

フラットスラブ構造の押抜きせん断耐力に関する一考察

清水建設（株） 正会員 ○張 潤興，グエン ズン，征矢 雅宏，土田 一輝

1. はじめに

近年，フラットスラブは空間の利用効率が高いなどの理由により，国内外においてよく使用されている．ただし，鉄道構造物におけるフラットスラブの照査において国内の基準を参照した場合，鉄道構造物等設計基準・同解説¹⁾（以下鉄道標準）の「面部材の設計押抜きせん断耐力式」を用いることとなり，せん断補強筋の補強効果を考慮することができない．そこで，せん断補強筋があるフラットスラブの押抜きせん断耐力を日本及び海外（ACI²⁾,Eurocode³⁾）の異なる基準で算定し，既往の試験結果と比較した．本稿では，その結果と評価について示す．

2. 設計基準の比較

フラットスラブの押抜きせん断耐力に関して，以下の3つの基準（表-1）で用いられている耐力式を比較した．

表 1 鉄道標準，ACI と Eurocode の押抜きせん断耐力式

参照基準	適用	耐力式（ V ， V_1 ， V_2 ：押抜きせん断耐力）	式番号
鉄道標準		$V = \sqrt[4]{1000/d^3} \sqrt{100p_c} (1 + 1/(1 + 0.25u/d)) 0.2 \sqrt{f'_c} u_p d$	(1)
ACI318-19	せん断補強なし	$V = \left(\min (0.33 \lambda \lambda_s \sqrt{f'_c}, \left(0.17 + \frac{0.33}{\beta}\right) \lambda \lambda_s \sqrt{f'_c}, \left(0.17 + \frac{0.083 \alpha_s d}{u}\right) \lambda \lambda_s \sqrt{f'_c}) \right) u_p d$	(2)
	せん断補強あり	$V = \left(\min (v_{c1}, 0.17 \lambda \lambda_s \sqrt{f'_c}) + \frac{A_v f_{yt}}{b_o s} \leq v_u = \phi 0.5 \sqrt{f'_c} \right) u_p d$	(3)
Eurocode	載荷部	$V_1 = 0.3 (1 - f'_c/250) f'_c u d$	(4)
	臨界面	$V_2 = \min \left(V_1, \left(0.135 \left(1 + \sqrt{200/d}\right) (100 p_c f'_c)^{1/3} + 1.5 \frac{d}{s} A_{sw} f_{ywd,ef} \frac{1}{u_p d} \sin \alpha \right) u_p d \right)$	(5)

f'_c ：コンクリートの圧縮強度； u ：載荷部の外周(mm)； u_p ：臨界面（照査断面）の周長； d ：有効高さ(mm)； p_c ：引張鉄筋比； λ ：修正係数； β ：柱長短比； α_s ：定数（内柱の場合は40）； s ：せん断補強筋の間隔(mm)； v_u ：ACIによる上限値； ϕ ：強度低減係数； f_{yw} ：せん断補強筋の降伏強度(N/mm²)； $f_{ywd,ef}$ ：せん断補強筋の有効降伏強度(N/mm²)， $f_{ywd,ef} = 250 + 0.25d \leq f_{yw}$

表-2 に示すように，鉄道標準や ACI の設計手法では，載荷部から 0.5d 離れた位置に臨界面を設ける一方，Eurocode では載荷部から 2d 離れた位置に臨界面を設けている．鉄道標準や Eurocode では，軸方向鉄筋の影響が考慮されているが，ACI の式ではそれを表すパラメータが存在しない．ACI や Eurocode では，せん断補強に関するパラメータが含まれており，上限値(v_u ， V_1)を超えてはならないことが明記されている．以上のように，鉄道標準，ACI，Eurocode のスラブの押抜きせん断耐力耐力式においては，アプローチと設計パラメータが異なっている．

表-2 鉄道標準，ACI と Eurocode のパラメータ比較（○：考慮，×：考慮せず，a：載荷端から支持部までの水平距離）

参照基準	臨界面位置	載荷面の周長	コンクリートの圧縮強度	主筋比	せん断補強筋比	せん断スパン比(a/d)
鉄道標準	0.5d (d:有効高さ)	○	○	○	×	×
ACI	0.5d	○	○	×	○	×
Eurocode	2d	○	○	○	○	×

3. 既往の試験内容と結果

文献⁴⁾に示す実験は RC スラブの押抜きせん断載荷試験である．実験に用いた供試体はシリーズ 1 とシリーズ 2 の 2 種類から成り，その寸法は，1660mm×1660mm×500mm と 1960mm×1960mm×500mm であった．荷重は，寸法 400×400mm の載荷板を介してスラブの中央部に静的に加えられた．一方，文献⁵⁾に示す実験では，せん断補強筋にハット型を用いた T シリーズとフック型を用いた K シリーズという試験体が用いられ，その上部から変位制御で載荷が行われた．スラブの寸法は，2000mm×2000mm×200mm であり，中央には柱に相当するスタブ（300mm×300mm）が設けられていた．ただし，K シリーズの多くが曲げ破壊であったため，本検討ではせん断破壊が生じた T シリーズのみを参考にすることとした．表-3 に各試験体のせん断補強筋比，せん断スパン比(a/d)と押抜きせん断耐力値を示す．

キーワード 押抜きせん断，せん断耐力，フラットスラブ構造，ACI，Eurocode

連絡先 〒104-8370 東京都中央区京橋 2-16-1 清水建設株式会社 TEL: 070-4004-8418

表-3 試験体の実験結果

試験体	No.1.1	No.1.2	No.1.3	No.2.1	No.2.2	No.2.3	T1	T2	T3	T4	T5
せん断補強筋比 p_w (%)	0.15	0.33	0.59	0.33	0.58	0.91	0.51	0.75	0.97	1.27	1.53
せん断スパン比(a/d)	0.92	0.92	0.92	1.29	1.29	1.29	3.75	3.75	3.75	3.75	3.75
実験によるせん断耐力 V_{exp} (kN)	3,852	4,296	4,806	3,431	3,826	3,960	612	742	711	778	750

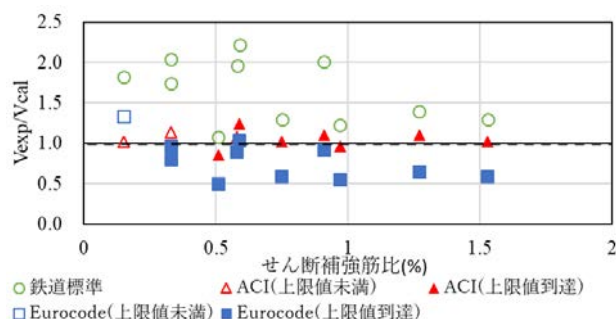
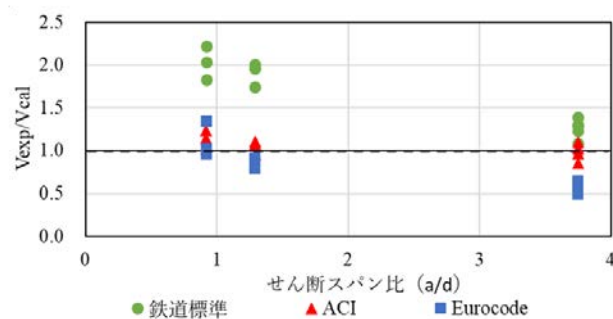
4. 押抜きせん断耐力の計算値と実験値の比較と考察

図-1 は、せん断耐力に関する文献^{4) 5)}の実験結果と鉄道標準、ACI、Eurocode に基づく計算結果を比較したもので、横軸にせん断補強筋比、縦軸にせん断耐力比（せん断耐力の実験値 (V_{exp}) を各基準の耐力式からの計算値 (V_{cal}) で除した比）を取っている。同図の ACI、Eurocode に基づくせん断耐力比のうち、白抜きのマーク ($\triangle$, $\square$) は、計算耐力値が上限値未満であることを表し、それ以外 ($\blacktriangle$, $\blacksquare$) は上限値に達していることを表す。図-2 は、せん断補耐力比とせん断スパン比の関係を示している。

これらの図より、鉄道標準の耐力式は、せん断補強の効果が考慮されていないため、すべての計算結果が実験結果を下回り、やや安全側の耐力値を与えることがわかる。一方、ACI の耐力式では、せん断補強筋比とせん断スパン比によらず、実験結果にほぼ一致する計算結果が得られる。Eurocode の耐力式による計算結果は、せん断スパン比が小さい場合に実験値と良い一致を示すが、せん断スパン比が大きいほど、実験結果を上回る傾向がある。

ACI と Eurocode の耐力式では、せん断補強筋の補強効果にコンクリートの圧縮強度 (f'_c)、有効高さ (d) から算出できる上限値が定められている。ただし、ACI 式においては、上限値 (V_u) が臨界断面の周長 (u_p) で考慮されるのに対し、Eurocode 式の上限値 (V_1) においては、荷重部の外周長 (u) で考慮される点が異なる。これはせん断補強筋比の増加に伴い、ACI と Eurocode 式による計算結果に差が生じる原因になっていると考えられる。

図-2 では、せん断スパン比の増加に伴い、鉄道標準と Eurocode 式によるせん断耐力比がそれぞれ異なる程度で低下する傾向が見られた。原因としては、せん断スパン比が変化するにつれて、主筋比 (p_e) がせん断耐力に与える影響もある程度変化するためであると考えられる。

図-1 せん断補強筋比- V_{exp}/V_{cal} の関係図-2 せん断スパン比- V_{exp}/V_{cal} の関係

5. おわりに

本検討では、鉄道標準、ACI318-19 および Eurocode に基づいて計算したスラブの押抜きせん断耐力値を、既往文献^{4) 5)}に示された実験結果と比較し、ACI 式による計算値が、実験結果と最も良い一致を示すことを確認した。ただし、3つの耐力式においては、せん断スパン比が考慮されていないことから、今後はせん断スパン比の影響をより詳細に検証をするため、さらなる実験や解析を行う必要があると考える。

参考文献

- 1)国土交通省鉄道局監修 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物，丸善 2004.
- 2)ACI318-19: Building Code Requirements for Structural Concrete.
- 3)Eurocode 2: Design of concrete structure.
- 4)原紘一郎，吉武謙二，小倉大季，大野広志，荒木尚幸：フラットスラブ構造の押抜きせん断挙動に及ぼすせん断補強鉄筋量の影響，土木学会第 76 回年次学術講演会概要集，V-258, 2021.
- 5)山田哲也：フラットプレートの押抜きせん断に関する実験的研究（せん断補強筋形状および補強筋量の影響），コンクリート工学年次論文報告集，Vol.14, No.2, pp. 155~160, 1992