

分布荷重，支点曲げモーメントの作用するRC構造物 の耐荷性能について

里道喜義¹・幸左賢二²・白戸真大³・小林寛⁴

¹正会員 九州工業大学大学院 工学部建設社会工学科（〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1）

²正会員 Ph.D. 九州工業大学助教授 工学部建設社会工学科（〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1）

³正会員 独立行政法人土木研究所 基礎チーム（〒305-0804 茨城県つくば市南原1-6）

⁴正会員 阪神高速道路公団 工務部 設計課（〒552-0006 大阪市港区石田3-1-25）

1. はじめに

実構造物の中には開削トンネル等のように土圧による分布荷重や支点曲げモーメントが作用する構造物が数多くある。

しかし、現開削トンネル設計基準では、これらの効果は考慮しておらず、部材寸法などが上部構造に近いことや、せん断スパン比の影響等も不明確なため、コンクリート橋編によってせん断耐力を評価している。コンクリート橋編等に代表されるせん断耐力式は、単純梁に集中載荷を行った実験式であり、分布荷重や支点曲げモーメントが作用するなどの特徴を有する開削トンネル壁部材に適用した場合、せん断耐力を過小評価することが知られている（図-1 参照）。

そのため、分布荷重や支点曲げモーメントを受ける 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、本研究では、分布荷重，支点曲げモーメントの効果について既往の評価手法を取り上げ、その適応性を検討した。

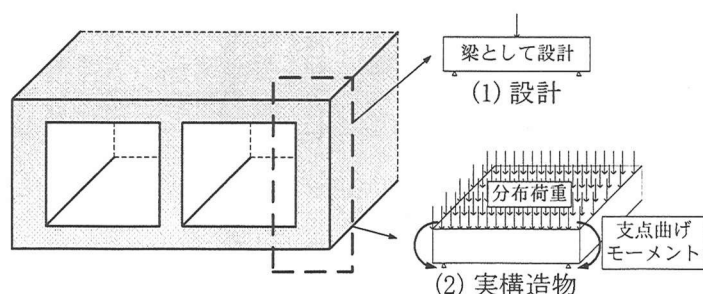


図-1 設計手法の比較

2. 評価手法について

電中研および桧貝氏などは実験および数値シミュレーションの結果から分布荷重や支点曲げモーメントが作用した場合の評価手法を提案している。ここでは、電中研および桧貝氏などが提案した評価手法を紹介する。

(1) 分布荷重+支点曲げモーメントの評価手法

スパン内に反曲点が存在する場合、反曲点を境界に異なるひび割れが存在し、相互に干渉して、最終的な破壊状態に至ることが明らかとなっている。

そのため、電中研¹⁾および桧貝氏²⁾は、このことを考慮して、部材を反曲点を境界にした2区間に分け、それぞれについて破壊判定する手法を提案している。図-2に示す断面力分布（S-図、M-図）の観点から支点から反曲点までの部材を片持はりに分布荷重が作用した状態と想定し、反曲点から部材中心までを単純はりに分布荷重が作用した状態と想定してそれぞれ評価している。

(2) 分布荷重の評価手法

図-2に示す評価手法を用いる場合、はり部材、片持はり部材に分布荷重が作用した状態の評価手法が一つの重要な要素となる。既往の分布荷重の評価手法は表-1に示すように、主に評価手法1～3のように3つのパターンに分けられる。以下にその代表的な手法とその概要を示す。

a) 評価手法1

白戸氏³⁾は、等荷重を多点で載荷された状態を、各

照査断面(載荷点)のせん断作用力 S_i とせん断耐力 S_{dci} を求め、 $(S_i / S_{dci})_{\max}$ となる断面を破壊断面とすることにより評価している。その際、 S_{dci} は岩崎氏⁴⁾の方法を参考にし、各照査断面のせん断スパン a を次式により設定し、各照査断面のせん断耐力 S_{dci} を求めている。

単純はり： $a_i = M_i / S_i$ (1)

片持はり： $a_i = M_i' / S_i'$ (2)

- ここに、 M_i ：照査断面 i に生じる曲げモーメント
- S_i ：照査断面 i に生じるせん断力
- M_i' ：照査断面 i とその外側に作用している荷重が固定端に作る曲げモーメント
- S_i' ：照査断面 i とその外側に作用している荷重が固定端に作る曲げモーメント

b) 評価手法2

桧貝氏は、荷重を複数個に分割し、その各々の荷重による発生するせん断作用力を低減係数により除し、それらを足し合わせた時のせん断作用力 S_i が最大となる点を破壊断面とすることにより評価している(区間強度法)。その際に用いる低減係数は、断面位置から支点および載荷点までの距離とせん断耐力の関係に着目した実験から独自に提案している。

c) 評価手法3

井畔氏⁵⁾は、Kaniの考え方を参考にして、等分布荷重を受ける場合は、せん断スパン a をスパン L の1/4とした場合と等価であるとみなし、また、照査位置を支点から $1.5d$ と考えて評価している。

d) 各種手法の比較

図-3 には、Leonhardt⁷⁾の 11/1 の実験データをベースとして L/d を変化させた場合の各手法により求まる照査位置をプロットしたものを示す。

図より、各手法により求まる照査位置は L/d の違いにより異なり、 L/d が大きい範囲では、区間強度法と井畔法が一致し、 L/d が小さい範囲では白戸法と区間強度法が比較的一致する傾向となっている。

(3) 集中荷重を受けるはりのせん断耐力式

表-1に示される評価手法1, 3を用いる場合、部材の持つせん断耐力を $a=M/S$, $a=L/4$ と設定することにより求めるため、精度の良い a/d

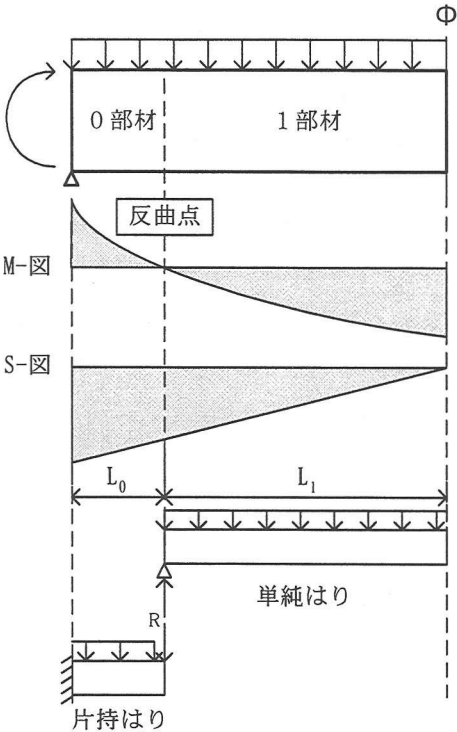


図-2 分布荷重、支点曲げモーメントの評価方法

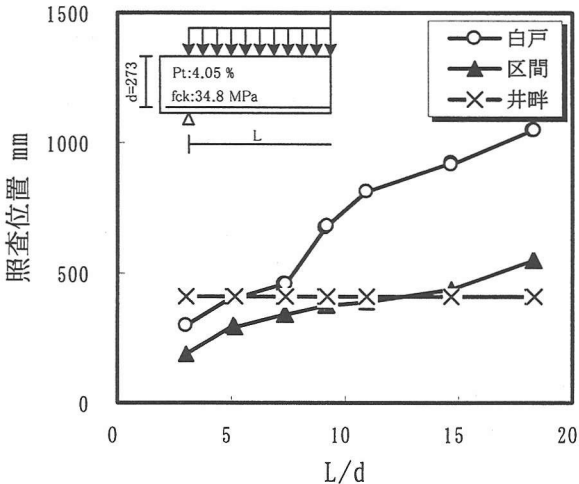


図-3 各手法の照査位置の比較

表-1 各種評価手法の比較

	評価手法 1	評価手法2	評価手法3
代表的手法	白戸法	区間強度法(桧貝)	井畔法
概要			
照査位置	$(S_{ei} / S_{dci})_{\max}$ となる断面	$S_{i\max}$ となる断面	支点から $1.5d$ 離れた位置
照査位置のせん断耐力	$S_{dci} = C_{dci} \times S_c$ $a_i = M_i / S_i$ M_i, S_i : 照査位置の曲げモーメント, せん断力	$S_{dc} = S_c / (S_{i\max}) \times L$ $S_{i\max}$: 低減後の最大せん断力 L : スパン長	$S_{dci} = C_{dci} \times S_c$ $a_i = L / 4$ L : スパン長

効果を考慮したせん断耐力式が求められる。そこで、著者ら⁹⁾は集中荷重を受けるはりのせん断耐力に関して、過去10年間の国内外で行われた実験データを収集し、 a/d の小さい領域に対しても、 a/d の大きい領域に対しても、連続的に求められるように検討を行った。その結果、式(3)が得られた。

$$S_{dc}=C_{dc}\cdot S_c \tag{3}$$

C_{dc} : せん断スパン比 a/d に応じた補正係数

$$\begin{aligned} a/d \leq 2.5 \quad C_{dc} &= \frac{10.3}{1+(a/d)^2} \\ 2.5 < a/d \leq 5.0 \quad C_{dc} &= 0.4 + \frac{3.0}{a/d} \end{aligned}$$

S_c : コンクリートの負担するせん断耐力式

$$S_c=0.82Pt^{1/3}\cdot(1/d)^{1/3}\cdot s_{ck}^{1/3}\cdot b\cdot d$$

ここに、 d : 部材断面の有効高さ、 Pt : 軸方向引張鉄筋比、 s_{ck} : コンクリートの圧縮強度、 b : 部材断面幅

式(3)を用いることにより、はりのせん断耐力を精度良く評価できる。よって、本論文におけるせん断耐力は式(3)を用いて全て求めている。

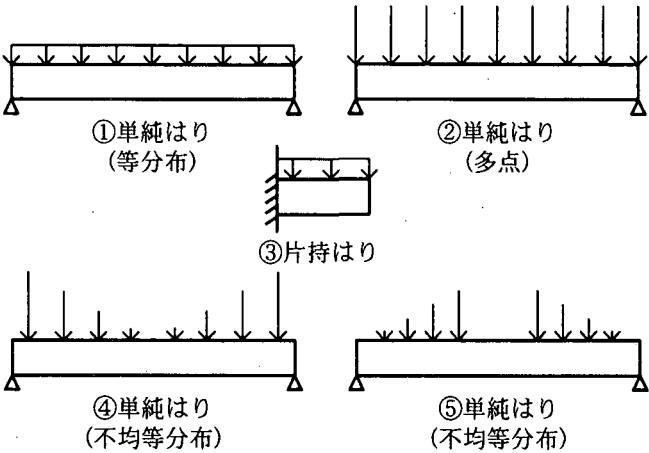


図-4 荷重パターン

表-2 実験データ

	Number	L/d	f_c' (Mpa)	Pt (%)	d (mm)	荷重 パターン
電中研	4	4.0-16.0	35	4.0	250	②
岩崎	6	7.8	30	2.9	270	②
丁井畔	2	6.3-12.5	32	4.2	160	①
井畔	5	12.0	21-29	0.4-0.6	600-3000	①
Leonhardt	12	5.1-18.3	33-35	2.0	273	①
土木研究所	24	4.0-12.0	23-27	1.2-1.6	240-360	②, ③ ④, ⑤
Total	53	4.0-18.3	21-35	0.4-4.2	160-3000	-

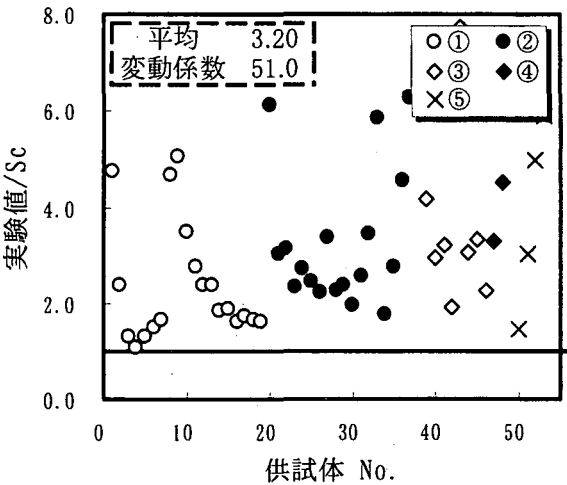


図-5 各供試体と実験値/ S_c の関係

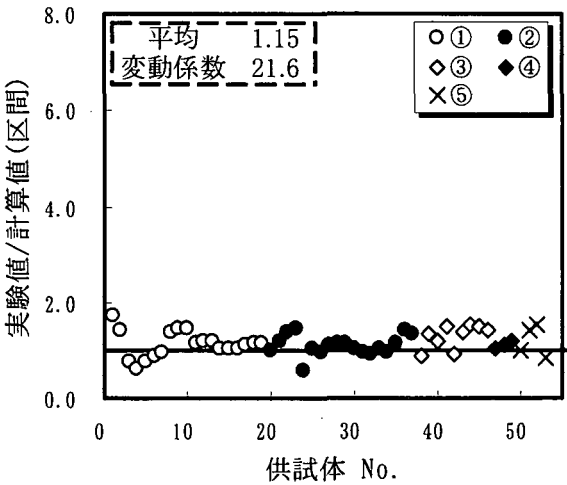


図-7 区間強度法を用いた場合

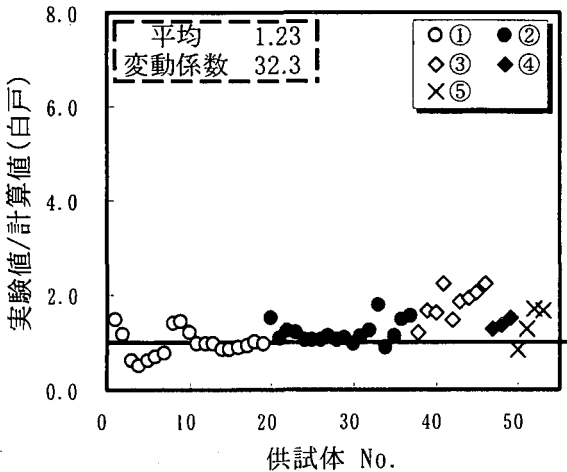


図-6 白戸法を用いた場合

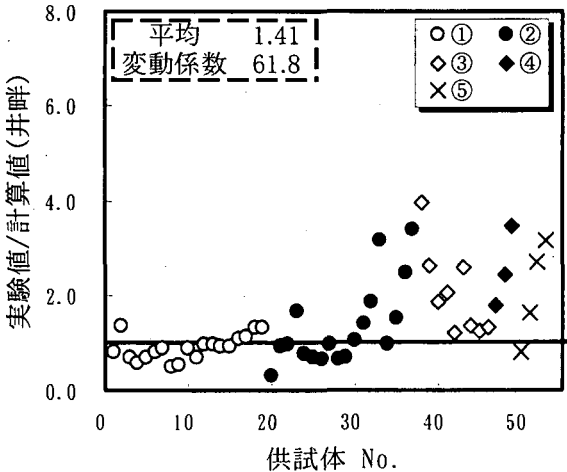


図-8 井畔法を用いた場合

3. 適応性検討(分布荷重)

始めに分布荷重の各種評価手法の適応性について検討を行った。

また、実際の開削トンネル壁部材を想定した場合、上側と下側の壁部材には等分布で土圧が作用するが、側壁には三角形分布の不均等土圧が作用する。そのため、等分布荷重に加え不均等分布荷重についても精度良く評価できることが求められる。そこで、等分布荷重に加え不均等分布荷重を載荷した実験データについても検討を行っている。

(1) 実験データ

検討には、電中研¹⁾、岩崎⁴⁾、丁⁶⁾、井畔⁵⁾、Leonhardt⁷⁾、土木研究所⁸⁾で行われた実験データの計53体を用いた。表-2には実験データの概要を、図-4には実験データの載荷パターンを示す。

(2) 通常のはりとして算定した場合

始めに通常的设计で行われるように、 a/d (ディープビーム)による効果 Cdc を無視した計算値 Sc と実験値とを比較検討した。図-5には各供試体と実験値/ Sc の関係を示す。図より、通常的设计で行われるように a/d 効果 Cdc を無視した計算値 Sc を用いた場合、平均が3.2と計算値は梁の耐力を大きく過小評価する。また、変動係数が51%とバラツキも非常に大きい。

(3) 各種手法を用いた場合

次に表-1に示される各種手法を用いた場合の適応性について検討した。

表-3には計算結果を、図-6~8には、各種手法を用いた場合の実験値/計算値の関係を示す。図より、通常的设计で行われる式を用いた場合には平均が3.2であったのに対し、各種手法を用いると、平均が1.0~1.5と比較的良く実験値を推定している。

白戸法を用いると、平均が1.23、変動係数が32.3%と比較的一致しているが、片持はりの実験データについては、平均が1.8と他の実験データより大きく、実験値を過小評価している。

区間強度法を用いると、最大耐力、破壊断面位置のどちらにおいても、平均と変動係数がそれぞれ1.15、21.6%、1.01、48.9%と比較的良く実験値を推定している。

井畔法を用いると、平均、変動係数が1.41、64.8%と他の手法に比べると平均およびバラツキとも大きくなっている。また、井畔法は等分布を対象と

表-3 計算結果

		白戸法	区間強度法	井畔法
最大耐力	①	0.95	1.13	0.89
	②	1.19	1.10	1.32
	③	1.80	1.29	2.00
	④	1.38	1.11	2.54
	⑤	1.36	1.19	2.05
	計	平均	1.23	1.15
	変動係数	32.3	21.6	61.8
破壊位置	①	0.50	0.89	0.86
	②	0.52	1.19	0.81
	③	0.84	0.58	0.55
	④	0.64	1.28	0.87
	⑤	0.64	1.13	0.89
	計	平均	0.57	1.01
	変動係数	42.1	48.9	28.8

表-4 実験データ概要

	Number	L/d	f'_c (Mpa)	Pt (%)	d (mm)	L_0/d
電中研	13	8.0	35	4.0	250	0.5-4.0
検貝	24	6.0-14.0	19-43	3.2	160	0.3-6.6
Total	37	6.0-14.0	19-43	3.2-4.0	160-250	0.3-6.6

※ L_0 : 支点から反曲点までの距離

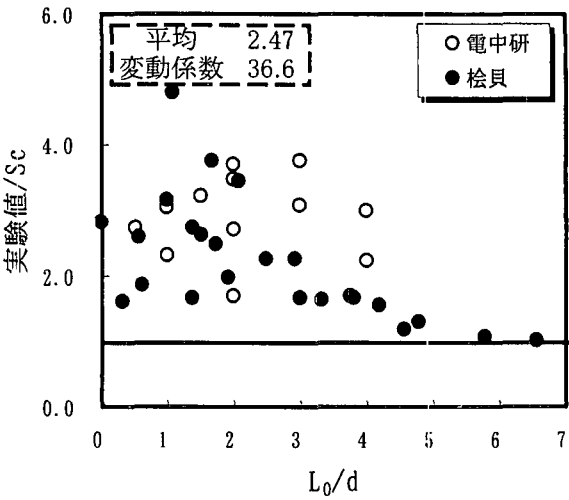


図-9 L_0/d と実験値/ Sc の関係

したものである。不均等分布の実験データに適応した場合、バラツキが大きく等分布に比べて実験値を過小評価する。

また、実験での破壊位置と各種手法から求まる照査位置との関係について検討した。実験での破壊位置は、主要なひび割れが有効高さの1/2の点を通して位置としている。

表-3より、区間強度法と井畔法を用いた場合、平均が1.01、0.81と実験値の破壊位置と比較的一致している。しかし、変動係数が48.9%、28.8%とばらつきも大きい。

4. 適応性検討(分布+支点曲げモーメント)

次に分布荷重+支点曲げモーメントの作用する実

験データに対する各種手法の適応性について検討した。また、ここでは、白戸法、区間強度法、井畔法に加え電中研が独自に提案している方法についても検討した。電中研法は、井畔法と類似しており、せん断スパン a を支点から反曲点までの距離、反曲点から M_{max} までの距離と設定し、照査位置を $a/2$ として評価する方法である。

(1) 実験データ

検討には電中研¹⁾、桧貝氏²⁾が行った実験データの計37体を用いた。実験データの概要を表-5に示す。

(2) 通常のはりとして算定した場合

始めに通常の設計で行われるように、 a/d (ディープビーム)による効果 C_{dc} を無視した計算値 S_c と実験値を比較検討した。

検討した結果を、図-9に示す。実験値/ S_c は平均2.47と計算値は梁の耐力を過小に評価している。また、 L_0/d は小さくなるほど、梁のせん断耐力を過小評価する傾向にある。

(3) 各種手法を用いた場合

次に表-3に示される各種手法を用いた場合の適応性について検討した。

図-10~13には、各種手法を用いた場合の実験値/計算値の関係を示している。図より、通常的设计で行われる式を用いた場合には平均が2.47であったのに対し、各種手法を用いると、平均が0.5~1.5と比較的良好く実験値を推定している。

白戸法は、平均が1.19、変動係数が32.3%と比較的実験値と一致するが、1部材で破壊する実験データに

表-5 計算結果

			白戸	区間強度	井畔	電中研
最大耐力	0部材	平均	1.31	1.24	0.71	1.33
			0.91	1.10	0.77	1.03
	1部材	平均	1.19	1.19	0.74	1.23
			26.0	23.3	28.2	26.2
破壊位置	0部材	平均	3.76	0.92	0.80	0.99
			0.71	1.06	0.87	0.75
	1部材	平均	2.83	0.97	0.83	0.91
			109.4	43.4	39.7	85.1

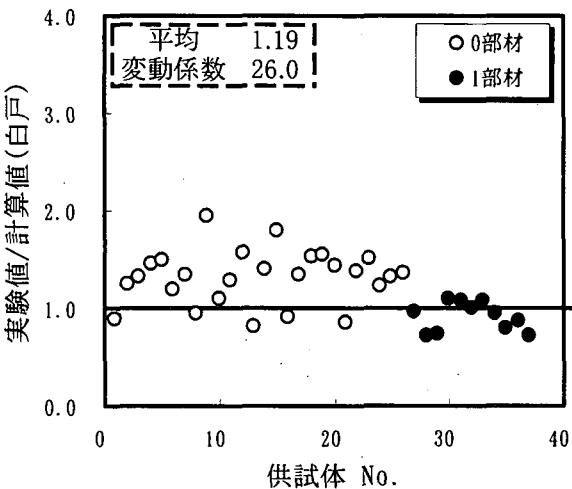


図-10 白戸法を用いた場合

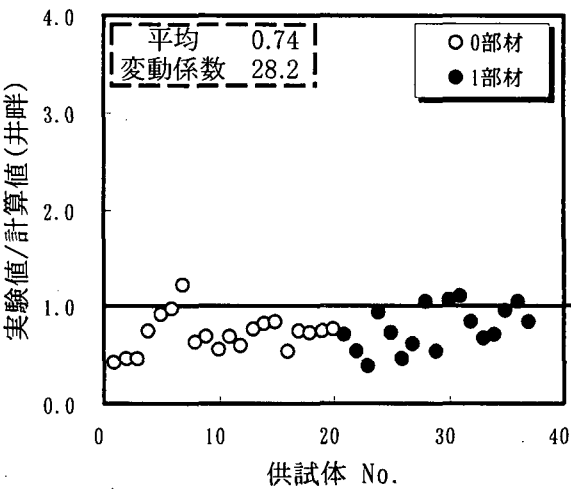


図-12 井畔法を用いた場合

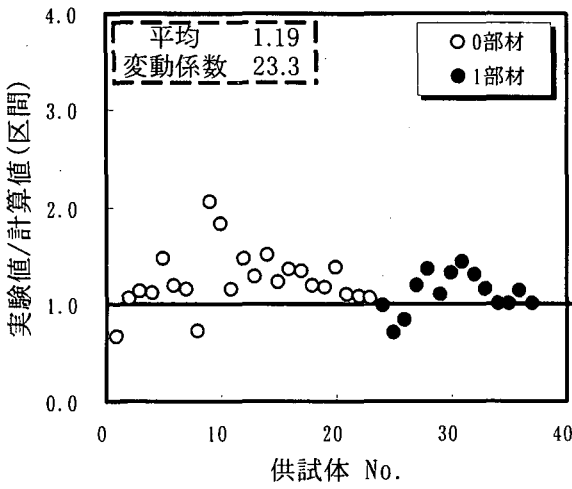


図-11 区間強度法を用いた場合

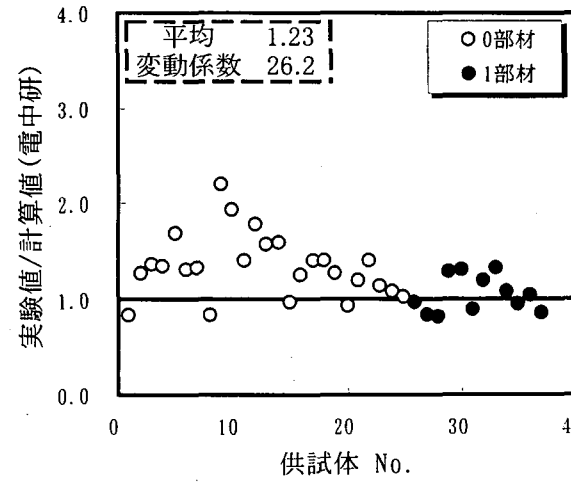


図-13 電中研法を用いた場合

比べて、0部材で破壊するデータの平均が大きくなっており、実験値を過小評価している。これは、分布荷重の場合と同様に片持はりの実験データを過小評価するためと考えられる。

区間強度法、電中研法を用いると最大耐力および破壊断面位置とも比較的良好に実験値と一致している。

(4) 破壊部材に関する検討

図-14には、 L_0/d と破壊部材の関係を示す。破壊部材は、反曲点の位置に大きく影響を受け、反曲点が支点に近いほど(1.5~2以下)1部材で破壊し、反曲点が支点から遠いほど0部材で破壊する。各種手法でも、同様の傾向を示している。

破壊部材の一致数を比較すると電中研、井畔、区間強度法では90%の確率で実験値と一致しているが、白戸法では80%程度と他の手法に比べると適応性の低い結果である。

・電中研	33/36	・井畔	33/36
・白戸	32/36	・区間強度法	35/36

5. まとめ

分布荷重、分布荷重+支点曲げモーメントの作用するRC部材の耐荷性能について既往の実験データをもとに検討した結果をまとめる。

① 分布荷重、分布荷重+支点曲げモーメントが作用する供試体に、従来の設計通りはりのせん断耐力式 Sc を用いると実験値/計算値の平均が3.2, 2.5と実験値を過小評価する。特に、反曲点が支点に近い供試体ほど過小評価する。

② 分布荷重が作用する供試体に、白戸法、区間強度法を適用すると比較的良好に実験値を推定する。しかし、白戸法に関しては、片持はりの実験データを過小評価する傾向にある。

また、井畔法は等分布荷重には適応できるが、不均等荷重には実験値を過小評価する傾向にある。

③ 分布荷重+支点曲げモーメントが作用する供試体に白戸法、区間強度法、電中研法を用いると比較的良好に実験値を良く推定する。しかし、白戸法に関しては、分布荷重時と同様に0部材(片持はり)で破壊する場合に実験値を過小評価する傾向にある。

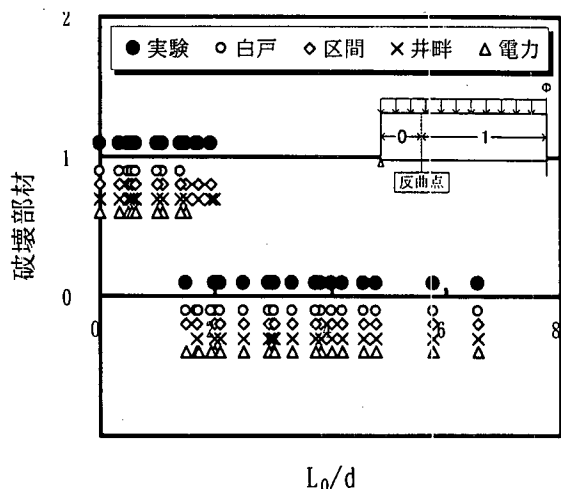


図-14 L_0/d と破壊部材の関係

- 2) 桧貝：等分布荷重を受け、曲げモーメントの反曲点をスパン内に持つRC梁のせん断耐力，土木学会論文集，No. 460/V-18，pp. 49-56，1993. 3
- 3) 白戸，福井，幸左，梅原：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
- 4) 岩崎，丸山，吉田，石橋：多点荷重を受けるRC梁のせん断性状に関する基礎的研究，第7回コンクリート工学年次講演会論文集，pp. 513-516，1985
- 5) 井畔，塩屋，野尻，秋山：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. 372/V-1，pp. 175-184，1984. 8
- 6) 丁，桧貝，中村：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
- 7) Leonhard: Beiträge zur Behandlung der Schubproblem im Stahlbetonbau, Beton und Stahlbetonbau, 1962. 2
- 8) 土木研究所：鉄筋コンクリート部材のせん断実験データ集，土木研究所資料，第2045号，1984. 3
- 9) 里道，幸左，足立，鈴木：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，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 24，No. 2，pp. 931-936，2002

参考文献

- 1) 電力中央研究所：鉄筋コンクリート製地中構造物の限界状態に用いるせん断耐力評価方法