

# 論文 フーチングの押し抜きせん断耐力式の検討

里道喜義\*1・幸左賢二\*2・白戸真大\*3・水谷治弘\*4

**要旨：**フーチングの設計では、押し抜きせん断の照査により部材断面が決定されることもあり、押し抜き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と考えられる。そこで、杭基礎フーチングをモデル化した载荷実験を行い、既往の押し抜きせん断耐力式の適応性について検討を行った。その結果、道示のコンクリート強度、引張鉄筋比の評価式は比較的妥当であったが、せん断スパン比については、評価式ほどの  $a/d$  の効果が実験値では見られなかった。

**キーワード：**フーチング、ディープビーム、押し抜きせん断耐力、せん断スパン比

## 1. はじめに

平成8年道路橋示方書の保耐法による杭基礎フーチングの耐震設計<sup>1)</sup>では、柱あるいは壁前面からフーチング厚さの1/2だけ離れた位置での梁としてのせん断に対する照査に加え、版としてのせん断つまり押し抜きせん断についても照査を行うようになっている。その結果、押し抜きせん断の照査により部材断面が決定されることもあり、フーチングの押し抜き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と考えられる。

押し抜きせん断については、すでに多くの研究がなされているが、その対象は床版などの部材厚の薄いものが多く、フーチングのような部材厚の厚いものを対象としたものは数少ない。

そこで、本研究では、フーチングの押し抜きせん断耐力式の確立のため、杭基礎フーチングをモデル化した供試体を用いて鉛直载荷実験を行い、既往の押し抜きせん断耐力式との適応性について比較検討を行った。さらに、複数の文献より実験データを収集し、道示式のパラメータの評価式について適応性の検討を行った。

## 2. 実験概要

供試体形状を図-1に、構造諸元を表-1に示す。供試体は杭基礎フーチングをモデル化したもので、矩形フーチングと幅200mm、高さ220mmの杭部を有する構造とした。

供試体は、コンクリート強度(26.0~42.9kN)、

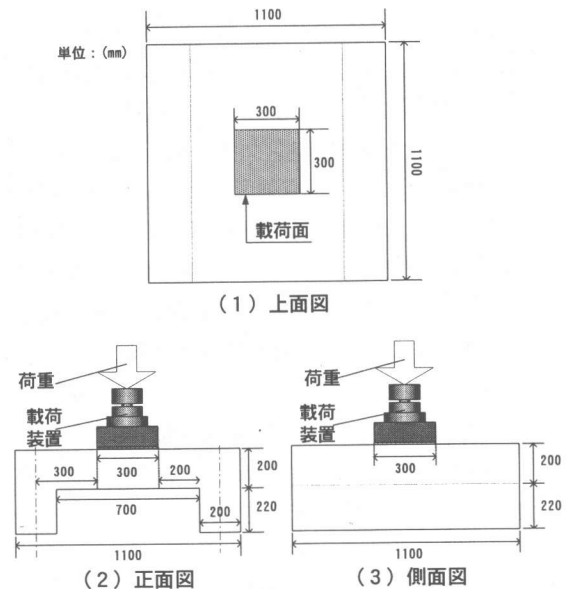


図-1 供試体形状

\*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独立行政法人土木研究所 構造物研究グループ (正会員)

\*4阪神高速道路公団 工務部 設計課 (正会員)

表-1 供試体諸元と実験結果

	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7
有効高さ d(mm)	170	170	170	170	170	170	170
せん断スパン a(mm)	300	300	300	300	300	270	235
せん断スパン比 a/d	1.76	1.76	1.76	1.76	1.76	1.59	1.38
配筋状態	一方向配筋	一方向配筋	二方向配筋	二方向配筋	二方向配筋	二方向配筋	二方向配筋
引張鉄筋比 (%)	0.61	0.61	0.61, 0.47	0.61, 0.47	0.95, 0.75	0.57, 0.43	0.61, 0.46
圧縮鉄筋比 (%)	-	-	-	0.41, 0.27	-	-	-
コンクリート圧縮強度 $\sigma_{ck}(N/mm^2)$	42.9	26.0	26.0	26.5	26.5	27.8	27.8
初期ひび割れ荷重(kN)	176.4	98.0	147.0	196.0	245.0	98.0	196.0
鉄筋の降伏荷重(kN)	470.4	490.0	539.0	441.0	705.6	441.0	490.0
最大荷重(kN)	686.0	608.6	646.8	617.4	716.4	688.9	768.3

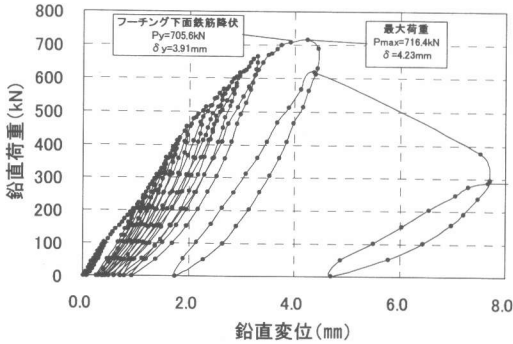


図-2 下面中心の荷重と変位の関係(No. 5)

鉄筋量(0.61%, 0.95%, 圧縮および配筋鉄筋の有無), せん断スパン比 a/d(1.76, 1.59, 1.38)を変化させた合計7体とした。支持条件は、杭部底面において鉛直方向は支持したが、水平方向に関しては特に支持しなかった。また、載荷板とフーチングおよび杭と底面の間には荷重の局部荷重を防ぐためゴム版を介した。なお、今回の実験では、コンクリートは普通コンクリート、鉄筋はSD-295の異形鉄筋D13(降伏点強度 338N/mm<sup>2</sup>)を用いた。

荷重は、1000kN 載荷試験装置を使用し、単調漸増鉛直荷重で行った。載荷ステップは最大荷重に達するまでは荷重制御で、それ以降は変位制御により載荷した。また、荷重制御時の荷重ステップ増加量は 50kN を基本とし、ステップ毎に荷重を 0kN まで除荷し、ひび割れ状況を観察した。

実験中の測定項目は載荷荷重、供試体変位、鉄筋ひずみ、ひび割れ状況とした。

### 3. 実験結果および考察

#### (1) 破壊性状

ここでは、代表例として No. 5 供試体について考察する。図-2に下面中心位置における荷重と変位の関係を示す。図より、供試体は最大荷重ま

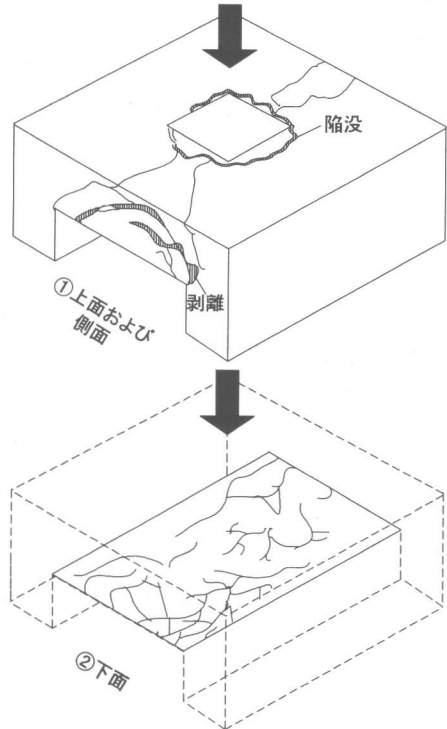


図-3 最終ひび割れ状況(No. 5)

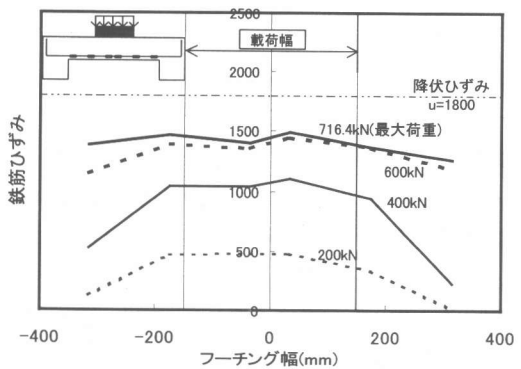


図-4 中心主鉄筋のひずみ分布(No. 5)

では荷重の増加に伴い変位も緩やかに増加していることから曲げ破壊的な挙動を示していたと考えられる。しかし、最大荷重以降は荷重が急激

に減少しており、最終的にはせん断により終局に至ったと考えられる。

図-3に最終状態でのひび割れ状況を示す。ひび割れはまず下面中心から杭方向へ発生し、次いで側面へと曲げによるひび割れが生じた。しかし、曲げによるひび割れは荷重が増加しても長さ、幅ともに顕著には進展せず、直接終局の原因には至らなかった。終局を支配するひび割れは、最大荷重付近で側面に載荷板より杭部方向に斜めひび割れが生じ、これが急激に進展して終局に至った。上面では、最大荷重付近までひび割れは生じておらず、終局と同時に載荷板まわりを押し抜くようなひび割れが生じた。

図-4に各荷重における供試体中心位置の主鉄筋ひずみ分布を示す。図より、鉄筋ひずみは最大荷重時にも降伏ひずみに達しておらず、曲げによる損傷は進展していなかった。

以上の結果より、供試体は曲げ先行型押し抜きせん断により終局に至ったものと推定できる。また、損傷の進展状況は、No.1~No.7 供試体の全てにおいて、ほぼ同様の進展を示した。

## (2) 最大荷重

表-1に7体の最大荷重、降伏荷重、初期ひび

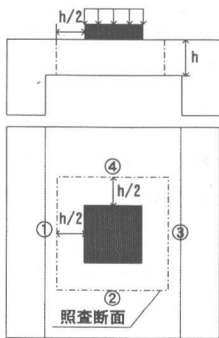


図-5 版としてのせん断照査断面

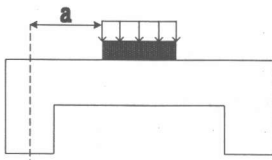


図-6 計算に用いたせん断スパン a のとり方

割れ発生荷重を示す。表より、各パラメータを変化させることにより、コンクリート強度(26.0~42.9kN)で77kN、鉄筋量(0.61%, 0.95%, 配力鉄筋の有無)で70kN、38kN、せん断スパン比 a/d(1.76, 1.59, 1.38)で42kN、122kNの最大荷重の増加が見られ、その効果は確認できた。また、圧縮鉄筋に関しては、配置することによる耐力の増加は見られず、その効果は確認できなかった。

## 4. 既往式の適応性検討

### 4.1 押し抜きせん断耐力式

以下に既往の押し抜きせん断耐力式を示す。

①道示式(平成8年度版)<sup>1)</sup>

$$P_s = C_{dc} \cdot S_c + C_{ds} \cdot S_s \quad (1)$$

ここで、 $S_c$ :コンクリートの負担するせん断耐力

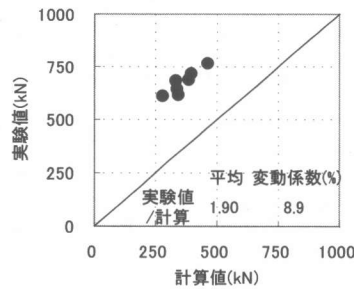
$$S_c = C_c \cdot C_e \cdot C_{pt} \cdot C_N \cdot \tau_c \cdot b$$

$S_s$ :スターラップの負担するせん断耐力

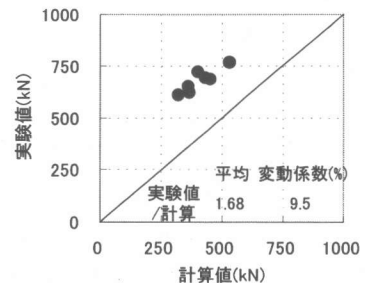
$$S_s = n \cdot A_w \cdot \sigma_{sy}$$

$C_{dc}$ :せん断スパン比による  $S_c$  の補正係数

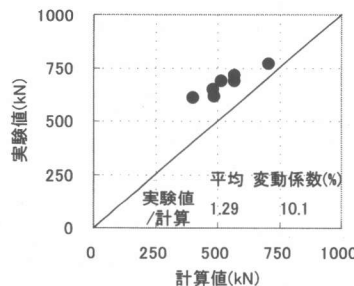
$$C_{dc} = \frac{6.3}{1.3 + 0.8(a/d)^2}$$



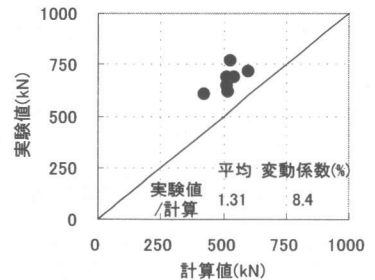
(1) 道示式



(2) 二羽式



(3) 土木学会式(ディープビーム)



(4) 土木学会式(面部材)

図-7 計算値と実験値の比較

Cds:せん断スパン比による Ss の補正係数

$$Cds = \frac{a/d}{2.5}$$

②二羽式<sup>2)</sup>

$$V = 0.53bw \cdot d \cdot fc^3 (1 + \sqrt{Pw})(1 + 3.33r/d) \cdot \frac{1}{1 + (a/d)^2} \quad (2)$$

ここで, fc:コンクリート強度 (kgf/cm<sup>2</sup>)

bw:ウェブ幅 (cm) d:有効高さ (cm)

r:支圧板長さ (cm) Pw:軸方向鉄筋比 (%)

a:せん断スパン (cm)

③土木学会式(ディープビーム)<sup>3)</sup>

$$V_{DS} = \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_a \cdot f_{dd} \cdot u \cdot d \quad (3)$$

ここで,  $f_{dd} = 0.19 \sigma_{ck}^{1/2}$   $\beta_d = (1/d)^{1/4}$

$\beta_p = (100Pt)^{1/3}$   $\beta_a = 5/\{1+(a/d)^2\}$

u:せん断抵抗幅 (mm) d:有効高さ (mm)

$\sigma_{ck}$ :コンクリート強度 (N/mm<sup>2</sup>)

④土木学会式(面部材)<sup>3)</sup>

$$V_{pcd} = \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_r \cdot f_{pcd} \cdot u_p \cdot d \quad (4)$$

ここで,  $\beta_r = 1 + 1/(1 + 0.25u/d)$

$u_p$ :設計断面の周長で, 荷重面から d/2 離れた位置 (mm)

$\beta_p, \beta_a, u, d$  は (3) に同じ

式(2), (3)は, 本来ディープビームを対象とした式で, 梁としてのせん断耐力を求める式である。ここでは押し抜きせん断耐力について検討を行うため, 式に準じて図-5のような照査断面①~④について, それぞれの有効幅, せん断スパンおよび鉄筋比を用いて算定した。また, 二羽式では, 式の中で r/d(支圧板の長さとの有効高さの比)の影響を考慮しているが, 今回の実験の形状には r/dの影響は適用できないと考えられ, ここでは, 十分に小さい値として r/d=0.05 を用いた<sup>2)</sup>。

せん断スパンは, 図-6に示すように, 荷重板端部と杭部中心の距離をせん断スパンとした。

4.2 実験値と計算値の適応性

図-7に実験値と上記に示す4つの算定式の計算値の比較を示す。

図より, 全ての式の計算値は実験値の下限値を

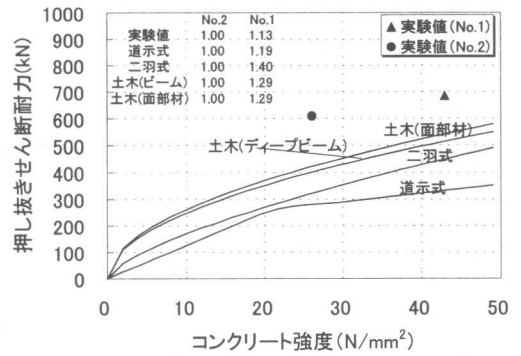


図-8 コンクリート強度と押し抜きせん断耐力の関係

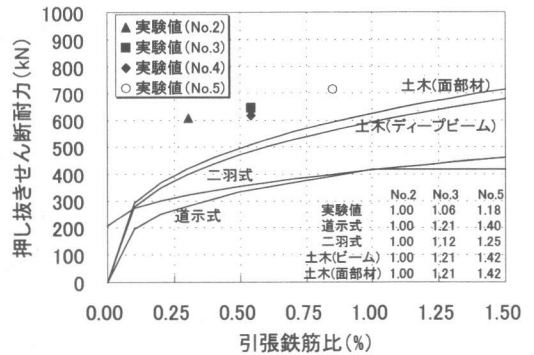


図-9 引張鉄筋比と押し抜きせん断耐力の関係

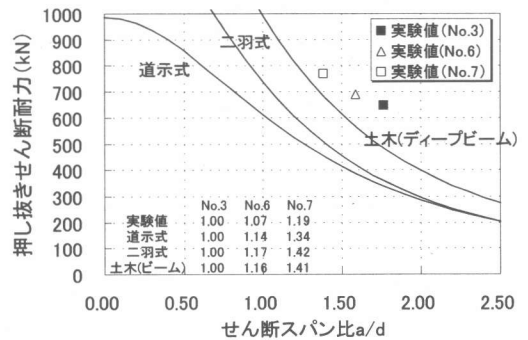


図-10 a/dと押し抜きせん断耐力の関係

与え, 安全側に設定されているのがわかる。平均と変動係数から判断すると, 土木学会式がディープビームで平均 1.29, 変動係数 10.1%, 面部材で平均 1.31, 変動係数 8.4%と比較的实验値に近い値を推定している。

図-8~10に今回の実験でパラメータとしたコンクリート強度, 鉄筋量, せん断スパン比 a/d と耐力の関係を示す。図上の数値は, 比較している供試体の中で最も耐力の低い供試体の実験値

(計算値)で、他の供試体の実験値(計算値)を除いた値である。ここでは、実験値と計算値の差ではなく、各種パラメータが変化することによる耐力の変化量に着目した。

図-8より、コンクリート強度に関しては、コンクリート強度の増加により、実験値で1.13倍に耐力が増加しているのに対し、計算値では道示式が最も適応性が良く1.19倍となっている。

図-9より、引張鉄筋比に関しては、引張鉄筋比の増加により、実験値で1.06倍、1.18倍に耐力が増加しているのに対し、計算値では二羽式が最も適応性が良く1.12倍、1.25倍となっている。

図-10より、せん断スパン比に関しては、せん断スパン比が小さくなることにより、実験値で1.07倍、1.19倍に耐力が増加しているのに対し、計算値では比較的どの式も同程度の増加量であるが、道示式が1.14倍、1.34倍と適合性が良い。

## 5. 道示のパラメータ評価式の適応性検討

### 5.1 パラメータ評価式の適応性

ここでは、算定式として最もよく用いられている道示式に関して、そのパラメータ評価式の適応性について検討を行った。検討に際しては、複数の文献<sup>4), 5)</sup>よりフーチングのデータ16個を追加し、行った。その結果を図-11に示す。図より、

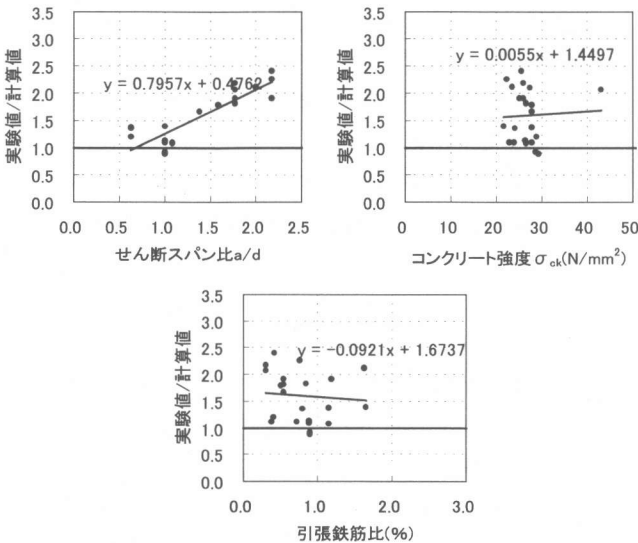


図-11 各パラメータと実験値/計算値の関係

コンクリート強度、引張鉄筋比については、各パラメータと実験値/計算値の近似曲線の傾きが0.0055、-0.0921と強い相関関係は見られず、その評価式は比較的妥当である。しかし、せん断スパン比については、 $a/d$ 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おり、傾きも0.80と強い相関関係が見られる。

そこで、以下では、収集した実験データをもとに $a/d$ の評価式について検討を行った。また、フーチングデータ23個に、ディープビームデータ200個を追加し、適応性の比較検討も行った。

### 5.2 せん断スパン比 $a/d$ の評価式の検討

#### (1) 実験データの分析

図-12, 13に、フーチングとディープビームのせん断スパン比  $a/d$  と実験値/ $S_c$ (実験値を $a/d$ を考慮しない計算値で除した値)の関係を示す。図より、実験値と評価式とでは $a/d$ が小さくなることによる耐力の増加量が異なり、評価式ほどの $a/d$ の効果が実験値では見られないことが分

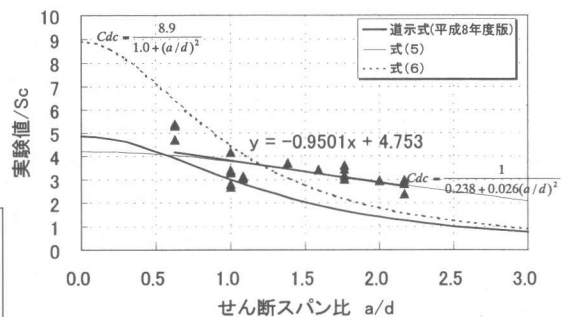


図-12 実験値/ $S_c$  とせん断スパン比  $a/d$  の関係(フーチング)

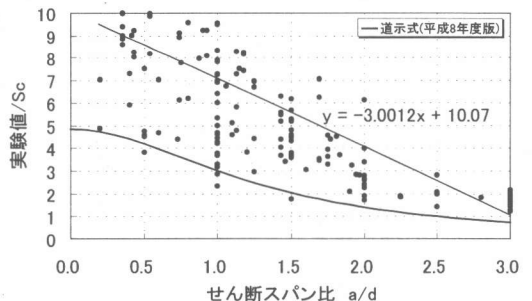


図-13 実験値/ $S_c$  とせん断スパン比  $a/d$  の関係(ディープビーム)

かる。また、ディープビームの実験データと比較すると、フーチングでは近似曲線の傾きが 1.00 であるのに対し、ディープビームでは 3.00 とフーチングに比べディープビームの方が  $a/d$  が小さくなるに従い、約 3 倍の大ききで耐力が増加している。このことから、道示でのせん断スパン比の評価式は、フーチング特有の  $a/d$  の効果を考慮できていないと考えられる。

## (2) 押し抜きせん断耐力式の提案

ここでは、平均的な押し抜きせん断耐力を求める式をフーチングの実験データを用いて以下のような方法により提案した。

提案に当たっては、4.1 節の道示式および土木学会式(ディープビーム)のせん断スパン比の評価式の係数を以下のように A, B, C, D と設定し、収集した実験データをもとに最小 2 乗法により、これを求めた。A, B, C については、 $(a/d)^2$  と  $Sc$ /実験値のグラフから、プロットしたデータの線形直線式を最小 2 乗法により求め、式の  $y$  切片を B、傾きを C とした。

$$Cdc = \frac{A}{B+C(a/d)^2} \quad (5) \quad Cdc = \frac{D}{1+(a/d)^2} \quad (6)$$

結果、 $A=1.0$ 、 $B=0.238$ 、 $C=0.026$ 、 $D=8.9$  となった。式(5)および式(6)を図-12に追加した。また、実験値と道示式の  $Cdc$  項を式(5)、式(6)として計算した値とを比較したものを図-14に示す。図中の数値は、実験値/計算値の平均および変動係数である。図より、 $a/d$  の評価式を式(5)として算定すると実験値/計算値の平均が 1.00、変動係数が 16.0%と比較的実験値との適合性が良い。また、近似曲線の傾きが 0.02 と強い相関関係は見られないことから、 $a/d$  の効果も妥当に評価している。

## 6. 結論

杭基礎フーチングの鉛直載荷実験を行い、フーチングの押し抜きせん断耐力式の適応性について検討した結果をまとめる。

①今回の 7 体の実験結果と既往式の適応性を比較した結果、全ての式の計算値は実験値の下限値を

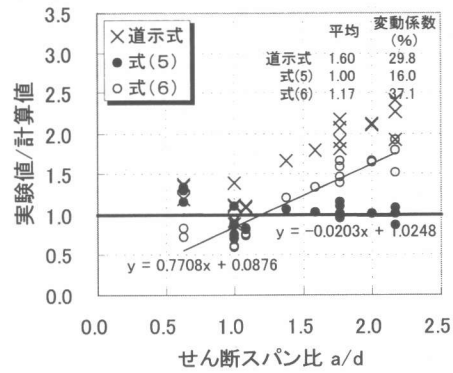


図-14 提案式による計算値と実験値

与え、安全側に設定されているのがわかった。また、各パラメータの効果は、コンクリート強度、せん断スパン比については道示式、引張鉄筋比については二羽式の評価式の適応性が良かった。

②フーチングのデータを追加し、道示の各パラメータの評価式について再検討した結果、コンクリート強度、引張鉄筋比については、比較的妥当であったが、せん断スパン比については、評価式ほどの  $a/d$  の効果が実験値では見られなかった。

③収集したフーチングとディープビームのデータよりせん断スパン比  $a/d$  の評価式の適応性について比較検討した結果、フーチングでは  $a/d$  の小さい領域においてディープビームほどの耐力の増加は見られず、せん断スパン比の評価式を式(5)として算定すると、 $a/d$  の効果を妥当に評価し、実験値との適合性も良かった。

## 参考文献：

- 1) 社団法人日本道路協会：道路橋示方書・同解説IV下部構造編，pp.206-221，1996。
- 2) 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。
- 3) 土木学会コンクリート委員会：コンクリート標準示方書設計編，pp65-67，pp163-165，1996。
- 4) 建設省土木研究所構造橋梁部基礎研究室：橋梁基礎のフーチングおよび頂版の耐力に関する実験的研究，土木研究所資料第3483号，1997.3。
- 5) 建設省土木研究所構造橋梁部基礎研究室：フーチングの設計および補強方法に関する実験的研究，土木研究所資料第3550号，1998.3。