

フラットスラブ構造の押し抜きせん断耐力に及ぼすせん断補強の影響と設計アプローチの検討

清水建設(株) 正会員 ○グエン ティトウズウン フェロー会員 荒木 尚幸
正会員 大野 広志 フェロー会員 土田 一輝
正会員 原 紘一朗 正会員 クーリー ラルフ

1. はじめに

近年、海外の地下駅では、施工の容易性や地下空間の有効活用の観点から、従来の版桁構造に代わり、フラットスラブ構造を採用する事例が増えている。一方で、日本の基準（鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物¹⁾）に準じてフラットスラブを設計する場合、押し抜きせん断耐力にせん断補強筋の効果を考慮できない。このため、押し抜きせん断耐力が過小評価され、その結果としてスラブの厚さが決定されることも考えられる。そこで、現在、設計中のフィリピン・マニラ地下鉄駅舎で採用予定のフラットスラブ構造をモデルとして、実物大実験と非線形 FEM 解析により、せん断補強筋がフラットスラブの押し抜きせん断耐力に及ぼす影響を検証した。また、フラットスラブの押し抜きせん断耐力を日本および海外の異なる設計手法 (ACI²⁾, Eurocode³⁾) で算定し、本実験結果との比較により評価した結果についても報告する。

2. 実物大実験

(1) 実験概要

図-1 に試験体の詳細を示す。試験体は、せん断スパン比 0.92 のシリーズ 1 と 1.29 のシリーズ 2 の 2 種類を製作した。フラットスラブの寸法は、シリーズ 1 が 1660mm×1660mm、シリーズ 2 が 1960mm×1960mm で、スラブの厚さは 500mm である。試験体の厚さおよび配筋は、マニラ地下鉄工事で実際に採用されるフラットスラブ構造物の 1/3 スケールとなるように決定した。それぞれのシリーズにおいて、スターラップの鉄筋径をパラメータとして、せん断補強筋比を変化させた。

シリーズ 1 ではスターラップに D6, D10, D13, シリーズ 2 では D10, D13, D16 の鉄筋を用いた。スターラップに用いた鉄筋の降伏強度を表-1 に示す。曲げによる破壊を防ぐため、高強度鋼 (USD685) を軸方向の鉄筋に使用した。軸方向鉄筋の降伏強度は 685N/mm² である。

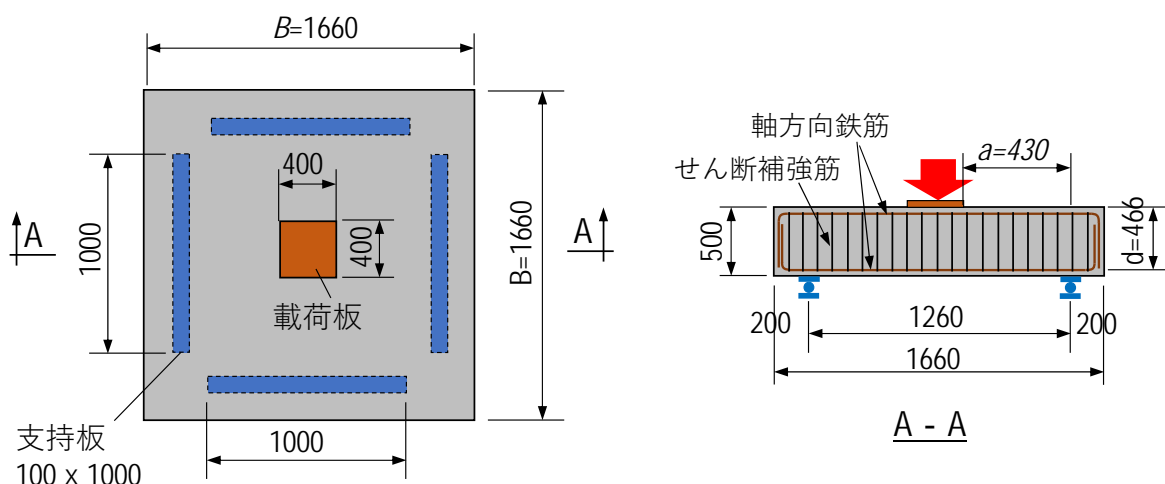


図-1 試験体の詳細 (シリーズ 1)

キーワード フラットスラブ, 非線形 FEM 解析, 押し抜きせん断, 設計手法, せん断補強

連絡先 〒104-8370 東京都中央区京橋 2-16-1 清水建設株式会社 土木技術本部 グローバルプロジェクト部

TEL: 03-3561-1111

すべての試験体には、本工事で使用するコンクリート強度と同程度の設計圧縮強度 24N/mm^2 のコンクリートを使用した。荷重は寸法 $400\times 400\text{mm}$ の載荷板を介してスラブの中央部に静的に載荷した。試験体の諸条件と材料特性値を表-1 に示す。

(2) 実験結果

実験結果の詳細は過去の研究論文⁴⁾で報告しているため、本論文では主要な結果のみを要約する。せん断スパン比が小さい試験体 ($a/d=0.92$) では、せん断補強筋比の増加とともにせん断耐力が大きく増加した。せん断補強筋比が 0.15% から 0.59% に増加すると、押し抜きせん断耐力は 24.8% 増加した。しかし、せん断スパン比が大きい試験体 ($a/d=1.29$) では、この傾向は明瞭には見られない。せん断補強筋比が 0.33% から 0.58% に増加した場合、押し抜きせん断耐力は 11.5% 増加したが、せん断補強筋比が 0.58% から 0.91% に増加した場合は、押し抜きせん断耐力の増加は約 3.9% と僅かであった。

載荷試験後、試験体内部のひび割れを確認するため、載荷領域の端で試験体を切断した。図-2 に試験体の切断面を示す。すべての試験体において、載荷板の端から支持点までのせん断スパンで斜めひび割れが卓越していた。写真からわかるように、載荷板の端部付近でひび割れが拡大している。せん断スパン比が大きいシリーズ 2 においては、支持点から中央部にかけてスラブ下側の軸方向鉄筋に沿って進展する割裂ひび割れが観察された。

表-1 実験条件と結果の概要

シリーズ	試験体	d (mm)	B (mm)	せん断 スパン比 a/d	f_c (N/mm^2)	p_w (%)	せん断補強筋	f_{sy} (N/mm^2)	V_{exp} (kN)	押し抜き せん断耐力 増分
1	No.1	466	1660	0.92	21.8	0.15	D6 (SD 345)	384	3,852	-
	No.2				21.8	0.33	D10 (SD390)	445	4,296	11.5%
	No.3				23.0	0.59	D13 (SD390)	461	4,806	24.8%
2	No.4	450	1960	1.29	21.8	0.33	D10 (SD390)	455	3,431	-
	No.5				21.9	0.58	D13 (SD390)	461	3,826	11.5%
	No.6				21.9	0.91	D16 (SD390)	404	3,960	15.4%

d : 有効高さ, B : 試験体の幅, a : せん断スパン, f_c : コンクリートの圧縮強度, f_{sy} : 鉄筋の降伏強度
 p_w : せん断補強筋比, V_{exp} : 実験によるせん断耐力

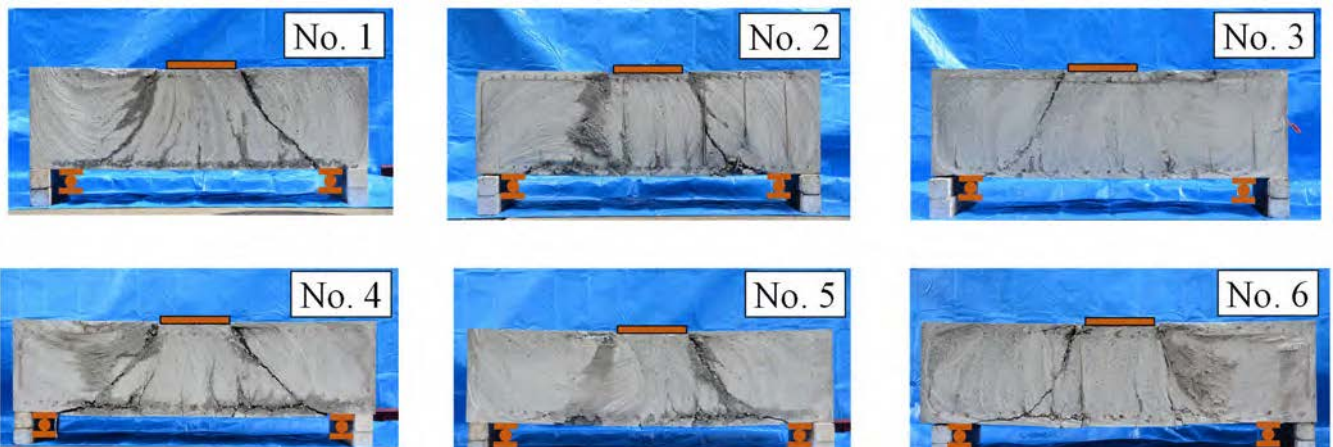


図-2 試験体の切断面 (実験終了後)

3. 3次元非線形 FEM 解析

(1) 解析モデル

3次元非線形 FEM 解析により、試験体の押し抜きせん断耐力と荷重作用時の挙動を検討した。試験体は左右対称であるため、試験体の4分の1をモデル化し、DIANA ver.10.4を用いて解析した(図-3)。コンクリートはソリッド要素、鉄筋は埋込み鉄筋要素でモデル化した。図-4に鉄筋の要素を示す。また、X、Y方向に対称なモデルとするため、対称面に変位および回転を拘束する条件を設定した。コンクリートのひび割れモデルには、スミアードクラックモデルを採用した。コンクリートおよび鉄筋の応力-ひずみ関係には非線形モデルを用いた。コンクリートの圧縮応力下における応力-ひずみ挙動には、Feenstraの放物線モデル⁹⁾を用い、引張応力下には、土木学会基準に基づく引張剛性モデルを採用した。コンクリートの圧縮強度および引張強度には試験で得られた実強度を用いた。鉄筋のモデルには、鉄筋の引張試験で得られた実際の応力-ひずみ関係を用いた。

(2) 解析結果

非線形 FEM 解析で得られたフラットスラブの押し抜きせん断耐力と実験結果の比較を図-5に示す。この図に示すように、非線形 FEM 解析の結果は、実験の終局せん断耐力と良い一致を示している。また、せん断補強筋比の増加に伴い、せん断耐力が増加する傾向は、FEM 解析結果でも同様に観察される。

図-6は、シリーズ1の試験体における荷重レベル3800kNと終局荷重におけるコンクリート中の主圧縮応力分布を示したものである。3800kNの荷重では、載荷板下の圧縮コンクリートと斜め圧縮コンクリート部分で圧縮アーチが形成されている。荷重は主に圧縮アーチによって荷重面から支持点に伝達されていることが分かった。同じ荷重レベルにおいては、すべての試験体で主圧縮応力の分布状態に違いはなく、ほぼ同様な分布を示した。終局荷重では、No.1の試験体では主圧縮応力分布に大きな変化は見られなかった。しかし、せん断補強筋比の大きいNo.2およびNo.3では、終局荷重時に、圧縮に寄与するコンクリートの割合が大きくなることを確認できた。圧縮アーチで抵抗できる荷重が増えたことで、押し抜きせん断耐力が上がったと考えられる。

このように、せん断補強比が大きくなると、圧縮アーチの効果が大きくなり、その結果、せん断補強筋比の大きい試験体では押し抜きせん断耐力が増加する結果となった。

図-7に、終局荷重時のせん断補強筋の引張応力分布を示す。せん断補強筋に引張応力が発生しており、せん断抵抗に寄与していることを示唆している。

図-8に、終局荷重におけるコンクリートの主引張ひずみ分布を示す。終局荷重において、No.1試験体では、斜めひび割れと載荷板近傍のひび割れ幅が拡大している。No.2,3試験体では、せん断補強の比率が高いため、斜めひび割れの拡大が効果的に抑制されている。しかし、すべての試験体において、終局荷重時に載荷板近傍でひび割れが発生しており、このひび割れ幅の拡大がコンクリートの割れを促進させ、押し抜きせん断耐力を

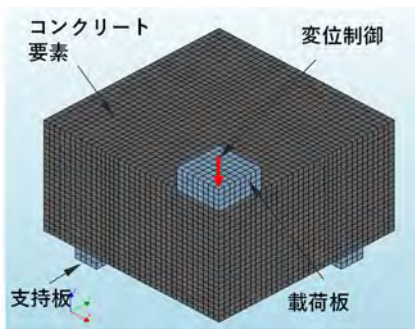


図-3 1/4 試験体のモデル

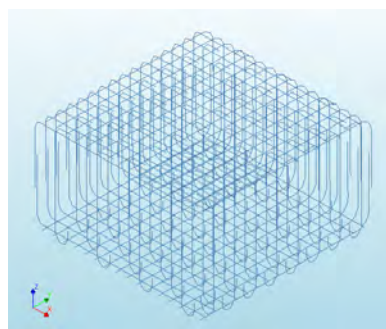


図-4 鉄筋の要素

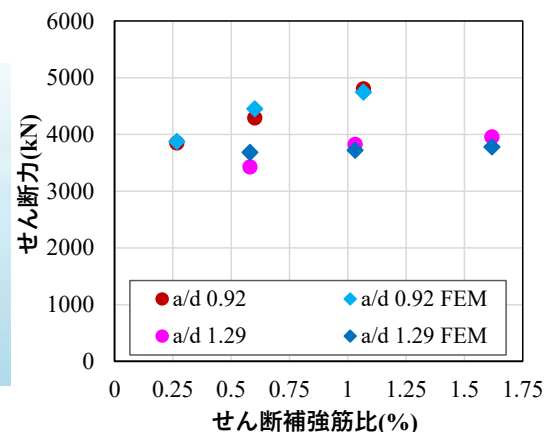
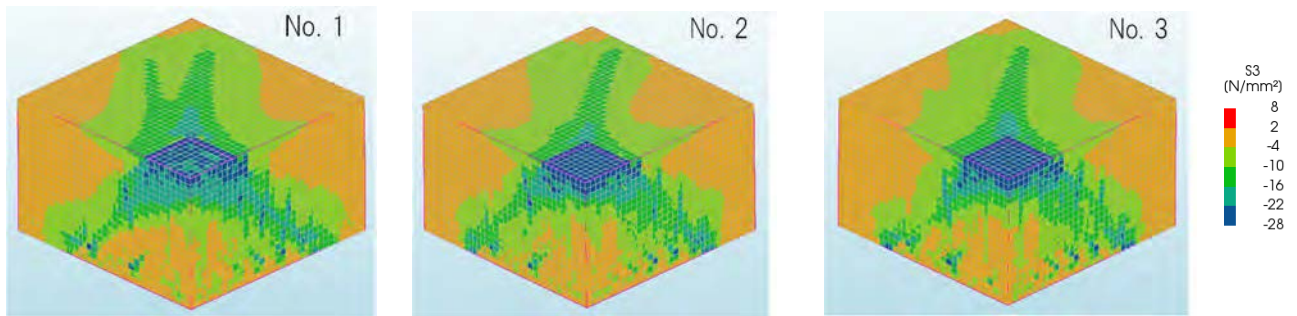
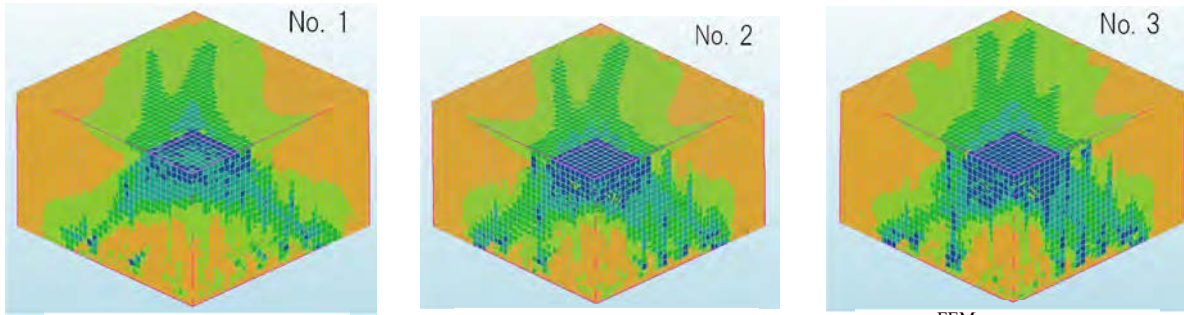


図-5 押し抜きせん断耐力の比較



(a) 3800 kNにおけるコンクリートの主圧縮応力分布



(b) 終局荷重におけるコンクリートの主圧縮応力分布

図-6 コンクリートの主圧縮応力分布

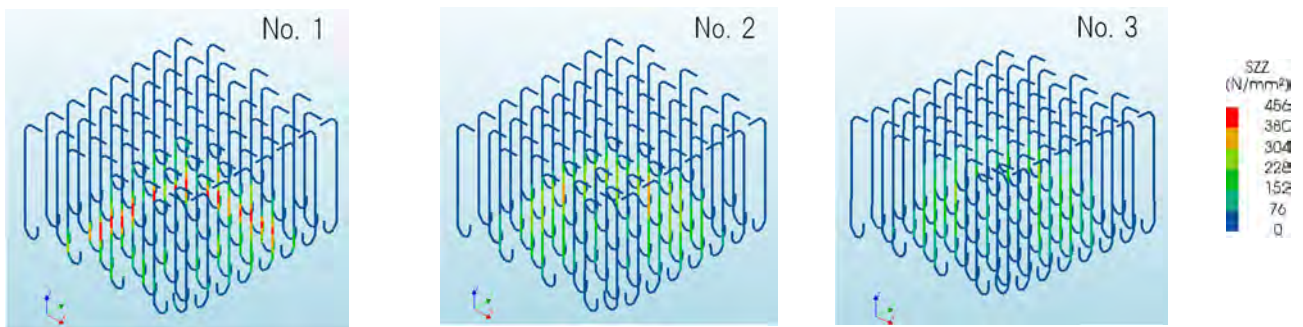


図-7 終局荷重時のせん断補強筋の引張応力分布

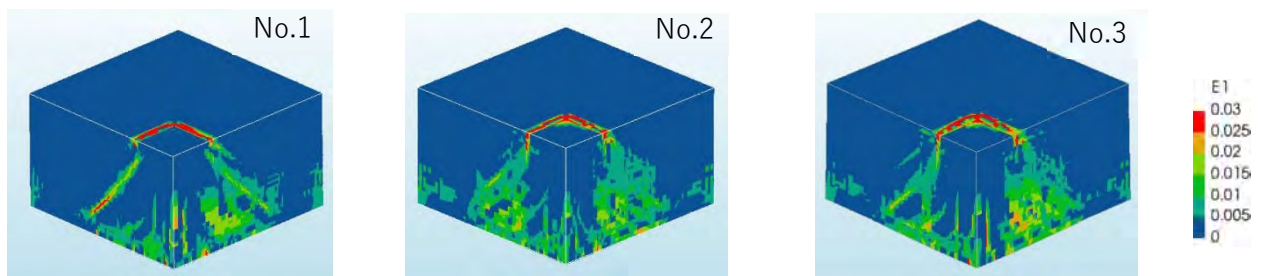


図-8 終局荷重におけるコンクリートの主引張ひずみ分布

それ以上増加させなかったものと考えられる。

FEM 解析結果より、せん断補強筋が荷重に抵抗していることがわかる。しかし、せん断補強筋の比率が高い場合、せん断補強筋に発生する引張応力が降伏強度に達する前に载荷部周辺でコンクリートの破壊が生じて崩壊に至るため、せん断補強筋によるせん断耐力の向上効果には上限があることが示唆される。

4. 設計手法の比較

(1) 押し抜きせん断耐力算定式

a) 鉄道構造物等設計標準

日本の地下鉄駅の設計では、鉄道構造物等設計標準に基づき、フラットスラブの押し抜きせん断耐力を式(1)により計算する。

$$V = \sqrt[4]{1000/d^3} \sqrt[3]{100p_c} (1 + 1/(1 + 0.25u/d)) f_{pcd} u_p d \quad (1)$$

$$\text{ここで, } f_{pcd} = 0.2\sqrt{f'_c} \quad ; \quad f_{pcd} \leq 1.2 \text{ N/mm}^2 \quad (2)$$

鉄道構造物等設計標準（以下、鉄道標準という。）では、載荷部より $0.5d$ 離れた部分を照査部（臨界面）とする。鉄道構造物等設計標準では、コンクリートの圧縮強度，引張鉄筋比，照査断面の外周，載荷領域の外周，有効高さの影響を考慮した式としている。しかし，この式には，せん断補強の効果を反映するパラメータは存在しない。

b) 米国コンクリート学会の基準

米国コンクリート学会の基準 ACI318-14 では，せん断補強のないスラブのせん断耐力 v_{c1} は式(3)に基づいて計算されるが，せん断補強のあるスラブのせん断耐力 v は式(7)を用いて計算することができる。

$$v_{c1} = \min (v_1, v_2, v_3) \quad (3)$$

$$\text{ここで, } v_1 = 0.33\lambda\sqrt{f'_c} \quad (4)$$

$$v_2 = 0.17(1 + 2/\beta) \lambda\sqrt{f'_c} \quad (5)$$

$$v_3 = 0.083(2 + \frac{\alpha_s d}{u_p}) \lambda\sqrt{f'_c} \quad (6)$$

$$v = v_c + v_s \leq v_u \quad (7)$$

$$\text{ここで, } v_c = \min (v_{c1}, 0.17\lambda\sqrt{f'_c}) \quad (8)$$

$$v_s = \frac{A_{sw} f_{yw}}{u_p s} \quad (9)$$

$$v_u = \phi 0.5\sqrt{f'_c} \quad (10)$$

c) 欧州構造基準

欧州構造基準（以下，Eurocode という）では，せん断耐力は2箇所を確認する必要がある。1つ目は，載荷部または柱の外周部，2つ目は臨界面で，載荷部から $2d$ の距離の位置である。載荷部周辺では，式(11)を用いてせん断耐力 V_1 が決定される。

$$V_1 = 0.5v f'_c u d \quad (11)$$

$$\text{ここで, } v = 0.6(1 - f'_c/250) \quad (12)$$

臨界面におけるせん断耐力は，以下の式で計算することができる。

$$V_2 = \left(0.75v_{Rd,c} + 1.5 \frac{d}{s} A_{sw} f_{ywd,ef} \frac{1}{u_p d} \sin \alpha \right) u_p d \quad (13)$$

$$v_{Rd,c} = 0.18 \left(1 + \sqrt{200/d}\right) (100p_c f'_c)^{1/3} \quad (14)$$

ここで、 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（普通コンクリートの場合は1）；

β ：柱長短比；

α_s ：定数（内柱の場合は40）；

A_v ：せん断補強筋の1周分の面積の合計；

s ：せん断補強筋の間隔；

ϕ ：強度低減係数；

v_c ：せん断補強のないコンクリートによるせん断耐力；

v_s ：せん断補強筋によるせん断耐力；

f_{yw} ：せん断補強筋の降伏強度

$f_{ywd,ef}$ ：せん断補強筋の有効降伏強度， $f_{ywd,ef} = 250 + 0.25d \leq f_{yw}$

(2) 押し抜きせん断耐力の計算値と実験値の比較

表-2は、設計式で考慮されるパラメータ（臨界面の決定、載荷面の周長、コンクリートの圧縮強度、軸方向鉄筋の比率、せん断補強の比率、せん断スパンと深さの比率）の観点から、異なる設計手法を比較したものである。鉄道標準やACIでは載荷部より $0.5d$ 離れた位置に臨界面を設けているのに対し、Eurocodeでは載荷部より $2d$ 離れた位置に臨界面を設けている（図-9）。鉄道標準やEurocodeの設計手法では、軸方向鉄筋（主筋）の効果が考慮されているが、ACIの式では軸方向鉄筋に関するパラメータは存在しない。

表-2 鉄道標準，ACI 318-14 と Eurocode のパラメータ比較

標準	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
鉄道標準	$0.5d$	○	○	○	×	×
ACI 318-14	$0.5d$	○	○	×	○	×
Eurocode	$2d$	○	○	○	○	×

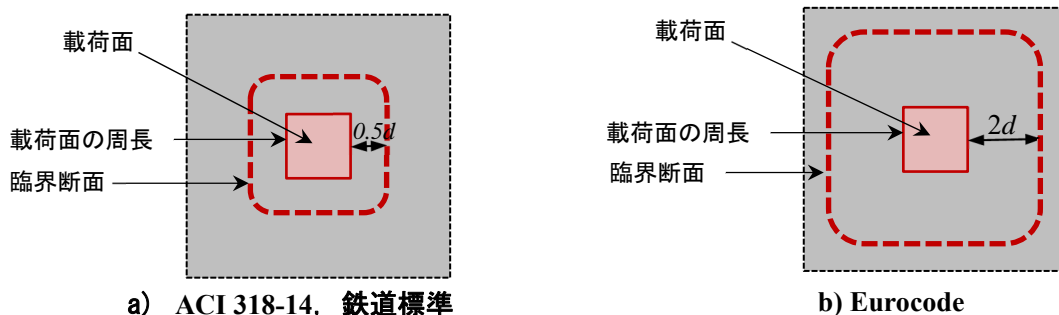


図-9 臨界面の決定

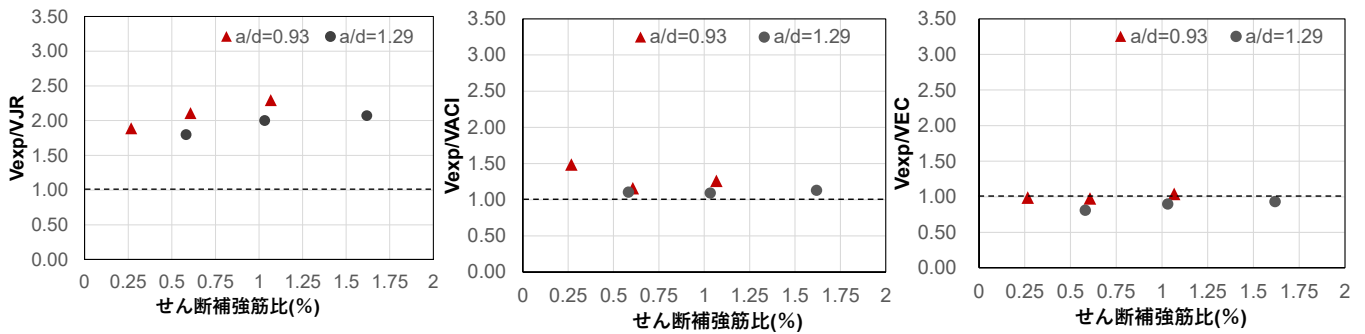


図-10 設計基準による計算と実験結果との比較

一方、ACI318-14やEurocodeでは、せん断補強筋の面積比、間隔、せん断補強筋の引張強度など、せん断補強に関するパラメータが設計式に含まれている。しかしながら、せん断耐力は制限値を越えてはならない。

また、すべての設計式において、せん断スパン比がパラメータとして用いられていない。ACIの考え方では、制限値は式(10)に基づいて計算されるが、Eurocodeの考え方では、制限値は式(11)から計算される。両計算式とも、コンクリートの圧縮強度、限界断面の周長、有効高さが、せん断耐力を支配するパラメータであることがわかる。

このように、ACI、Eurocode、鉄道標準では、スラブの押し抜きせん断力を計算するためのアプローチと設計パラメータが異なっていることがわかる。

図-10は、実験結果と鉄道標準、ACI、Eurocodeの設計手法に基づく計算結果の比較である。鉄道標準の式による計算は、すべての試験体において、実験結果を大きく下回っている。実験結果は、鉄道標準による計算値の1.89倍から2.11倍であった。

ACIに基づく計算値は、実験結果と良い一致を示している。実験結果は、計算値の1.10倍から1.48倍であった。せん断補強比が小さい試験体(No.1とNo.4)の押し抜きせん断耐力は式(7)による計算値であるが、その他の試験体の押し抜きせん断耐力は式(10)で決まる制限値である。同様に、Eurocodeも実験結果に近い値を示している。しかし、Eurocodeに基づく計算値は実験結果を若干上回っており、押し抜きせん断耐力を過大評価した。Eurocodeに基づく計算では、No.1試験体の押し抜きせん断耐力は式(13)で計算されるせん断耐力 V_2 、その他の試験体の押し抜きせん断耐力は式(11)で決まる制限値 V_1 である。せん断補強筋の比が高い試験体では、荷重部周辺でせん断破壊が生じてせん断補強筋が降伏に至らない結果がFEM解析で確認できたことから、これらの試験体ではACIおよびEurocodeによる計算において制限値を採用した。

上記の通り、各種設計式を検証した結果、マニラ地下鉄で採用されるフラットスラブをモデルとした場合においては、フラットスラブの押し抜きせん断耐力を検証する設計式として、ACIの式が推奨される。

5. まとめ

本検討の結果は以下のとおりである。

3次元非線形FEM解析の結果は、実験結果と良い一致を示した。実験および解析結果によれば、フラットスラブの押し抜きせん断耐力は、せん断補強筋比が大きくなるにつれて大きくなる。また、解析結果からせん断補強筋がせん断耐力に寄与していることが確認された。さらに、せん断補強筋比が小さい場合は、せん断補強筋が降伏して破壊に至るが、せん断補強筋比が大きい場合は、より大きな耐荷力が得られるものの、せん断補強筋は降伏せずに荷重位置周辺のコンクリートがひび割れて破壊に至った。このため、せん断補強筋の補強効果にはせん断スパン比に応じた上限があることも示唆された。

鉄道構造物等設計標準、ACI318-14およびEurocodeにおけるスラブの押し抜きせん断の設計法で押し抜きせん断耐力を算定し、本実験結果との比較を行った。せん断補強の効果を検討していない鉄道構造物等設計標準の設計式による押し抜きせん断耐力の計算値は、実験結果を大きく下回った。ACIおよびEurocodeはせん断補強筋の効果を含んだパラメータを含んでおり、ACIやEurocodeの設計手法による押し抜きせん断耐力は、

コンクリートの圧縮強度，臨界面の周長，有効高さに基づいて決定される．Eurocode の設計式は，実験結果をやや過大に評価したが，ACI の設計式による押し抜きせん断耐力は実験結果とよく一致した．

しかしながら，上記の設計手法の比較において，せん断スパン比の影響を検証していないため，今後，更なる実験や3次元非線形FEM解析でのパラメトリックスタディなどを行い，各種設計式の適用範囲を明らかにすることが必要と考える．また，本検討で得られた知見をマニラ地下鉄駅舎の設計に活用し，押し抜きせん断破壊に対してより合理的なフラットスラブの設計を実施していく予定である．

6. 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)ACI318-14: 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し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，2021.
- 5)DIANA FEA BV: DIANA Documentation, Release 10.4, 2020.