

# 論文 コンクリート強度分布および打重ね条件を考慮した RC 部材のせん断耐荷性能の評価

佐伯 慶悟<sup>\*1</sup>・森川 英典<sup>\*2</sup>・小林 秀恵<sup>\*3</sup>

**要旨:** RC はり部材において、コンクリート強度のばらつきやコールドジョイントなどの実施工により発生すると考えられる諸要因を考慮したせん断耐荷性能について実験的に評価を行い、さらにはコンクリート強度分布を考慮したせん断耐力評価式の提案を行った。実験の結果としては、その耐力は設計値を大きく上回る結果となり、その破壊モードは一部アーチ作用に移行し、複雑な挙動となった。また、耐力は支点側の強度の支配を強く受けることが分かった。さらに、実験結果の詳細な考察を行うため強度分布を考慮した RC はりの有限要素解析を行い、実験結果との比較により本解析手法の精度の検証を行った。

**キーワード:** コンクリート強度分布, 打重ね, コールドジョイント, RC 部材, せん断耐荷性能

## 1. はじめに

近年、劣化の進行したコンクリート構造物において脆性的な破壊形式であるせん断破壊の危険性が指摘されている。本研究では、実施工により発生するコンクリート強度のばらつきやコールドジョイントなどの諸要因をせん断耐荷性能および破壊機構と関連づけ、定量的に影響を評価することを目的とし、比較的高水準のコンクリート強度を用いた RC はり部材に対して静的載荷試験を行い、コンクリート強度分布および打重ね条件の影響を考慮したせん断耐力および破壊性状について評価を行った。また実験結果の詳細な考察を行うため強度分布を考慮した RC はりの有限要素解析を行い、耐荷性能評価実験結果との比較により本解析手法の精度の検証を行った。さらにはコンクリート強度分布を考慮した評価式の提案を行った。

## 2. 実験概要

試験供試体寸法は、幅 150mm、高さ 240mm、

有効高さ 200mm の矩形断面を持つスパン 1200mm の RC はりとした。本試験においては、せん断耐荷性能の評価が目的であり、曲げ破壊よりもせん断破壊を先行させるために、引張鉄筋（以下、主鉄筋）には D16 を 3 本配置し、また、せん断破壊位置を指定箇所に限定するため、スターラップには D6 を破壊断面に 300mm 間隔で配置した。なお、コンクリートの打重ねは端部より 300mm の位置とした。また、載荷方法については万能試験機により、単純支持された試験供試体に対して、鋼製円柱による線載荷を与えた。なお、せん断スパン比は 2.5 とし、中央 2 点載荷により試験を行った。供試体および載荷試験方法を図-1 に示す。また、室内試験において使用した供試体の名称およびその強度分布について図-2 におよび表-1 に示す。また、表-2 に鉄筋の特性値を示す。本研究においてはコンクリート強度分布とコンクリートの打重ね条件により発生したコンクリートの付着の劣弱部、すなわちコールドジョイントの有無

\*1 神戸大学大学院 自然科学研究科建設学専攻 (正会員)

\*2 神戸大学助教授 工学部建設学科 工博 (正会員)

\*3 神戸大学 工学部建設学科 (正会員)

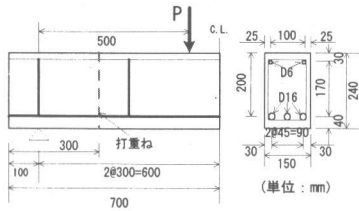


図-1 供試体および載荷試験方法

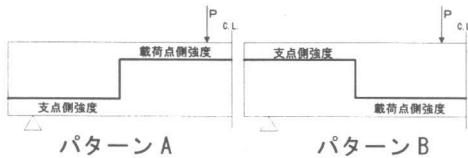


図-2 強度分布パターン

表-1 各供試体の強度配置

供試体番号	パターンA		供試体番号	パターンB	
	支点側強度 (N/mm <sup>2</sup> )	載荷点側強度 (N/mm <sup>2</sup> )		支点側強度 (N/mm <sup>2</sup> )	載荷点側強度 (N/mm <sup>2</sup> )
S-1	24.7	42.4	S-2	44.3	27.9
S-3	24.7	28.3	S-4	28.3	24.7
S-5	28.3	42.4	S-6	42.4	28.3
			S-J-V	44.3	29.7
			S-J-H	43.4	27.9

表-2 鉄筋の特性値

	降伏点強度(N/mm <sup>2</sup> )	引張強度(N/mm <sup>2</sup> )
D6	383.7	503.4
D16	334.2	510.6

がせん断耐荷性能に与える影響の評価を行った。ここではそれらの条件について評価するために一体打ちで作成したもの(S-A)、コンクリートの強度差を与えるが、その打重ねにおいては時差を可能な限り短縮し、一体打ちに近い打重ねにより強度差を与えたもの(S-1, S-2, S-3, S-4, S-5, S-6)であり、図-2 に示したように強度配置により便宜上パターン A(S-1, S-3, S-5)およびパターン B(S-2, S-4, S-6)と分類した。なお、本試験では、著者らが行った既存コンクリート橋の橋脚に対する非破壊試験により推定されたコンクリート強度分布データ<sup>1)</sup>に基づき強度分布の設定を行った。また、コールドジョイントの影響を評価する供試体については、S-2 と同じ強度分布を持つが、打重ね時差を1日とり、先打ちコンクリートにおける硬化時間が終結時間を経た後、打重ね面に対する遅延剤使用等の処理をいっさい行わず、コンクリート間の付着

を弱め横打ちで鉛直打重ねを与えたもの(S-J-V)、縦打ちで水平打重ねを与えたもの(S-J-H)とした。なお、先打ちコンクリートの硬化状態については、本試験の実施に並行して、先打ちコンクリート中のモルタル成分において凝結時間試験を行い、打重ね時の同実験室内条件におけるコンクリート硬化状態の定量的な評価を行った。これより硬化の終結時間は13時間前後という結果が得られたため、翌日の打重ね時には十分に硬化が完了しているものと判断できた。

### 3. 実験結果および考察

載荷試験結果を表-3 に示す。なお、本研究においては強度分布の影響評価を目的とするため、コンクリート強度を平均強度の他に支点側および載荷点側の領域ごとに区分し考察を行った。また、せん断耐力はスターラップ降伏時点の荷重とした。さらに本試験においては破壊モードの変化を以下の3種類に大別した。

- a: スターラップの降伏が先行し、その後、ほどなくしてせん断圧縮破壊にて終局した。
- b: スターラップの降伏後、主鉄筋も降伏するが最終的にはせん断圧縮破壊で終局した。
- c: スターラップの降伏が先行するが、その後主鉄筋も降伏し最終的には曲げ破壊で終局した。

また、表-4 に載荷試験におけるせん断耐力とコンクリート標準示方書<sup>2)</sup>のせん断耐力評価式およびACI基準の評価式<sup>3)</sup>による各領域ごとの強度を考慮した評価値との相関を示す。表よりパターン A では載荷点側のコンクリート強度による評価の方が支点側の強度による評価よりもばらつきが小さく相関性が高い。一方、パ

表-3 載荷試験結果

供試体番号	コンクリート強度(N/mm <sup>2</sup> )			せん断耐力実験値(kN)	破壊*モード
	平均	支点側	載荷点側		
S-A	28.3	-	-	67.6	a
S-1	34.8	24.7	42.4	77.4	b
S-2	34.9	44.3	27.9	82.3	a
S-3	26.8	24.7	28.3	63.8	c
S-4	26.3	28.3	24.7	75.5	c
S-5	36.4	28.3	42.4	65.7	a
S-6	34.4	42.4	28.3	71.6	c
S-J-V	35.9	44.3	29.7	68.6	b
S-J-H	34.5	43.4	27.9	69.6	a

(\*破壊モードは文中に説明した)

ターン B においては支点側強度による評価の方がより妥当性が高いと判断できる。したがって、強度分布を考慮に入れ、せん断耐力評価を行う際、各強度の分布の状態によりそれぞれのパターンを考慮した検討の必要があると考えられる。さらに、この結果より本試験において、ACI 基準の評価式は実験に対する適用性が高いことが分かった。また、コールドジョイントを導入した両供試体は、打重ね条件を考慮せずに同一分布を与えた供試体 S-2 との比較により 15%前後のせん断耐力の低下を引き起こしていることがみられる。一方、縦打ちおよび横打ちの両供試体において同程度の低下が見られるため、打重ねの導入方向の相違による影響評価をこの視点から行うことは難しい。パターン B ではパターン A との比較においてせん断耐力（スターラップ降伏時）が非常に高くなっている。パターン B では、せん断破壊の進行による斜めひび割れの卓越に伴い、主鉄筋の付着すべり等の要因によりせん断抵抗のメカニズムに複雑な変化が生じており、それが破壊モードにも影響を及ぼしている可能性があると考えられる。そこで、スターラップひずみ、またひび割れの挙動などによる考察を行う。

図-3 においてスターラップひずみの挙動を示す。なお図中の破線はスターラップ降伏時荷重である。また、図-4 に各供試体のひび割れ状況を示す。なお、図-4 中の破線は打重ね部である。また、スターラップの降伏点は鉄筋引

張試験による降伏点での鉄筋ひずみの値に基づいたものであり 2346 $\mu$ である。

図-3 にあるように全体的な傾向として、スターラップひずみの挙動はグループ別により明確な相違点が見られた。パターン A では、全体的にひずみは順調に成長しており、スターラップ降伏の前後においては、スターラップにおけるせん断力の負担増分がほぼ 0 になったと考えられる。それに対して、パターン B においては、スターラップひずみの成長は鈍く、スターラップ降伏後においてもまだスターラップのひずみの急激な増大に対して抑制が働いている。これより低強度コンクリートの配置パターンにより破壊機構およびせん断抵抗機構に明確な差違が表れたと考察できる。しかし、パターン B の中でも、S-6 においては、同グループの他の 2 体と比べ、比較的スターラップひずみの変化が著しい。これは、同パターンにおける他の 2 体の供試体と比べて、載荷点側のコンクリート強度が高い水準であるため、これが要因となりせん断抵抗機構に微妙な変化が生じたものと考えられる。本試験の結果においては載荷点側強度が 28N/mm<sup>2</sup>の前後において、せん断抵抗機構が変化することがわかった。これらを総合し、破壊モードの変化をグループ別に考察すると、パターン A においては、せん断破壊の進行に伴って、鉄筋の付着が低下することにより鉄筋とコンクリート間における付着力の伝達機構の効果が弱まり、それにより一部ビーム作用から

表-4 各強度分布パターンにおける  $V_0$  の実験値と評価式算定値の比較

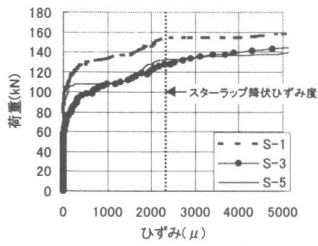
(a) パターン A

供試体 番号	実験値 (kN)	示方書評価値* (kN)			ACI基準評価値* (kN)			(実験値)/(示方書評価値)			(実験値)/(ACI評価値)			
		平均	支点側	載荷点側	平均	支点側	載荷点側	平均	支点側	載荷点側	平均	支点側	載荷点側	
S-1	50.7	36.8	32.9	39.4	58.3	50.8	63.3	1.38	1.54	1.29	0.87	1.00	0.80	
S-3	37.1	33.8	32.9	34.4	52.4	50.8	53.6	1.10	1.13	1.08	0.71	0.73	0.69	
S-5	39.0	37.4	34.4	39.4	59.4	53.6	63.3	1.04	1.13	0.99	0.66	0.73	0.62	
								変動係数	0.065	0.113	0.047	0.025	0.049	0.017

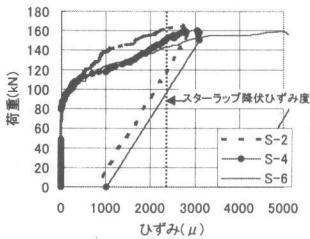
(b) パターン B

供試体 番号	実験値 (kN)	示方書評価値* (kN)			ACI基準評価値* (kN)			(実験値)/(示方書評価値)			(実験値)/(ACI評価値)			
		平均	支点側	載荷点側	平均	支点側	載荷点側	平均	支点側	載荷点側	平均	支点側	載荷点側	
S-2	55.6	36.9	39.9	34.2	58.4	64.5	53.3	1.51	1.39	1.63	0.95	0.86	1.04	
S-4	48.8	33.6	34.4	32.9	52.0	53.6	50.8	1.45	1.42	1.48	0.94	0.91	0.96	
S-6	44.9	36.7	39.4	34.4	58.0	63.3	53.6	1.22	1.14	1.30	0.77	0.71	0.84	
								変動係数	0.046	0.047	0.052	0.020	0.022	0.022

(\*ただし安全係数は考慮していない)



(a) パターン A



(b) パターン B

図-3 スターラップひずみ挙動

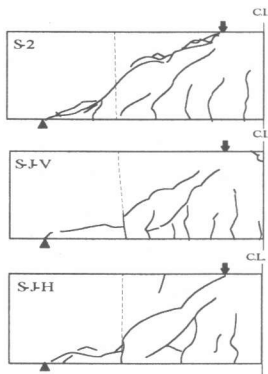


図-4 ひび割れ状況

アーチ作用へ移行するもののアーチ作用への傾斜は小さく、おおむねトラス理論によるせん断抵抗が有効な範囲内で破壊に至ると考えられる。一方、パターン B においては荷点近傍つまり供試体中央部のコンクリート強度が弱い。このため比較的早い段階においてスパン中央部のコンクリートのひび割れ、および付着力の大幅な低下による鉄筋のすべりが生じ、そのため梁作用とアーチ作用の共存したせん断抵抗機構の状態に移行し、せん断耐力を増大させることとなったと考えられる。この結果より、荷点側、つまり、はりの中央部に劣弱部が存在

するとせん断抵抗機構は複雑な挙動をとる可能性があるといえる。またひび割れ状況についてであるが、S-J-V においては打重ね部に比較的初期の段階から界面がはく離するような曲げひび割れの発生が見られ、その後、前述のせん断抵抗機構の移行があり、最終的には曲げ破壊で終局したが、打重ねのはく離ひび割れからせん断ひび割れが派生しており、また、S-J-H についても同様であり、これにより明確なせん断破壊形式で終局した。以上の結果より打重ね部の導入が、わずかながらせん断耐荷性能に影響を与えたものと考えられる。

#### 4. 解析の概要

本研究においては弾塑性二次元有限要素解析法<sup>4)</sup>を用いた。解析対象モデルは前述の実験モデルと同一のものを用いており、このモデルを図-5 に示す。なお、解析モデルは左右対称形を片側のみについてモデル化し、スパン中央断面を橋軸方向に拘束した。また、コンクリート要素を平面応力要素、鉄筋要素を線要素とし、コンクリート要素と引張鉄筋要素の接触節点において、付着を考慮したバネ要素を導入した。また、各要素の応力-ひずみ関係は材料試験に基づくものとした。

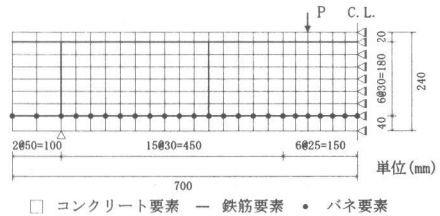


図-5 解析モデル

#### 5. 解析結果および考察

表-5 に供試体 S-1 の解析結果におけるせん断耐力および実験結果との比較を、また図-6 に主鉄筋挙動を、図-7 および図-8 にせん断抵抗力を示す。なお、図中の  $V_s$  はスターラップの負担せん断力、 $V_c$  はコンクリートの負担せん断

力、V ははり全体に発生するせん断力である。また、図中の破線は斜めひび割れ発生荷重である。全体的な傾向として、せん断耐力および主鉄筋ひずみの挙動において解析値はおおむね良好な値が得られたと考えられる。また、このため、マクロ的な挙動および性能の解析精度は良好であることがわかった。また、スターラップ分担力における解析値と実験値ではスターラップひずみの初動域で大きな格差が生じている。

解析結果では斜めひび割れ発生荷重段階の近傍において、スターラップに分担力が生じてい

るにもかかわらず、実験結果においては斜めひび割れの発生が確認され、せん断破壊が進行していると思われる段階においてもスターラップ分担力の発生はみられず、コンクリートのせん断抵抗機構が解析とは異なる挙動をしている。解析においては、トラス理論に基づく典型的な挙動が表現されており、一方、実験においては、一部アーチ作用への移行など抵抗機構の変化が原因であると考えられる。今後、せん断耐荷性能の定量的な評価を行う上で、内部のコンクリートの応力状態に関する検討を行うとともに、せん断抵抗機構の詳細な分析を行うことが必要であると思われる。

表-5 実験結果および解析結果

供試体	実験値(kN)	解析値(kN)	(実験値)/(解析値)
S-1	77.4	81.1	0.95
S-2	82.3	78.7	1.05
S-3	63.8	62.5	1.02
S-4	75.5	79.9	0.94
S-5	65.7	68.1	0.96
S-6	71.6	78.2	0.92

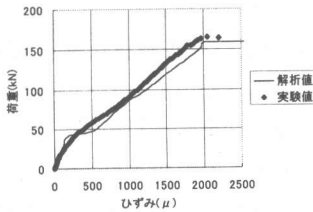


図-6 主鉄筋ひずみ挙動

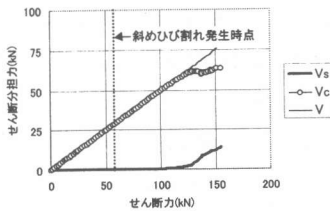


図-7 実験結果における耐力分担

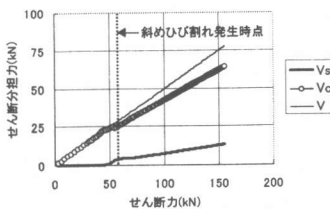


図-8 解析結果における耐力分担

## 6. せん断耐力評価式の提案

強度分布がせん断耐荷性能に及ぼす影響を定量的に評価するために、本試験の結果および解析結果に基づき感度曲線の回帰式を求め、強度分布を考慮したせん断耐力評価式を検討した。ここでは、支点側、荷重点側および平均のコンクリート強度をパラメータとし、コンクリート標準示方書の評価式と本研究において比較的精度の高かった ACI 基準の評価式を用いて検討を行った。ここで、パターン A では荷重点側、パターン B では支点側のコンクリート強度を基準強度とし、さらにコンクリートの負担せん断耐力に対し強度分布パラメータに基づいた置換関数をかけることにより評価する手法を提案した。また、分布のパターンの相違も考慮に入れ、パターン別の評価の検討も行った。以下にその手順について示す。

$$V_c = \alpha \cdot V_{c(base)} \quad (1)$$

$$\alpha = g(r) : \text{置換関数} \quad (2)$$

$$r = f_{ca} / f_{c(base)} \quad (3)$$

$f_{c(base)}$  : 基準強度(N/mm<sup>2</sup>)

$f_{ca}$  : 平均強度(N/mm<sup>2</sup>)

式(1)において、置換関数  $\alpha$  は、コンクリート強度比 (基準強度に対する平均強度の比) をパラメータとした関数である。つまり基準強度と平均強度の比が 1 であるときは均一強度部材と

しての評価をすることとなる。また、式中の  $V_c$  はコンクリート強度をそれぞれの基準強度と仮定したときのコンクリートのせん断耐力である。ここで、実験結果および解析結果を用いて逆算することにより各強度分布パターンにおけるコンクリート負担せん断耐力が求まる。その結果に基づき回帰を行うことにより置換関数の決定を行う。以下にそれぞれの評価式をベースにし、強度分布パターン別に提案した置換関数を示す。なお、式中の  $R$  は相関係数である。

i) 示方書評価式ベース

(パターン A)

$$\alpha = 0.98 \exp\{0.977(1-r)\} \quad (R^2 = 0.224) \quad (4)$$

(パターン B)

$$\alpha = 1.46 \exp\{-0.685(1-r)\} \quad (R^2 = 0.183) \quad (5)$$

ii) ACI 基準評価式ベース

(パターン A)

$$\alpha = 0.64 \exp\{0.716(1-r)\} \quad (R^2 = 0.124) \quad (6)$$

(パターン B)

$$\alpha = 0.95 \exp\{-0.945(1-r)\} \quad (R^2 = 0.298) \quad (7)$$

表-6 は上記の各評価式による評価値と実験値を比較したものである。表より全般的な傾向として比較的良い精度で評価値は得られているが、2, 3 体の供試体についてはやや危険側の評価であった。これは、破壊モードの差違による影響であると考えられる。

表-6 各評価式による  $V_c$  の精度検証

供試体 名称	実験値 (kN)	示方書ベース		ACI基準ベース	
		評価値 (kN)	(実験値) / (評価値)	評価値 (kN)	(実験値) / (評価値)
S-1	50.7	46.2	1.10	46.0	1.10
S-2	55.6	50.4	1.10	50.4	1.10
S-3	37.1	35.7	1.04	35.6	1.04
S-4	48.8	47.8	1.02	47.9	1.02
S-5	39.0	44.5	0.88	44.8	0.87
S-6	44.9	50.5	0.89	50.5	0.89

## 7. まとめ

本研究では、コンクリート強度分布およびコールドジョイントが、せん断耐荷性能に及ぼす影響について評価を行った。本研究で得られた結果を以下で述べる。

(1) 強度分布を導入した RC 部材では、そのせん

断耐力はパターン A では載荷点側のコンクリート強度の影響をパターン B では支点側の強度の影響を強く受けるという結果が得られ、分布のパターンを考慮した検討の必要性が示された。

(2) コンクリート強度レベルの高い RC 部材では、せん断破壊の進行に伴い、せん断抵抗機構がビーム作用からアーチ作用に変化し、せん断耐力が評価値よりも大幅に増大する結果となった。

(3) コールドジョイントの有無はひび割れ挙動に影響を及ぼし、結果的にせん断破壊の進行を助長する結果となった。また、そのため打重ね面の付着の強弱が、その部材のせん断耐荷性能に影響を与え、構造上の弱点となりうることがわかった。

(4) 有限要素法解析においてはせん断耐力や主鉄筋挙動などマクロ的部分での解析精度は良好であったが、せん断抵抗機構の複雑な現象をとらえることはできなかった。

(5) 実験結果および解析結果に基づき強度分布を考慮したせん断耐力評価式の検討を行い、比較的良い精度の結果が得られた。今後は、一義的に評価することが困難である破壊モードが混合した場合も視野に入れ評価を行う必要がある。

## 参考文献

- 1) 森川英典, 小林秀恵, 小林大輔: 非破壊試験に基づく既存 RC 橋脚の強度分布推定とせん断耐荷性能の評価, 建設工学研究所論文報告集, No.41-A, 1999.11.
- 2) 土木学会: 平成 8 年制定コンクリート標準示方書 [設計編], 1996.
- 3) American Concrete Institute: Building code requirements for structural concrete (ACI318-95) and commentary (ACI318R-95), Farmington Hills, MI, pp.133-180, 1999.
- 4) 森川英典, 河合優: 材料試験に基づくコンクリート部材の強度劣化分布進行予測とせん断耐荷力評価, 材料, 第 48 巻, 第 8 号, pp.916-926, 1999.8.