

論文 自由縁の影響を考慮した R C スラブの押抜きせん断耐力算定式に関する研究

古内 仁^{*1}・角田與史雄^{*2}

要旨：R C スラブの自由縁付近に集中荷重が作用した場合、押抜きせん断耐力は著しく低下する。土木学会コンクリート標準示方書では、耐力算定式における設計断面を減少させて評価しても危険側となることから、平成 8 年版よりその方法が削除された。押抜きせん断耐力式において、設計断面の取り方、各種影響因子による係数および実験定数について再検討を行った結果、自由縁の影響を受ける押抜きせん断破壊に対する評価が可能となった。

キーワード：鉄筋コンクリートスラブ、押抜きせん断耐力、自由縁、設計断面

1. はじめに

鉄筋コンクリートスラブが、面外方向に局部的な荷重を受けると荷重直下のコンクリートが押し抜かれるような形で破壊が生ずる場合がある。このような破壊は一般に「押抜きせん断破壊」と呼ばれているが、土木学会コンクリート標準示方書¹⁾では、昭和 61 年制定時に許容応力度法から限界状態設計法へ移行したのを契機に終局限界に対して設計押抜きせん断耐力式が示された。改訂資料²⁾によれば、この耐力式ははりのせん断耐力式と同様の形式であらわされるものと仮定した上で、国内外の実験データを基に統計学的に処理した経験式として示されたものである。押抜きせん断耐力は、載荷点の周囲に仮定された設計断面に平均押抜きせん断強度を乗じて求められる。この設計断面は、1978 年の CEB/FIP 基準³⁾の方法を基としており、自由縁付近に載荷された場合や開口部が荷重付近の近傍にある場合には設計断面の長さを低減して用いることとしている。しかしながら、自由縁付近に載荷された場合の押抜きせん断耐力は、この方法によれば危険側の評価となることが明らかとなったことから、平成 8 年版の示方書より設計断面を低減する方法は削除された⁴⁾。

本研究では、既往の実験結果⁵⁾を基に自由縁

付近載荷の影響を評価できるよう押抜きせん断耐力算定式における設計断面の取り方を再検討することとし、あわせて実験定数および各種影響因子の検証を行うこととした。

2. 土木学会コンクリート標準示方書の押抜きせん断耐力式

スラブの押抜きせん断耐力算定式として、土木学会コンクリート標準示方書では式(1)が与えられている。

$$V_{pcd} = \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_r \cdot f_{pcd} \cdot u_p \cdot d / \gamma_b \quad (1)$$

ここに、

$$f_{pcd} = 0.19 \sqrt{f'_{cd}} \quad (N/mm^2)$$

$$\beta_d = (1000/d)^{1/4} \quad (d:mm) \quad \beta_d \leq 1.5$$

$$\beta_p = (100p)^{1/3} \quad \beta_p \leq 1.5$$

$$\beta_r = 1 + 1 / (1 + 0.25 u / d)$$

$$f'_{cd} : \text{コンクリートの設計圧縮強度} (N/mm^2)$$

u : 載荷面の周長

u_p : 設計断面の周長で、載荷面から $d/2$ 離れた位置で算定する。

d および p : 有効高さおよび鉄筋比で、二方向の鉄筋に対する平均値とする。

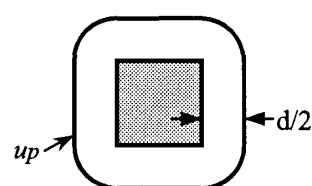
γ_b : 部材係数 (=1.3)

平成 3 年版までの示方書では、図-1 に示す

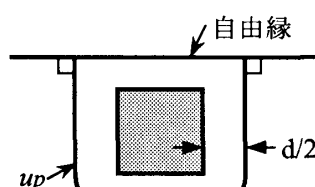
^{*1} 北海道大学助手 大学院工学研究科社会基盤工学専攻 (正会員)

^{*2} 北海道大学教授 大学院工学研究科社会基盤工学専攻 工博 (正会員)

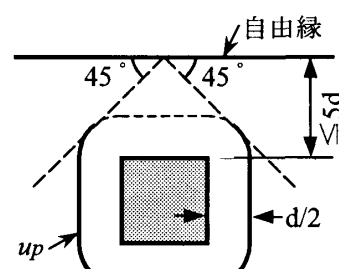
(自由縁から離れている場合)



Case 1



Case 2



Case 3

図-1 土木学会コンクリート標準示方書(昭和 61 年版, 平成 3 年版)による設計断面の取り方

ように載荷面の端辺から $d/2$ 離れた位置に設計断面をとることとしていた。完全押抜きせん断破壊に対しては case1 の設計断面, 自由縁の影響を受ける場合には case2 および case3 のうち周長の小さい方の設計断面を用いる。先述したように, 平成 8 年版の示方書より case2 と case3 の設計断面は削除され, 押抜きせん断耐力式は完全押抜きせん断破壊に対してのみの適用となった。現在, 示方書においては, 自由縁の影響を受ける場合の押抜きせん断破壊に対しては, 有効幅を用いたはりとしてのせん断耐力を用いて照査を行うこととなっている。

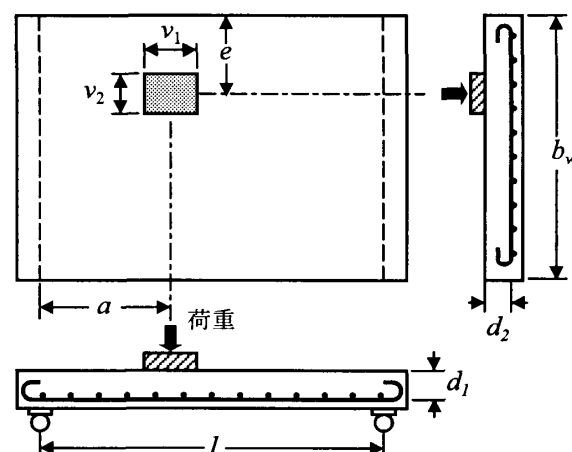


図-2 供試体の形状寸法

3. 実験データの概要

本研究では, 既往の研究⁵⁾における実験データを用いて検討を行った。実験は, すべて相対する 2 辺が単純支持された 1 方向スラブで, スラブ上面から鉛直に集中荷重を作用させたもの

である(図-2 参照)。実験変数は, 載荷点位置(自由縁からの距離等), スラブ幅, 支間長, せん断スパン, 有効高さ, 鉄筋比, 載荷面辺長である。なお, 供試体は全部で 86 体であるが, 曲げ破壊およびはり型のせん断破壊を呈した供試

表-1 供試体の分類

グループ	供試体数	載荷点までの距離 e (mm)	スラブ幅 b_w (mm)	支間長 l (mm)	せん断スパン a (mm)	有効高 ^{注2)} d (mm)	載荷面辺長 $v_1 \times v_2$ (mm)	鉄筋比 ^{注2)} p (%)
1(1)	3	350,225,100	700	500	250	75	100×100	1.79
1(2)	5	500,400,300,200,100	1000	500	250	75	100×100	1.79
2(1)	1	100	700	500	500	75	100×100	1.79
2(2)	2	500,100	1000	500	500	75	100×100	1.79
2(3)	5	700,550,400,250,100	1400	500	500	75	100×100	1.79
3(1)	3	450,300,150	900	1000	500	175	100×100	1.13
3(2)	4	600,450,300,150	1200	1000	500	175	100×100	1.13
3(3)	5	700,600,450,300,150	1400	1000	500	175	100×100	1.13
4	5	700,550,400,250,100	1400	1000	500	75	70×140	1.82
5	5	700,550,400,250,100	1400	1000	500	75	140×70	1.82
6	5	700,550,400,250,100	1400	1000	350 ^{注1)}	75	100×100	1.82
7	5	700,550,400,250,100	1400	1000	500	75	75×75	1.79
8	5	700,550,400,250,100	1400	1000	500	75	150×150	1.79
9	6	700,550,400,250,200,100	1400	1000	500	125	100×100	1.08
10(1)	5	700,550,400,250,100	1400	1000	500	123	100×100	1.42
10(2)	4	450,300,150,60	900	700	350	123	100×100	1.66

注 1) 小さい方のせん断スパン 注 2) 2 方向の平均値

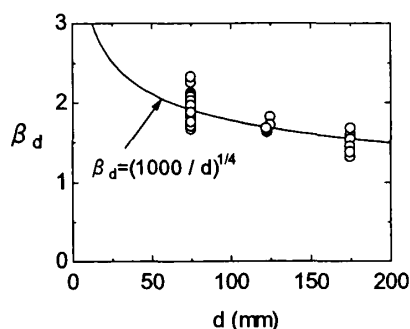


図-3 寸法効果の影響(示方書式)

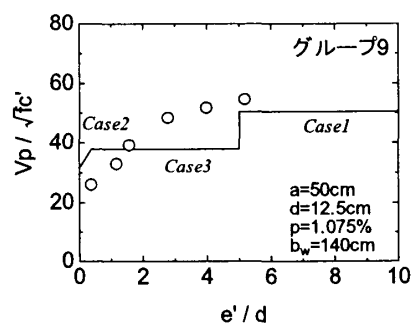
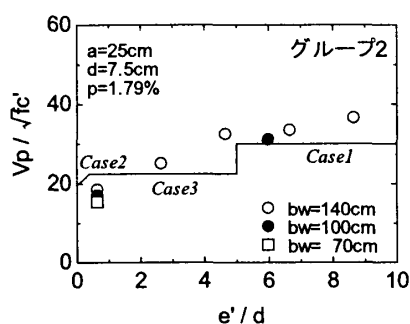


図-4 昭和 61 年版示方書式による押抜きせん断耐力

体は除き、目視によって押抜きせん断破壊したと見なした 79 体を検討の対象とした。このうち、幅の大きいスラブについて載荷点位置の変化に着目すると表-1 のような分類ができる。

4. 押抜きせん断耐力の検討

4.1 示方書式における β_d の適用性の検証

示方書押抜きせん断耐力式では、寸法効果による影響を有効高さの関数として β_d を与えているが、棒部材のせん断耐力式⁶⁾と同様に 1.5 の制限値を設けている。本研究で対象としたスラブには、 β_d が 1.5 を越えるものが多く含まれている。そこで、載荷位置がスラブ中央付近の供試体（自由縁の影響を受けないスラブ）33 体を対象として、制限値の妥当性について検証を行った。図-3 は、有効高さ d と β_d の関係をあらわしたものである。実測値（図中プロット）は、破壊荷重をもとに以下の式により算定した。

$$\beta_{d, test} = \frac{P_B}{\beta_p \cdot \beta_r \cdot f_{pcd} \cdot u_p \cdot d} \quad (2)$$

ここに、 P_B ：破壊荷重（実測値）

$\beta_{d, test}$ ：実測値から逆算される寸法効果に対する係数

この結果より、示方書式における β_d は実測値とよく一致しており、本研究で対象とした供試体については β_d が 1.9 程度までは評価できるものと考えられる。したがって、この後の検討にあたっては、 β_d に制限値を設けないこととした。

4.2 示方書式による押抜きせん断耐力の検証

既往の研究⁵⁾で明らかとなったように、自由

縁の影響を受ける場合には、平成 3 年版までの示方書の評価方法では危険側の評価となる。図-4 はその 1 例を示したものである。図中の押抜きせん断耐力は、データ個々のコンクリート圧縮強度にばらつきがあるため、その平方根で耐力を除した。また、 e' は載荷面端から自由縁までの距離で、 $e - v_2/2$ である。図に見られるように、耐力は載荷点が自由縁に近づくにつれて連続的に減少しており、載荷点が自由縁に近い場合には実験値は計算値を下回る。他のいずれのグループにおいてもこの傾向は同様である。このような不整合を示すこととなった理由としては、回帰に用いた実験データに自由縁の影響を受けるスラブが少なかったこと、それゆえ設計断面の取り方を CEB-FIP 基準の方法を取り入れざるを得なかったためと推察される。以下では、設計断面の大きさを変化させて、自由縁の影響による耐力低下を評価できるかどうかについて検討を行う。

4.3 設計断面の検討

耐力算定方法として設計断面を用いる方法は、比較的簡便であることから設計実務においては有用である。しかし、実際の押抜きせん断によって生じる破壊面の拡がり示方書の設計断面に比べて大きく、また、その拡がり方は部材剛性等の影響を受け、必ずしも一定の大きさにはならないと考えられる。示方書式では、そのような影響を β_d 、 β_p および β_r の係数を用いることによって補っている。本研究も示方書の考え方を踏襲し、自由縁の影響に対しては設計断面の取り方のみによって検討を行う。検討にあた

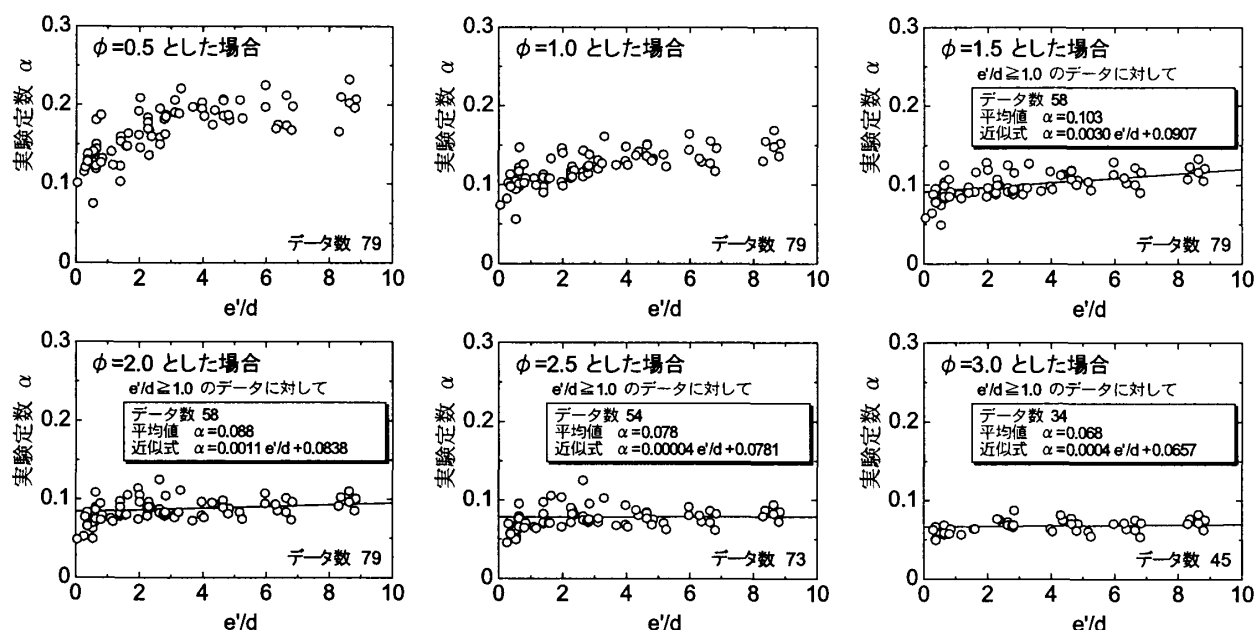


図-5 設計断面の周長を変化させた場合の実験定数の試算結果

っては、設計断面の取り方として実験で得られた傾向と合致しない *case3* を除外することとし、*case1* と *case2* による方法を用いることとした。検討手順は、以下のとおりである。

- (1) 載荷面端から設計断面までの距離を未知量としその長さを ϕd とおく。
- (2) 設計断面の周長は、*case1* と *case2* による方法のうち、小さい方をとる。
- (3) 示方書式における実験定数を未知量 α とし、上記 ϕ によって得られる周長と実測の破壊荷重により個々の供試体における α を逆算する。
- (4) このとき、すべて供試体で算出された α が一定値となれば設計断面周長の長さのみで自由縁の影響による耐力低下を評価することが可能となる。

実験定数 α は、次式によって算定した。

$$\alpha = \frac{0.19 P_B}{\beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_r \cdot f_{pcd} \cdot u_{pt} \cdot d} \quad (3)$$

ここに、 u_{pt} ：仮定された設計断面周長

以下では、 ϕ を 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 とした場合について、検討した結果を示す。図-5 は、 α と e'/d の関係を ϕ ごとに示したものである。なお、設計断面は実用上の定義と考え、支間方向については支承位置付近までとることを許した。

図に示されているように、 ϕ を小さくとった場合は e'/d が大きくなるにつれて α が大きくなる傾向にある。 ϕ を大きくしていくとその傾向は小さくなり α が一定値に近づきつつあるが、 e'/d の小さい供試体ではいくら ϕ を大きくとっても、 α は相対的に小さいままである。したがって、極端に自由縁に近い位置に荷重が作用している場合については、耐力の低下を設計断面の取り方のみで評価することは困難であると考えられる。そこで、 e'/d が 1.0 以上の供試体に対してのみ平均値の算出と直線による近似を行った（図中実線）。ただし、 ϕ が 0.5 および 1.0 の場合は一定値を取らないことが明らかなので除外した。この結果、近似直線の勾配が最も小さくなるのは $\phi=2.5$ のときである。変動係数では、 $\phi=3.0$ のときが最も小さくなるが設計断面が支承部を越えるスラブを除外したことによりデータ数が少なくなったためである。

4.4 補正係数の検討

自由縁付近荷重の影響を表すためには、示方書耐力式における設計断面の位置を載荷面から $2.5d$ 離れた位置にとること、またその際に実験定数は 0.078 とすることが、最適であるという結果が得られた。そこで、これらの値を用いた場合について、あらためて寸法効果、鉄筋比お

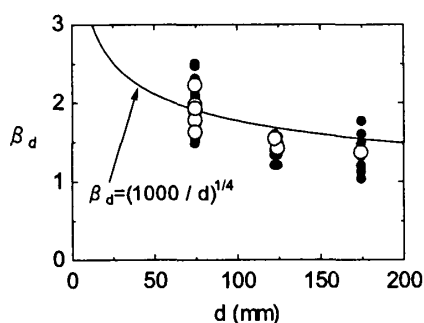


図-6 寸法効果の影響

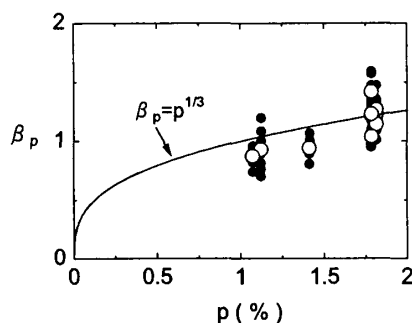


図-7 鉄筋比の影響

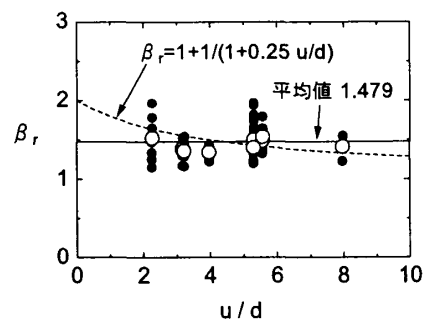


図-8 載荷周長の影響

よび載荷周長の影響について検討を行う。設計断面の大きさと実験定数を変えた以外は、4.1と同様の手法を用いる。ただし、今回の検討では自由縁付近に載荷された供試体（不完全押抜きせん断破壊）も対象となる。

図-6および図-7は、それぞれの係数 β_d および β_p の試算結果である。図中において、個々のデータは黒丸で、各グループごとの平均値は白丸で示した。 β_d と β_p については、個々の供試体の評価値と計算値は傾向が類似しており良い対応を示してしていると思われる。ただし、計算値に対する評価値の平均は0.955であるので、全般的にやや危険側となるようである。ここで、評価値と計算値の適合性を高めるため、実験定数0.078に0.955を乗じて修正することとした。

図-8は、 β_r の試算結果である。この結果によれば、個々のデータに対する評価値は示方書式で与えられている傾向にはなく、ほぼ一定であると考えられる。載荷面周長の影響は、設計断面を小さくとっていたことによる二次的な影響と見ることができる。したがって、本研究では β_r は u/d との相関がないものとして、定数（平均値1.479）を与えることとした。

4.5 押抜きせん断耐力式の補正

上記の結果を整理して、押抜きせん断耐力式を補正すると次式が得られる（ β_r は定数となることから実験定数に繰り入れた）。

$$V_p = \beta_d \cdot \beta_p \cdot f_p \cdot u_p \cdot d \quad (4)$$

（ただし、 $e'/d \geq 1.0$ のスラブ）

ここに、

$$f_p = 0.11 \sqrt{f'_c} \quad (N/mm^2)$$

$$\beta_d = (1000/d)^{1/4} \quad (d: mm) \quad \beta_d \leq 1.9$$

u_p : 設計断面の周長で、載荷面から
2.5d離れた位置で算定するもの
とする。ただし、設計断面が支承
を越える場合については、適用範
囲外とする。

図-9は、式(4)により各グループごとのスラブについて再評価したものである。ただし、設計断面が支承部を越えるスラブは除外した。線分による表示は、補正式による算定値である。

補正式による評価は、全体的に良い適合性を示すが、先に述べたように載荷点から自由縁までの距離が極端に小さい場合は危険側評価である。これは、支間直角方向の引張鉄筋が自由縁で終端となっていることから、その付近に載荷された場合は支間直角方向の引張力を負担しにくくなるためと思われる。したがって、補正された耐力式の適用範囲を e'/d が1.0程度以上とするのが妥当である。一方、補正式による評価がやや安全側の傾向となるのはグループ1である。これらのスラブはせん断スパン比が小さく、設計断面が支承付近にまで達するものである。この試算においては、設計断面が支承を越えるものについては除外したが、それらは耐力が大きく破壊機構が異なるものと考えられる。すなわち、せん断スパン比が小さいスラブでは、ディープビームのようにタイドアーチ機構へ移行していくものと考えられる。グループ1のスラブもそのような傾向を有していると考えられる。

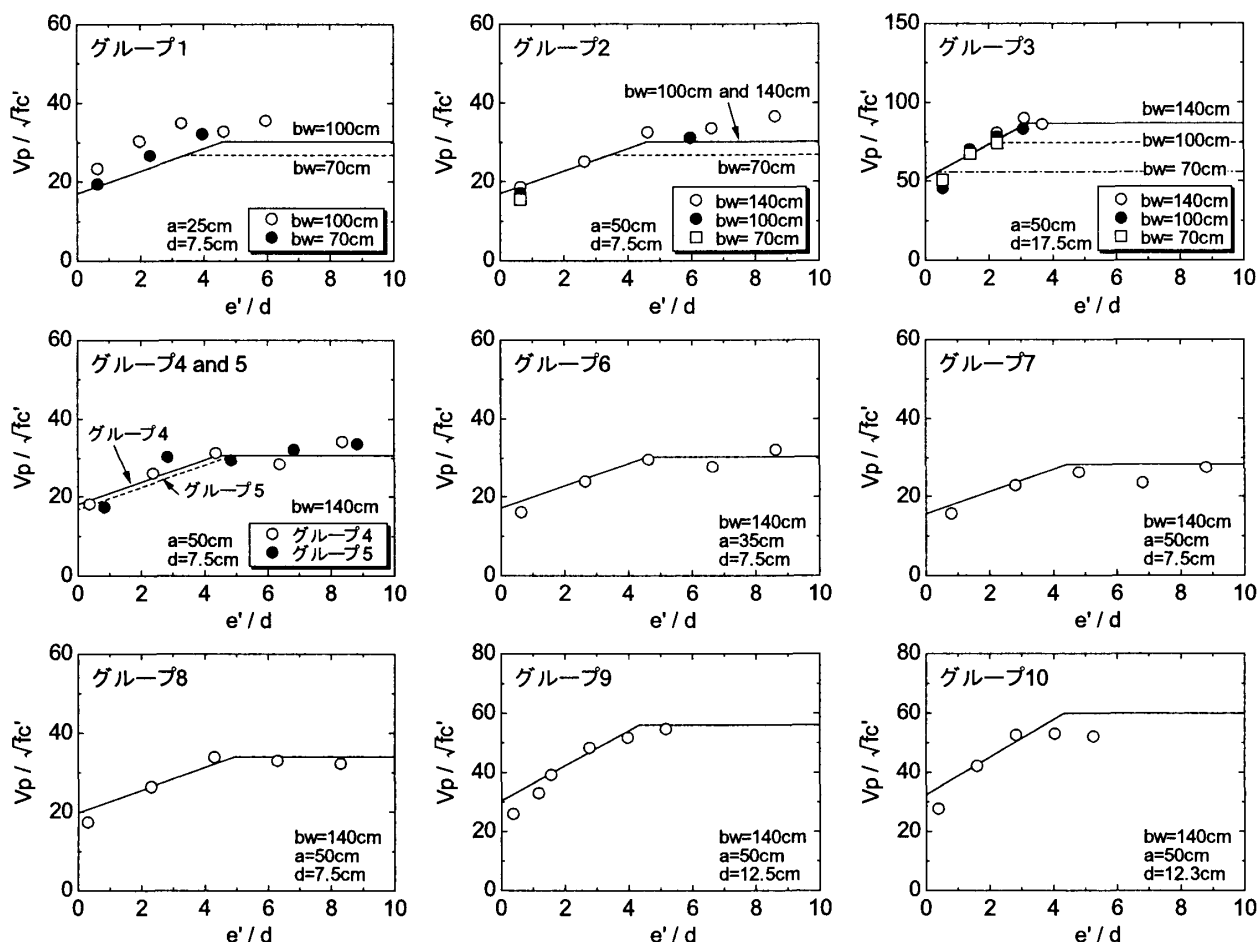


図-9 補正された押抜きせん断耐方式による試算結果

5. まとめ

押抜きせん断耐力に与える自由縁の影響を評価する方法として、土木学会コンクリート標準示方書式における設計断面の取り方を検討した結果、以下の知見が得られた。

- 1) 設計断面として case1 (完全押抜き型で載荷面の周囲にとる方法) と case2 (自由縁に近い場合は自由縁に対して垂線を引く方法) を設定した場合、載荷面端から $2.5d$ 離れた位置に設計断面をとると自由縁の影響を受ける押抜きせん断破壊に対して概ね評価できる。
- 2) 設計断面を大きく取ること、載荷面周長が押抜きせん断耐力に与える影響は排除することができる。
- 3) 載荷点が極端に自由縁に近い場合は、耐力の低下が大きく、上記の方法では評価できないため別途検討が必要である。

参考文献

- 1) コンクリート標準示方書 [昭和 61 年制定] 設計編, 土木学会, 1986
- 2) コンクリート標準示方書 (昭和 61 年制定) 改訂資料, 土木学会コンクリートライブラリー第 61 号, pp.170-171, 1986
- 3) CEB-FIP Model Code for Concrete Structures, CEB, 1978
- 4) 平成 8 年制定コンクリート標準示方書改訂資料, 土木学会コンクリートライブラリー第 85 号, pp.9-12, 1996
- 5) 古内仁, 高橋義裕, 角田與史雄: RCスラブの自由縁附近載荷に対する実用せん断設計法の研究, 土木学会論文集, pp.141-149, 1996
- 6) 二羽淳一郎ほか: 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, pp.167-176, 1986