

論文 RC 梁部材のせん断耐力に及ぼすせん断スパン比 a/d の効果

里道喜義*¹・幸左賢二*²・足立幸郎*³・鈴木直人*⁴

要旨：国内外で行なわれた実験データを収集し、RC 梁部材のせん断耐力に及ぼす a/d 効果について検討した。その結果、道路橋示方書ではせん断スパン比 a/d の効果を a/d ≤ 2.5 の場合についてのみ考慮することとなっているが、a/d > 2.5 の実験データについても a/d 効果が確認できた。

キーワード：せん断スパン比, せん断耐力, 信頼性解析, 等分布荷重

1. はじめに

現在の RC 構造物の設計手法では、曲げによる照査とともにせん断による照査によって部材断面が決定されることが多く、RC 構造物のせん断耐力を適切に推定することは設計上重要な課題である。

RC 梁部材のせん断耐力については、これまでに多くの研究がなされ、種々の算定式が提案されている。しかし、これらの式は過去の実験データに依存した実験式が多く、適合性の向上のためには、未だ検討の余地があると思われる。

また、せん断耐力に影響を与える要因の一つにせん断スパン比 a/d があるが、道路橋示方書では a/d ≤ 2.5 の場合についてのみ a/d 効果を考慮している。しかし、a/d > 2.5 の場合についてもその効果が見られるという報告¹⁾がこれまでになされている。

そこで、本研究では国内外で行なわれた実験データを収集し、RC 梁部材のせん断耐力に及ぼす a/d 効果についての検討を行なった。

2. 実験データ

既往の国内外の文献より実験データ 455 個を収集した。主に、岡村式¹⁾、修正道示式²⁾の定

式化に用いられた実験データに、最近 10 年間に国内で行なわれた実験データ 73 個を追加した。実験データをパラメータ毎に区分したものを図-1 に示す。また、解析に際しては、これらの中から道示式の適用範囲であるコンク

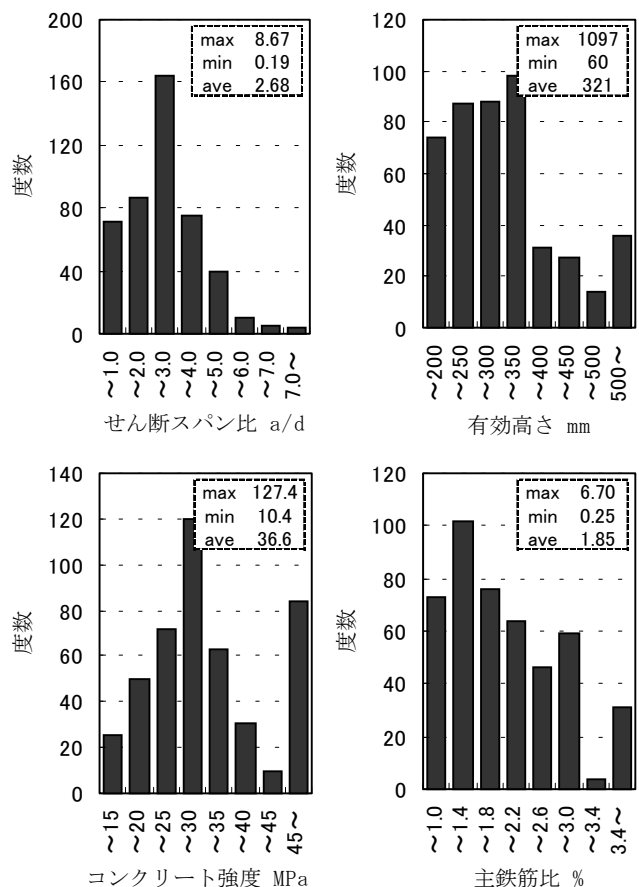


図-1 各パラメータの度数分布

* 1 九州工業大学大学院 工学研究科建設社会工学専攻 (正会員)
 * 2 九州工業大学助教授 工学部建設社会工学科 Ph.D. (正会員)
 * 3 阪神高速道路公団 工務部 設計課 (正会員)
 * 4 建設技術研究所(株) 大阪支社技術第二部 (正会員)

リート圧縮強度 $f_{ck} \leq 40 \text{ N/mm}^2$ を満足する実験データを対象とした。

3. 道示式の適応性検討

道路橋示方書では、せん断補強筋を有しない梁部材のせん断耐力は式(1)、式(2)により求められる。下記に示す5%超過式とは、信頼性解析により導かれた信頼性区間90%、下側超過確率5%の安全性を有する式である。計算に際しては、 $a/d \leq 2.5$ の実験データについてはディープビーム式を、 $a/d > 2.5$ の実験データについては梁部材式を用いた。

① 梁

$$S_{dc} = S_c \quad (1)$$

$$S_c = C_e \cdot C_{pt} \cdot \tau_c \cdot b \cdot d$$

② ディープビーム²⁾

$$S_{dc} = C_{dc} \cdot S_c \quad (2)$$

$$S_c = C_e \cdot C_{pt} \cdot \tau_c \cdot b \cdot d$$

$$C_{dc} = \frac{14}{1 + (a/d)^2} : \text{平均式}$$

$$C_{dc} = \frac{9.24}{1 + (a/d)^2} : \text{5\%超過式}$$

ここで、 C_e :有効高さ d に関する補正係数

C_{pt} :主鉄筋比 P_t に関する補正係数

τ_c :コンクリートが負担できる

平均せん断応力度 (N/mm^2)

d :有効高さ(mm) b :部材断面幅(mm)

道示式(5%超過式)を用いた計算値と実験値とを比較したものを図-2に示す。道示式を用いた場合、実験データは平均が1.58、変動係数が34.4%で分布しており、非常にバラツキの大きい結果となっている。これは、式において考慮されている各パラメータ(a/d , コンクリート強度, 有効高さ, 引張鉄筋比)に対する評価式がその効果を妥当に評価できていないことや、これらのパラメータ以外の要因がせん断耐力に影響していることなどが原因として考えられる。

本論文では、特に各パラメータ評価式の適応性に着目して検討を行った。

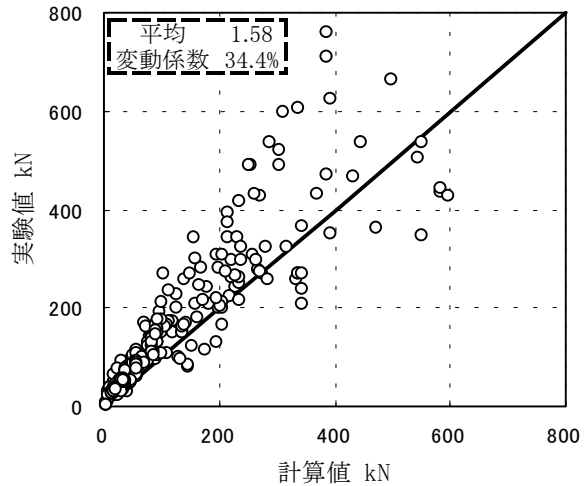


図-2 計算値と実験値の関係

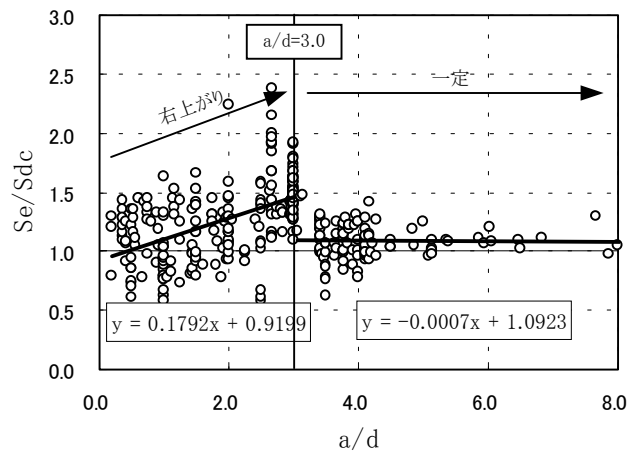


図-3 a/d と S_e/S_{dc} の関係

3.1 a/d 評価式の適応性検討

道路橋示方書では、有効高さ, 引張鉄筋比の割増係数を $d < 1\text{m}$ の場合には一律1.4, $P_t > 1.0\%$ の場合には一律1.5としている。しかし、図-1に示すように、実験データは、 $d < 1.0\text{m}$ および $P_t > 1.0\%$ のものが多数を占めており、この条件を適用するとほとんど有効高さと引張鉄筋比の効果を考慮しないことになる。そのため、解析においては、式(3)により S_c を求めることにより上記の条件を適用しないこととした。

$$S_c = 0.82 P_t^{1/3} \cdot (1/d)^{1/3} \cdot \sigma_{ck}^{1/3} \cdot b \cdot d \quad (3)$$

S_c に式(3)を用いて各パラメータ評価式の適合性について検討した。その結果、有効高さ, コンクリート強度, 引張鉄筋比の評価式は比較的妥当であったが、せん断スパン比 a/d の評価式は、 a/d と実験値/計算値(S_e/S_{dc})との間に強い相関関係が見られた(図-3参照)。図-3にはせん断スパン比 a/d と S_e/S_{dc} との関係

示している。図より、 $a/d \leq 3.0$ と $a/d > 3.0$ の実験データでは近似曲線の傾きが異なり、 $a/d \leq 3.0$ では 0.1792 と右上がりとなっているのに対し、 $a/d > 3.0$ では 0.0007 と一定となっている。つまり、 $a/d \leq 3.0$ では a/d が大きくなるに従い実験値と計算値の差が大きくなっている。このことから、現在の道路橋示方書の a/d 評価式では、RC 梁部材の a/d 効果を十分考慮できていないと考えられる。

そこで、収集した実験データをもとに a/d 評価式の再評価を行った。

3.2 せん断スパン比 a/d の影響の再評価

(1) a/d の効果

図-4 には、 a/d と Se/Sc の関係、また表-1 には、 a/d の一定領域ごとの Se/Sc の平均を示している。本来、道路橋示方書では $a/d=2.5$ を境界として、それ以下の供試体についてのみ a/d 効果を考慮しているが、表-1 より a/d が 2.5 ~ 3.0 でも Se/Sc の平均が 1.51 と a/d 効果が見られる。

そこで、本論文においては $a/d \leq 2.5$ 、 $a/d > 2.5$ それぞれについて a/d 評価式を提案した。

(2) a/d 評価式の再評価

RC 梁部材の a/d の効果については、これまでに二羽氏や岡村氏らにより研究がなされ評価式が提案されている。二羽氏³⁾は、ディープビームのせん断耐荷機構をタイドアーチモデルでモデル化し、式(4)により a/d 効果を定式化している。

$$\frac{K}{1+(a/d)^2} \quad (4)$$

また、岡村氏¹⁾は a/d が比較的大きな梁部材 ($a/d > 3.0$) の a/d 効果を実験的に評価し、 a/d 効果を式(5)で定式化している。

$$0.20(0.75 + \frac{1.4}{a/d}) \quad (5)$$

そこで、 a/d 評価式の形状を $a/d \leq 2.5$ の場合は式(4)、 $a/d > 2.5$ の場合は式(5)と仮定して再評価を行った。結果、次式が得られた。

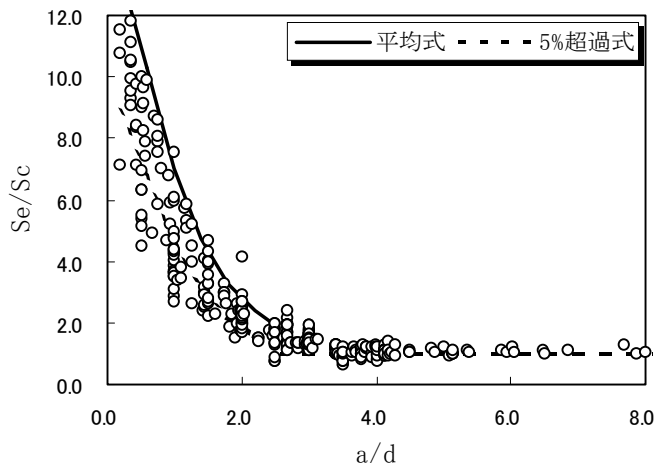


図-4 a/d と Se/Sc の関係 (修正道示式)

表-1 a/d の領域ごとの Se/Sc

a/d	データ数	Se/Sc
0~1.0	63	6.79
1.0~2.0	61	3.04
2.0~2.5	18	1.53
2.5~3.0	81	1.51
3.0~4.0	67	1.10
4.0~	56	1.08

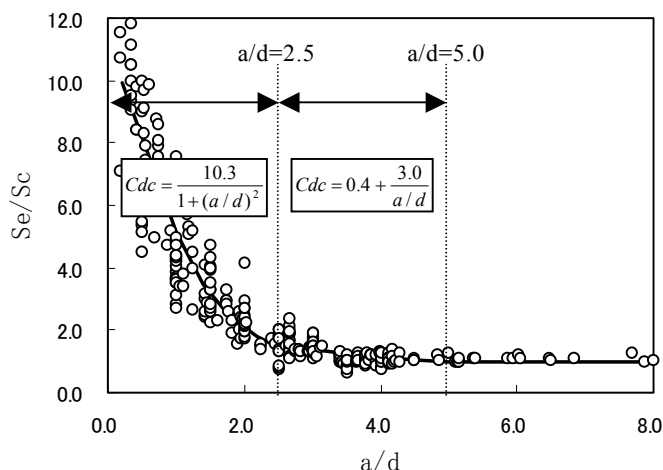


図-5 a/d と Se/Sc の関係 (提案式)

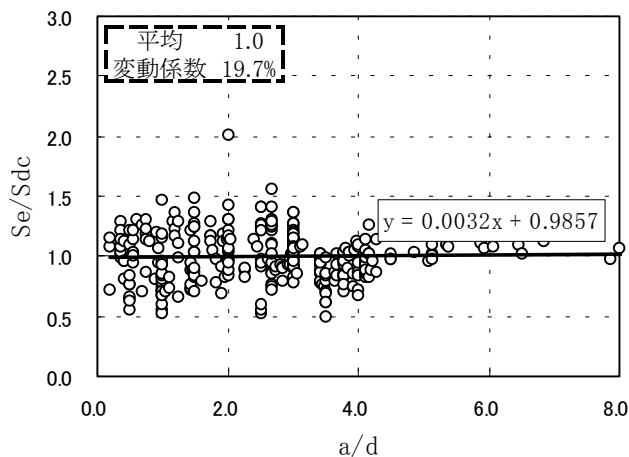


図-6 a/d と Se/Sdc の関係

$$a/d \leq 2.5 \quad Cdc = \frac{10.3}{1+(a/d)^2} \quad (6)$$

$$2.5 < a/d \leq 5.0 \quad Cdc = 0.4 + \frac{3.0}{a/d} \quad (7)$$

式(6), 式(7)を図に追加したものを図-5に, a/d 評価式に式(6), 式(7)を用いて再計算した結果を図-6に示す。

図より, 道示式の a/d 評価式に式(6), 式(7)を用いることにより平均が 1.0, 変動係数が 19.4%と比較的実験値と一致しており, 近似曲線の傾きが 0.003 と強い相関関係が見られないことから a/d 効果も妥当に評価している。

3.3 他のパラメータの適応性検討

a/d 以外のパラメータ(コンクリート強度, 有効高さ, 引張鉄筋比)の評価式の適合性について検討した。図-7には, 各パラメータと実験値/S_σ, S_d, S_p の関係を示している。ここに示す S_σ, S_d, S_p は, 各パラメータの割増係数を乗じていない計算値を意味する。

図より, 実験データの近似曲線と道示式は, ほぼ一致しており, 道路橋示方書に示されるコンクリート強度・有効高さ・引張鉄筋比の評価式は比較的妥当にその効果を評価している。

3.4 信頼性解析に基づく安全係数

近年, 構造物に所要の安全性を合理的に確保するための設計法として, 信頼性設計の導入が望ましいと考えられている。そこで, 信頼性解析に基づく安全係数の設定を行った。

せん断耐力式の推定精度のみに着目すると, 安全係数 γ は式(8)により求められる。

$$\gamma = P/P_N = (1 - \beta V_p) \bar{P} \quad (8)$$

$$P = \frac{Se}{Sdc} = \frac{Se/Sc}{Cdc} \quad P_N = \frac{P}{\gamma}$$

β : α による定数 α : 危険率

\bar{P} : P の平均値 V_p : 変動係数

$\alpha = 5\%$ (信頼区間 90%) とすると, 式(8)より $\gamma_{5\%} = 0.66$ となる安全係数が得られた。よって, 式(6), 式(7)に $\gamma_{5\%} = 0.66$ を乗じることにより, 下側超過確率 5%の安全性を考慮したせん断耐力が求まる。図-8 に平均式($\gamma = 1.0$)と

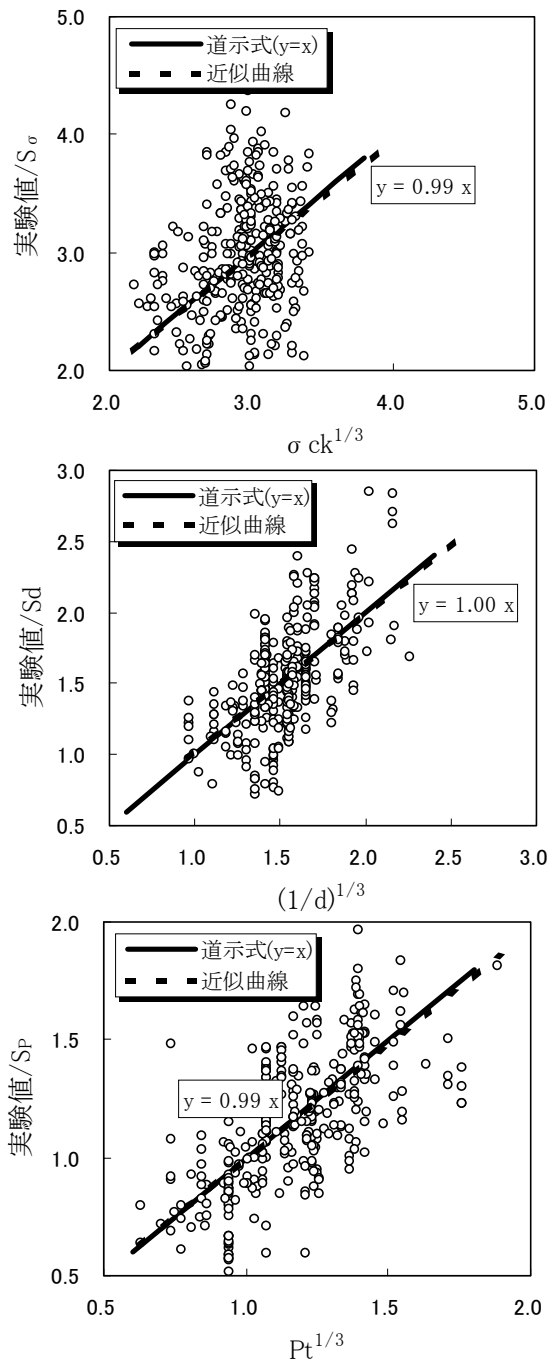


図-7 各パラメータと実験値/S_σ, S_d, S_p の関係

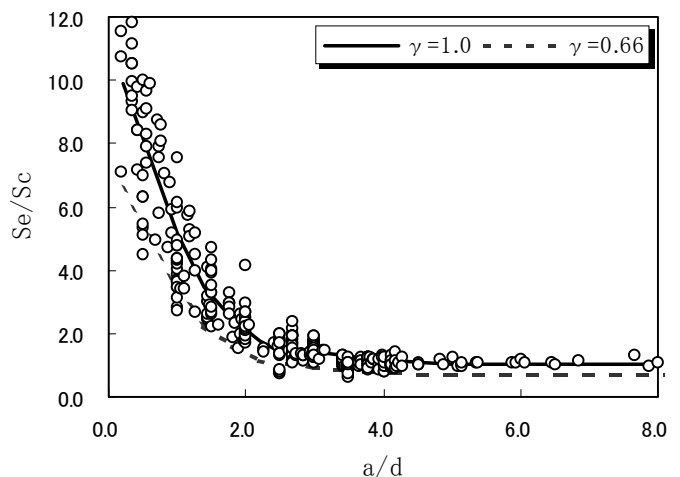


図-8 平均式と 5%超過式の関係

5%超過式($\gamma=0.66$)を用いた場合の a/d と Se/Sc の関係を示している。図より、 $\gamma_{5\%}$ を提案式に乗じることにより平均が 1.5, 変動係数が 19.7%となる。

4. 等分布荷重の評価方法

実構造物の中には開削トンネル等のような土圧による等分布荷重を受けるものも数多くあり, 等分布荷重を受ける RC 構造物のせん断照査方法の確立は設計上重要な課題である。

そこで, 井畔氏⁴⁾および白戸氏²⁾が提案する手法を取り上げ, その適合性を検討し, それを拡張した手法を提案する。また, 検討に用いた等分布荷重下の実験データは, 丁ら⁵⁾による実験データ 2 個, 井畔ら⁴⁾による実験データ 5 個, Leonhardt ら⁶⁾による実験データ 12 個の計 19 個である。

4.1 既往の評価手法の適応性検討

井畔氏は, 等分布荷重下の仮想せん断スパンをスパンの $1/4$ で集中荷重を受ける場合のせん断スパン a と等価であるとみなし, 支点から $x=12d/(4 \times 2)=1.5d$ 位置での作用せん断力とせん断耐力を比較している。

白戸氏の手法は, 多点で載荷された状態のせん断スパン a_i を $a_i=M_i/S_i$ (M_i, S_i :各照査断面 i の曲げモーメント, せん断力)と設定し, 破壊時に生じていた各照査断面 i でのせん断力 S_i とせん断耐力 S_{dci} の比 S_i/S_{dci} が最大となる断面を破壊断面としている。検討に際して, 等分布荷重の実験データを多数の集中荷重に変換する必要があるが, 今回の計算では 50 個の集中荷重に分割して計算を行った。

各供試体と実験値/計算値の関係を図-9 に示す。図より, 分布荷重を考慮せずに集中荷重として計算した場合, 平均 2.04, 変動係数 33.6%と非常に実験値を過小評価する傾向にあり, ばらつきも大きい。井畔の手法と白戸氏の手法を用いることにより平均が 0.97, 0.95 と比較的实验値と一致する。

実験での破壊断面位置をせん断ひび割れが

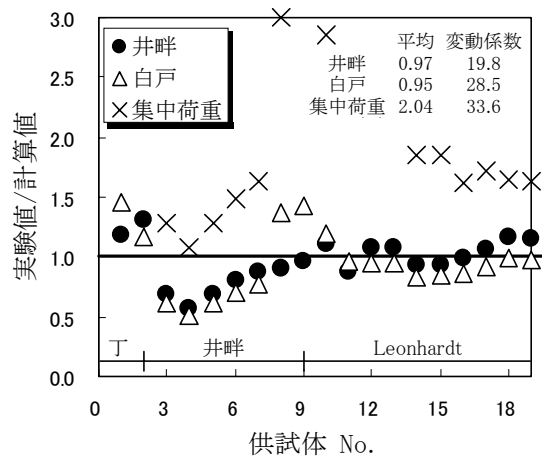


図-9 各供試体と実験値/計算値の関係

表-2 各手法に基づく破壊断面位置と実験の比較

実験データ	実験値 (mm)	計算値 (mm)		実験値/計算値	
		井畔	白戸	井畔	白戸
丁・桧貝	100-0	300	125 290	2.40	1.03
	200-0	325	250 500	1.30	0.65
井畔	3	525	900 1944	0.58	0.27
	4	875	1500 3240	0.58	0.27
	5	925	1500 3240	0.62	0.29
	6	2000	3000 6480	0.67	0.31
	7	2925	4500 9720	0.65	0.30
Leonhardt	11/1	297	176 409	1.68	0.73
	12/1	331	250 580	1.32	0.57
	13/1	452	313 675	1.45	0.67
	14/1	383	375 810	1.02	0.47
	15/1	427	500 920	0.85	0.46
	16/1	375	625 1050	0.60	0.36

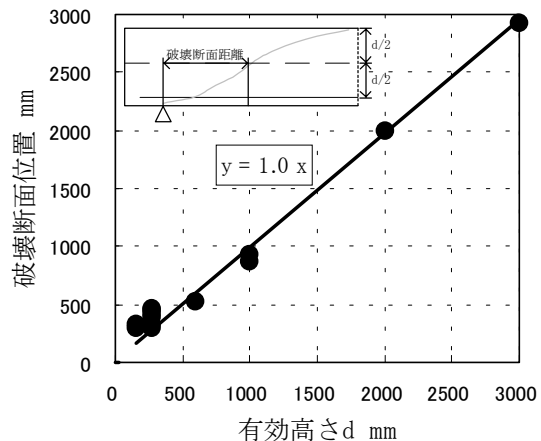


図-10 有効高さ d と破壊断面位置の関係

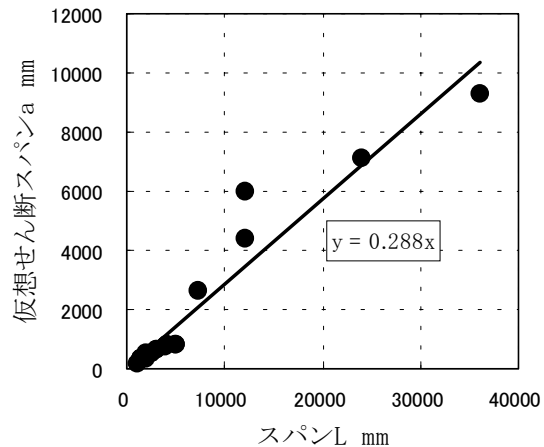


図-11 スパンと仮想せん断スパンの関係

有効高さの 2 分の 1 の点を横切る位置とし、各手法で求めた破壊断面位置と比較したものを表-2 に示す。表より、各手法を用いた破壊断面位置は実験での破壊断面位置と適合性が低く、非常にバラツキも大きい。

4.2 破壊断面と仮想せん断スパンの検討

収集した実験データを基に破壊断面位置について検討した。有効高さ d と破壊断面位置の関係を図-10 に示す。図より、有効高さ d と破壊断面位置の間には相関関係が見られ、破壊断面位置は支点から有効高さ d だけ離れた位置とほぼ一致することがわかる。これは、等分布荷重下では、支点が大きくひび割れに影響すると考えられ、そのために有効高さが破壊断面の支配的要素となったと考えられる。

そこで、せん断照査断面を支点から有効高さだけ離れた位置とし、実験データを用いて式(9)により仮想せん断スパン a を逆算した。

$$a = d \sqrt{10.3 \frac{Sc}{Se} - 1} \quad (9)$$

求めた仮想せん断スパン a とスパン L の関係を図-11 に示す。図より、スパン L と仮想せん断スパン a の間には相関関係が見られ、等分布荷重下の仮想せん断スパン a はスパン L の 0.3 倍とほぼ一致する。

そこで、等分布荷重下の評価手法を図-12 に示すように、せん断照査断面を支点から有効高さ d だけ離れた位置、仮想せん断スパン a を支点からスパンの 0.3 倍の位置とし、再び実験値と比較した。その結果、平均 1.19、変動係数 20.8%と比較的実験値と一致していた。

5. まとめ

収集した実験データを基に RC 梁部材のせん断耐力について検討した結果をまとめる。

- ① 道示では $a/d \leq 2.5$ についてのみ a/d 効果を考慮することとなっているが、 $a/d > 2.5$ の実験データについても a/d 効果が確認できた。
- ② 道示の a/d 評価式の再評価を行った結果、 $a/d \leq 2.5$ では式(4)、 $2.5 < a/d \leq 5.0$ では式

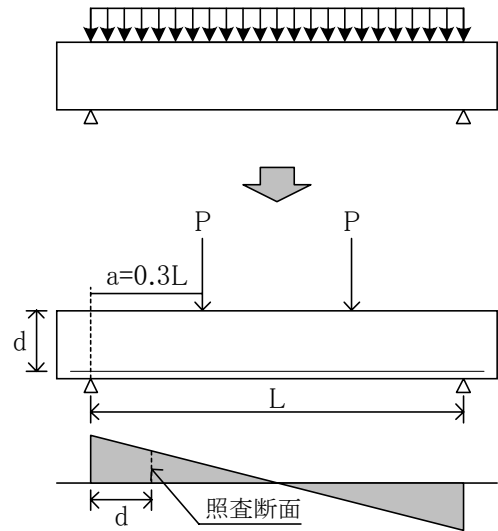


図-12 等分布荷重下の評価手法

(5)を用いることにより a/d 効果を妥当に評価し、実験値との適合性も良い。

③ 等分布荷重が作用する実験データに対して、その効果を考慮した手法(井畔, 白戸)を用いることにより概ね実験値と一致する。また、照査断面位置を支点から有効高さだけ離れた位置とし、また仮想せん断スパン a を支点からスパンの 0.3 倍の位置とすることによっても概ね評価できる。

参考文献：

- 1) Okamura, H. and Higai, T.: Proposed design equation for shear strength of reinforced concrete beams without web reinforcement, Proc of JSCE, No. 300, pp. 131-141, 1980. 8
- 2) 白戸真大, 福井次郎, 幸左賢二, 梅原剛: ディープビーム・フーチングのせん断耐力算定法に関する研究, 構造工学論文集, vol. 47A, pp. 1315-1325, 2001. 3.
- 3) 二羽淳一郎: FEM 解析に基づくディープビームのせん断耐力算定式, 第 2 回 RC 構造のせん断問題に対する解析的研究に関するコロキウム論文集, pp. 119-126, 1983. 10.
- 4) 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, 第 372 号/V-1, pp. 175-184, 1984. 8.
- 5) 丁則平, 梶貝勇, 中村光: 有限要素法による RC 部材のせん断破壊性状の検討, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 19, No. 2, pp. 723-728, 1997
- 6) Leonhardt, F. and Walther, R.: Beiträge zur Behandlung der Schubproblem im Stahlbetonbau, Beton und Stahlbetonbau, 1962. 2