

論文 RC 床版の押抜きせん断耐力算定式における各要因の影響について

松尾 栄治^{*1} ・ 毛 明傑^{*2} ・ 楊 秋寧^{*3} ・ 浜田 純夫^{*4}

要旨：RC 床版の押抜きせん断強度については，国内外において多くの算定式が提案されている。これらの式を構成する床版の主要因は，式それぞれで多岐にわたっており，その影響の度合いも多種多様である。本研究では国内外で実験された 297 体の床版供試体を対象とし，これまでに提案された式のうち代表的な 5 つの式への適用性について検討を行った。すなわち，各算定式に対して適用できる形状寸法などのパラメータの範囲について検討した。

キーワード：RC 床版，押抜きせん断耐力，比耐力，圧縮強度，鉄筋比

1. はじめに

道路橋の鉄筋コンクリート床版（以下，RC 床版と略す）に柱を通じ，あるいは直接に局部的な集中荷重が作用する場合には，荷重直下のコンクリート部分で押抜きせん断破壊が生じることが多く，その耐力を適切に推定することが重要となる。

小柳¹⁾によると，RC 床版の押抜きせん断耐力に関する研究は 1913 年の Talbot の実験報告に始まるとされており，その後今日まで多くの研究者により耐力機構の推察が行われ，算定式が提案されている。

これまでに提案された算定式における主なパラメータは，床版有効高さ，コンクリート強度，鉄筋比，載荷板の大きさや形状および周長などである。算定式を提案する場合，各研究者によって用いた床版の実験データや載荷条件が異なり，各算定式は特定の条件下において提案されている。すなわち，床版の押抜きせん断耐力へ影響する様々なパラメータの適用範囲に関して，総合的に評価し直す必要がある。例えば，床版は 1 つのパラメータを変えたと算定式による計算結果と実験結果との間にばらつきが大きく生

じることがある。すなわち，パラメータが算定式へ与える影響の程度により算定式の適用範囲も変わると考えるべきであり，その影響の程度を検討する必要がある。

本研究では，これまでに提案された RC 床版の押抜きせん断耐力算定式のうち，各国の示方書に採用されている ACI 式²⁾，BS 式³⁾，Eurocode2 式⁴⁾，土木学会式⁵⁾に加え，床版の破壊状況をより適切に評価できる式として松井の式⁶⁾を対象に取り上げた。これら 5 つの算定式に影響を及ぼすと考えられる圧縮強度，鉄筋比，有効厚さ，形状寸法の 4 つのパラメータについて，各算定式へ与える影響を調べた。すなわち，「算定式により計算した結果に対する実験値の割合」を「比耐力」と定義し，各算定式に対して有効に適用できるパラメータの範囲について検討した。なお，実験値は世界のデータを集め，297 体を対象にした。

2. 耐力算定式と床版供試体

各算定式において使用される床版諸元のパラメータは，当然のことながらそれぞれ異なり多岐にわたる。また一方で，ほとんどの算

*1 山口大学工学部 社会建設工学科 助手 博(工) (正会員)

*2 山口大学大学院 理工学研究科 設計工学専攻 修(工)

*3 山口大学大学院 理工学研究科 社会建設工学専攻

*4 山口大学工学部 社会建設工学科 教授 Ph.D. (正会員)

表-1 各算定式におけるパラメータ

パラメータ	コンクリート強度	鉄筋比	有効厚さ	載荷板寸法	鉄筋の降伏強度	中立軸	かぶり
ACI 式	○	×	○	○	×	×	×
BS 式	○	○	○	○	×	×	×
Eurocode2	○	○	○	○	×	×	×
土木学会式	○	○	○	○	×	×	×
松井の式	○	○	○	○	×	○	○

表-2 RC 床版のパラメータとそれぞれの実験結果

供試体 No	実験者	床版寸法 (cm)	コンクリート強度 (N/mm ²)	鉄筋比 (%)	床版厚 (cm)	有効厚 (cm)	載荷板 周長 (cm)	載荷板辺長		実験値 (kN)
								a (cm)	b (cm)	
1 2	Graf	150 × 150	15.6 ~ 15.7	0.6 ~ 1.1	不明	27.1 ~ 47.3	120.0	30.0	30.0	1164.2 ~ 1662.1
3 ~ 27	Elstner	183 × 183	12.7 ~ 50.5	1.2 ~ 7.0	15.0	11.4 ~ 11.8	101.6 ~ 142.4	25.4 ~ 35.6	25.4 ~ 35.6	301.8 ~ 578.6
28 29	Scordelis	183 × 183	19.4 ~ 27.9	2.5	不明	10.8	132.0	33.0	33.0	466.5 ~ 484.1
30 ~ 42	Moe	183 × 183	20.5 ~ 26.1	0.1 ~ 1.5	15.2	11.4	60.8 ~ 122	15.2 ~ 30.5	15.2 ~ 30.5	311.6 ~ 432.2
43 ~ 57	Yitzhaki	不明	12.3 ~ 28.7	0.5 ~ 2.0	不明	7.8 ~ 10.9	42.2 ~ 118	10.5 ~ 29.5	10.5 ~ 29.5	98.0 ~ 306.7
58 ~ 76	Gardner	54 × 54 ~ 108 × 108	13.2 ~ 52.1	0.7 ~ 5.0	10.2 ~ 15.2	7.3 ~ 12.3	36.0 ~ 72.0	9.0 ~ 18	9.0 ~ 18	107.4 ~ 356.6
77 ~ 95	Mowrer	122 × 122	15.5 ~ 53.8	1.1 ~ 2.2	7.6	5.1	40.6 ~ 162.6	10.2 ~ 40.6	10.2 ~ 40.6	79.2 ~ 184.6
96 ~ 98	Bazant	不明	47.9 ~ 52.9	2.6 ~ 4	10.2	7.8	360.0	102.0	102.0	228.9 ~ 309.6
99 ~ 111	Menetrey	不明	16.1 ~ 40.6	0.2 ~ 2.0	15.0 ~ 45.0	12.1 ~ 39.7	42.5 ~ 159.5	10.6 ~ 39.9	10.6 ~ 39.9	107.0 ~ 1370.0
112 ~ 136	Kinnunen	152 × 152 ~ 183 × 183	23.9 ~ 31.9	0.4 ~ 2.3	15.0 ~ 24.0	10.0 ~ 20.1	17.7 ~ 106.4	4.4 ~ 26.6	4.4 ~ 26.6	183.0 ~ 558.0
137	Pralong	180 × 180	31.6	0.7	18.0	16.2	106.3	26.6	26.6	366.0
138 ~ 147	Regan	150 × 150 ~ 180 × 180	31.4 ~ 43.6	0.8 ~ 1.0	不明	11.8 ~ 20	19.2 ~ 88.8	4.8 ~ 22.2	4.8 ~ 22.2	170.0 ~ 825.0
148 ~ 150	Van	不明	29.0 ~ 36.5	0.15	15.0	11.4	88.8 ~ 255.2	22.2 ~ 63.8	22.2 ~ 63.8	375.0 ~ 592.0
151 ~ 155	Corley	213 × 213	18.7 ~ 25.5	0.15	14.6	11.1	81.2 ~ 101.6	20.3 ~ 25.4	20.3 ~ 25.4	243.8 ~ 334
156 ~ 172	Marzouk	150 × 150	30.0 ~ 80.0	0.5 ~ 2.4	9.0 ~ 15.0	7.0 ~ 12.0	60.0 ~ 120.0	15.0 ~ 30.0	15.0 ~ 30.0	178.0 ~ 560.0
173 ~ 196	Akiyama	不明	21.7 ~ 24.6	0.3 ~ 3	不明	4.0 ~ 9.5	39.2 ~ 348.0	9.8 ~ 87	9.8 ~ 87	62.7 ~ 981.5
197 ~ 201	Umehara	110 × 110	22.8 ~ 40.1	0.2 ~ 0.8	12 ~ 15	8.5 ~ 11.5	120.0	30.0	30.0	202.9 ~ 402.8
202 ~ 204	Higashi— Yama	148 × 100	33.5 ~ 43.4	1.3	6.0 ~ 6.5	4.4 ~ 4.7	28.0 ~ 46.0	10.0 ~ 13.0	4.0 ~ 10.0	96.7 ~ 104.3
205 ~ 207	Suehiro	不明	51.2 ~ 52.3	0.6 ~ 1.8	15.0 ~ 20.0	12.0 ~ 16.2	354.0	89.0	89.0	267.5 ~ 563.5
208 209	Nagai	200 × 200	19.6	1.0	15.0	12.0	101.2	25.3	25.3	362.6 ~ 392
210 ~ 230	Hamada	100 × 100 ~ 150 × 150	20.4 ~ 60	0.4 ~ 3.4	10.0 ~ 15.0	7.5 ~ 12.0	40.0 ~ 120.0	10.0 ~ 30.0	10.0 ~ 30.0	144.1 ~ 699.7
231 ~ 277	Kakuta	65 × 65 ~ 220 × 220	15.1 ~ 51.9	0.5 ~ 3.4	10.0 ~ 15.0	7.5 ~ 12.0	20.0 ~ 120.0	5.0 ~ 30.0	5.0 ~ 30.0	115.4 ~ 735.0
278 ~ 295	Other	不明	23.8 ~ 46.8	0.8 ~ 1.3	7.1 ~ 22	5.8 ~ 18.1	39.0 ~ 180.0	15.0 ~ 60.0	4.5 ~ 30.0	100.0 ~ 989.8
295 ~ 297	Yamada	200 × 200	21.6 ~ 26	0.6 ~ 1.5	20.0	16.3	120.0	30.0	30.0	441.0 ~ 658.0

定式に用いられているパラメータもある。表-1に本研究で用いた代表的な5つの算定式で考慮されているパラメータを示す。本研究では筆者らおよび世界の各研究者が提供した計297体に及ぶ床版の実験データを収集した。そのデータを表-2に示すが、床版データは研究者によって

大きく異なることがわかる。コンクリート強度に関しても、低強度のもの実験あるいは高強度のみの実験もある。床版の寸法についても一定の大きさで実験を行っている場合と、角田のように寸法を変化させている場合とがある。

表-3 各算定式による計算結果

算定式	ACI 式	BS8110-85	Eurocode2 式	土木学会式	松井の式*
平均値	1.42	1.05	2.12	1.18	0.85
標準偏差	0.36	0.21	0.54	0.24	0.20
変動係数(%)	25.1	19.7	25.2	20.7	23.4

* 印については 244 個のデータを使用

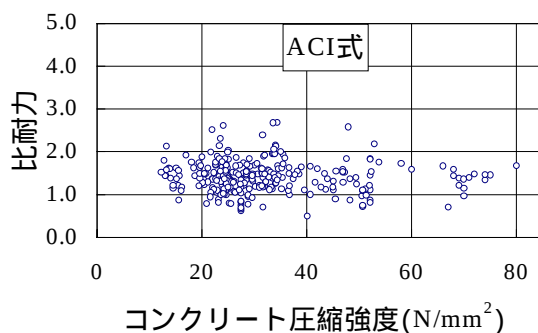


図-1 圧縮強度と比耐力の関係(ACI 式)

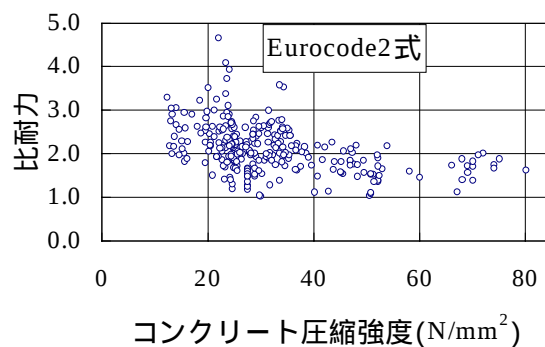


図-3 圧縮強度と比耐力の関係(EC2 式)

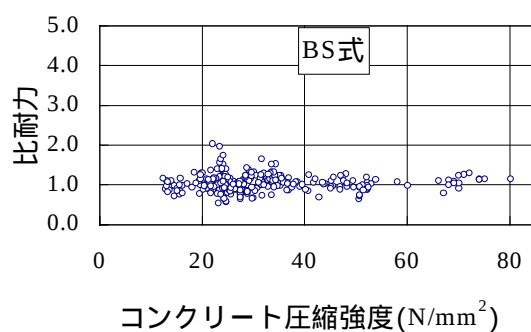


図-2 圧縮強度と比耐力の関係(BS 式)

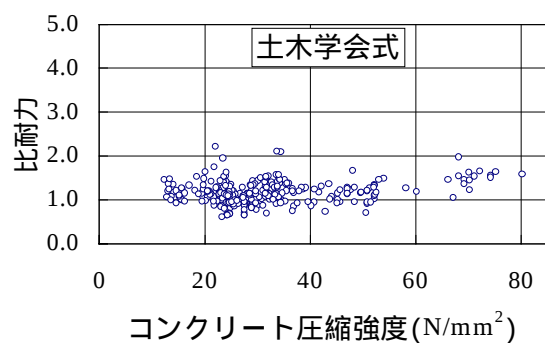


図-4 圧縮強度と比耐力の関係(JSCE 式)

3. 解析結果

3.1 各算定式による算定結果

表-3 に実験値と計算値の比を比耐力として、それらの平均値、標準偏差および変動係数を示す。BS 式、土木学会式の比耐力の平均値は 1.0 に近く、他の式より精度が良いことがわかる。また ACI 式、土木学会式は比耐力の平均値が 1.1 以上になっており、安全側の値を示している。また、Eurocode2 式は比耐力の平均値が 2.0 以上で、かなり安全側になっていることがわかる。以下に、各パラメータと比耐力の分布状況を検討していく。

3.2 コンクリート強度の影響

図-1～5 にコンクリート圧縮強度と比耐力の関係を算定式ごとに示す。

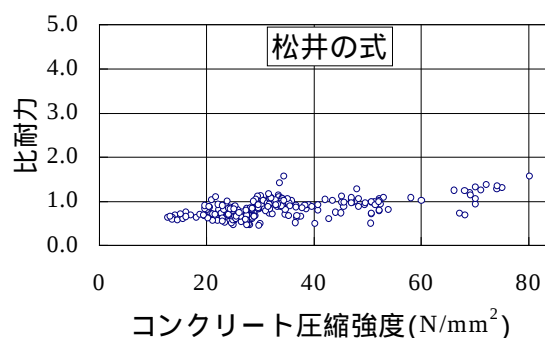


図-5 圧縮強度と比耐力の関係(松井の式)

図-1～2 より ACI 式と BS 式による比耐力はコンクリート圧縮強度の増加との明確な相関関係はみられなかった。よってコンクリート圧縮強度に関わらず適用できると考える。

図-3 より Eurocode2 式による比耐力はコンク

リート強度が小さいときに大きな値を示し、強度の増加とともに低下して 1.0 に近づく傾向がみられる。すなわち、コンクリート強度が高い床版に対する算定精度が良いといえる。ただし、比耐力のばらつきは 5 つの算定式のうち、かなり大きい。

図-4 から土木学会式により求めた比耐力については、コンクリート圧縮強度が 50N/mm^2 までは、強度の増加に伴う大きな変化はみられなかった。ただし、圧縮強度 50N/mm^2 を超える範囲の比耐力は、 50N/mm^2 以下のものより安全側の値を示した。コンクリート標準示方書では適用できるコンクリート圧縮強度の上限値を原則として 50N/mm^2 としているが、ここでは 80N/mm^2 まで適用させた。しかしながらこの高強度領域においても比耐力はほとんど安全側の値を示しており、土木学会式がそのまま高強度コンクリートへも適用できる可能性を示している。

図-5 にコンクリート圧縮強度と松井の式により求めた比耐力の関係を示す。コンクリート強度 50N/mm^2 までは強度と比耐力には明確な相関関係は確認できない。ただし、コンクリート強度が 50N/mm^2 を超えると、圧縮強度が増大するにつれて比耐力が上昇する傾向がみられる。これは松井の式ではコンクリート強度が 50N/mm^2 までの普通コンクリート床版を対象として提案されているためと考えられる。よって本研究ではコンクリート強度が 50N/mm^2 を超えれば高強度コンクリートとしてのせん断強度を式(1)により算定⁷⁾した。

$$f_s = -38 + 5.2 \cdot \ln(f_c) \quad (1)$$

ただし、 f_s ：コンクリートのせん断強度

f_c ：コンクリートの圧縮強度 (N/mm^2)

本研究においてはコンクリート圧縮強度が 50N/mm^2 以上の床版は 36 体である。これらのデータを用いて、従来の式と式(1)により、計算

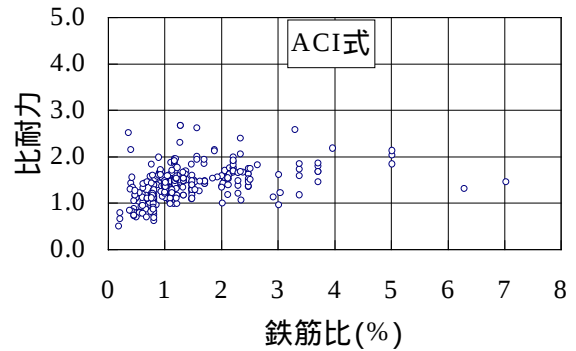


図-6 鉄筋比と比耐力の関係(ACI 式)

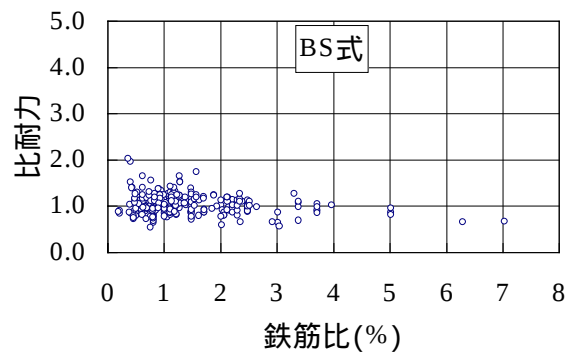


図-7 鉄筋比と比耐力の関係(BS 式)

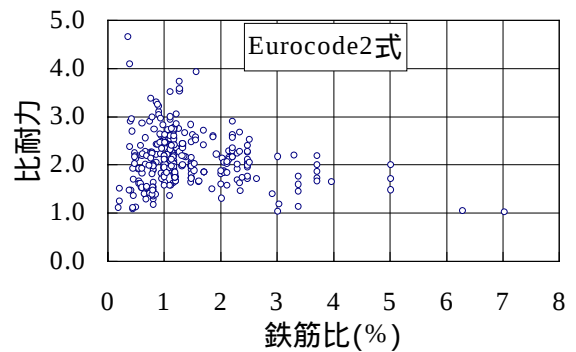


図-8 鉄筋比と比耐力の関係(EC2 式)

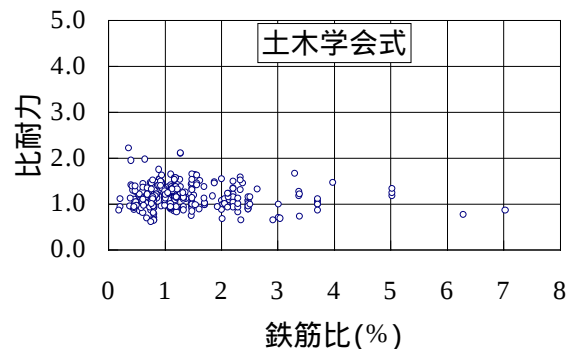


図-9 鉄筋比と比耐力の関係(JSCE 式)

表-4 圧縮強度 50N/mm^2 を超えた 36 個の
床版データによる計算結果

	従来の式	式(1)
比耐力の平均値	1.04	0.93
標準偏差	0.23	0.14
変動係数(%)	22.0	15.6

した結果を表-4 に示す。これより、式(1)により計算した場合は、比耐力の平均値は 0.93 と危険側を示し、1.0 からの差も大きくなったものの、標準偏差および変動係数は小さくなっており精度は向上した。

3.3 鉄筋比の影響

図-6～10 に鉄筋比と比耐力の関係を示す。

図-6 から、ACI 式により求めた比耐力は鉄筋比が 1% 以下の場合 1.0 以下になり、鉄筋比が 1% を超えると比耐力はほとんど 1.0 以上と安全側の値を示す傾向がある。これは ACI 式が鉄筋比をパラメータとしていないため、鉄筋比が算定式へ及ぼす影響が顕著であると考えられる。

図 7～10 については、鉄筋比と比耐力に明確な相関関係はみられなかった。よって、これらの式については鉄筋比の大小に関わらず適用できると考えられる。

3.4 床版形状寸法の影響

各算定式における床版形状寸法の影響を検討するため、載荷板一辺の辺長と有効厚さの比（以下、 r/d ）を用いて検討した。寸法効果を表す指標としてせん断スパン比や、有効厚さを用いることも考えられるが、床版に作用すると想定される活荷重の作用面積は変動が小さいと考え、ここでは r/d を指標とした。

図-11～15 に r/d と比耐力の関係を示す。いずれの算定式においても r/d と比耐力との間に明確な相関関係はみられなかった。これはいずれの算定式においても載荷板寸法と床版有効厚さを考慮しているためと考えられる。すなわち、式中に寸法効果そのものを具体的に考慮する指標がなくても、何らかの床版形状寸法を示すパラメータが少なくとも 2 つ以上

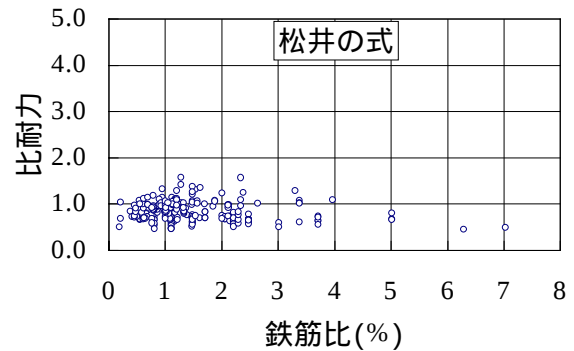


図-10 鉄筋比と比耐力の関係(松井の式)

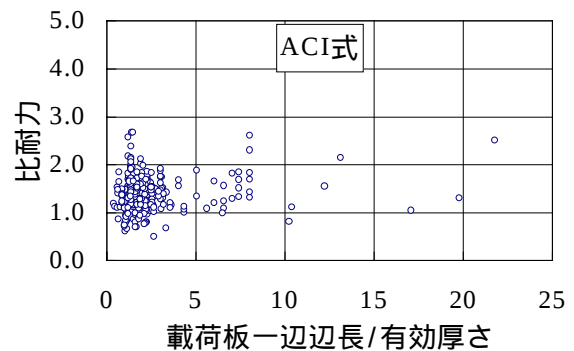


図-11 r/d と比耐力の関係(ACI 式)

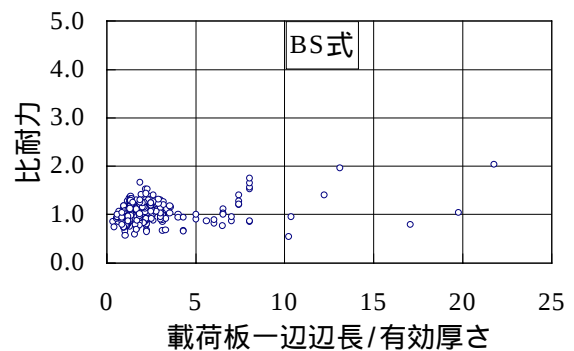


図-12 r/d と比耐力の関係(BS 式)

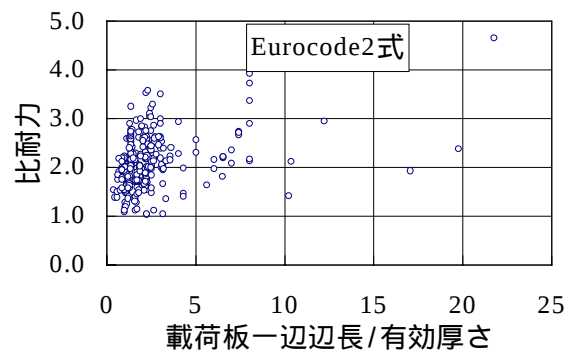


図-13 r/d と比耐力の関係(EC2 式)

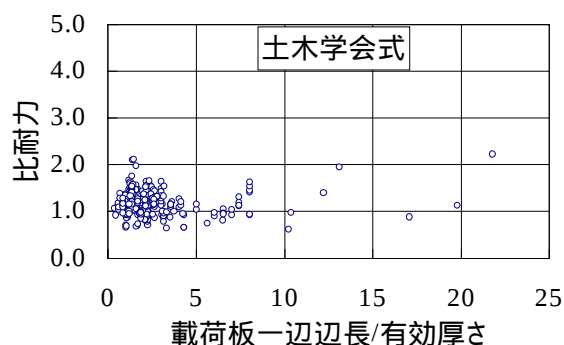


図-14 r/d と比耐力の関係(JSCE 式)

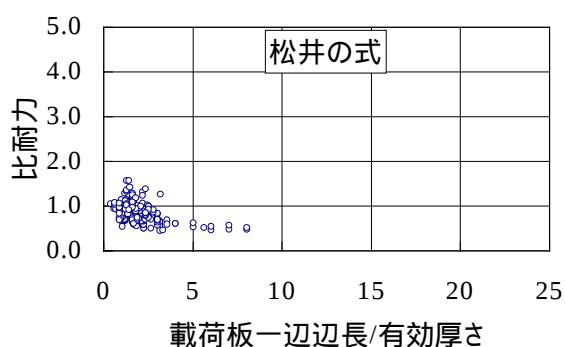


図-15 r/d と比耐力の関係(松井の式)

存在し,それらが間接的に寸法効果を表せば,その算定式は寸法効果の変動に対応できると考えられる。

4. まとめ

- 1) 本研究で用いたデータに関する限りでは,コンクリート標準示方書の面部材の押抜きせん断耐力式は 80N/mm^2 の高強度コンクリートにまでそのまま適用できる。
- 2) 松井の式において高強度コンクリートを適用する場合は,せん断強度の換算に高強度コンクリート用の式を用いることで,より精度が向上する。
- 3) 鉄筋比は ACI 式の算定結果に影響を及ぼしている。すなわち,算定式が考慮していないパラメータが変動すれば,その計算値も変動する可能性がある。
- 4) いずれの算定式においても寸法効果の影響は小さく,各寸法の床版に対しても十分に適用できると考えられる。

参考文献

- 1) 小柳 治:鉄筋コンクリートスラブの押抜きせん断とその設計上の取扱い,コンクリート工学,Vol.19, No.8, 1981.
- 2) ACI Committee 318 : Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-83) ACI 1983
- 3) BS 8110-85 “Structural Use of Concrete”, British Standards Institute, London, 1985
- 4) Eurocode.2,“Design of Concrete Structural -Part 1 : General Rules and Rules for Buildings” (ENV 1992-1-1), 1991.12
- 5) 土木学会:コンクリート標準示方書(構造性能照査編), 2002 年
- 6) 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力の評価式,土木学会論文集,第 348 号 / V-1 ,pp.133-141 ,1984 年 8 月
- 7) 並木 哲,山本康弘,戸祭邦之,黒羽健嗣:超高強度コンクリートの各種強度の検討,日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿),昭和 62 年 10 月