

三次元 FEM 解析によるフラットスラブのせん断耐力の評価

清水建設株式会社 正会員 ○大野 広志, グェン ズウン, 荒木 尚幸, 原 紘一郎

1. はじめに

近年, 海外の開削トンネルによる地下駅では, 施工の容易性や地下空間確保の観点から, 従来からの版桁構造に代わりフラットスラブ構造が採用される事例が増えている. 一方で, 国内の基準を参照してフラットスラブ構造を照査する場合, 鉄道構造物等設計基準・同解説(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, フラットスラブの押抜きせん断耐力に対するせん断補強筋の影響を調べるために, 実験および三次元非線形 FEM 解析を実施した. 本論文では, 三次元 FEM 解析を実施して, 実験結果と比較することで, フラットスラブのせん断耐力を評価した結果について報告する.

2. 試験概要

図-1 に試験体の諸元を示す¹⁾. 試験体の厚さは 500mm とし, せん断スパン比は 0.92 と 1.29 の 2 種類とした. いずれのせん断スパン比の試験体も, スターラップの直径を変えることによって, せん断補強鉄筋比を変化させた. 軸方向鉄筋には, 曲げによる破壊を避けるために高強度鋼を使用した. 荷重は寸法 400x400mm の載荷板を介してスラブ中央部に載荷した. 試験体のパラメータ及び材料特性を表-1 に示す. 図-2 に, 鉄道標準²⁾の(1)式で算定した押抜きせん断耐力の予測値に対し, 実験により求めた最大せん断耐力を示す. 前報¹⁾で詳述した実験結果は, せん断補強鉄筋比の増加とともにせん断耐力が増加することを示唆している. また, せん断スパン比が小さいフラットスラブほど, せん断耐力は大きく増加することが確認された. 一方, (1)式による予測は, すべての試験体において実験結果を過小評価することがわかった.

$$V = \sqrt[4]{1000/d^3} \sqrt[3]{100p_c} (1 + 1/(1 + 0.25u/d)) 0.20 \sqrt{f'_{cd}} u_p d \quad (1)$$

ここで f'_{cd} : コンクリートの設計圧縮強度(N/mm²), u : 載荷面の周長(mm)

u_p : 照査断面の周長(mm), d : 有効高さ(mm), p_c : せん断引張鉄筋比

表-1 試験体諸元

Case	d (mm)	B (mm)	a/d	p_w (%)	Shear reinforcement	f_{ys} (N/mm ²)	V^{exp} (kN)	V^{FEM} (kN)
No. 1	466	1660	0.92	0.15	D6 (SD 345)	384	3,852	3,878
No. 2				0.33	D10 (SD390)	445	4,296	4,456
No. 3				0.59	D13 (SD390)	461	4,806	4,746
No. 4	450	1960	1.29	0.33	D10 (SD390)	455	3,431	3,686
No. 5				0.58	D13 (SD390)	461	3,826	3,723
No. 6				0.91	D16 (SD390)	404	3,960	3,782

3. 解析モデル

鉄道標準による(1)式では, 実験値との乖離が大きいため, No.1~3の試験体について 3次元非線形 FEM 解析を行い, 押し抜きせん断耐力の算定および破壊形態の解明を試みた. 試験体は左右対称であるため, 試験片の 1/4 をモデル化し, DIANA ver. 10.4 を用いて解析した. コンクリートのひび割れのモデル化には直交固定ひび割れモデルを採用

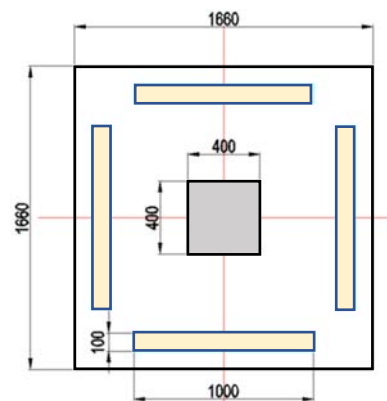


図-1 試験体寸法 ($a/d=0.92$)

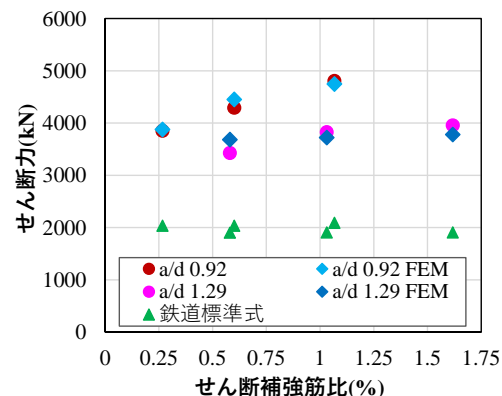


図-2 押し抜きせん断耐力の比較

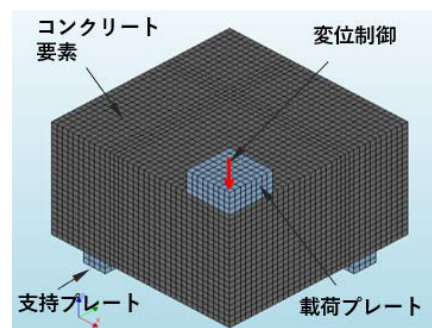


図-3 FEM 解析モデル

キーワード 開削トンネル, フラットスラブ構造物, 押し抜きせん断, FEM 解析, 非線形解析

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 03-3561-8770

用し、材料のモデル化にはコンクリート・鉄筋の応力-ひずみ非線形挙動を用いた。材料モデルには、材料の圧縮試験および引張試験で得られた実際の強度を採用した。図-3にFEM解析モデルを示す。

4. FEM解析結果

三次元FEM解析で得られた押抜きせん断耐力の結果を、実験結果および鉄道標準式による計算結果と重ね

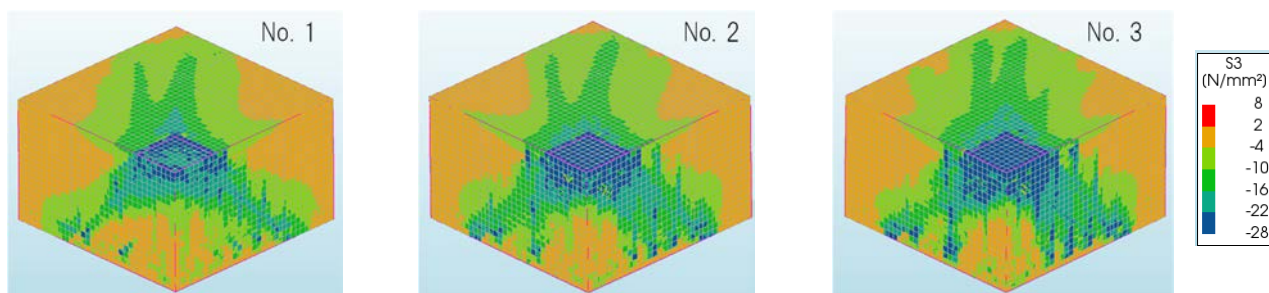


図-4 最大荷重時の最小主応力コンター図

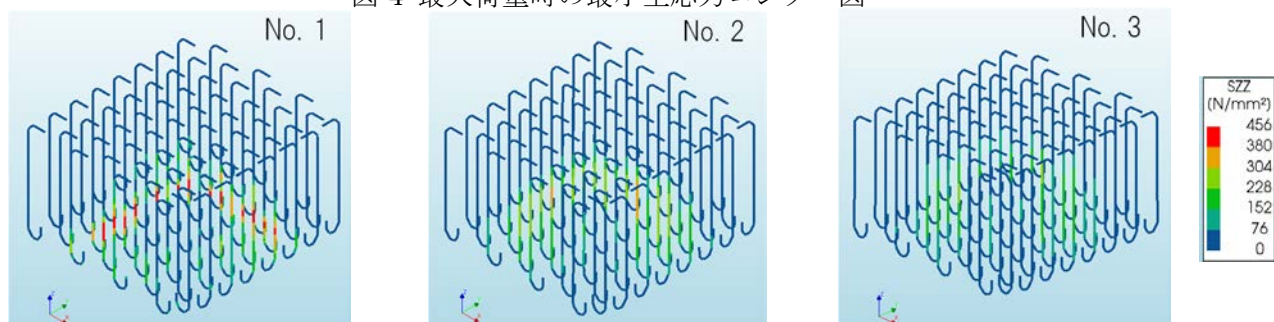


図-5 最大荷重時の鉄筋引張応力図

て図-2に表示した。この図より、FEM解析による最大耐力は実験結果を高い精度で再現できた。また、せん断補強鉄筋比の増加に伴い、押抜きせん断耐力が増加する傾向が実験結果同様に解析でも観察された。図-4は、せん断スパン比0.92の最大荷重における試験体の最小主応力の分布を示したものである。図-4より、せん断補強鉄筋比が高い供試体では、斜め圧縮アーチの幅が広がっていることから、より多くのコンクリートがせん断抵抗に寄与していることがわかる。これはせん断補強筋のトラス効果により、コンクリートの圧縮ストラットが有効に働いているためであると考えられる。図-5に終局荷重時のせん断補強鉄筋の引張応力分布を示す。試験体No.1では、終局荷重時にせん断補強鉄筋の降伏が発生している。しかし、No.2およびNo.3では、せん断補強鉄筋は降伏に至らなかった。前報¹⁾ではNo.1の供試体はせん断補強筋の降伏とともに、耐荷力は上限に達した。一方No.2およびNo.3では3852kNに達した後、載荷板周囲のコンクリートにひび割れが発生するまで荷重は増加した。本FEM解析結果と実験結果より、せん断補強筋の比率が小さいと、せん断補強筋の降伏による破壊が卓越するが、せん断補強筋の比率が大きいと、せん断補強筋の降伏が抑制され、載荷部周辺に発生したひび割れによって破壊が生じていると考えられる。

5. まとめ

FEM解析で得られた結果は、実験結果とよく一致しており、押抜きせん断に対する破壊メカニズムを再現できていると考えられる。FEM解析の結果によれば、フラットスラブの押抜きせん断耐力に対するせん断補強の寄与は、せん断補強鉄筋比が大きくなるにつれて大きくなることが示された。しかし、せん断補強筋の比率が高い場合には、押抜きせん断耐力は載荷部付近のコンクリートの割裂に支配されることになり、せん断補強鉄筋によるせん断補強効果には上限があることを示唆している。

参考文献

- 1) 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推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
- 2) 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2004.4