

# 等分布荷重を受ける二辺単純支持 RC 梁の耐力に関する実験的研究

## An Experimental Study on Ultimate Strength of Two Side Simple Supported RC Beams under Distributed Transverse Load

篠崎 裕生 HIROO SHINOZAKI

三上 浩 HIROSHI MIKAMI

土木営業部 武富 幸郎 YUKIO TAKETOMI

土木営業部 高田 昭 AKIRA TAKADA

二辺単純支持 RC 梁の等分布荷重載荷試験を実施し、せん断耐力の評価方法を検討した。等分布荷重は、空気圧で膨張するゴムバッグにより模擬した。実験で得られたせん断耐力は、等分布荷重を多点荷重に置き換えて、個々の荷重に対する耐力評価値を累積する方法により求めた計算値と良く一致することが分かった。また、それぞれの支点から載荷スパン長の 1/4 離れた点に集中荷重があると見なして計算する簡易な方法でも、実用上は十分な精度でせん断耐力を評価できることが分かった。

キーワード：RC 梁，二辺単純支持，等分布荷重，せん断耐力

The authors have conducted experiments on RC beams with two side simple supported under distributed transverse loading, and clarified that ultimate shear strength. In the experiments, distributed load were simulated with air inflating superficial gum bag. The observed shear capacity can be estimated by the conventional formula with transforming distributed load to plural concentrated load. Furthermore, the simple method of assumption that two concentrated loads on the points that locates 1/4 span distant from each support have enough accuracy as practical design purpose.

**Key Words:** RC Beam, Two Side Simple Support, Distributed Load, Shear Strength

### 1. はじめに

地中構造物の壁や底版のように分布荷重を受ける構造物のせん断耐力の照査は、壁や底版を梁とみなし、分布荷重によって生じる断面力と、梁としてのせん断耐力の大きさを比較することによって行われる。

等分布荷重による作用せん断力は、梁の支点位置で最大となるが、一方で、梁の支点に近い部分では、圧縮力が直接支点に伝達されるいわゆるアーチ的耐荷機構が卓越してくるため、この部分のせん断耐力が大きくなることが知られている。したがって、この部分のせん断耐力の照査を従来からのトラス理論に基づいた棒部材のせん断耐力式<sup>例えは<sup>1)</sup></sup>を用いて行うことは不経済となる。これを避けるため、コンクリート標準示方書<sup>1)</sup>では支承前面から部材の全高さの半分までの区間では、トラス作用に基づくせん断耐力の照査を行わなくてもよいとしているが、等分布荷重を受ける棒部材の支持点付近の挙動や耐力については未だ解明されていないのが現状である。

等分布荷重を作用させた梁のせん断実験として井畔ら<sup>2)</sup>や Leonhardt and Walther<sup>5)</sup>の実験が有名である。また、等分布荷重を受けるせん断補強鉄筋を配置していない梁のせん断耐力についての研究には、代表的なものに井畔ら<sup>2)</sup>、二羽ら<sup>3)</sup>や斉藤ら<sup>4)</sup>のものがある。二羽他によれば、等分布荷重を複数の集中荷重に分割して、それぞれの集中荷重について支点からの影響と荷重からの影響を考慮した低減係数による修正を行い、すべての修正されたせん断力図を重ねることにより作用せん断力を求め、その中の最大せん断力  $V_{max}$  と基本せん断耐力  $V_{co}$  との比を求めて破壊時の等分布荷重を計算する手法を試みている。斉藤らは、この方法における低減係数の修正およびデータ処理方法に若干の改良を施すことで比較的精度良く実験結果を再現できることを示している<sup>4)</sup>。一方、井畔らは等分布荷重を載荷スパン長の 1/4 に集中荷重を与えたことと等価であるとみなしている。

いずれにしても、等分布荷重を再現した実験の困難さもあって、これらの研究成果は限られた数の等分布荷

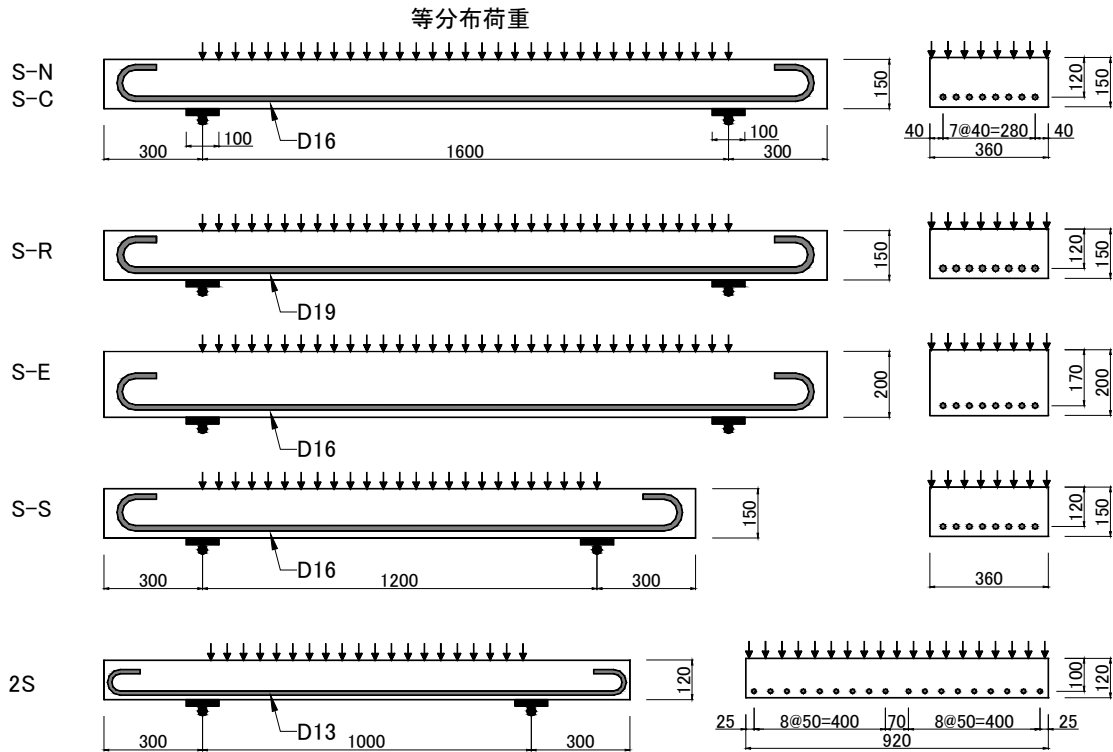


図-1 試験体形状寸法および荷重方法

重あるいは多点荷重の梁のせん断実験結果から導かれたものであり、更なる実験と検討が必要と考える。

著者らはこれまで、等分布荷重を受ける四辺が支持された RC 板の耐力について、空気圧で膨張するゴムバッグによる荷重試験を行い、支持条件や板の縦横比の影響などを検討してきた<sup>6)~8)</sup>。ここでは、同様の荷重方法により等分布荷重を受ける二辺単純支持 RC 梁の荷重試験を行い、荷重スパンや鉄筋比、コンクリート強度などがせん断耐力に与える影響を検討するとともに、先に紹介した斉藤らや井畔らの評価手法の妥当性を検証した。

表-1 試験体一覧

試験体名	スパン (mm)	鉄筋	有効高さ (mm)	$f_c$
S-N	1600	D16	120	30
S-C	1600	D16	120	40
S-R	1600	D19	120	30
S-E	1600	D16	170	30
S-S	1200	D16	120	30
2S <sup>7)</sup>	1000	D13	100	30

$f_c$ はコンクリートの設計圧縮強度

## 2. 実験の概要

試験体は、図-1、表-1 に示す計 6 体とした。断面幅 360mm、断面高さ 150mm (有効高さ 120mm)、引張鋼材として D16 を 8 本配置したスパン長 1.6m の S-N 試験体を基本として、コンクリート強度 (S-C)、引張鉄筋比 (S-R)、有効高さ (S-E)、荷重スパン長 (S-S) を変えた。いずれの試験体もせん断補強鉄筋は配置していない。2S 試験体は、既報<sup>7)</sup>において二辺単純支持試験体として用いたものである。

試験体の形状寸法や補強鉄筋の設定に当たっては、後に述べるゴムバッグの大きさや荷重能力に加え、確実にせん断破壊させることなどを考慮している。したがって、横長の断面形状になるとともに比較的大きい鉄筋比



写真-1 荷重試験状況 (上はゴムバッグ)

(2.48~5.31%) となっている。

等分布荷重は市販のゴムバッグ(写真-1)を用いて再現した。ゴムバッグは正方形平板の形状で、外寸は400mm×400mm、空気無注入時の厚さは約30mmである。ゴムバッグの最大圧力は0.8MPaである。2S試験体では930×930mmの大きさのゴムバッグを1枚用いて載荷している。載荷方法は、このゴムバッグ3枚あるいは4枚を床に敷き(写真-1上)、その上に試験体と支点治具を載せ、PC鋼棒で治具を床に縫い付けた状態でゴムバッグを膨張させることで行った。載荷の際は、1台のコンプレッサーの出力を分岐供給することで、それぞれのゴムバッグの圧力が同じになるようにした。

支承部は幅100mmの鋼板を用いた。また、丸鋼により自由に回転およびスライドできるようにした。載荷荷重は支承部の4箇所に設置した荷重計の合計値とした。計測項目は、荷重と梁の変位および鉄筋のひずみである。使用したコンクリートおよび鉄筋の材料特性値を表-2、表-3に示す。

### 3. 実験結果

#### (1) 等分布荷重の検証

ゴムバッグにより等分布荷重が再現できているかどうかを基準試験体であるS-Nの結果をもとに考察した。S-N試験体は、50kN程度で曲げひび割れが発生し始め、235kNで支点近傍に斜めひび割れが発生した。図-2は、200kNまでの鉄筋のひずみ分布の実測値と計算値を示したものである。横軸は梁の各位置を表しており、0と1600mmが支点位置となる。計算値はファイバーモデルを用いて算出したものであり、コンクリートおよび鉄筋の応力-ひずみ関係はコンクリート標準示方書のモデルに、材料試験結果の値を反映したものをを用いた。

計算値の方が若干大き目の値を示しているものの、いずれの荷重段階においてもおおむねそのひずみ分布形状は計算値のものと一致している。図には、集中荷重の例としてスパンLの1/4点と3/4点に集中荷重が作用した場合のひずみ分布形状を併記した。集中荷重ではひずみ分布が直線で構成される矩形形状になるが、実測値はそのような分布になっておらず、等分布荷重が再現されていると考えられる。

図-3は、梁の変位分布の実測値と計算値を示したものである。変位の実測値はおおむね計算値と一致していることが分かる。等分布と集中荷重(たとえば1/4, 3/4点集中)とでは、変位分布にほとんど差異がないので、この比較だけでは明言できないが、先のひずみ分布も合わせて等分布を仮定した計算値と実測値がほぼ一致して

表-2 コンクリートの材料特性値

試験体名	圧縮強度 N/mm <sup>2</sup>	引張強度 N/mm <sup>2</sup>	弾性係数 kN/mm <sup>2</sup>
S-C	43.2	3.60	31.3
S-C以外	36.5	3.21	30.7
2S <sup>7)</sup>	32.5	2.75	26.7

表-3 鉄筋の材料特性値

鉄筋	降伏強度 N/mm <sup>2</sup>	引張強度 N/mm <sup>2</sup>	弾性係数 kN/mm <sup>2</sup>
D16	375	572	191
D19	386	555	181
D13 <sup>7)</sup>	372	535	191

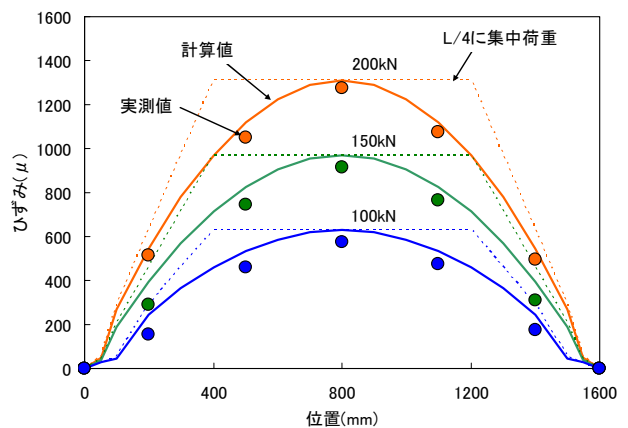


図-2 鉄筋のひずみ分布 (S-N試験体)

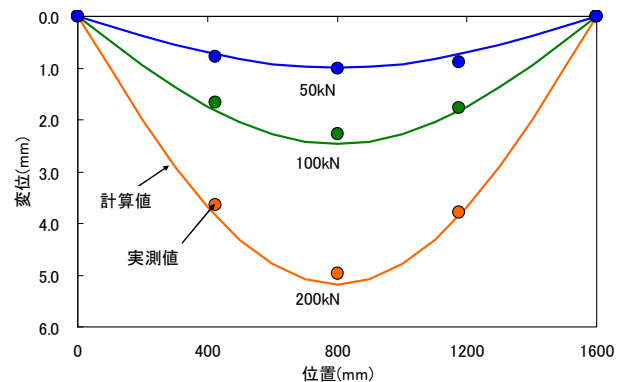


図-3 変位分布 (S-N試験体)

いることから、ゴムバッグにより等分布載荷が再現されていると考えられる。

#### (2) 各試験体のせん断耐力と破壊性状

図-4に各試験体の荷重と梁中央の変位の関係を示す。図にはコンクリート標準示方書に従って計算した棒部材のせん断耐力値を併記した。図-5にはひび割れの状況を示す。ひび割れ図に表示した数値は、斜めひび割れが梁の有効高さの1/2の線(図中破線で示した横線)と交わった点から支点までの距離を示している。本文では、この位置を“斜めひび割れ位置”と呼ぶこととする。

S-N 試験体はいくつか曲げひび割れが発生したあと、235kN で図-5 左側の支点近傍、269kN で右側の支点近傍で斜めひび割れが生じた。その後も荷重は増加し、329kN で左側斜めひび割れ部の圧縮側のコンクリートが大規模に破壊して荷重が大きく低下したため試験を終了した。次に載荷した S-C 試験体も同様に、258kN および 271kN で両サイドに斜めひび割れが生じた後に荷重が増加し、最終的に圧縮縁で破壊が生じて荷重が低下した。

S-S 試験体では、それぞれ 249kN および 275kN で斜めひび割れが生じた。斜めひび割れの梁軸線に対する角度は他の試験体のもものと比較して大きいように見える。また、斜めひび割れ位置は他の試験体と比較して支点到近いことが分かる。次に、S-R 試験体では、274kN と 319kN で斜めひび割れが生じた。斜めひび割れの角度および位置は S-N 試験体と同様であった。有効高さを大きくした S-E 試験体は、334kN と 371kN と比較的大きな荷重で斜めひび割れが生じた。斜めひび割れの位置は S-N や S-R 試験体とほぼ同じであるが、角度は若干大きい。これは、有効高さが大きく、せん断スパン比（ここでは、載荷スパンを有効高さで除した値とする）が小さく、同様の比となる S-S 試験体と同じ傾向になっていると思われる。2S 試験体は 452kN で最初の斜めひび割れが発生し、576kN まで荷重が上昇してせん断破壊した。

表-4 にせん断耐力をまとめた。計算値はコンクリート標準示方書に従って計算した棒部材のせん断耐力で、対象が無筋コンクリートであるので斜めひび割れ発生荷重と比較できる。計算値は実験結果をかなり小さく評価する傾向があり、いずれの試験体も概ね実験値の約半分程度の値でしかない。このように、等分布荷重が作用する RC 梁のせん断耐力を従来からの棒部材のせん断耐力で評価することは不経済となる可能性があることがわかる。

#### 4. せん断耐力の評価

##### (1) 齊藤らの方法

齊藤ら<sup>4)</sup>は等分布荷重を多点の集中荷重に置き換えて梁のせん断耐力を計算する手法を提案している。これは、梁のせん断耐力がせん断スパン比  $a/d$  の影響を受けるのは、支承反力の影響が主であるという点を考慮し、ある任意の位置の梁のせん断強度を、置き換えた任意の集中荷重によって発生する支承反力の影響によるものと、その集中荷重によって発生する作用せん断力の影響によるものの和で表すものである。せん断強度を求める梁の任意の位置とそのとき考慮する集中荷重および支承反力の位置との関係で決まる  $a/d$  の値を用いて、式(1)および式

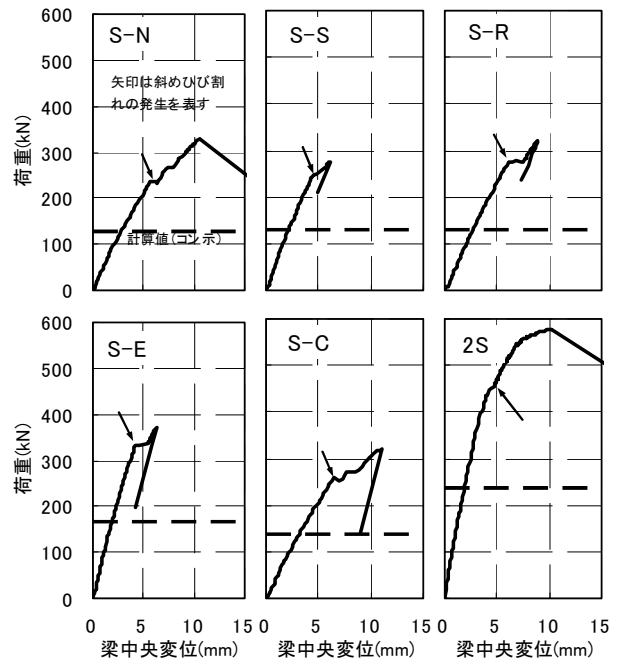


図-4 荷重-梁中央変位

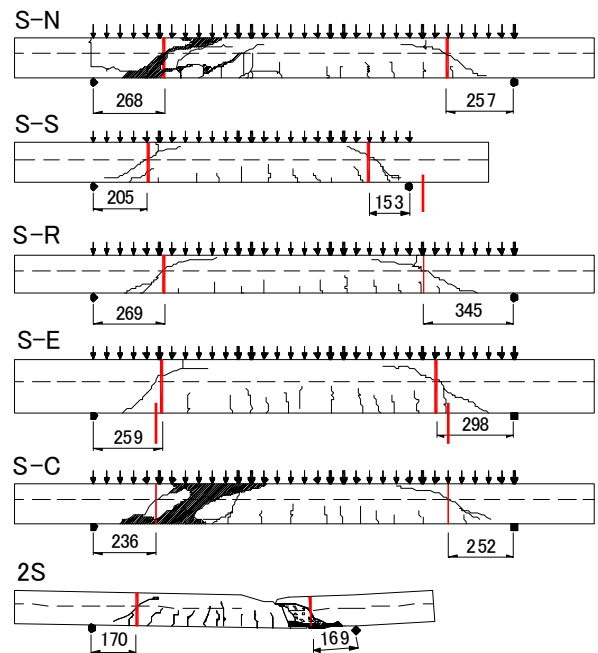


図-5 破壊後のひび割れ状況

表-4 せん断耐力のまとめ

試験体名	実験値(kN)		計算値*1 (kN)
	斜めひび割れ発生荷重	最大荷重	
S-N	235	329	129
S-S	249	275	129
S-R	274	320	129
S-E	334	371	167
S-C	258	320	136
2S	452	576	238

\*1: コン示<sup>1)</sup>による斜めひび割れ発生荷重



(2)でせん断強度を計算し、値の大きい方をその位置でのせん断強度とする (図-6 (2) 参照)。

$$V_{cal} = 0.20 \cdot (p_w \times f'_c)^{1/3} \times (d/1000)^{-1/4} \times [0.75 + 1.4/(a/d)] \times b \times d \quad (1)$$

$$V_{cal} = 0.24 \cdot f'_c{}^{2/3} \times (1 + 3.33 \times r/d) \times (1 + \sqrt{p_w}) \times b \times d / [1 + (a/d)^2] \quad (2)$$

ここに、 $f'_c$ : コンクリートの圧縮強度、 $p_w$ : 鉄筋比、 $b$ : 部材の幅、 $r$ : 支承や載荷板の長さ、 $a$ : せん断スパンである

各集中荷重に対して求めたせん断強度と、その位置の作用せん断力の比 (Z) を合算して、その値が最も大きくなる位置でせん断破壊すると仮定する。そして、その値 Z が 1.0 となる荷重の大きさがせん断耐力の計算値となる。二羽らの方法もほぼ同様であるが、用いているせん断強度評価式が異なることと、データの処理方法に若干の工夫を加えている点が異なっている。

図-7 は、この方法により計算したせん断耐力を実験値と比較したものである。両者は比較的良い精度で一致しており、同計算方法の妥当性が確認できた。表-5 は同方法により計算した斜めひび割れ位置を実験値と比較したものである。ばらつきはあるものの、計算値は実験値の傾向を比較的良く捕らえていることがわかる。

(2) 2点集中荷重を仮定した簡易な方法

井畔らは、等分布荷重を受ける梁のせん断スパン  $a$  は、スパン  $L$  の 1/4 点に集中荷重を受ける梁と等価であると見みなしている。文献<sup>2)</sup>では、スパン  $L$  が  $12d$  ( $d$  は有効高さ) である梁のせん断実験により、斜めひび割れの位置 (井畔らの定義は、主鉄筋位置において支点と斜めひび割れ発生部位との距離としている) は  $a$  の中央と一致するとしている。そして、支点からの距離  $1.5d$  ( $12d/8$ ) の位置に作用するせん断力と、せん断スパン  $a=3.0$  として計算したせん断耐力を比較検討している。

ここではまず、斜めひび割れの位置を井畔らの仮定と比較した。この際、斜めひび割れ位置の定義が若干異なるが、傾向を捉えるためここでは当初の定義の通りとして支点から  $1.5d$  と  $L/8$  で比較すると、表-5 に示す通り  $L/8$  の位置と比較的良く対応することがわかる。ここで用いた試験体のせん断スパン  $L$  は  $9.4d \sim 13.3d$  と幅があるが、井畔らの試験体は  $L=12d$  のみでありひび割れ位置にスパンと有効高さの比の影響を考慮した方が良いことがわかる。

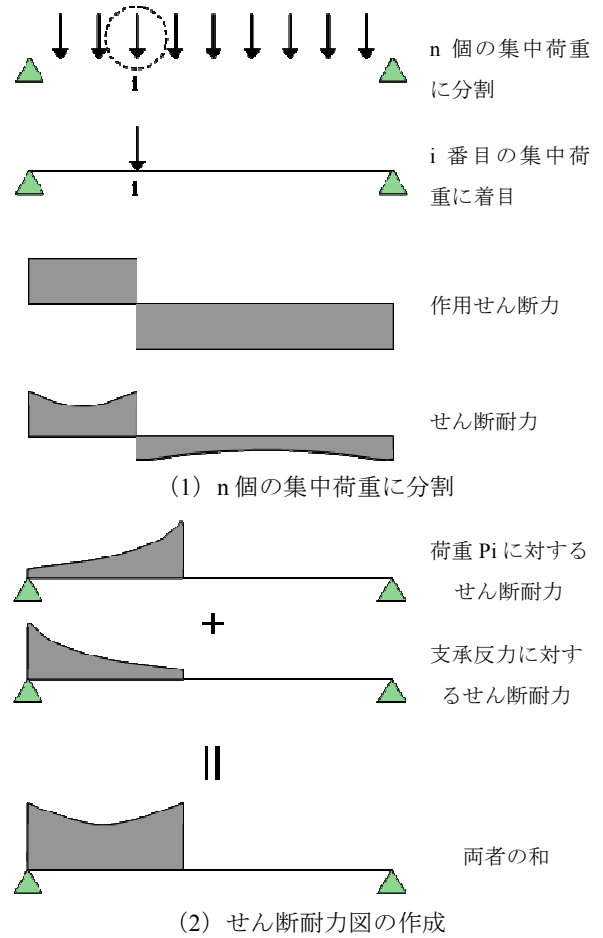


図-6 等分布荷重を受ける梁のせん断耐力計算方法

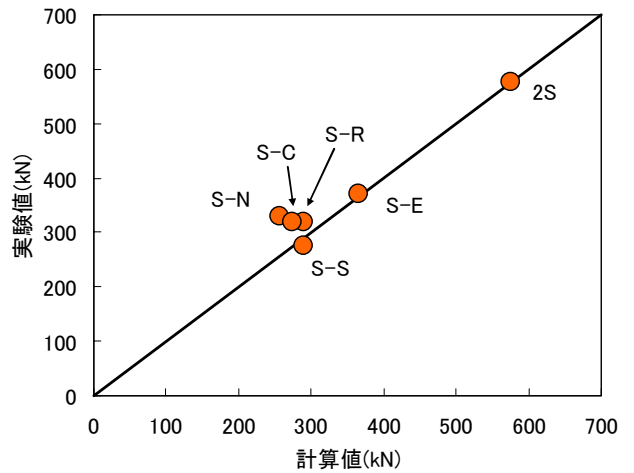


図-7 せん断耐力の比較

表-5 斜めひび割れ位置の比較

試験体	実験値 (mm)	計算値 (mm)	計算値 1.5d(mm)	計算値 L/8(mm)
S-N	263	240	180	200
S-S	179	220	180	150
S-R	307	230	180	200
S-E	279	300	255	200
S-C	244	230	180	200
2S	170	190	150	125

次に、L/4 点に集中荷重が作用すると仮定して試験体の L/8 位置に作用するせん断力と、式(1)によるせん断耐力を比較した。その結果を図-8 に示す。両者は比較的良く対応しており、かつ安全に評価できていることから、簡易的にはこのような方法でせん断耐力の照査を行っても問題ないと考えられる。

## 5. まとめ

鉄筋比やせん断スパン比、コンクリート強度などを変えた 6 体の二辺単純支持 RC 梁について、ゴムバッグを用いて等分布荷重を再現した載荷試験を行い、その耐荷挙動および耐力について既往の計算式などを用いて考察した。その結果、以下の点が明らかとなった。

- ① 載荷過程における鉄筋のひずみや変位の分布データなどからゴムバッグにより等分布荷重が再現されていると考えられる。
- ② いずれの梁も斜めひび割れが発生してせん断破壊した。コンクリート標準示方書に従って計算したせん断耐力は実験結果をかなり小さく（概ね半分程度）評価する傾向があり、不経済となる可能性がある。
- ③ 等分布荷重を多数の集中荷重に置き換えてせん断耐力を計算する齊藤らの方法により、試験体のせん断耐力を精度良く評価できることを確認した。
- ④ 等分布荷重をスパン L の 1/4 点と 3/4 点に作用する 2 点の集中荷重と仮定し、式(1)を用いて計算したせん断耐力は実験値を安全に評価できることを確認した。

## 参考文献

- 1) 2007 年制定コンクリート標準示方書 [設計編], 土木学会, 2007
- 2) 井畔瑞人, 塩屋俊幸, 野尻陽一, 秋山暉: 等分布荷重下における大型鉄筋コンクリートはりのせん断強度に関する実験的研究, 土木学会論文集 No.348/V-1, pp.175-184, 1984.8
- 3) 二羽淳一郎, 山田一字, 横沢和夫, 岡村甫: せん断補強鉄筋を用いない RC はりのせん断強度式の再評価, 土木学会論文集 No.372/V-5, pp.167-176, 1986.8
- 4) 齋藤啓一, 高橋宏幸, 石橋忠良, 丸山久一, 秋山充良, 鈴木基行: 多点荷重を受ける RC はりのせん断耐力評価に関する研究, 土木学会論文集 No.767/V-64, pp.87-98, 2004.8
- 5) Leonhardt, F. and Walther, R.: Beitrage zur Behandlung

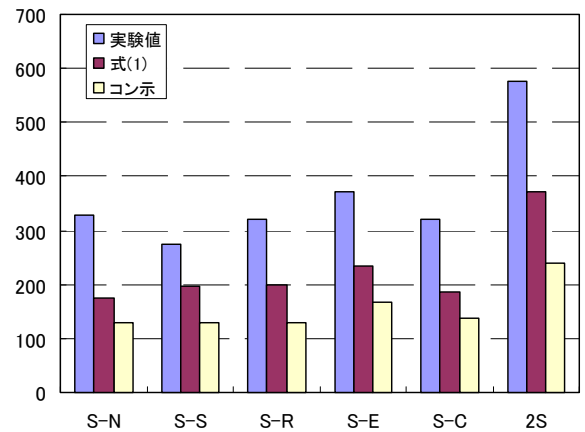


図-8 せん断耐力の比較

der Schubprobleme in Stahlbetonbau, Beton und Stahlbetonbau, pp.32-42,1962

- 6) 篠崎裕生, 樋口昇, 三上浩: 等分布荷重を受ける四辺単純支持 RC 板の耐力に関する実験的考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.3, pp.391-396, 2007
- 7) 篠崎裕生, 樋口昇, 三上浩: 等分布荷重を受ける RC 板の耐荷挙動に与える支持条件の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.3, pp.1339-1344, 2008
- 8) 篠崎裕生, 三上浩, 樋口昇: 支持条件や縦横比が異なる RC スラブの耐力に関する実験的考察, 三井住友建設技術研究所報告第6号, pp.33-39, 2008