

鉄筋コンクリート造スラブにおける開口幅に関する解析的研究

仮設開口 RC スラブ FEM 1210056 神原 里奈*1
 荷重-変形角関係 曲げモーメント せん断力 指導教員 鈴木 卓

1 はじめに

鉄筋コンクリート造（以下、RC）建物のスラブには、コンクリート打設後に仮設部材を下階から上階に荷揚げするための仮設開口を設ける場合がある。従来の工法では施工中のコストや品質にばらつきがみられるとともに、これらの方法に明確な規定や規準は存在しない¹⁾。そこで、仮設開口を有するスラブの施工性の向上、コスト削減および品質の確保を目的とした工法が提案され、開口の有無、加力形式およびスラブ種類を変数とした静的載荷実験が行われた²⁾。実験の結果、有開口のスラブは無開口のスラブと比べて同等以上の構造性能を有することが確認された。しかし、スラブの開口幅とスラブ幅の比率がスラブの構造性能に及ぼす影響は不明瞭のままである。

以上を背景として本研究では、文献 2) に示される有開口 RC スラブの静的載荷実験を対象とした 3 次元有限要素法（以下、FEM と呼称）解析を実施した。本論文では、解析手法の概要を述べるとともに解析結果と実験結果の比較から解析モデルの妥当性を示す。さらに、内部応力状態から、開口幅とスラブ幅の比率がスラブの構造性能に及ぼす影響の検討結果を示す。

2 静的載荷実験の概要²⁾

2.1 試験体形状

図 1 に試験体形状を、表 1 に試験体概要を、表 2 に試験体変数を、表 3 に材料特性をそれぞれ示す。本論文では、文献 2) に示された実物大の試験体のうち 3 体を検討対象とした。試験体寸法は 3,500×1,400mm であり、スラブ厚は 180mm である。スラブの主筋には D13 @100 ($p_f=0.70\%$) が、配力筋には D13@150 ($p_f=0.47\%$) が 2 段で採用されている。開口補強筋は主筋方向に 3 本を 2 段とした計 6 本が、配力筋方向に 5 本を 2 段とした計 10 本が、斜め方向に 2 本を 1 か所とした計 8 本がそれぞれ配筋されている。

実験変数は加力形式および開口の有無である。加力形式は開口を含むスラブの支持点間（後述の図 2 参照）の曲げモーメント分布が一定となるもの（以下、等曲げと呼称）および逆対称となるもの（以下、逆対称曲げと呼称）の 2 種類である。試験体中央に設けられた開口の寸法は 1,050×400mm である。本論文で対象とした試験体は等曲げでは無開口試験体 RUC および有開口試験体 RUE の 2 体、逆対称曲げでは無開口試験体 RAC の 1 体である。

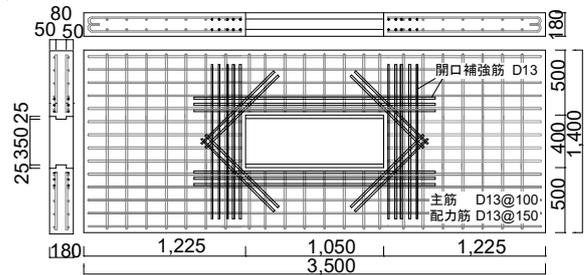


図 1 試験体形状 (RUE)

表 1 試験体概要

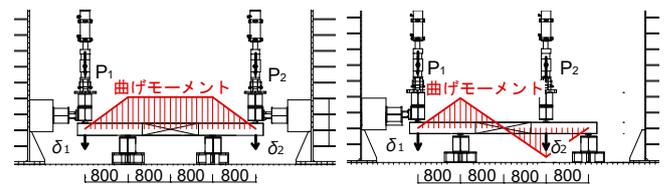
形状 (mm)	3,500×1,400	
スラブ厚 (mm)	180	
主筋	D13@100, $p_f=0.70\%$	
配力筋	D13@150, $p_f=0.47\%$	
開口補強筋	主筋方向	6-D13
	配力筋方向	10-D13
	斜め方向	2-D13

表 2 試験体変数

加力形式	等曲げ 逆対称曲げ	開口	
		無し	有り
		RUC	RUE
		RAC	—

表 3 材料特性

コンクリート	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
	26.1	26.8	1.91
鉄筋 D13 (SD295A)	降伏強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
	353	185	492



(a) 等曲げ加力形式 (b) 逆対称曲げ加力形式

図 2 載荷装置

2.2 載荷方法

載荷装置を図 2 に示す。同図中の線はスラブに生じる曲げモーメント分布を表している。鉛直方向加力の前半は荷重制御、後半は変位制御による一方向漸増繰り返し載荷とした。

3. FEM 解析

3.1 解析モデル

解析対象は 2 章において示した 3 体に加えて逆対称曲げで開口を有するモデル RAE を含めた計 4 体である。さらに、2 種類の加力形式において、有開口試験体のスラブ幅を 1,400mm から 1,200 および 1,000mm に変化させたモ

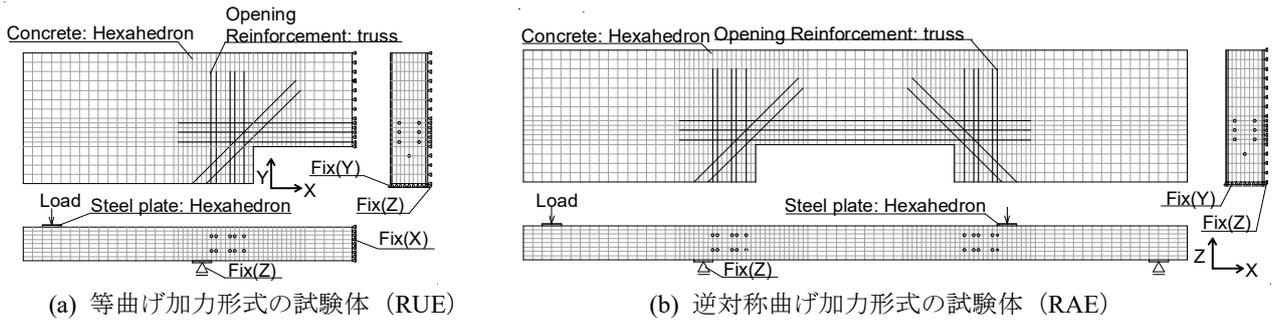


図3 要素分割

デル 4 体のパラメトリック解析も併せて行った。パラメトリック解析に用いたモデルのスラブ幅以外の試験体詳細は試験体 RUE と同じである。

図 3 に試験体 RUE およびモデル RAE の要素分割を示す。等曲げ試験体ではスラブ長辺および短辺（以後、長辺、短辺と呼称）の対称性を考慮して試験体の 1/4 の部分を、逆対称曲げ試験体では短辺の対称性を考慮して試験体の 1/2 の部分をそれぞれモデル化した。コンクリートは六面体要素に置換し、主筋および配筋筋は埋込み鉄筋としてコンクリート要素に層状置換した。開口補強筋はトラス要素に置換し、開口補強筋とコンクリートの付着挙動をライン要素により考慮した。試験体の支持点および加力点における鋼板を剛な六面体要素でモデル化した。

すべての試験体において、短辺方向における切断面節点の Y 方向変位（図 3 参照）を拘束し、支持点位置の節点の Z 方向鉛直変位を拘束した。等曲げ試験体では、長辺方向切断面における節点の X 方向変位を拘束した。

解析では、試験体の自重を分布荷重でコンクリート要素に作用させた後、実験より得られた加力ピーク時および除荷時における加力点位置の鉛直変位 δ_1 および δ_2 を該当する節点に作用させた。また、逆対称曲げで有開口モデル RAE の制御変位 δ は文献 2) に示される開口を閉塞した試験体 RAF の制御変位を与えた。なお、解析には非線形解析ソフト「FINAL」を使用した。

3.2 材料構成則

コンクリートの応力-ひずみ構成モデルは等価一軸ひずみに基づく直交異方性モデルにより表現し、ひび割れは非直交ひび割れモデルを適用した。三軸応力下の破壊条件は Ottosen の 4 パラメータモデルに畑中らの係数を適用したものに従った。応力-ひずみ関係の上昇域は修正 Ahmad モデルを、軟化域は中村・桧貝モデルを適用した。ひび割れによる圧縮特性の劣化は長沼モデルを適用した。ひび割れ後の tension-stiffening 特性は長沼・山口モデルを用いた。コンクリートのひび割れ後のせん断伝達特性は Al-Mahaidi モデルを適用した。

鉄筋の応力-ひずみ関係はバイリニアモデルとし、ひずみ硬化則は Ziegler の移動硬化則を適用した。鉄筋とコ

ンクリートの付着応力-すべり関係は Naganuma モデルを適用した。付着強度 f_{bok} は文献 3) を参考に式(1)により算定し、付着強度時のすべり量は 1mm とした。

$$f_{bok} = 0.28 \times f'_{ck}{}^{2/3} \quad (1)$$

ここで、 f'_{ck} : コンクリートの圧縮強度である。

4 解析結果

4.1 実験結果および解析結果の比較

図 4 に各試験体の荷重-変形角関係を示す。図中の灰色実線は実験結果、黒色実線はスラブ幅 1,400mm の解析結果、灰色破線はスラブ幅 1,200mm の解析結果、黒色破線はスラブ幅 1,000mm の解析結果である。

スラブ幅 1,400mm の 3 体の試験体では、解析の曲げひび割れの発生に起因する剛性低下は実験のものとは比べて早期に生じた。また、有開口試験体 RUE では解析は実験と比べて早期に耐力低下する傾向も確認された。しかしながら、3 体の試験体ともに解析の曲げひび割れ発生から $\theta=0.04\text{rad}$ 付近までの荷重-変形角関係は実験結果と概ね一致している。スラブ幅を変数とした解析の結果、等曲げおよび逆対称曲げのそれぞれのモデルにおいてスラブ幅の減少に伴い剛性および最大耐力の低下が確認された。

4.2 コンクリートの最小主応力分布

図 5 に各試験体の $\theta=0.04\text{rad}$ におけるコンクリートの最小主応力分布を示す。同図中は、各試験体のスラブ下面の応力を示している。

無開口試験体で等曲げ試験体 RUC と逆対称曲げ試験体 RAC では、短辺方向にほぼ様な圧縮応力が生じており、支持点から長辺の中心にかけて圧縮応力の減少が確認された。すべての有開口試験体において、短辺の中心から開口端に生じる圧縮応力のレベルは開口端から外端のものとは比べて低く、短辺の中心における開口隣接部付近にほぼ圧縮応力が生じていない。また、有開口試験体において開口隅角部に高い圧縮応力の発生が確認された。これらのことから、短辺の中心から開口端に生じる圧縮応力が開口隅角部付近に伝達されたものと推察される。しかし、逆対称曲げで有開口の試験体の開口隅角部付近の

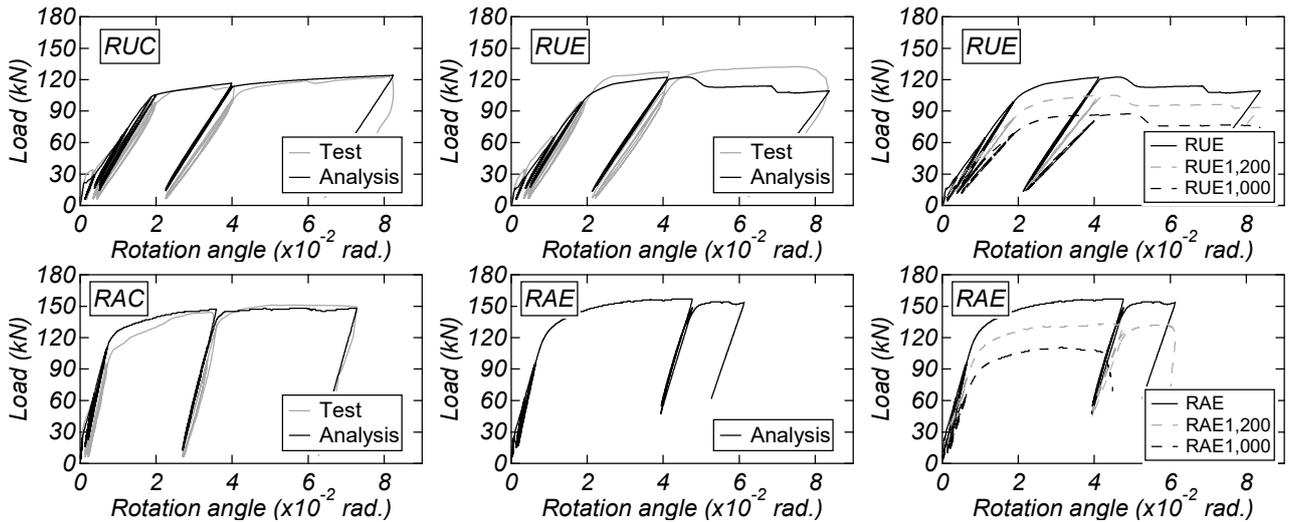


図4 荷重-変形角関係

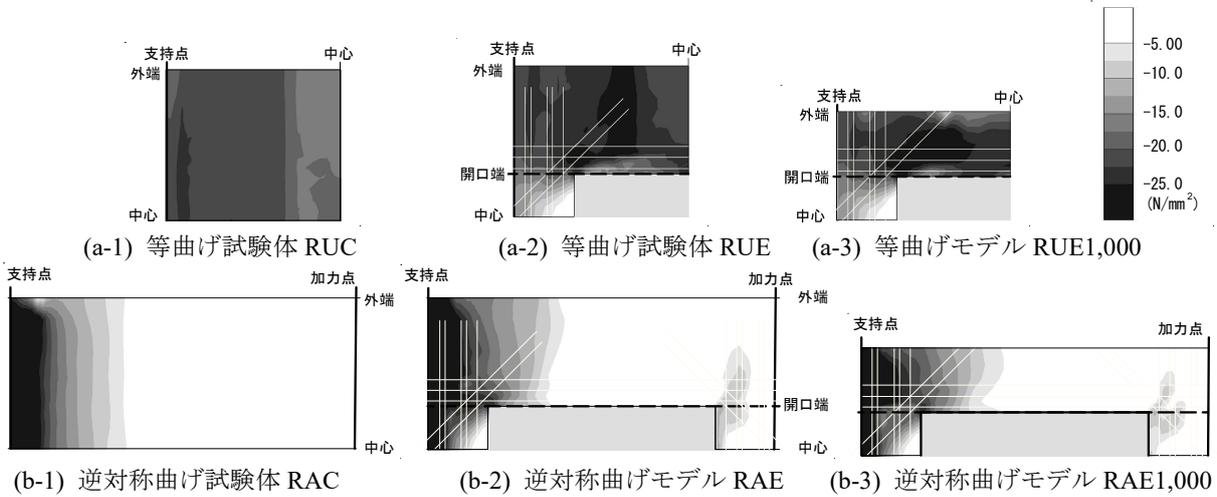


図5 $\theta=0.04\text{rad.}$ におけるコンクリートの最小主応力分布(スラブ下面)

圧縮応力は等曲げのものとは比べて低く、加力形式の違いの影響が認められた。

等曲げ試験体における短辺の開口端から外端では、有開口試験体 RUE とモデル RUE1,000 とともに支持点から中心に生じる圧縮応力のレベルは無開口試験体 RUC のものとは比べて高い。一方の逆対称曲げ試験体の短辺の開口端から外端では、有開口モデル RAE と RAE1,000 の短辺方向にかけて生じる圧縮応力にばらつきがみられるものの、両モデルの当該箇所における圧縮応力のレベルは無開口試験体 RAC のものとはほぼ同程度であった。

4.3 曲げモーメント分布

図6に等曲げで有開口試験体の $\theta=0.04\text{rad.}$ における長辺方向の曲げモーメント分布を示す。曲げモーメントは図7に示した応力抽出領域(1から4)におけるコンクリートおよび鉄筋要素のX方向応力に要素面積および要素中心からスラブ厚さ中心までの距離を乗じて算出した。曲げモーメントは短辺方向において開口のある内側(黒)、開口端から長辺方向開口補強筋が配される中央(白)および外側(灰)に区別して示した。同図中の数字は曲げモーメントの割合を百分率で示したものである。

各試験体ともに領域1から2にかけて開口部となる内側の曲げモーメントが零となり、中央の曲げモーメントの増大が認められた。これは4.2節で述べた短辺の中心から開口端の圧縮応力が開口隅角部に伝達されたことに対応する。また、領域1から4にかけて各試験体の内側と中央の曲げモーメントの合計値および外側の曲げモーメントに大きな差異は認められない。一方、同一領域における各試験体の内側と中央の曲げモーメントの合計値は同程度であり、スラブ幅の減少に伴う外側の曲げモーメントの減少が確認された。以上のことから、等曲げ試験体ではスラブ幅の減少が短辺の中心から開口補強筋が配される領域付近の曲げモーメントに及ぼす影響は小さいものと判断できる。

4.4 せん断力分布

図8に逆対称曲げで有開口試験体の $\theta=0.04\text{rad.}$ における長辺方向のせん断力分布を示す。せん断力は図7に示した応力抽出位置におけるコンクリート要素のXZ方向(図3)せん断応力に要素面積を乗じて算出した。グラフの色分けは曲げモーメント分布と同様である。同図中の数字はせん断力の割合を百分率で示したものである。また、

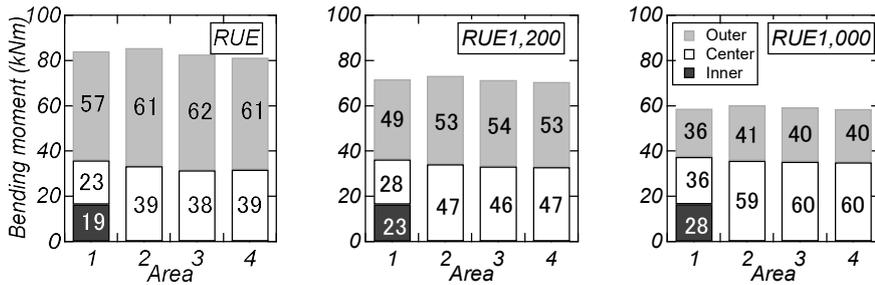


図6 $\theta=0.04\text{rad.}$ における曲げモーメント分布

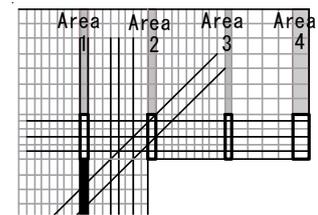


図7 応力抽出領域

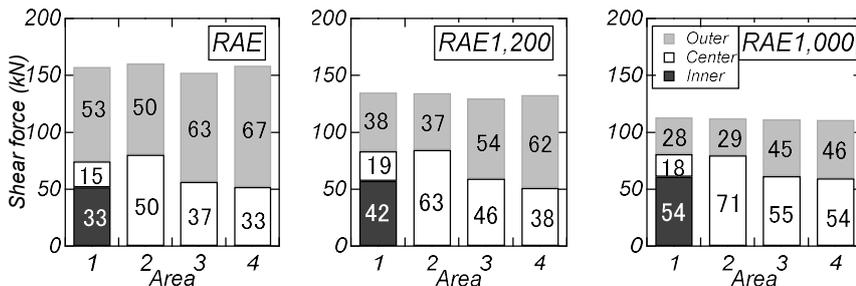


図8 $\theta=0.04\text{rad.}$ におけるせん断力分布

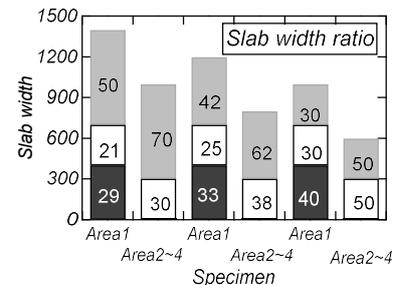


図9 スラブ幅の比率

図9に各試験体のスラブ幅の比率を示す。

同一領域においてスラブ幅の減少に伴う外側のせん断力の減少が確認された。また、各試験体の同一領域における内側と中央のせん断力の合計値はほぼ同程度であり、短辺の中心から開口補強筋が配される領域付近のせん断力に及ぼす影響は小さいものと判断される。

各試験体ともに領域1から2にかけて開口部となる内側のせん断力が零となり、中央のせん断力の増大が認められた。これは、4.3節と同様に短辺の中心から開口部の圧縮応力が開口隅角部に伝達されたことに対応する。また、領域2から4にかけて中央のせん断力の減少および外側のせん断力の増大が確認された。これは各モデルにおけるせん断力の割合とスラブ幅の比率(図9)と対応するものと考えられる。すなわち、領域4ではスラブ幅の比率とせん断力の割合がほぼ対応し、領域2では前述した領域1から2にかけての応力伝達の影響により外側のせん断力の割合が領域1における外側のスラブ幅の比率と対応したためと推察される。以上のことから、逆対称曲げ試験体では開口の無い領域1から開口を含む領域2にかけて開口隅角部付近のせん断力が増大し、このことが当該箇所に顕著な損傷の生じた要因と判断される。

5. まとめ

本論より得られた知見を以下に示す。

- 1) 本論に示した解析モデルは変形角 0.04rad. 付近までの実験における荷重-変形角関係、開口補強筋の応

力分布および損傷状況を概ね再現した。

- 2) スラブ幅を変数とした解析の結果、スラブ幅の減少に伴い開口付きスラブの剛性および最大耐力の低下が確認された。
- 3) 短辺の中心から開口端に生じる圧縮応力が開口隅角部付近に伝達されたことにより開口隅角部に高い圧縮応力の発生が確認された。
- 4) すべての有開口試験体において、スラブにおける短辺の中心から開口補強筋の配される領域の曲げモーメントまたはせん断力の合計値はスラブ幅に拘わらず同程度となり、スラブ幅の減少が当該領域における曲げモーメントまたはせん断力に及ぼす影響は小さい。
- 5) 曲げモーメント分布が逆対称となるモデルでは、開口の無い領域から開口を含む領域にかけて開口隅角部付近のせん断力が増大し、このことが当該箇所に顕著な損傷の生じた要因の一つと判断された。

参考文献

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, p. 282, 2018.12
- 2) 深津尚人, 田口孝：スラブにおける仮設開口用型枠工法の実験検証, コンクリート工学年次論文集 Vol. 42, No. 2, pp. 367-372, 2020.6
- 3) 土木学会：コンクリート標準示方書, p. 35, 2012.9