

論文

[2070] 貫通ひびわれを有する鉄筋コンクリート床版の押し抜きせん断耐荷力

仲山元章*1・松貝 勇*2・中村 光*3・飯東義夫*4

1. はじめに

昭和38～42年頃に施工された道路橋の鉄筋コンクリート床版（RCスラブ）に、過大なひびわれ、コンクリートの部分的な剥落やそれに伴う舗装面の陥没などの損傷が多発して社会的な問題となった。それ以後20数年が過ぎているが、この間、鉄筋の許容応力度、配力鉄筋量、最小床版厚、床版スパン長などに関する規定に何度も変更が加えられており、最近建設された道路橋の床版には同様の問題は生じていない。しかしながら、当時建設された床版はなお多数供用されており、これらの床版の維持・管理は現在、将来ともに重要な問題である。

RCスラブの破損の主要原因は、せん断耐力の不足であり、特に、断面を貫通して発生するひびわれによるスラブのせん断耐力の低下に起因すると考えることができる。本論文は、人工的な貫通ひびわれを導入して、あらかじめ損傷を受けた状態にしたRCスラブの押し抜きせん断試験を実施して、そのようなRCスラブの破壊耐力や破壊性状を検討した結果をとりまとめたものである。

2. 実験概要

実験に用いた供試体は、100cm×100cm、厚さ10cmの単鉄筋矩形スラブで、相対2辺をスパン80cmで単純支持し、他の2辺は自由としたものである。各供試体には、1または2本の貫通ひびわれを人工的に導入した。人工貫通ひびわれは、道路橋RCスラブのひびわれ実態を考慮して、主鉄筋と平行方向に導入した。また、劣化が著しく進行した貫通ひびわれをモデル化するため、ひびわれ面の凹凸を極力除去した。

載荷試験は3シリーズに分かれている。1シリーズは、貫通ひびわれを1本導入した供試体を用い、貫通ひびわれから載荷点までの距離を変化させた。なお、比較のための、貫通ひびわれの無いスラブ（無損傷スラブ）も含まれている。2シリーズは、貫通ひびわれを2本、ひびわれ間隔を変化させて導入し、その中央に載荷したものである。3シリーズの供試体は、2シリーズと同様であるが、載荷板が常に一方のひびわれとに接するようにして非対称に載荷したものである。

配筋方法は、単鉄筋直交配筋とし、主鉄筋、配力鉄筋ともD10を用いた。鉄筋の有効高さは、主鉄筋方向 $d_m=7.0\text{cm}$ （鉄筋比2.04%）、配力鉄筋方向 $d_s=6.0\text{cm}$ （鉄筋比2.38%）である。鉄筋の中心間隔は両方向とも5cmである。供試体の概要は図-1に示した。載荷板端から貫通ひびわれまでの距離を X とする。なお、 X が特に大きい一部の供試体では、スラブの長さを150cmとした。載荷板としては、10cm×6cm厚さ3cmの鋼板を使用した。支持辺は直径5cmの鋼ローラーを用いて単純支持した。ただし、供試体端部の浮き上がりは特に拘束していない。

人工貫通ひびわれを導入するため、スラブ供試体は以下のようにして作製した。まず、ひびわれ予定位置に型枠を設けた後、1シリーズではひびわれの片側、2、3シリーズでは2本のひびわれの中間部のコンクリートを打設した。翌日、ひびわれ位置の型枠を外し、厚さ0.10mmの製図用

*1 山梨大学大学院 工学研究科土木環境工学専攻（正会員）

*2 山梨大学教授 工学部土木環境工学科、工博（正会員）

*3 山梨大学講師 工学部土木環境工学科、工博（正会員）

*4 日本道路公団試験研究所

ラスチックフィルムを3枚糊付けし、配力鉄筋を通す穴を開けたものを既設コンクリートに密着させた上で、残りの部分の鉄筋を組立て、コンクリートを打ち込んだ。このようにして、ひびわれ幅約0.35mmで凹凸の無い貫通ひびわれを新旧コンクリートの境界に導入した。スラブはコンクリート打設終了後試験直前まで、14日間（シリーズ1では7日間）湿潤養生を行った。

コンクリートには、早強ポルトランドセメント、最大寸法 20mmの砕石、およびFM2.75の川砂を使用した。載荷試験時における、載荷側と無載荷側のコンクリート強度 f_{c1}' と f_{c2}' 、および、鉄筋のヤング係数 E_s 、降伏点 f_v は表-1に示した。

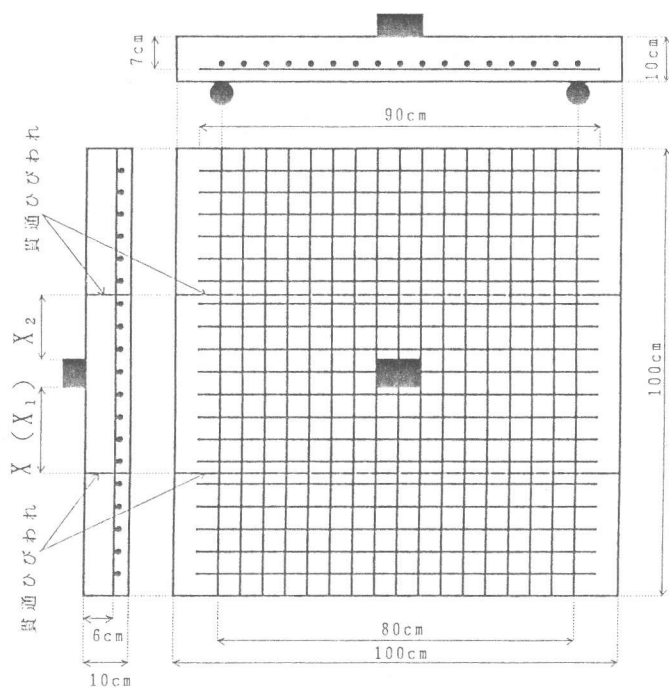


図-1 供試体寸法

3. 実験結果

3.1 押し抜きせん断破壊荷重

本論文において、無損傷スラブの押し抜きせん断耐力の算定には、信頼性が高いと思われる前田・松井の式¹⁾を用いることとした。さらに、貫通ひびわれを有するスラブの耐力算定においても、同式を拡張することを目指した。前田・松井の算定式の概要は式(1)～式(6)のとおりである。前田らが仮定している抵抗メカニズムは、圧縮部コンクリートのせん断抵抗（抵抗面の水平投影面積： A_s ）、および、引張鉄筋のダウエル作用に伴うコンクリートの鉛直方向の引張抵抗（抵抗面積： A_d ）である（図-2参照）。

表-1 供試体材料および実験結果

供試体	\bar{X} (cm)		f_{c1}' (kgf/cm ²)	f_{c2}' (kgf/cm ²)	E_s (kgf/cm ²)	f_v (kgf/cm ²)	P_{test} (tf)	P_{cal1} (tf)	$\frac{P_{test}}{P_{cal1}}$	P_{cal2} (tf)	$\frac{P_{cal2}}{P_{test}}$
	X_1	X_2									
1-1	0		364	348	1.68×10^6	3390	11.18	17.83	0.63	10.39	0.93
1-2	0		357	364	1.88×10^6	3701	11.67	18.37	0.64	10.62	0.91
1-3	4		360	342	1.88×10^6	3701	12.58	18.24	0.69	12.13	0.96
1-4	10		413	406	1.88×10^6	3701	13.42	19.00	0.71	15.01	1.12
1-5	20		395	413	1.88×10^6	3701	14.34	18.81	0.77	17.00	1.19
1-6	30		414	437	1.88×10^6	3701	15.98	19.03	0.84	18.05	1.13
1-7	***		352		1.68×10^6	3390	16.42	17.76	0.91	17.76	1.09
1-8*	***		358		1.68×10^6	3390	17.71	16.82	1.05	16.82	0.95
2-1	0	0	438	418	1.75×10^6	3591	9.22	19.06	0.48	8.72	0.95
2-2	7	7	355	370	1.75×10^6	3591	13.38	18.15	0.74	11.64	0.87
2-3	12	12	437	392	1.75×10^6	3591	13.56	18.89	0.72	14.09	1.04
2-4	17	17	390	389	1.75×10^6	3591	16.56	18.44	0.90	14.45	0.87
2-5	22	22	468	423	1.75×10^6	3591	15.56	19.26	0.81	16.25	1.04
2-6**	22	22	416	430	1.88×10^6	3701	16.12	19.05	0.85	15.80	0.98
2-7	27	27	442	423	1.75×10^6	3591	15.96	19.01	0.84	16.71	1.05
2-8**	27	27	423	447	1.88×10^6	3701	15.02	19.13	0.79	16.70	1.11
3-1	0	14	473	444	1.88×10^6	3701	10.01	19.47	0.51	9.14	0.91
3-2	0	44	409	404	1.88×10^6	3701	10.49	18.95	0.55	10.98	1.05

* : $d_m=7.5\text{cm}$ (鉄筋比 1.90%), $d_o=6.5\text{cm}$ (鉄筋比 2.19%)

** : スラブ長150(cm)

*** : 無損傷床版

$$P = \tau_{smax} \cdot A_s + (1/2) \cdot \sigma_{tmax} \cdot A_d \quad (1)$$

ここで、

$$A_s = 2(a + 2x_m)x_d + 2(b + 2x_d)x_m \quad (2)$$

$$A_d = 2(4C_d + 2d_d + b)2C_m + 2(a + 2d_m)2C_d \quad (3)$$

$$\tau_{smax} = 0.252f_c' - 0.000246(f_c')^2 \quad (4)$$

$$\sigma_{tmax} = 0.583(f_c')^{2/3} \quad (5)$$

$$E_c = 210000 + 900(f_c' - 300) \quad (6)$$

a, b : 載荷板の主鉄筋方向、配力鉄筋方向の辺長(cm)

x_m, x_d : 主鉄筋および配力鉄筋に直角な断面の、引張側コンクリートを無視して算出した中立軸高さ(cm)

d_m, d_d : 主鉄筋、配力鉄筋の有効高さ(cm)

C_m, C_d : 主鉄筋、配力鉄筋の中心からコンクリート下面までのかぶり厚さ(cm)

$\tau_{smax}, \sigma_{tmax}$: コンクリートの最大せん断応力度、最大引張応力度(kgf/cm²)

f_c' : コンクリートの圧縮強度(kgf/cm²)

E_c : コンクリートのヤング係数(kgf/cm²)

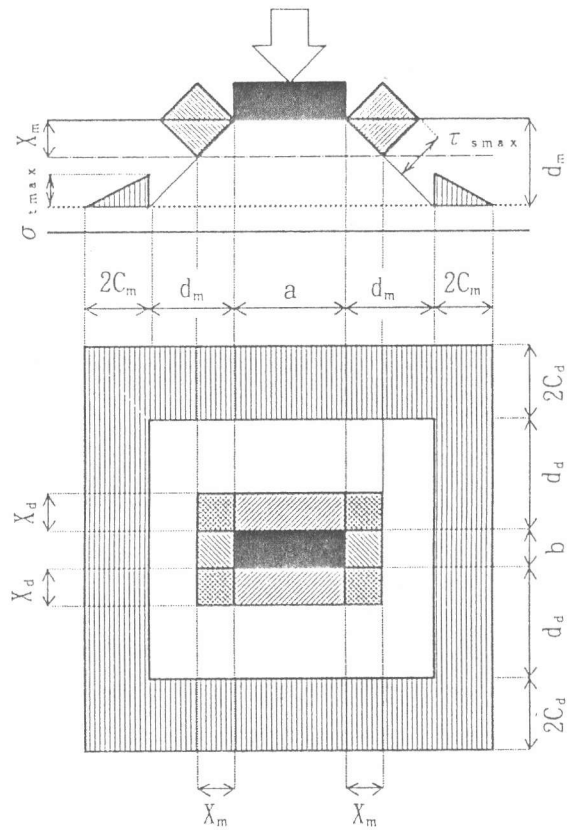


図-2 前田・松井の応力分布図

なお、前田らは、かぶりとして鉄筋中心からの距離を用いているが、無損傷スラブの破壊荷重の検討結果に基づいて、本実験供試体のように鉄筋ピッチが小さい場合には、純かぶりをを用いるのが適当と判断した。供試体はすべて押し抜きせん断により破壊に至った。貫通ひびわれを有する各供試体の破壊荷重 P_{test} 、無損傷スラブとしての破壊荷重の計算値 P_{call} 、ならびにその比率(耐力比) P_{test}/P_{call} は表-1に示したとおりである。

貫通ひびわれを1本導入した1シリーズでは、載荷位置が貫通ひびわれに近づくに従って、押し抜きせん断破壊荷重は直線的に低下している。図-3に示したように、載荷板がひびわれと接する位置($X=0$)で破壊荷重は最小であり、この時の耐力比は0.64となった。

2本の貫通ひびわれの中央に載荷した2シリーズにおいても同様に、載荷点から貫通ひびわれまでの距離 X が短くなるに従って、耐力比が直線的に低下しており、 $X=0$ の時に耐力比が最小(0.48)となった。ここで注目すべきことは、ひびわれが2本ある場合の耐力は、当然、ひびわれが1本の場合よりもかなり低下すると予測していたにもかかわらず、図-3から明らかなように、 X が同一であれば、両者の耐力比に大差は認められなかったということである。上記の結果は予想外であった。このことをさらに確かめるために、3シリーズの2供試体の試験を追加

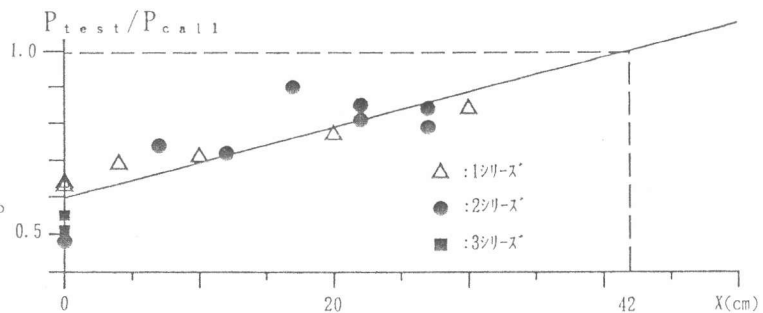


図-3 距離(X)と耐力比(P_{test}/P_{call})の関係

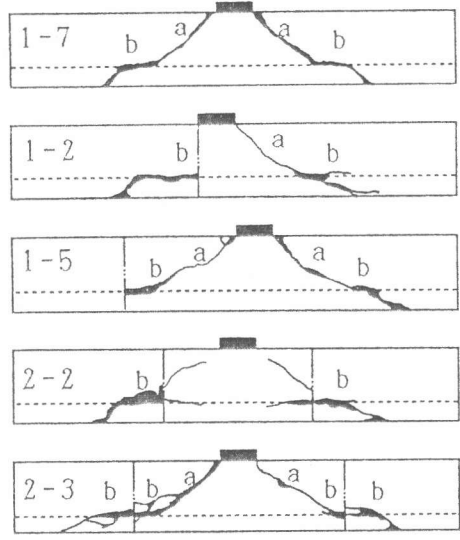
した。両供試体において、2本の貫通ひびわれの間隔は異なっているが、どちらも載荷板が1方の貫通ひびわれに接する位置に載荷した。結局、2体の耐力比は1,2シリーズの値の間中となって、正確に言えば、 $X=0$ の場合、2シリーズ、3シリーズ、1シリーズの順で破壊荷重は増加しているのではあるが、予測した程の大差ではなかった。図-3に見られる様に、載荷板端からこれと近い方のひびわれまでの距離（ X または X_1 ）と押し抜きせん断耐力比の関係は、ほぼ同一の直線で表せられると思われる。最小二乗法により求めた X と耐力比の関係は式(7)のとおりである。

$$P_{test}/P_{call} = (0.0096)X + (0.597) \quad (7)$$

式(7)によれば、載荷板端から貫通ひびわれまでの距離 X が42cm($7d_a$)以上であれば、貫通ひびわれの悪影響による押し抜きせん断耐力の低下は無視できることになる。

3.2 スラブのひびわれ状況

実験終了後、供試体を貫通ひびわれに直交し載荷点中心を通る面で切断し、内部のひびわれを観察した。切断面のひびわれ状況を、図-4に示す。1-7の様な無損傷スラブでは、載荷板端から角度約 $30^\circ \sim 40^\circ$ の斜めひびわれ a が鉄筋位置まで延びており、それより外側では引張鉄筋のダウエル作用によるひびわれ b とつながっている。貫通ひびわれ1本を有する1シリーズで1-2のように載荷板端から貫通ひびわれまでの距離 X が短い場合は、載荷側で a, b 、無載荷側で b が発生している。1-5のように X が十分長い場合は、載荷側で載荷板端の両側に a, b が発生し、無載荷側ではひびわれは発生していない。1シリーズにおいては共通して、貫通ひびわれが無い側のひびわれ状況は、無損傷スラブと同様であった。貫通ひびわれ2本で対称載荷した2シリーズの場合は、2-2のように X が短い場合、載荷側でわずかに斜めひびわれが発生し、両無載荷側で b が発生している。2-2の斜めひびわれは完全に発達していないことから、この供試体では配力鉄筋方向のせん断抵抗はあまり期待できないと考えられる。2-3のように X がある程度長い場合は、載荷側でひびわれ a, b が発生し、無載荷側でも b が発生していることから、載荷側と無載荷側に渡ってダウエル作用による引張抵抗が働いていたと考えられる。2-8のように X が十分長い場合は、載荷側には無損傷スラブと同様にひびわれが発生し、無載荷側でのひびわれはあまり発達していない。貫通ひびわれ2本を有し非対称載荷した3シリーズでは3-2のように、載荷側で a, b 、載荷板に近い無載荷側では b が発達し、もう一方の無載荷側ではひびわれは認められない。3シリーズのひびわれ状況は、1シリーズと同様である。



4. 抵抗機構の考察と耐力算定法の提案

RCスラブの切断面のおよび底面で観察したひびわれ状況等に基づいて、前田・松井式を貫通ひびわれを有するRCスラブの押し抜

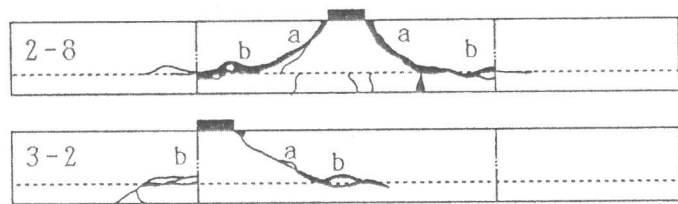


図-4 切断面のひびわれ状況

きせん断耐力の算定に拡張する方法を考察した。試行錯誤を繰り返した結果、以下の考え方が妥当であろうとの結論に達した。

4. 1 貫通ひびわれを有するRCスラブのダウエル抵抗領域

まず、2本の貫通ひびわれの中央に荷重した2シリーズについて考える。この場合、対称性があるので、荷重点を中心とした片側だけについて述べる。3.2のひびわれ観察結果によれば、配力鉄筋方向のダウエル抵抗領域 S_1 は、荷重点から貫通ひびわれまでの距離 X が短い場合には、無荷側側にあり（図-4(2-2)参照）、 X が増加すると、荷側側から無荷側側にまたがって存在し（図-4(2-3)）、 X がさらに大きくなると無損傷床版と同様であると考えられる（図-4(2-8)）。一方、主鉄筋方向のダウエル抵抗領域 S_2 は、荷側側だけに存在すると考えられる。また、主鉄筋については貫通ひびわれの影響は考えられないので、無損傷スラブを対象とした前田・松井式における主鉄筋方向のダウエル抵抗領域と同様であると考えることができる。以上のことから、貫通ひびわれが存在する場合のダウエル抵抗領域面積 A_d は図-5に示すようであろうと考えられる。

貫通ひびわれを1本だけ導入した1シリーズの場合も、基本的には上記と同様であるが、非対称荷重であり、貫通ひびわれ側の変位は逆側に比べて大きいので、貫通ひびわれ付近のダウエル破壊は早期に発生し、床版の押し抜き破壊時にはもはや有効には働かないと推定される。また、荷重板中心から貫通ひびわれの無い側でのダウエル抵抗領域は無損傷スラブと同様であると考えられる。以上のことから、このような場合のダウエル作用領域面積 A_d を定めることができる。

貫通ひびわれが2本で非対称荷重した3シリーズの場合も、基本的には2シリーズと同様であるが、1シリーズの場合と同様の理由で、荷重点に近い貫通ひびわれ部での配力鉄筋方向のダウエル作用は無視して A_d を算定するのが適当であると考えられる。

上記のように仮定してダウエル抵抗領域面積 A_d を定め、コンクリートの引張抵抗は式(5)を適用すれば、ダウエル作用によるせん断抵抗 $((1/2) \cdot \sigma_{tmax} \cdot A_d)$ を推定することができる。

4. 2 貫通ひびわれを有するRCスラブのせん断抵抗領域

荷重板端から貫通ひびわれまでの距離 X が短い場合には、配力鉄筋方向には斜めひびわれは発生せず、この部分のせん断抵抗は考えられない。しかし、 X が十分に長い場合には、貫通ひびわれ側にも無損傷スラブと同様な斜めひびわれが発生しており、せん断抵抗も無損傷の場合と同様であると考えられる。さらに、3.1で示したように、 X が $7d_d$ 以下となる場合に押し抜きせん断耐力が直線的に低下していることから、荷重板端から貫通ひびわれの間で働く配力鉄筋方向のせん断抵抗の有効度 (μ) は式(8)~式(10)のように X の一次関数によって近似的に表されるものと考えた。距離 X の関数である有効度 (μ) を、図-6に示す。主鉄筋方向の斜めひびわれにおけるせん断抵抗は、貫通ひびわれの影響を受けないので、有効度 (μ) は常に1であると考えられる。

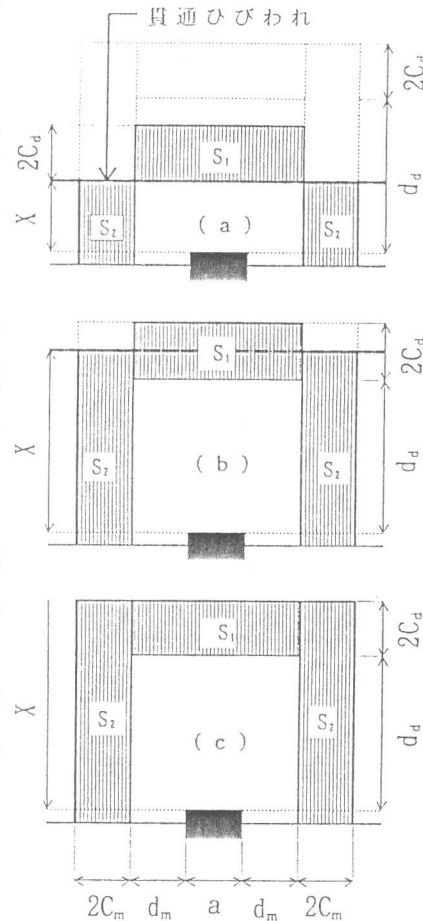


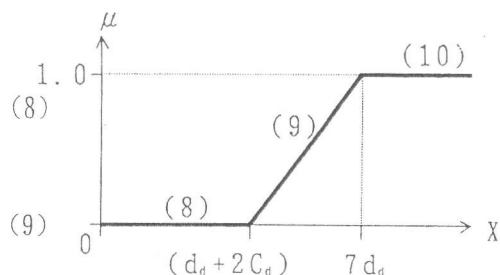
図-5 ダウエル抵抗領域面積

このようにXによってせん断抵抗力が変化すると仮定したので、せん断抵抗領域の面積 A_s は前田・松井式と同じ値を用いる。

$$0 \leq X \leq (d_d + 2C_d) \text{ の場合、} \\ \mu = 0$$

$$(d_d + 2C_d) \leq X \leq 7d_d \text{ の場合、} \\ \mu = \{1/(6d_d - 2C_d)\} X - \{(d_d + 2C_d)/(6d_d - 2C_d)\} \quad (9)$$

$$7d_d \leq X \text{ の場合、} \\ \mu = 1$$



(10) 図-6 距離(X)と有効度(μ)の関係

以上のようにして定めたせん断抵抗領域面積 A_s と式(4)を用いれば、コンクリートのせん断抵抗による抵抗力 ($\mu \cdot \tau_{smax} \cdot A_s$) を推定することができる。

4. 3 貫通ひびわれを有するRCスラブの押し抜きせん断耐荷力

4.2の結果を総合すれば、結局、貫通ひびわれを有するRCスラブの押し抜きせん断耐荷力 (P_{ca12}) は、式(11)によって推定することができる。

$$P_{ca12} = \mu \cdot \tau_{smax} \cdot A_s + (1/2) \cdot \sigma_{tmax} \cdot A_d \quad (11)$$

式(11)によって求めた押し抜きせん断耐荷力の計算値 P_{ca12} 、および、計算値と実験値との比(耐力比) P_{ca12}/P_{test} は表-1に示したとおりである。1シリーズの6体についての耐力比の平均値は1.04、変動係数は10.4%である。2シリーズの8体では、平均0.99、変動係数8.3%、3シリーズの2体では平均0.98、変動係数6.8%であり、各シリーズの結果の間に有意な差は認められない。そこで、貫通ひびわれを有する全供試体16体について耐力比の平均値および変動係数を計算すると、それぞれ1.01および9.4%であり、式(11)によって、貫通ひびわれを有するRCスラブの押し抜きせん断耐荷力を良好な精度で推定できることが確かめられた。

5. 結論

貫通ひびわれを有するRCスラブの押し抜きせん断破壊試験から得られた知見を要約すると以下のようなものである。

- ①貫通ひびわれを有するRCスラブの押し抜きせん断耐荷力は、載荷位置が貫通ひびわれに近づくに従って、ほぼ直線的に低下する。従って、耐力が最小になるのは、荷重が貫通ひびわれと接する位置に作用する場合である。
- ②貫通ひびわれが複数でその間隔が小さい場合には、スラブの押し抜きせん断耐荷力は低下するのではあるが、その程度は予想以上に小さいものであった。
- ③初期損傷の無いRCスラブの押し抜きせん断耐荷力を算定する前田・松井の式を、貫通ひびわれを有するスラブが任意の位置に載荷される時の耐力算定に拡張する方法を提案し、その妥当性を示した。

本研究に対し科学研究費補助金の交付を受けた。ここに謝辞を表する次第である。

【参考文献】

- 1)前田幸雄・松井繁之：鉄筋コンクリート床版の押し抜きせん断耐荷力の評価式、土木学会論文集、第348号、V-1、1984年8月