# 論文 X線造影法を併用した局部載荷重下のコンクリートの性状に関する 検討

子田 康弘\*<sup>1</sup>·原 忠勝\*<sup>2</sup>·大塚 浩司\*<sup>3</sup>

要旨:本研究では、コンクリートの圧縮ストラットが局部載荷重下の性状に類似と仮定し、 支圧強度試験にX線造影法を併用し、ひび割れの発生や伸展、応力の伝達性状について実験 的な検討を行ったものである。実験では、通常の支圧強度試験より、支圧応力性状と弾性論 による解析の比較を行い、次に、X線造影法を併用した支圧強度試験から、ひび割れ様相の 可視化による検討を行った。この結果、支圧応力状態が弾性解析でも評価でき、また、ひび 割れが最大引張応力位置で生じ、さらには、ひび割れ発生後の破壊が載荷板によって、割裂 的なものと、くさびの形成が顕著なモードに大別されることを述べた。

キーワード: 圧縮ストラット, X線造影法, 支圧強度試験, ひび割れ性状

## 1. はじめに

せん断力が作用する RC 部材や PC 部材は, 応力の流れが複雑な領域(Disturbed Region)を 形成する。これら部材内部の応力の流れに着目 する方法としてストラットータイモデル<sup>1)</sup>があ る。このモデルは,曲げを受ける(B-region) 断面や部材と異なり,載荷重による力の流れが 非線形となる部材や,ディープビームのような 載荷点と支点の間が荷重伝達経路となる部材に 対して,視覚的に解析や設計が行える方法とし て盛んに研究が行われるようになった。

このうち, 圧縮力を分担するコンクリートの ストラットは, ディープビーム的な RC 部材の 場合, 載荷点や支点の荷重幅がコンクリートの 面積に比べて小さいために起こる局部応力状態 の変化によるものである。また, 圧縮ストラッ トの耐荷能力については, 低減係数を用いた定 式化<sup>1)</sup>や, FEM による検討<sup>2)</sup>が行われているが, 耐荷力算定式の整合性を向上させるには, 未だ 検討の余地が残されているように思われる。

本研究では、Adebar ら<sup>3</sup>と同様、コンクリー トの圧縮ストラットが局部載荷重下の応力状態 に類似と仮定し、圧縮ストラットの性状につい て実験的な検討を行った。ここでは、まず、2 次元のダブルパンチ法<sup>4)</sup>(以下 DP 法と称す) による実験を行い、弾性解析の適用性と圧縮ス トラットの耐荷性状に対する支圧強度試験の有 用性を検討した。次に、X線造影法を併用した 支圧試験<sup>5)</sup>(2 次元シングルパンチ法、以下 SP 法と称す)によるひび割れ検出を試み、局部載 荷重によるひび割れ発生位置や伸展状況、およ び破壊性状について検討した結果を述べたもの である。

## 2. 実験概要

#### 2.1 本研究の試験体形状

本実験では、圧縮ストラットの性状を図-1 のように仮定し、矩形のコンクリートブロック を試験体とし、載荷板を介して局部載荷重を作 用させたものである。

#### 2.2 DP 法による支圧強度試験方法

載荷方法は、図-2(a)に示すように、試験 体上下面部より載荷する DP 法で、破壊までの 漸次増加荷重とした。また、試験体には、コン クリートのひずみ分布を計測するために、鉛直 方向および水平方向にゲージを貼付した。試験

\*1日本大学 工学部土木工学科助手 工修 (正会員) \*2日本大学 工学部土木工学科教授 工博 (正会員) \*3東北学院大学 工学部環境土木工学科教授 工博 (正会員) 体の作製には、粗骨材の最大寸法  $G_{max}=20mm$ のレディーミクストコンクリートを使用した。 試験体は、 $\mathbf{a} - 1$ に示すように、高さ×幅を 500mm×250mm、1000mm×500mm、1500mm× 750mm とした。また、載荷板幅 b と試験体高さ H の比 b/H を 0.06、0.12、0.18 とした、合計 9 条件である。試験日材齢のコンクリート強度は、 圧縮強度  $\mathbf{f}_{c}=24.4N/mm^{2}$  ( $\mathbf{E}_{c}=21.3kN/mm^{2}$ 、 $\nu$ =0.190)、割裂引張強度  $\mathbf{f}_{r}=2.87N/mm^{2}$ である。

## 2.3 X線造影法による支圧強度試験方法

試験体には,粗骨材の最大寸法 G<sub>max</sub>=20mm のレディーミクストコンクリートを使用した。 試験日材齢のコンクリートの性質は,表-2に 示すとおりである。試験体寸法は,表-3に示 すように,試験体幅を B=200mm, 300mm,高 さ H=150mm, 300mm とした3条件に,載荷板 幅 b=50, 100mm の2条件をそれぞれ組合せた 合計7条件である。造影剤注入孔の位置は,図 -3に示すように,試験体上縁より10mm の位 置から試験体形状に応じて30mm と25mm 間隔 で設置した。載荷は,図-2(b)に示すように,

矩形コンクリートブロックの上面より支圧板を 介して載荷する SP 法に X 線造影法を併用した ものである。このうち X 線撮影は, X 線フィル ムを試験体に密着させ,照射距離を 500mm,管 電圧 120kV,電流 2mA,照射時間を 2 分 30 秒 とした。実験は, X 線用 CRT モニターで内部の 様子をリアルタイムで観察しながら,初期ひび 割れ発生までは漸次増加荷重とし,試験体に変 化が見られたところで荷重を保持し,撮影を行 い,撮影後再び載荷を行った。

表-1 DP 法の実験条件

	試験体寸法						
試験体名	H (mm)	B (mm)	b (mm)	t (mm)	b/H	H/B	B/b
50-25-3	500	250	30	150	0.06	2. 0	8. 33
50-25-6	500	250	60	150	0.12	2. 0	4. 17
50-25-9	500	250	90	150	0.18	2. 0	2. 78
100-50-6	1000	500	60	150	0. 06	2. 0	8.33
100-50-12	1000	500	120	150	0. 12	2. 0	4.17
100-50-18	1000	500	180	150	0. 18	2. 0	2.78
150–75–9	1500	750	90	150	0.06	2. 0	8. 33
150–75–18	1500	750	180	150	0.12	2. 0	4. 17
150–75–27	1500	750	270	150	0.18	2. 0	2. 78





図-2 実験概要

表-2 硬化コンクリートの性質

W/C	f' <sub>c</sub> (N/mm²)	E <sub>c</sub> (kN/mm²)	ν	f <sub>t</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	
	28. 5	24. 0	0. 194	2.83	
57	26. 7	22. 7	0. 167	2.76	

### 表-3 X線造影法の実験条件

試験体名	h (mm)	B (mm)	b (mm)	t (mm)	b/h	b/2h	
X15-30-5	150	300	50	70	0.333	0.167	
X15-30-10	150	300	100	70	0.667	0.333	
X30-30-5	300	300	50	70	0.167	0.083	
X30-30-10-1	300	300	100	70	0.333	0.167	
X30-20-5	300	200	50	70	0.167	0.083	
X30-20-10	300	200	100	70	0.333	0.167	
X30-30-10-2	300	300	100	70	0.333	0.167	



## 実験結果および考察

## 3.1 DP 法による実験結果

写真-1は, H=500mm 試験体の破壊状況を 示したものである。写真に示すように,局部載 荷重によるコンクリートの破壊は,載荷板幅 b によらず試験体中央に発生したひび割れによる 割裂的な破壊モードである。また,載荷板下に は,載荷板幅が大きくなるにしたがって,くさ び状のひび割れの形成がより明確に見られた。

図-4は、DP 法による最大荷重 P<sub>max</sub> と試験 体高さの関係を示したものである。図に示すよ うに、最大荷重は、試験体高さに関わらず、載 荷板幅が大きくなるにしたがって大きくなり、 b/H=0.06<0.12<0.18の順となった。

## 3.2 弾性解析による支圧応力分布の比較

図-5は、試験体表面に貼付したコンクリー トゲージによるひずみの測定結果(〇,□,△) と、Bleich の式<sup>®</sup>による計算結果を併せて示し たものである。なお、測定結果は、最大荷重の 約 50%のもので、H=500mm の結果を図(a)に、 また、H=1500mm の結果を図(b)に示した。ま た、坂ら<sup>®</sup>によれば、Bleich の式の適用に際し ては、水平方向ひずみには鉛直方向の影響、す なわち、ポアソン効果の影響を考慮すべきとの 指摘がなされている。したがって、ここでも、 計算に際してはポアソン比の影響を考慮した。

図-5に示すように、鉛直および水平方向の ひずみの測定結果は、若干のズレはあるが、お およそ計算値を満足する傾向にある。図に示す ように、鉛直方向のひずみは、試験体上面から 下方に行くにしたがって、ほぼ、均一なひずみ 分布となった。図-6は、試験体 100-50-12 に おける最大荷重までの実験値と計算値を比較し たものである。鉛直ひずみは、最大荷重付近ま で実験値と比較的一致する結果が得られた。ま た、水平ひずみは、載荷板下でバラツキがある が、その他の位置では、比較的良く一致する傾 向が示された。これらの結果から、局部載荷重 下のコンクリートの応力状態を求める手段とし て、Bleichの式の適用が可能と思われる。









図 - 5,6 に示したように,局部載荷重下の 応力状態を推定する方法として,Bleich 式の適 用が可能なことから,次に,これら弾性解析に 基づく応力分布よりストラット幅の検討を行っ た。二羽<sup>2)</sup>によれば,ディープビーム的 RC 部 材におけるストラット幅 W は,支圧板幅 b と 有効高さ d の関係として,W=b+0.3d なる直線 式を提案している。したがって,ここでも,二 羽式によるストラット幅と高さの直線関係に着 目し,ストラット幅の検討を行うこととした。 DP 法による局部載荷重下のストラット幅 W<sub>s</sub>の 検討は,鉛直方向の応力分布形状に着目し,図 - 7 に示すように,載荷点中央断面の水平方向 の引張応力分布の合力位置(y<sub>t</sub>)と,試験体高 さの中央断面(H/2)の2ケ所である。

ストラット幅の仮定は,図-5に示したよう に,試験体高さの中央断面の応力分布がほぼ等 分布であることに着目し,これら鉛直応力の合 力位置 eの4倍とした。また,水平方向の引張 合力位置 y<sub>t</sub>のストラット幅についても,鉛直方 向の応力は,この断面における合力位置 e<sub>t</sub>の4 倍の幅以上になると,かなり小さくなることか ら,4e<sub>t</sub>と仮定することとした。

これより, DP 法によるストラット幅は, 図 -7,8に示すように,二羽式を変形し, W<sub>s</sub>b と試験体高さ H の直線関係として比較検討し たものである。図-8に示すように, DP 法に よるストラット幅も,二羽と同様,試験体高さ とほぼ直線的な関係が得られた。また,本実験 結果の傾向は,載荷点に近い水平方向の引張応 力の合力位置 y<sub>t</sub>では小さく,試験体高さの中央



図 - 8 DP 法のストラット幅と二羽式の比較

断面に近づくにしたがって大きくなっている。 このことより,概略的には,DP法によるスト ラット幅も,ディープビームのストラット幅と 同様な関係にあると考えられる。換言すれば, DP法による支圧強度試験でも,圧縮ストラッ トの性状を検討する方法として有用な手段の一 つになるということである。しかし,ストラッ ト幅の概念をディープビーム等へ適用するには, 圧縮ストラットの耐荷能力も併せて検討する必 要があり,今後の検討課題としたい。

表-4 X線造影法の実験結果

試験体名	P <sub>cr</sub> (kN)	P <sub>max</sub> (kN)		
X15-30-5	183.2	196.0		
X15-30-10	250.0	280.2		
X30-30-5	215.0	220.0		
X30-30-10-1	269.5	326.0		
X30-20-5	176.0	185.5		
X30-20-10	265.5	269.5		
X30-30-10-2	300.0	315.5		

## 3.3 X線造影法によるひび割れ検出結果

X線造影法を併用した SP 法による支圧強度 試験は,試験体寸法によって,初期ひび割れの 発生から伸展の様子を撮影できた場合と破壊が 急激であり伸展状況の撮影ができなかった場合 があった。これら実験結果を表-4に示した。

図-9は、ひび割れ発生時の様相が観察され た試験体 X30-30-5 と X30-20-5 の初期ひび割れ 発生位置と Bleich による試験体中央の横方向応 力分布を比較したものである。図に示すように、 X30-30-5 試験体の場合、P<sub>cr</sub>=215.0kN の時、支 圧面から 2、3 本目の注入孔よりひび割れが発 生しているのが確認された。そのため、直ちに 撮影を行ったが、撮影後の写真には、図(a)に 示すように、ひび割れ発生位置より下方に向か ってひび割れが伸展していた。また、X30-20-5 試験体の場合も同様に、初期ひび割れは、

 $P_{cr}=176.0$ kN の時に支圧面から 2,3 本目の注入 孔よりひび割れが発生した。そして、これら初 期ひびれ発生は、横方向引張応力が最大となる 位置で、ほぼ、コンクリートの引張強度以上の 領域である。その後は、 写真 -2に示すよう に、ひび割れが十分伸展した後に最大荷重に達 した。また、載荷板下には、V 字状のひび割れ が生じており、くさびの形成が確認できた。

写真-3は、試験体 X30-20-10 のひび割れ様 相で、P<sub>cr</sub>=265.5kN で支圧面から 2 本目の注入孔 より下方にひび割れが伸展した。最大荷重時の ひび割れは、写真(b)に示すように、P<sub>max</sub>=269.5kN で載荷板下にくさびが形成され、そのくさびが 試験体にめり込むような様相を示した。







写真-2 X30-20-5 試験体のひび割れ様相



(a) P<sub>cr</sub>=265.5kN (b) P<sub>max</sub>=269.5kN 写真-3 X30-20-10 試験体のひび割れ様相

一方,これ以外の試験体 の場合,破壊が急激で,発 生から伸展に至るまでのひ び割れ様相を撮影できなか った。このため,これらの 試験体については,図-10 に示すように,最大荷重時 のひび割れ様相のトレース



図で示した。試験体 X30-30-10 の場合,図(a)に 示すように,載荷板下にくさびの形成が確認さ れたが,撮影に用いたフィルムサイズが適切で なかったため,全体的なひび割れは撮影できな かった。また,h=150mm とした試験体 X15-30-5 の場合,図(b)に示すように,短く,断続的鉛 直ひび割れが試験体下部まで発生した。試験体 X15-30-10 の場合は,図(c)に示すように,載荷 板端部のくい込みによると思われるひび割れが 発生した。これら高さが低い試験体の破壊は, 反力の影響が大きく,圧縮ストラットの破壊性 状とは異なるものと考えられる。

これらX線造影法を併用した結果から,載荷 幅が小さい場合,くさびの形成は生じるものの 中心より左右に広がる割裂的なひび割れを示す ことがわかった。また,載荷幅が大きくなると, 載荷板下に形成されたくさびが試験体中央に向 かってめり込むような性状が示された。このこ とより,局部載荷重を受けるコンクリートの破 壊は,2つに大別できる破壊モードが存在する ように思われる。

#### 4. まとめ

以上の結果をまとめれば,以下のようになる。

- (1)局部載荷重下におけるコンクリートの応力 分布は, Bleich による計算値と比較的よく一 致する傾向が示され,解析手法としての適用 が可能である。
- (2) ストラット幅の検討に用いた DP 法は,二羽 による数値実験の場合とほぼ同様な傾向とな り,有用な方法の一つになると考えられる。 しかし,圧縮ストラットの耐荷能力について



(b) X15-30-5 試験体 (c) X15-30-10 試験体 図-10 最大荷重時のひび割れ様相

- は、今後検討する必要がある。
- (3) X 線造影法による結果から,ひび割れは, 支圧応力が最大となる領域で発生し,また, 最大耐力は,ひび割れが十分伸展した時点で 生じることがわかった。さらに,破壊モード は,割裂的なものと,くさびの形成が顕著な ものの2つに大別できることが示された。

#### 参考文献

- Schlaich, J. et al. : Toward a Consistent Design of Structural Concrete, PCI Journal, Vol.32, No.3, pp.74-150, May/June 1987
- 二羽淳一郎:ディープビーム的鉄筋コンクリート 部材のせん断耐荷機構,東京大学学位論文,1983
- Adebar, P. et al. : Strut-and-Tie Models for The Design of Pile Caps : An Experimental Study, ACI Structural Journal V.87, No.1, pp.81-92, Jan.-Feb. 1990
- Chen, W. F. : Double Punch Test for Tensile Strength of Concrete, ACI Journal, Vol.67, No.12, pp.993-995, Dec. 1970
- 5) 日本建築学会:コンクリートの支圧強度(1),(2), 鉄筋コンクリートの終局強度設計に関する資料, PP.90-100, June 1987
- Bleich, F.: Der Gerade Stab mit Rechteckquerschnitt als Ebenes Problem, Der Bauingenieur, HEFT9-11, 1923
- 7) 坂静雄ほか:鋼棒使用ポストテンション型 PC の 定着応力に関する研究(第1報・2次元応力の場 合),日本建築学会論文報告集,第55号,pp.43-51, Feb. 1957