

かぶり厚の RC 床版耐力への寄与に関する研究

Influence of the cover on the strength of RC slab

田中宏明*, 浜田純夫**, 毛 明傑***, 河野博幸****, 福島邦治*****

Hiroaki TANAKA, Sumio HAMADA, Mingjie MAO, Hiroyuki KAWANO and Kuniharu HUKUSHIMA

- * 山口大学大学院 理工学研究科 社会建設工学専攻 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2 丁目 16-1)
- ** Ph.D. 山口大学工学部 社会建設工学科 教授 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2 丁目 16-1)
- *** 山口大学大学院 理工学研究科 社会建設工学専攻 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2 丁目 16-1)
- **** 山口小野田レミコン株式会社 小野田工場 工場長 (〒756-0815 山口県小野田市高栄 3 丁目 7-1)
- ***** 株式会社日本ピーエス 設計部 (〒812-0025 福岡県福岡市博多区店屋町 1-31)

The study on the influence of the cover depth on punching shear strength of concrete slab has not been conducted so far. In the present study tests of reinforced concrete slab with various cover depths were carried out in our laboratory. Some revised equations for JSCE, Eurocode, CEB-FIP, BS and ACI code equations are herein proposed. These proposed equations, consequently, provides the better accuracy to the data obtained from the past.

Key words : reinforcement cover, RC slab, punching shear

1. はじめに

近年、海岸地帯におけるコンクリート構造物の塩害による早期劣化が問題となっている。特に、塩分に起因した鋼材腐食による塩害損傷の報告が多くされている。

平成 14 年の道路橋示方書¹⁾では、塩害対策の一つとして、かぶりを増加させることが挙げられている。かぶりの増加は強度に影響を及ぼすが、現在までの多くの算定式²⁾は、松井らの式以外、かぶり厚をパラメータとして取り入れている算定式はほとんどない。

現在までに、床版に関する研究は数多くなされてきた。小柳氏によると、床版の押抜きせん断強度に関する研究は、20 世紀初頭の Talbot の報告が最初であり、その後も実験報告や影響因子および破壊メカニズム等について数多くの研究がなされている。

床版の破壊は曲げ破壊とせん断破壊に大別されるが、道路橋鉄筋コンクリート床版(以下、RC 床版と略す)の場合、輪荷重のように床版面積に比較して小さい載荷面積で載荷された場合はほとんどがせん断破壊(押抜きせん断破壊)であることは周知の事実である。

最近では Gardner による提案式など多くの評価式も提案されている。我が国においても角田らの研究をはじめとして少なからず研究報告がなされているが、はりに関するせん断破壊メカニズムと比較した場合、その解明度合いは低いと認識されている。これは、床版が面部材であるため高次の不静定部材となり、影響因子が極めて多くなることが原因とされる。また多くのパラメータが互いに影響を及ぼしあうため、はりのせん断耐力の算定式を求めること以上に複雑である。

実構造物を考慮した場合、定点載荷による強度の評価が、実

際の交通荷重を担う RC 床版の耐荷力を表現するのに適当であるかどうかは議論の余地がある。しかしながら、交通荷重に似せた移動荷重や疲労荷重を考慮する以前に、静的荷重による破壊機構がどのようなものであるかを明確にすることは、極めて重要である。

RC 床版が破壊する際の主な要因として、有効高さ、コンクリート圧縮強度、鉄筋比、載荷板の大きさや形状および載荷板周長が考えられる。各算定式において使用される床版諸元のパラメータは、各提案者によってそれぞれ異なっており、必ずしも同一ではない。ほとんどの算定式に有効高さ、コンクリート強度、載荷板寸法の 3 つのパラメータが用いられている。しかし、床版の押抜きせん断耐力に関する多くの研究は静的押抜きせん断破壊機構の解明には至っていない³⁾。

本研究では、かぶり厚の大きい RC 床版の静的押抜きせん断試験を行い、これまでに提案された算定式のうち、示方書式(土木学会式、Eurocode II 式、CEB-FIP 1990、BS 8110-85、ACI 式)として用いられているものによる算定結果をもとに、実験結果との適合性とかぶり厚が押抜きせん断耐力に及ぼす影響について検討を行った。また、文献より収集した供試体データ 86 体についても、検討を行った。

2. 試験方法

2.1 使用材料および配合条件

供試体の作製に用いたコンクリート材料を表 1 に示す。なお、コンクリートの骨材は、表面乾燥飽水状態にした。また、鉄筋の機械的性質を表 2 に示す。表 3 に、本実験に用いたコンクリートの配合表を示す。A は AE 減水剤(ヴィンソル 80S)である。

表1 使用材料

	産地および種類	表乾密度	粗粒率	最大骨材寸法	吸水率
細骨材	北九州市産海砂(水洗海砂)	2.54	1.75	2.5mm	1.2
粗骨材	門司産砕石	2.73	57.9	20mm	0.75
セメント	宇部興産製早強ポルトランドセメント	3.14	-	-	-
混和剤	ヴィンソル80S	-	-	-	-

表2 鉄筋の機械的性質

区分	種類の記号	降伏点 (kgf/mm ²)	引張強さ (kgf/mm ²)	引張試験片	伸び (%)
異形棒鋼	SD295A	30以上	45~61	2号に準じるもの 3号に準じるもの	16以上 18以上

表3 コンクリートの配合

W/S (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				
		W	C	G	S	A
49	40.8	177	362	1071	709	0.90

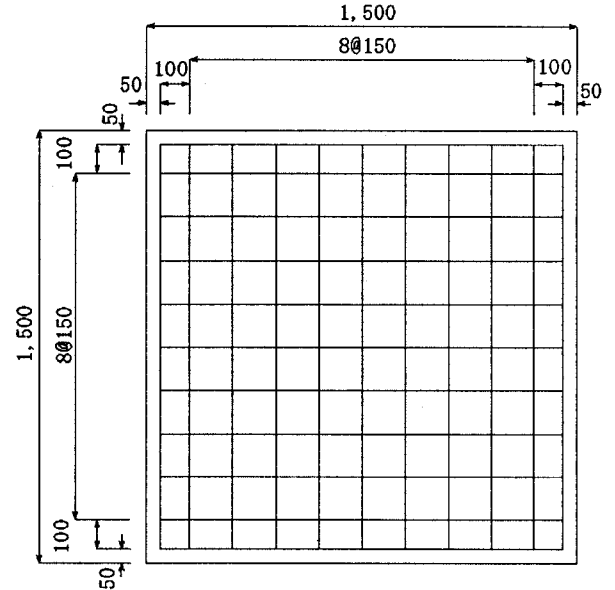


図1 配筋図

2.2 供試体概要

本実験で作製した供試体6体(A-10~B50)の概要を表4に示す。ここで供試体の数値はかぶり厚(mm)を示している。従って、かぶり厚は10~70mmの範囲で実験した。載荷板辺長の違いにより、Aシリーズ、Bシリーズと区別した。鉄筋は主鉄筋、配鉄筋ともSD295AのD10を使用した。配筋図を図1に示す。供試体断面を図2~5に示す。

表4 供試体概要

供試体 No	コンクリート 圧縮強度 (N/mm ²)	かぶり (mm)	床版厚 (mm)	有効高さ (mm)	供試体寸法 (mm ²)	スパン長 (mm)	鉄筋比 (%)	載荷板辺長 (mm)
A-10	41.9	10	110	95	1500x1500	1300	0.556	100
A-30	34.7	30	130					
A-50	42.2	50	150					
A-70-1	42.2	70	170					
A-70-2	41.9	70	170					
B-50	34.7	50	150					

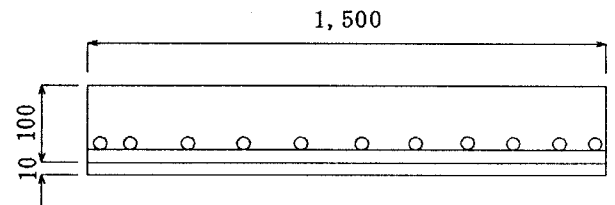


図2 A-10断面図

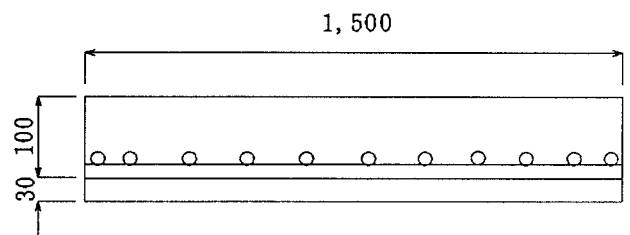


図3 A-30断面図

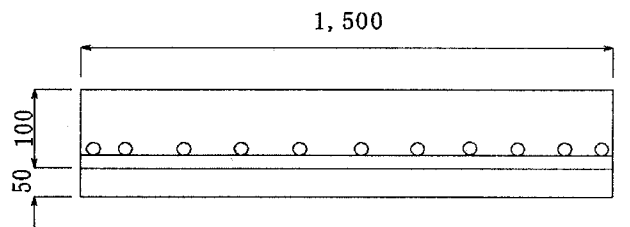


図4 A-50, B-50断面図

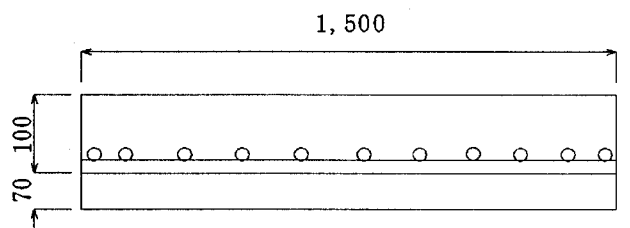


図5 A-70断面図

2.3 試験方法

実験方法は、いずれの供試体も同一とし、載荷は材齢7日以降に行い、支持条件はスパン長1300×1300mmとし、支承には直径100mmの丸鋼棒を使用し、四隅の浮き上がり防止は設けない四辺単純支持とした。また、載荷位置は供試体中央とし、Aシリーズは載荷板辺長100mm、Bシリーズは載荷板辺長200mmの正方形鋼板を用い、厚さ5mmの硬質ゴム板を介して静的載荷試験を行った。実験時における測定項目は、床版中央のたわみ、床版上面および下面のコンクリートのひずみ、引張側鉄筋のひずみ、ひび割れ、破壊荷重である。

3. 実験結果

3.1 破壊荷重

各供試体の破壊荷重を表5に示す。各供試体とも載荷板直下か押し抜かれ、押し抜きせん断破壊を起こしていた。破壊荷重はかぶり厚が大きくなるにつれて増加する傾向が見られた。

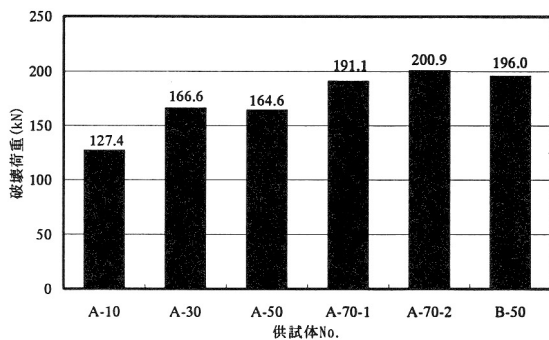


図6 破壊荷重

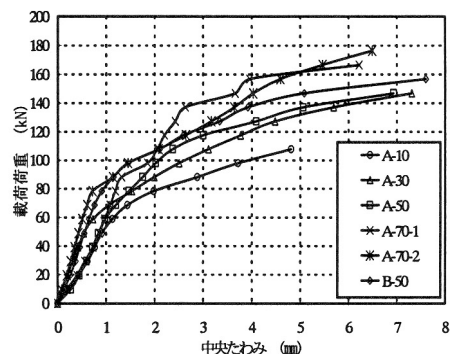


図7 載荷荷重と供試体中央たわみの関係

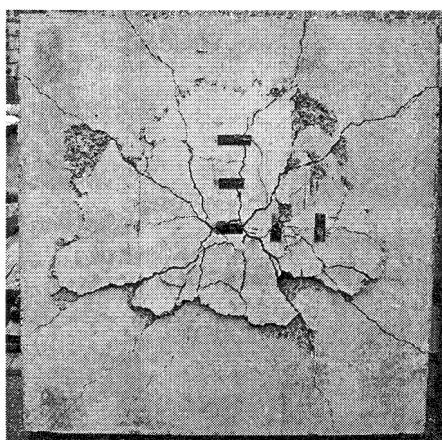


写真1 試験後の床版(A-70-1)下面

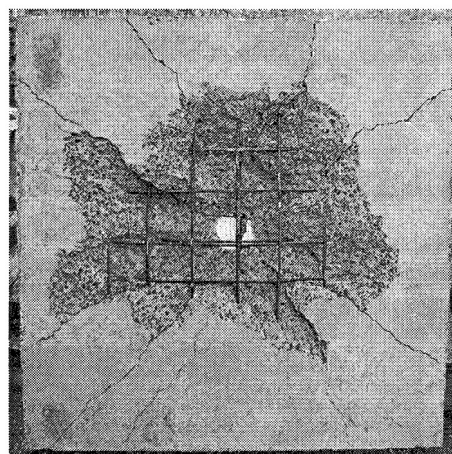


写真2 はつり後の床版(A-70-1)

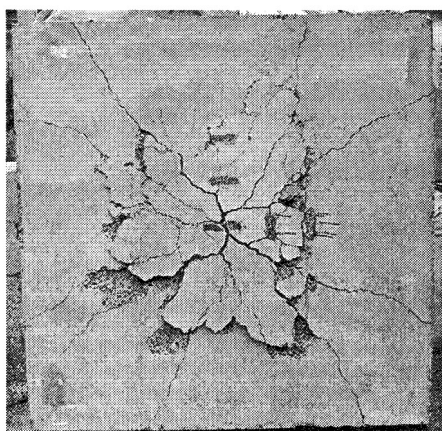


写真3 試験後の床版(A-50)下面

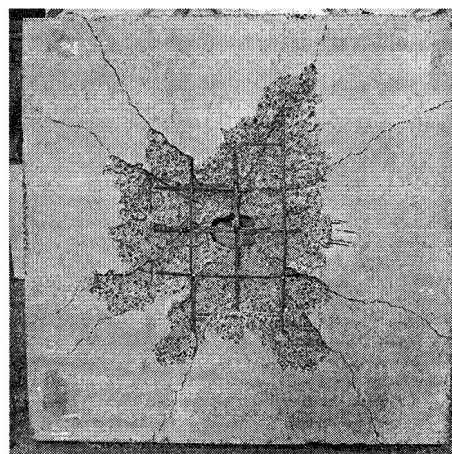


写真4 はつり後の床版(A-50)

3.2 破壊形態とひび割れ状況

写真1に破壊後の床版(A-70-1)下面のひび割れ状況を示す。写真2にはつり後の床版(A-70-1)を示す。床版の押抜きせん断試験における破壊形態は、すべての供試体において破壊荷重に達すると同時に供試体上面で載荷板とほぼ同じ形状の陥没を生じた。またそれと同時に供試体下面において、コンクリートの剥離が生じた。各供試体のひび割れは、供試体下面中央から放射線状に延びて、側面まで達した。

3.3 たわみ

図7に載荷荷重と供試体中央たわみの関係を示す。かぶり厚の大きい供試体ほど、破壊直前のたわみは小さくなった。これより、かぶり厚を厚くすることにより、床版の剛性が向上することが確認できる。

4. 押抜きせん断耐力算定式について

示方書における押抜きせん断耐力は基本的には d^2 に比例している。しかし、土木学会コンクリート標準示方書のように $d^{1/4}$ に比例している係数もあるが、 d に限界値が設けられている。以下にこれらの式を示す。

・) 土木学会式

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

ここに、

V_{pcd} : 押抜きせん断耐力 (N)

$$f_{pcd} = 0.20 \sqrt{f'_{cd}} \quad (\text{N/mm}^2)$$

ただし、 $f_{pcd} \leq 1.2 \text{ N/mm}^2$

$$\beta_d = \sqrt[3]{1/d} \quad (d: \text{m})$$

ただし、 $\beta_d > 1.5$ となる場合は 1.5 とする。

$$\beta_p = \sqrt[3]{100\rho}$$

ただし、 $\beta_p > 1.5$ となる場合は 1.5 とする。

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

f_{cd} : コンクリートの設計強度で、単位は N/mm^2 である。

u : 載荷面の周長

u_p : 設計断面の周長で、載荷面から $d/2$ 離れた位置で換算するものとする。

d および ρ : 有効高さおよび鉄筋比で、二方向に対する平均値とする。

γ_b : 部材係数 (=1.3)

・) Eurocode II 式

$$V_R = d\pi(B + 3d) 0.035 k(1.2 + 40\rho) f_{ck}^{2/3}$$

ここで、

V_R : 押抜きせん断耐力 (N)

d : 有効高さ (mm)

B : 載荷板辺長 (mm)

$k = 1.6 - d$ ただし、 d : (m)

ρ : 鉄筋比

f_{ck} : コンクリート圧縮強度 (N/mm^2)

・) CEB-FIP 式

$$V_u = 0.18 \cdot u \cdot d \cdot \xi (100\rho \cdot f_{ck})^{1/3} / \gamma_c$$

ここで、

V_u : 押抜きせん断耐力 (N)

$u = \pi(c + 4d)$: 円形載荷板 (mm)

$u = 4b + 4\pi d$: 正方形載荷板 (mm)

c : 円形載荷板直径 (mm)

・) BS 式

$$V = 0.79 u d \left(\frac{400}{d} \right)^{1/4} \left(100\rho \cdot \frac{f_{cu}}{25} \right)^{1/3}$$

ここで、

V : 押抜きせん断耐力 (N)

$u = 4(c + 3d)$: 円形載荷板

$u = 4(b + 3d)$: 正方形載荷板

c : 円形載荷板直径 (mm)

b : 正方形載荷板辺長 (mm)

d : スラブ有効厚 (mm)

ρ : 鉄筋比

$f_{cu} = f_{ck} / 0.78$: Cube Strength (MPa)

f_{ck} : コンクリートの圧縮強度 (Cylinder Strength) (MPa)

・) ACI 式

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{cal} = 0.083 \left(2 + \frac{4}{\beta_c} \right) \sqrt{f'_c} \cdot b_0 d \\ V_{cal} = 0.083 \left(\frac{\alpha_s d}{b_0} + 2 \right) \sqrt{f'_c} \cdot b_0 d \\ V_{cal} = 0.33 \sqrt{f'_c} \cdot b_0 d \end{array} \right.$$

上式の3式中から最小となる値を用いる。

ただし、

V_{cal} : 押抜きせん断耐力 (N)

f'_c : コンクリートの圧縮強度 (MPa)

b_0 : 載荷板周長+4d (mm)

d : 有効高さ (mm)

α_s : 係数 (=30)

β_c : 載荷板の長辺と短辺の比 (長辺/短辺)

さて、これらの式中の d は有効高さであるが、かぶり厚が標準的には 30mm 程度と想定されている様に考えられる。しかし、ここで d を元から考え直し、かぶり厚 C を含めて検討することとした。 C のかぶり厚を入れることで、もともとの計算値に対する実験値の平均値が異なる可能性があるが、取りあえず、このまま適用して、検討することとした。当然考えられることはかぶり厚の一部が有効に作用すると考えて、

仮定の有効高さ \bar{d} とすると

$$\bar{d} = d + \alpha C$$

として、この α を各示方書式でどの程度になるか検討した。

4.1 計算結果

本実験で得たデータをもとに、土木学会式、Eurocode II 式、CEB-FIP 式、BS 式、ACI 式を用いて計算した RC 床版の耐力計算値を表 5 に示す。表中では、各算定式による計算値とそれに対する実験値の比を示している。Eurocode II を除く 4 つの算定式において、A-10 と B-50 は実験値/計算値が 1 を下回った。また、Eurocode II は他の 4 式に比べて、大きい計算値を示した。

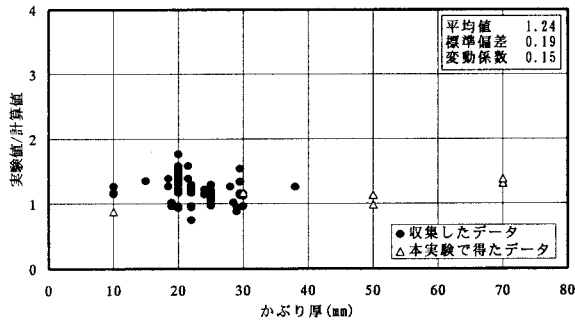


図8 土木学会

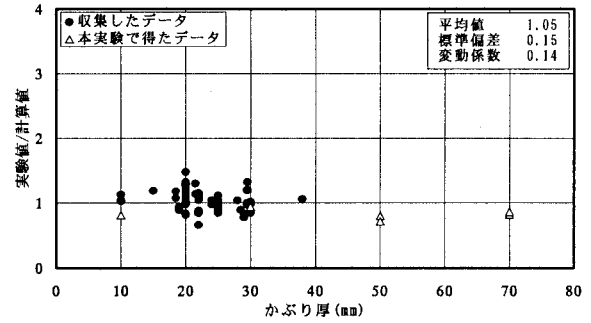


図9 補正後の土木学会

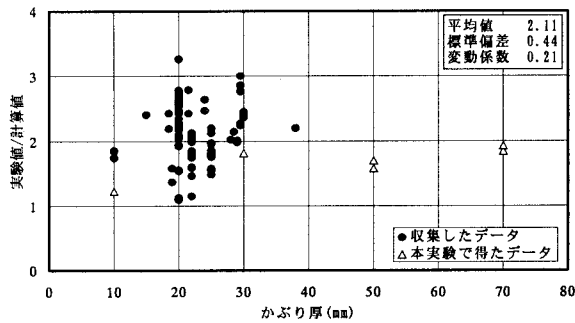


図10 Eurocode II

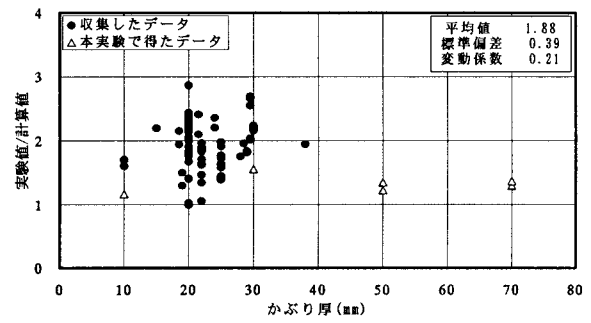


図11 補正後のEurocode II

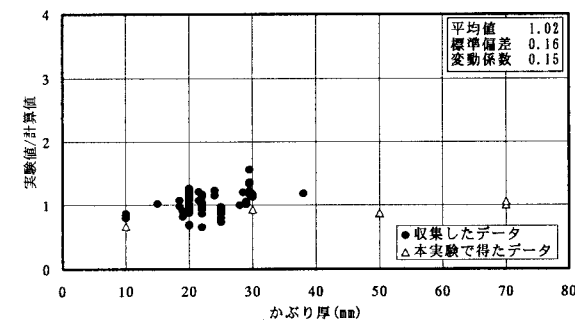


図12 CEB-FIP

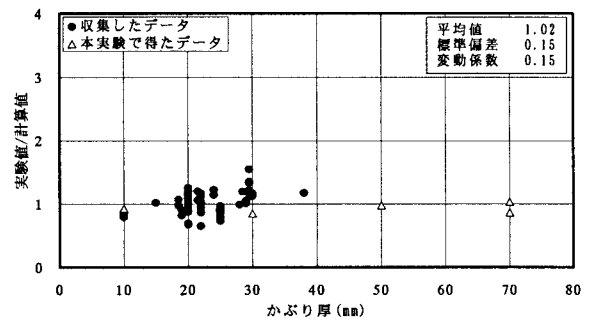


図13 補正後のCEB-FIP

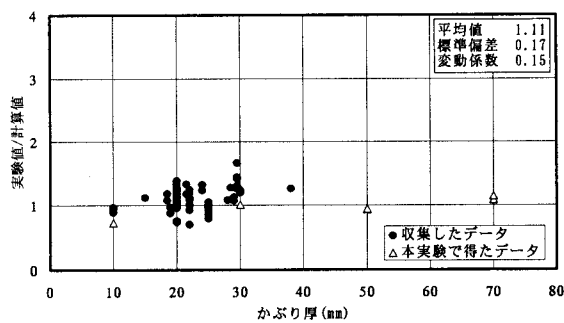


図14 BS

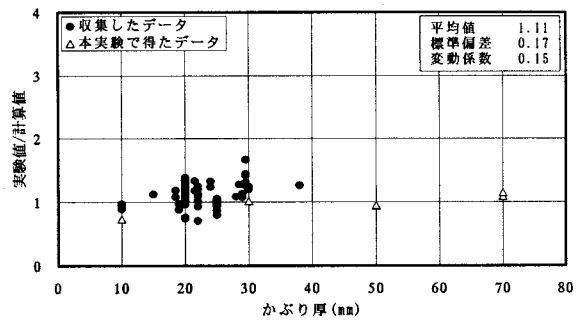


図15 補正後のBS

実験結果では、かぶり厚が大きくなるにつれて、破壊荷重が大きくなる傾向がみられた。しかし、計算値はかぶり厚が大きくなっても、計算値に大きな変化は見られなかった。耐力計算に用いた5つの算定式はかぶり厚をパラメータとして考慮していないためと考えられる。

4.2 各算定式における供試体のかぶり厚の影響

実験結果では、かぶり厚が大きくなるにつれて、破壊荷重が大きくなる傾向がみられた。本研究では、5つの算定式を対象とした。床版の押抜き強度を求める実験については、角田ら⁴⁾、松井ら⁵⁾により数多くのデータが提供されている。角田ら、松井ら、さらに本学の実験データ計86体のRC床版データを収集

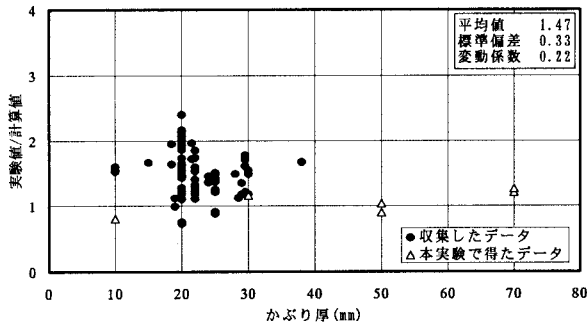


図 16 ACI

表 5 計算結果

供試体 No.	実験値 (kN)	土木学会		Eurocodell		CEB-FIP		BS		ACI	
		計算値 (kN)	実/計	計算値 (kN)	実/計	計算値 (kN)	実/計	計算値 (kN)	実/計	計算値 (kN)	実/計
A-10	127.4	145.6	0.88	103.7	1.23	190.2	0.67	175.2	0.73	158.4	0.80
A-30	166.6	143	1.17	91.5	1.82	178.6	0.93	164.5	1.01	144.1	1.16
A-50	164.6	145.6	1.13	104.2	1.58	190.7	0.86	175.6	0.94	158.9	1.04
A-70-1	191.1	145.6	1.31	103.7	1.84	190.7	1.00	175.6	1.09	158.4	1.21
A-70-2	200.9	145.6	1.38	104.2	1.93	190.2	1.06	175.2	1.15	158.9	1.26
B-50	196.0	200	0.98	115.2	1.70	223.5	0.88	207.2	0.95	218	0.90

し、5つの式に照合した。鉄筋径が明記された供試体については、かぶり厚を「床版厚-(有効高さ+(1/2)×鉄筋直径)」として求めた。

計算に用いた5つの示方書算定式では、かぶり厚をパラメータとして含まないため、実験結果のように変化しない。

一方、有効高さは5つの算定式にパラメータとして含まれている。そこで、 $d+\alpha C$ (d :有効高さ、 C :かぶり厚)を補正有効高さとした。 α に0~0.99を代入し、各算定式において、「実験値/計算値」の変動係数が最も小さくなる時の α の値を求めた。かぶり厚の範囲は10mmから70mmまでである。

4.2.1 土木学会式についての検討

図8にかぶり厚と実験値/計算値の関係を示す。図9に補正後のグラフを示す。 $\alpha=0.45$ となった。

4.2.2 Eurocode II式についての検討

図10にかぶり厚と実験値/計算値の関係を示す。図11に補正後のグラフを示す。 $\alpha=0.31$ となった。

4.2.3 CEB-FIPについての検討

図12にかぶり厚と実験値/計算値の関係を示す。図13に補正後のグラフを示す。 $\alpha=0.02$ となった。

4.2.4 BSについての検討

図14にかぶり厚と実験値/計算値の関係を示す。図15に補正後のグラフを示す。 $\alpha=0$ となった。

4.2.5 ACIについての検討

図16にかぶり厚と実験値/計算値の関係を示す。図17に補正後のグラフを示す。 $\alpha=0.99$ となった。これより、もともとの算定式は有効高さ d の扱い方が不適當であったと考えられる。

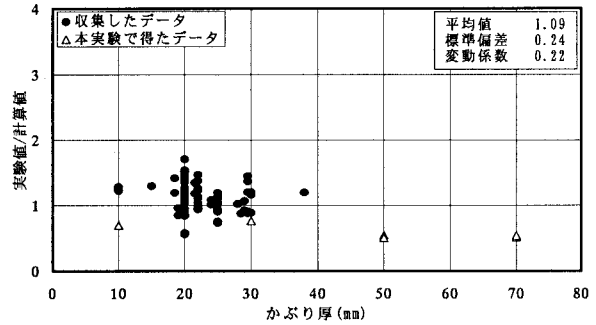


図 17 補正後のACI

補正後、計算に用いた5つの示方書式において適合性がよくなった。しかし、かぶり厚が50mm以上の実験データは少ないため、今後多くのデータを集める必要がある。

5. 結論

本研究では、かぶり厚の大きいRC床版の静的押抜きせん断試験を行い、これまでに提案された算定式のうち、示方書式(土木学会式、Eurocode II式、CEB-FIP 1990、BS 8110-85、ACI式)として用いられているものによる算定結果をもとに、実験結果との適合性とかぶり厚が押抜きせん断耐力に及ぼす影響について検討を行った。また、文献より収集した供試体データ86体についても、検討を行った。その結果を以下に示す。

- 鉄筋腐食抑制のために、かぶり厚を大きくすると、破壊荷重も大きくなった。
- かぶり厚に着目した場合、BSが最も適合性がよかった。
- 補正有効高さとして、かぶり厚を有効高さに加えると、適合性が向上した。
- かぶり厚が大きい供試体の実験データを集める必要がある。

[参考文献]

- 道路橋示方書(I共通編・IIIコンクリート橋編)・同解説, pp.171-175, 2002
- 浜田和子:コンクリート床版における押抜きせん断破壊に関する部材係数について, 山口大学修士論文, 2001.2
- 浜田純夫, 松尾栄治, 藤岡靖:実験結果に基づくRC床版の押抜きせん断強度算定式の安全係数, 土木学会論文集 No.676/V-51,51-63,2001.5
- 角田興史雄, 井藤昭夫, 藤田嘉夫:鉄筋コンクリートスラブの押抜きせん断耐力に関する実験的研究, 土木学会論文報告集, No.229, pp.105~115, 1974.9
- 前田幸雄, 松井繁之:鉄筋コンクリート床版の押抜きせん断耐荷力の評価式, 土木学会論文集, No.348, pp.133~141, 1984.8