

論文 コンクリート強度分布を有する RC はり部材のせん断耐荷機構

橋本 航*1・森川 英典*2・佐伯 慶悟*3・小林 秀恵*4

要旨：実構造物で確認されているコンクリート強度分布がせん断耐荷機構に及ぼす影響について評価するため、コンクリート強度分布を RC はり部材に導入し、載荷試験を行うことで実験的検討を行った。その結果、コンクリート強度分布は、ひび割れ経路を変化させ、RC はり部材のせん断耐荷力および破壊機構に大きく影響することが明らかとなった。また、コンクリート強度分布を考慮した RC はり部材の有限要素法解析を行い、実験結果と比較することで、本解析手法の精度検証を行った。

キーワード：コンクリート強度分布、打重ね、せん断耐荷機構、有限要素法解析

1. はじめに

同一 RC 構造物内部においてもコンクリート強度が大きくばらつく構造物が存在し、その強度分布が、せん断耐荷機構に影響を及ぼすことが明らかとなっている¹⁾²⁾。このようなコンクリート強度分布を有する構造物においては、脆性的な破壊形式であるせん断破壊に対する安全余裕が通常の場合と異なっていることが懸念される。そのため、コンクリート強度のばらつきが、せん断耐荷機構に及ぼす影響を把握することは、既存構造物の耐震診断等を行う上で重要となる。本研究では、比較的低強度のコンクリート強度分布を導入した 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の影響を考慮したせん断耐荷力および破壊機構についての評価を行った。また、実験で使用する RC はり部材に対して有限要素解析を実施し、実験結果と比較することで、本解析手法の精度検証を行った。

2. 実験概要

本試験で使用する供試体は、幅 150mm、高さ 240mm、有効高さ 200mm の長方形断面を持つス

パン 1200mm の RC はりである。本試験においては、せん断耐荷機構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、主鉄筋に D16 を 3 本、圧縮鉄筋に D6 を 2 本配置した。配筋 S においては、スターラップに D6 を 300mm 間隔で配置し、一方、配筋 T に関しては、スターラップをスパン内に配置しないものとした。コンクリートの打重ねは、端部より 300mm の位置に導入した。また、載荷方法については、単純支持された供試体に対して、鋼製円柱による線荷重を与えた。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。供試体の側面図と断面図および載荷試験方法を図-1 に示す。

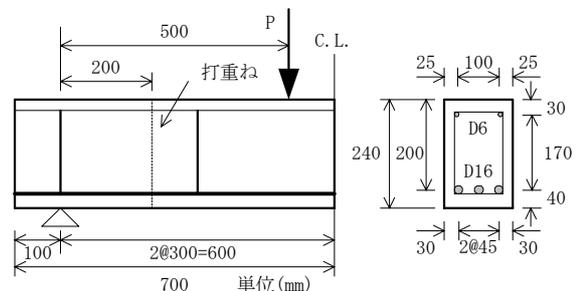


図-1 試験供試体(配筋 S)の側面図と断面図

*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 大阪市役所 工修 (正会員)

*4 神戸大学技術官 工学部建設学科 (正会員)

本試験では、コンクリート強度が一定である供試体(C-S-1, C-S-2, C-S-3, C-T-1, C-T-2)とコンクリート強度分布を導入した供試体(DA-S-1, DA-S-2, DB-S-1, DB-S-2, DA-T, DB-T)を作製した。コンクリート強度の配置については、既存橋梁の橋脚に対する非破壊試験結果¹⁾²⁾に基づき、比較的強度の低いコンクリート強度分布を導入し、その打重ね面はコンクリートの打設時差を可能な限り短縮した。表-1に本試験で使用した供試体の詳細と表-2に鉄筋の特性について示す。

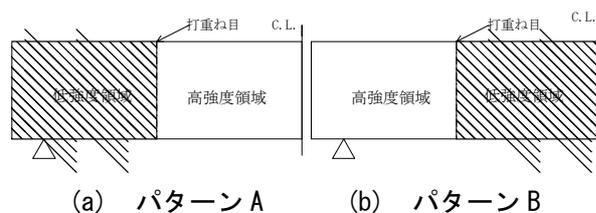
表-1 試験供試体詳細

供試体番号	強度分布パターン	配筋	コンクリート強度(N/mm ²)	
			支点側	載荷点側
DA-S-1	A	S	13.4	19.4
DA-S-2	A	S	19.2	28.0
DB-S-1	B	S	22.4	14.7
DB-S-2	B	S	28.0	19.2
C-S-1	一定	S	28.3	
C-S-2	一定	S	19.4	
C-S-3	一定	S	13.4	
DA-T	A	T	19.0	32.4
DB-T	B	T	32.4	19.0
C-T-1	一定	T	32.4	
C-T-2	一定	T	19.0	

表-2 鉄筋の特性値

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

また、本研究では、図-2に示すようにコンクリート強度配置により、パターンA(載荷点側が高強度)とパターンB(支点側が高強度)として分類した。



(a) パターンA (b) パターンB
図-2 強度分布パターンによる分類

3. 実験結果および考察

表-3に載荷試験の結果および二羽式³⁾による

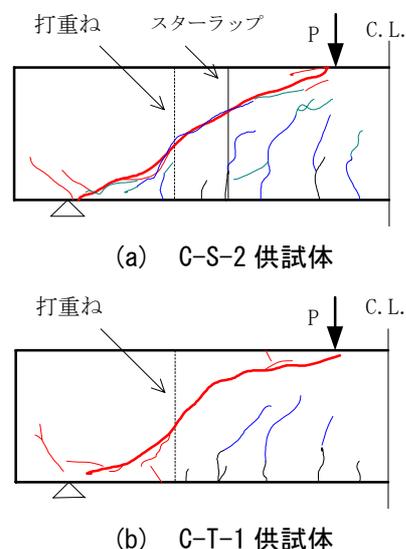
評価値との比較を示す。本試験では全ての供試体が斜め引張り破壊で終局した。スターラップ降伏後に終局した供試体(DB-S-1, DB-S-2, C-S-1, C-S-2)に関しては、スターラップ降伏荷重をせん断耐力(V_c+V_s)とし、スターラップが降伏せずに終局した供試体(DA-S-1, DA-S-2, C-S-3)に関しては、最大荷重をせん断耐力(V_c+V_s)とした。配筋Sにおける V_c については、スターラップひずみから V_s を算定し、部材のせん断耐力(V_c+V_s)から V_s を除いた値とした。配筋Tについては、最大荷重を V_c とした。

表-3 載荷試験結果と二羽式評価値との比較

供試体番号	コンクリート強度(N/mm ²)		実験値(kN)		Vc/二羽式評価値	
	支点側	載荷点側	Vc+Vs	Vc	支点側 ^{*1}	載荷点側 ^{*2}
DA-S-1	13.4	19.4	48.0	46.0	1.31	1.16
DA-S-2	19.2	28.0	61.0	41.4	1.05	0.92
DB-S-1	22.7	14.7	66.8	42.5	1.01	1.17
DB-S-2	28.0	19.2	66.6	42.3	0.94	1.07
C-S-1	28.3		67.6	43.3	0.96	
C-S-2	19.4		63.5	39.2	0.99	
C-S-3	13.4		56.8	32.8	0.94	
DA-T	19.0	32.4	—	51.7	1.31	1.10
DB-T	32.4	19.0	—	56.7	1.20	1.44
C-T-1	32.4		—	49.6	1.05	
C-T-2	19.0		—	42.9	1.09	

*安全係数は考慮していない
*1: 支点側強度を用いて評価した場合
*2: 載荷点側強度を用いて評価した場合

次に、供試体の終局時におけるひび割れ状況を強度分布パターン別に以下に示す。



(a) C-S-2 供試体 (b) C-T-1 供試体
図-3 強度が一定である供試体のひび割れ状況

図-5より、パターンBの強度分布を有する供試体においては、主要なせん断ひび割れが荷重点側に発生していることが分かる。したがって、パターンBの強度分布を有する供試体の V_c を評価する際には、荷重点側のコンクリート強度を用いることが妥当であると考えられる。また、図-3と図-5を比較すると、コンクリート強度が一定である供試体のひび割れが、支点と荷重点を結ぶ直線上に生じているのに対し、パターンBの強度分布を有する供試体では、打重ね面下方と荷重点を結ぶ直線上に生じている。表-3からパターンBの強度分布を有する供試体の実験値 V_c が二羽式評価値よりも大きくなる傾向にあること、および図-5に示すような特殊なひび割れ経路で破壊していることから、パターンBの強度分布を有する供試体においては、せん断スパン比が見かけ上、変化していると考えられる。表-4に実験で得られた V_c から二羽式を用い逆算して求めたパターンBの強度分布を有する供試体のせん断スパン比を示す。

本試験結果から考察すると、パターンBの強度分布を有する供試体では、ひび割れ経路の変化に伴い、見かけのせん断スパン比が減少するため、 V_c が増加傾向にあると言える。配筋T供試体については、最大荷重を V_c としたため、配筋S供試体の V_c よりも幾分大きな値となり、その結果、DB-T供試体の等価せん断スパン比は、配筋S供試体と比較して減少している。図-5よりDB-T供試体のひび割れ経路が他の2体とほぼ同様であることから、DB-T供試体の等価せん断スパン比も2.0前後になるものと考えられる。パターンAの強度分布を有するDA-S-2供試体とDA-T供試体のひび割れ経路は、図-3と図-4を比較すると、支点側と荷重点側に偏り無く生じており、コンクリート強度が一定の供試体に

表-4 パターンB供試体の等価せん断スパン比

供試体番号	強度分布パターン	コンクリート強度 荷重点側(N/mm ²)	等価せん断スパン比
DB-S-1	B	14.7	1.8
DB-S-2	B	19.2	2.2
DB-T	B	19.0	1.2

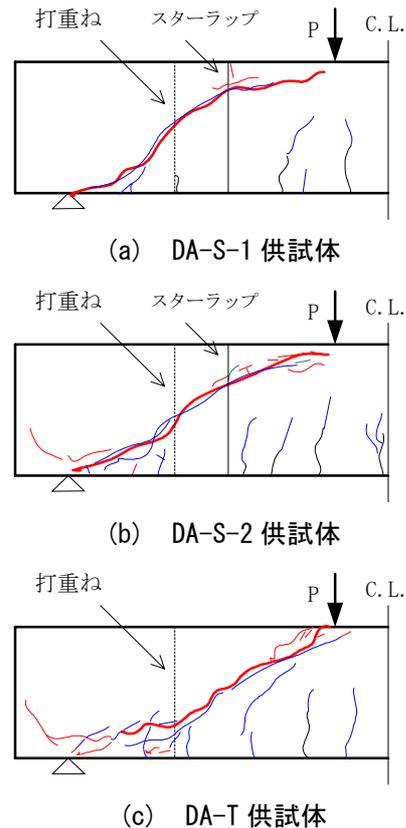


図-4 パターンA供試体のひび割れ状況

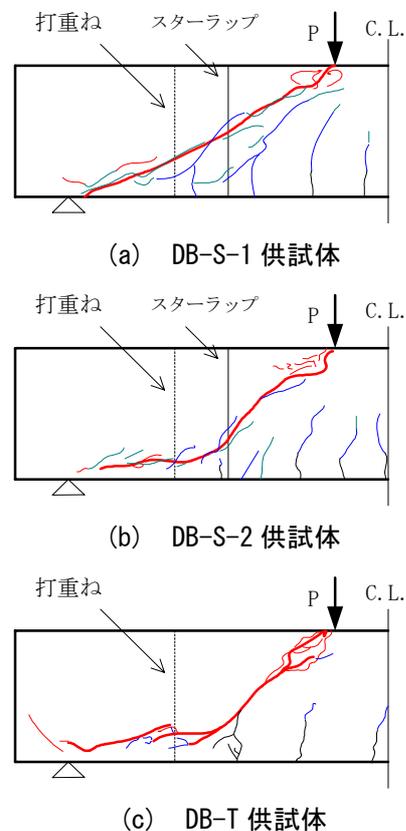


図-5 パターンB供試体のひび割れ状況

おけるひび割れ経路と比較して、それほど大きな差は見られない。このことから、パターン B の強度分布を有する供試体で見られたような、見かけのせん断スパン比が変化しているとは考え難い。耐力については、表-3 における実験値と二羽式評価値から検討する限り、パターン A の強度分布を有する供試体の V_c は、載荷点側のコンクリート強度を用いることが妥当であると考えられる。

次に、パターン A の強度分布を有する供試体で、特殊なひび割れ経路でせん断破壊した DA-S-1 供試体のひび割れ状況と各供試体のスターラップひずみ挙動を以下に示す。

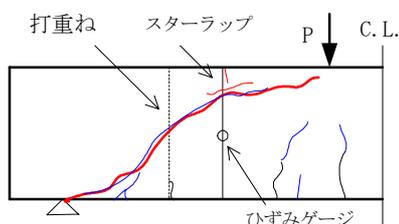


図-6 DA-S-1 供試体のひび割れ状況

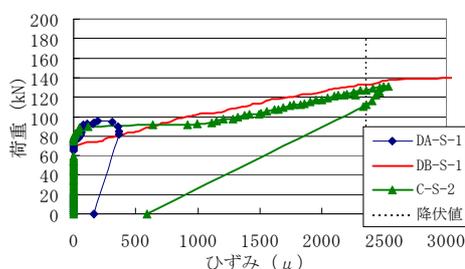


図-7 スターラップひずみの挙動

図-6 より、DA-S-1 供試体におけるせん断ひび割れは、支点と載荷点を結ぶ直線よりも上側に生じており、スターラップを横切るひび割れの位置とひずみ計測位置が大きく離れていることが分かる。そのため、計測したスターラップひずみは、最大ひずみよりも小さく、また図-7 において、同じコンクリート強度水準で強度配置が異なる供試体と比較しても、ひずみの伸びも鈍くなっている。実際のスターラップひずみは、計測値よりも大きく、ひずみから算定する V_s も大きくなっている可能性が高い。した

がって、DA-S-1 供試体の V_c は表-3 に示した値よりも小さくなるものと考えられる。

4. 解析の概要

本研究において用いた解析手法は弾塑性二次元有限要素解析法である⁴⁾。図-8 に解析モデルを示す。解析モデルは左右対称形のため、片側のみについてモデル化し、スパン中央断面をはり軸方向に拘束した。コンクリートを平面応力要素、鉄筋を線要素とし、コンクリート要素と主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。

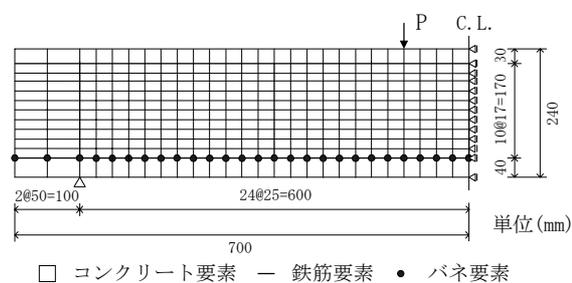


図-8 解析モデル

コンクリート要素の応力-ひずみ関係は、材料試験を基に、圧縮ひずみ 1000μ までを弾性範囲、 1000μ から 2500μ までを塑性範囲とし、 3500μ で圧縮破壊するとした。また、引張側に関しては、引張限界ひずみまでは弾性範囲とし、引張限界ひずみに達するとひび割れが発生するとした。コンクリートのせん断挙動を解析する場合、引張によって発生したひび割れ後の挙動が最も重要となるため、引張ひび割れ発生後、引張ひずみが増加していくにつれて徐々に引張応力が低下していく引張軟化モデルを考慮した。本解析における引張応力は、ひび割れ発生後、図-9 に示すような応力-ひずみ関係となるようにモデル化した。鉄筋要素については完全弾塑性としてモデル化した。なお、

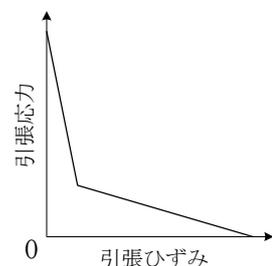


図-9 引張軟化モデル

破壊エネルギー G_f は式(1)を用いた⁵⁾。

$$G_f = 10(d_{\max})^{1/3} \cdot f_c'^{1/3} \quad (1)$$

d_{\max} : 粗骨材の最大寸法 (mm)

f_c' : コンクリートの圧縮強度 (N/mm²)

5. 解析結果および考察

表-5 に終局時における耐力の解析結果と実験結果を示す。本解析では実験結果同様、全ての供試体が斜め引張り破壊で終局した。

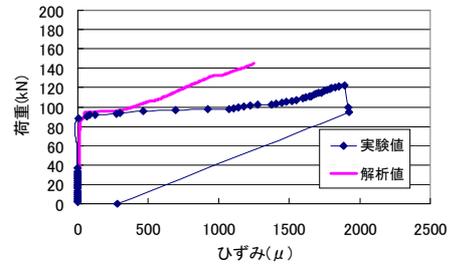
表-5 解析結果と実験結果の比較

供試体番号	コンクリート強度 (N/mm ²)		実験値 (kN)	解析値 (kN)	(実験値)/(解析値)
	支点側	載荷点側			
DA-S-1	13.4	19.4	48.0	62.7	0.76
DA-S-2	19.2	28.0	61.0	72.0	0.85
DB-S-1	22.7	14.7	66.8	60.0	1.11
DB-S-2	28.0	19.2	66.6	64.2	1.04
C-S-1	28.3		67.6	73.5	0.92
C-S-2	19.4		63.5	64.4	0.99
C-S-3	13.4		56.8	61.7	0.92
DA-T	19.0	32.4	51.7	45.6	1.13
DB-T	32.4	19.0	56.7	49.2	1.15
C-T-1	32.4		49.6	56.6	0.88
C-T-2	19.0		42.9	45.6	0.94

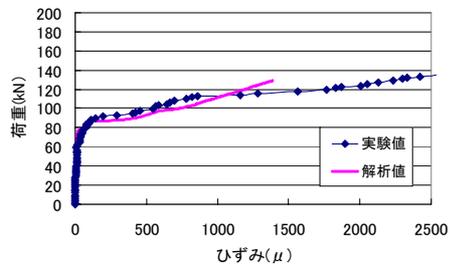
表-5 から、コンクリート強度が一定の供試体とパターンBの強度分布を有する供試体の耐力について、解析値は実験値と比較して概ね良好な値が得られたと考えられる。一方、パターンAの強度分布を有する供試体では、解析値と実験値との差が比較的大きくなっている。図-10にスターラップひずみの挙動について示す。

図-10 から、斜めひび割れが発生しスターラップのひずみが増加し始める荷重については、強度分布パターンに関係無く、解析値と実験値は一致している。斜めひび割れ発生後に関しては、パターンBの強度分布を有する供試体に関しては、精度良く実験結果を追随しているのに対し、パターンAの強度分布を有する供試体では、解析と実験の結果に差が見られる。実験では、ひび割れ経路の変化に伴い、スターラップを横切るひび割れの位置が供試体の上方に移動し、斜めひび割れ発生後、スターラップのひずみが急激に大きくなっているが、解析におけるスターラップひずみの伸びは、実験結果と比

較して鈍くなっており、パターンAの強度分布を有する供試体における斜めひび割れ発生後のせん断耐荷機構を追従することはできなかった。その結果が、表-5に示す終局耐力の解析値と実験値の精度差に表れたと考えられる。



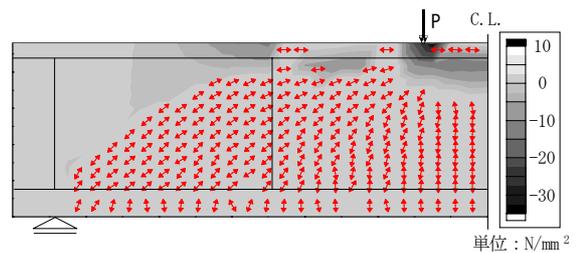
(a) DA-S-2 供試体



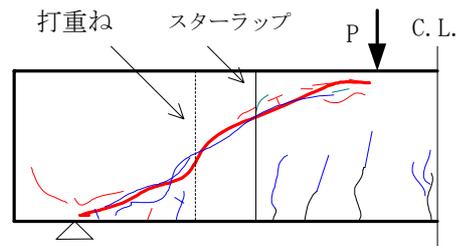
(b) DB-S-2 供試体

図-10 スターラップひずみ挙動の比較

図-11 と図-12 に解析による最大主応力分布とひび割れ分布および実験供試体のひび割れ状況を強度分布パターン別に示す。

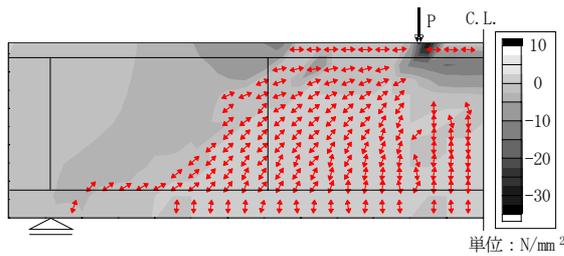


(a) 解析結果

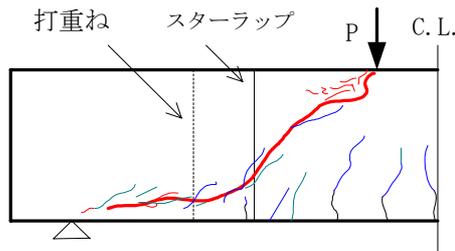


(b) 実験結果

図-11 DA-S-2 供試体のひび割れ状況



(a) 解析結果



(b) 実験結果

図-12 DB-S-2 供試体ひび割れ状況

図中のコンターは最大主応力分布を示し、矢印はひび割れ発生箇所とひび割れ方向を示している。本解析におけるひび割れの表示は、1つのコンクリート要素につき1つであり、実験での局所化したひび割れや、ひび割れ幅の増加は検証することはできないため、実験における主要なひび割れ方向に関して比較を行うことが妥当である。

図-11 と図-12 から、解析においても強度分布パターンによってひび割れ分布に差が生じている。パターンAの強度分布では、支点和載荷点を結ぶ直線の上側までひび割れが生じているのに対し、パターンBの強度分布では、主に支点和載荷点を結ぶ直線の下側にひび割れが集中している。これは、実験で確認された強度分布パターン別のひび割れ経路と同様の傾向を示しており、解析におけるひび割れ分布は、実験供試体の破壊性状を精度良く表現しているものと考えられる。

6. まとめ

本研究で得られた結果について以下にまとめる。

- (1) コンクリート強度分布を導入したRCはり部材では、強度分布パターンによりひび割れ経路が変化することが確認された。
- (2) ひび割れ経路が変化するに伴い、見かけのせん断スパン比も変化するため、強度分布パターンが V_c に影響を与えることが分かった。
- (3) ひび割れ経路の変化により、スパン内に配置されているスターラップを横断するひび割れの位置が移動し、スターラップひずみの挙動および終局耐力が、強度分布パターンにより変化するという結果が得られた。
- (4) 有限要素法解析では、耐力とスターラップひずみの挙動に関しては、強度分布パターンにより、解析の精度に差が生じる結果となった。また、ひび割れ状況については、強度分布パターンによって、ひび割れが生じる位置に明確な差が生じており、解析的評価から実験で見られたようなひび割れ範囲をとらえることができた。

参考文献

- 1) 小林大輔ほか：既存 RC 橋脚のコンクリート強度分布推定とせん断耐荷性能の評価，土木学会関西支部年次学術講演会，V-10，1999.5
- 2) 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，pp. 101-120，1999. 11
- 3) 二羽淳一郎ほか：鉄筋コンクリートはりのせん断耐荷機構に関する解析的研究，土木学会論文集，No. 508/V-26，pp. 131-176，1995
- 4) 佐伯慶悟，森川英典，小林秀恵：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，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 23，No. 3，pp. 1051-1056，2001. 6
- 5) 土木学会：コンクリート標準示方書[構造的な性能照査編]，pp. 27-28，2002
- 6) 土木学会：コンクリート標準示方書[設計編]，pp. 58-72，1996