存耐力には寄与しないものと仮定できる。荷点から発生する斜めひび割れの発生角度を  $45^\circ$  と仮定すると、模擬ひび割れ配置高さ  $d$  と要素 A の高さ  $X$  の差分  $h'$  がせん断伝達力の有効高さとなる。幅方向は、1 方向の場合は斜めひび割れが模擬ひび割れに到達したときの伝達幅を有効幅とした。2 方向に模擬ひび割れを配置した場合には、ひび割れ間隔内で十分なせん断伝達力が働くとして全域を有効幅とした。

以上より仲山・中村の式に亀裂面によるせん断伝達耐力項  $V_{c wd}$  を加え式①とした。

$$P_{call} = \tau_{s \max} \cdot A_s + (1/2) \cdot \sigma_{t \max} \cdot A_d + V_{c wd} \quad \text{①}$$

せん断伝達耐力には土木学会標準示方書による算定式を採用し、鋼製波板を介したせん断強度は通常のコンクリートに対して約 2 倍になることが明らかとなっているため、2 倍の値とした。

##### 4.3. 経路 B に関する考察

ひび割れ B は模擬ひび割れ面を介して伝達される応力により発生するひび割れである。ひび割れ B を、模擬ひび割れ面をひび割れ発生起点とするせん断破壊であると考え、ひび割れ B の発生荷重は模擬ひび割れ位置を荷板端部とする押し抜きせん断耐力と等価であると仮定した。また、無荷側には損傷が生じていないため、模擬ひび割れに生じるせん断力が、模擬ひび割れ高さ全域に伝達されるとして、耐力算定には有効高さは健全時と同値を使用することとした。

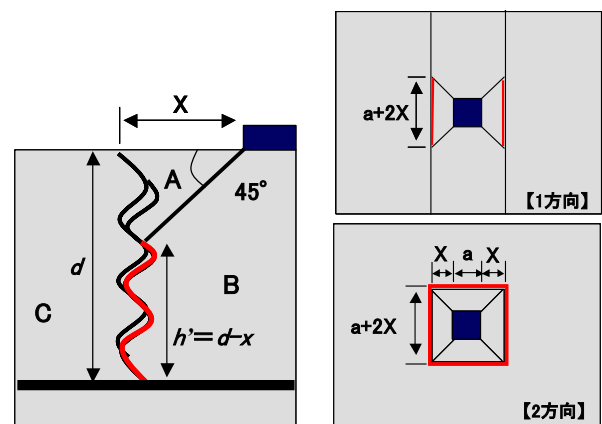


図 4 せん断伝達面有効域

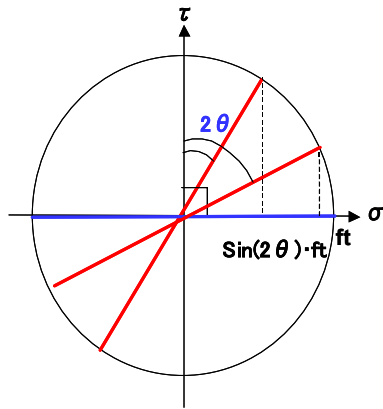


図5 モールの応力円による変換

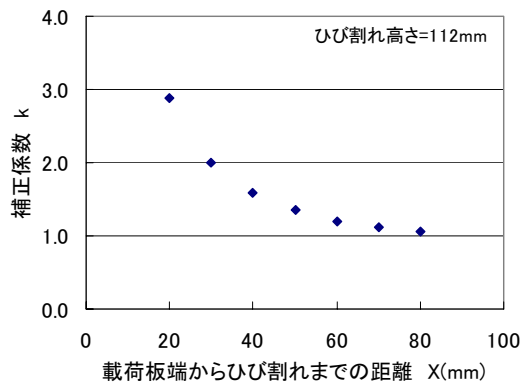


図6 ひび割れ位置 X と補正係数 k の関係

#### 4.4. 経路 C に関する考察

松井による押し抜きせん断耐力算定式では、押し抜きせん断破壊時におけるコンクリートの圧縮抵抗領域は、中立軸位置により決定されることからひび割れ C の破壊荷重を推定するために初等はり理論を用いた検討を行った

ひび割れが通常のせん断ひび割れ発生経路 A ではなくひび割れ C の経路で発生するケースでは、応力の作用軸を A から C に変換して得ることができると考えられる。中立軸高さにおける作用応力を求めるために、図 5 のモールの応力円を用いて軸の変換を行った。ひび割れ C の作用軸の傾き  $\theta$  はひび割れ位置 X とひび割れ端部からの高さから決定する。斜めひび割れの発生応力度は任意方向において、常に一定とし、角度  $\theta$  において引張応力度が  $ft$  に達する応力に補正することにより得られる。この補正値を補正係数  $k$  とするとひび割れ位置 X との関係は図 6 のようになる。ひび割れの距離 X が半分になれば経路 C のコンク

表 3 計算耐力による破壊経路の判定

試験体名	実験値 kN	経路A kN	経路B kN	経路C kN	経路D kN
PL	149	-	-	-	117
W1-V	188	370	251	215	113
W2-1	231	455	341	231	37
W2-2	269	455	274	333	25

リートのせん断耐力は約 2 倍になることがわかる。以上より、補正係数  $k$  を用いたひび割れ C の押し抜きせん断耐力は式②となる

$$P_{cal2} = k \cdot \tau_{smax} \cdot A_s + (1/2) \cdot \sigma_{tmax} \cdot A_d \quad \text{②}$$

#### 4.5. 破壊経路の判定

各試験体の検討結果を表 3 に示す。PL のみ経路 D で破壊が生じたため、波板シリーズについて経路 ABC の判定を行う。これらの最も耐力の小さい経路で破壊が生じるものとして破壊経路を判定した。

ひび割れが凹凸面を有する場合、亀裂面に生じるせん断耐力が過大となり、この面での破壊は困難となることがわかる。これらの計算結果を各試験体のひび割れ状況(図 3)と照合すると、W1-V では経路 B, C 上にひび割れが確認できるが、致命的な破壊となったのは経路 C であると断定することができる。W2-2 ではせん断ひび割れが経路 B のみに発生しているため、表の判別結果と一致する。W2-1 では試験体を切断していないため実際の破壊経路は未確認だが、経路 C で破壊が生じていると考えられる。ただし、この経路判定は 1 方向配置した場合の破壊経路と一致している。

#### 5. まとめ

先行ひび割れを有する部材の耐力は、ひび割れ面形状やひび割れ位置の影響を大きく受け、複数の破壊経路が形成されることが。試験により得られた。それらの評価は破壊経路の候補ごとにそれぞれ耐力推定を行い、破壊過程を含めた判別法によって概ね整理が可能であることが示された。しかしながら、本研究で提案する手法の適用範囲と妥当性の検証は不十分であり、今後の検討課題としたい。