

論文 鉄筋コンクリート造の柱～スラブによる架構のスラブ有効幅に関する研究

笹田 はるな*1・津田 和明*2

要旨：鉄筋コンクリート造の柱とスラブによる架構のスラブ有効幅の算定法は現在無い。そのため架構の弾性剛性やスラブの曲げ終局強度が算定できない。そこで、FEMによるパラメトリック解析の結果を用いてスラブ有効幅の検討を行うことにした。FEM解析では、スラブをシェル要素でモデル化した。そして弾性時とスラブ曲げ終局強度時の有効幅に関して検討した結果、新たなスラブ有効幅算定法を提案した。この算定法は、柱側面位置のスラブのねじり抵抗に立脚したものであり、この算定結果はFEM解析結果と良好に対応した。

キーワード：スラブ, 有効幅, FEM解析

1. はじめに

鉄筋コンクリート造の柱とスラブによる架構のスラブ有効幅の算定法は現在無い。そのため架構の弾性剛性とスラブの曲げ終局強度の算定ができない。現在の鉄筋コンクリート造フラットスラブの地震時の設計では、柱列帯スラブの曲げモーメント負担量を簡易的に定めており、さらには終局時においてスラブと柱の接合部が、せん断破壊しないように検討されている。これらは、スラブ有効幅が明確となれば、より合理的な設計法となる可能性がある。スラブ有効幅に関する研究としては、津田らが壁とスラブによる架構のスラブ有効幅算定手法を検討しており²⁾、西本らはスラブ付き梁と柱による架構のスラブ有効幅算定法を検討している^{3),4)}。この両者の算定法は、同じものとなっているが、柱とスラブによる架構にその算定手法が適用できるか分からない。そこで、その手法を用いて柱とスラブによる架構の弾性剛性とスラブの曲げ終局強度を算定し、FEM解析結果と比較検討することにした。そしてその対応が悪い場合には新しいスラブ有効幅算定法を提案することにした。

2. FEMシミュレーション解析

鉄筋コンクリート造柱とスラブによる架構のスラブ有効幅に関する既往実験は少なく、精度検証を行うことができない。そこで、FEM解析結果を用いて検討対象を増やすことにした。

FEM解析に用いたプログラムは「FINAL」である。まず、スラブ筋の曲げ降伏で決定した岸本らの十字型の実験結果¹⁾(N-1試験体)をソリッドモデルとシェルモデル(スラブ：シェル/柱：ソリッド)でシミュレーション解析を行い、解析仮定の妥当性を確認した後に、パラメトリック解析を行うことにした。

次に、試験体諸元を表-1に、ソリッドモデルのシミュレーション解析モデルを図-1、シェルモデルのシミュレーション解析モデルを図-2に示す。両図の茶色の要素(加力または支持位置)は、要素の局所的な変形を避けるために、コンクリートのヤング係数を緑色の要素の100倍とし、また青色の要素(シェルモデル柱スラブ接合部)はヤング係数を緑色の要素の1000倍とし、弾性としている。コンクリートはソリッドモデルでは全て六面体要素、シェルモデルでは柱は六面体要素、スラブは四面体要素で厚さ方向6分割とした。また、柱近傍のスラブは曲げモーメントが大きく働くことから、柱近傍のスラブの要素の大きさを幅45mmと細かくした。ソリッドモデルはスラブの主筋は線材鉄筋、柱の主筋及び柱とスラブのせん断補強筋は埋め込み鉄筋とし、シェルモデルは柱とスラブの主筋及びせん断補強筋は埋め込み鉄筋としてモデル化した。また、解析対象モデルをハーフモデルとし、切断面全節点に対称条件(加力方向軸回りの回転、スラブ幅方向の軸変形の拘束)を設定した。テンションスティフニング特性は出雲らのモデル⁶⁾($C=1.0$)、コンクリートの圧縮応力度～ひずみ度関係は修正Ahmadモデル⁷⁾、ひび割れ後のせん断伝達特性・圧縮強度低減モデルは長沼の提案モデル⁸⁾、圧縮破壊条件はソリッドモデルの場合はOttoosenの4パラメータモデル(畑中らの係数)⁹⁾、シェルモデルの場合、ソリッド要素の柱はOttoosenの4パラメータモデル(畑中らの係数)、シェル要素のスラブはKupfer-Gerstleの提案モデル¹⁰⁾、鉄筋を線材要素でモデル化した場合の付着応力度～滑り関係はCEB-FIP model code 1990のモデル(Eligehausenらのモデル)¹¹⁾とし、最大付着応力度を「鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型設計指針・同解説」¹²⁾に示された式により算定し、その時のすべり変位を1.0mmとした。全ての鉄筋の応力度～ひずみ度関係は、バイリニア型の完全弾塑性モデルとした。

*1 近畿大学 産業理工学部建築・デザイン学科 (学生会員)

*2 近畿大学 産業理工学部建築・デザイン学科 教授 博士(工学)(正会員)

表-1 試験体諸元

柱	断面 (mm)	450×450
	主筋 (SD345)	16-D22
	帯筋 (SD295)	D10@75
スラブ	スラブ厚	180
	スラブ幅	1350
	スラブ筋 (SD295A)	18-D13

※モデルの架構形状に関しては、図-1に記入

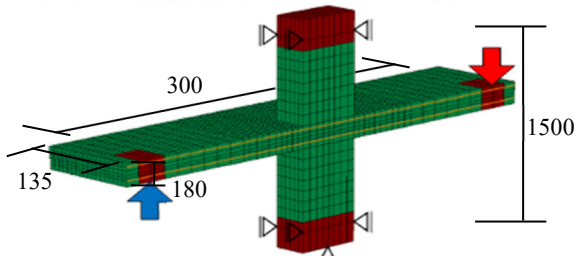


図-1 FEM シミュレーション解析モデル
柱：ソリッド要素・スラブ：ソリッド要素

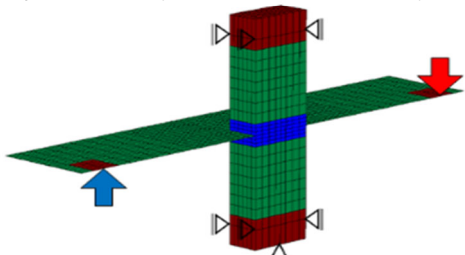


図-2 FEM シミュレーション解析モデル
柱：ソリッド要素・スラブ：シェル要素

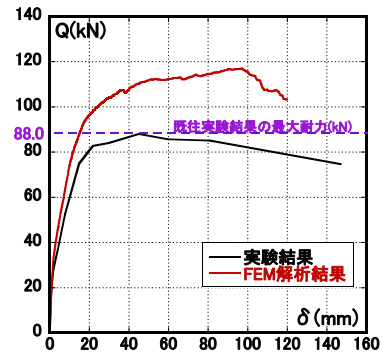


図-3 FEM シミュレーション解析結果
(スラブせん断力～スラブ鉛直変位関係)
柱：ソリッド要素・スラブ：ソリッド要素

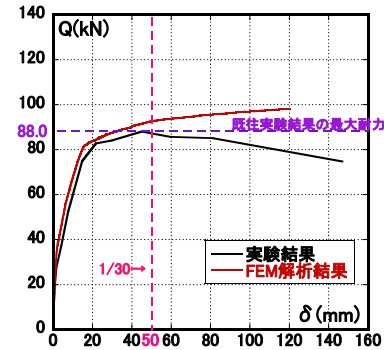


図-4 FEM シミュレーション解析結果
(スラブせん断力～スラブ鉛直変位関係)
柱：ソリッド要素・スラブ：シェル要素

2.1 ソリッドモデル (柱・スラブ：ソリッド)

ソリッドモデルのシミュレーション解析結果 (スラブせん断力～スラブ鉛直変位関係)を実験結果と比較して、図-3に示す。FEM 解析結果の弾性剛性は実験結果とほぼ対応したが、FEM 解析のスラブせん断力 30kN 以降のスラブ鉛直変位は、実験結果よりも小さくなった。FEM 解析結果の最大耐力は、実験結果よりもかなり大きくなった (1.329 倍)。解析結果は実験結果を再現できていないと判断し、次にシェルモデルで解析を行うことにした。

2.2 シェルモデル (柱：ソリッド/スラブ：シェル)

シェルモデルのシミュレーション解析結果 (スラブせん断力～スラブ鉛直変位関係)を実験結果と比較して、図-4に示す。FEM 解析結果の弾性剛性は実験結果と良好に対応した。また、FEM 解析のスラブせん断力 30kN 以降のスラブ鉛直変位も実験結果とほぼ対応した。FEM 解析では、スラブ鉛直変位に伴い、スラブせん断力はゆるやかに上昇したため、鉄筋コンクリート造の部材では曲げ破壊型の場合においては、部材角 1/30 までの変形能があれば、十分であると判断したことから、今回はスラブ鉛直変位 1/30 (50mm) の時を最大耐力とした。最大耐力の FEM 解析結果と実験結果の比 (FEM 最大耐力/実験最大耐力) は 1.052 であり、ほぼ対応した。以上から、解析結果は実験結果を十分に再現できていると判断し、このモデルを用いてパラメトリック解析を行うことにした。

表-2 共通諸元

柱	階高 (mm)	1500
	断面 (mm)	450×450
	主筋 (SD345)	16-D22
	帯筋 (SD295)	D10@75
スラブ	加力方向 スパン長 (mm)	3000

今回のシミュレーション解析で、シェルモデルに比べてソリッドモデルの適合性が低くなった明確な理由は現状では把握できない。これについては破壊モードに関するかどうかも含めて、今後検討したい。

3. FEM パラメトリック解析

パラメトリック解析はスラブ厚さと幅を変動させ、解析を行った。共通諸元を表-2に、パラメーター一覧を表-3に示す。シミュレーション解析モデルと同様に、支持位置及び加力位置のコンクリートのヤング係数を部材一般部の 100 倍、接合部部分は 1000 倍とし、柱は全て弾性としている。スラブ厚、幅をパラメータとして、計 12 ケースの解析を行った結果、破壊モードは 12 ケース全てスラブの曲げ破壊であった。解析により得られたスラブせん断力～スラブ鉛直変位関係の例を図-5に示す。

解析結果では、最大耐力はスラブ幅の増大とともに大きくなったが、その増大量はスラブ幅の増大ともなって鈍化した。

表-3 パラメーター一覧

解析ケース	スラブ厚 (mm)	スパン長 (mm)
1, 2, 3, 4	180	1350
5, 6, 7, 8	300	2100
9, 10, 11, 12	450	4500

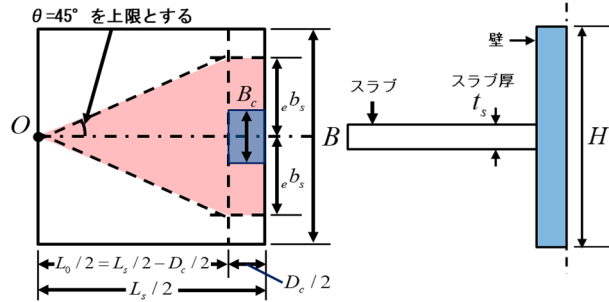


図-6 スラブモーメント広がり概念

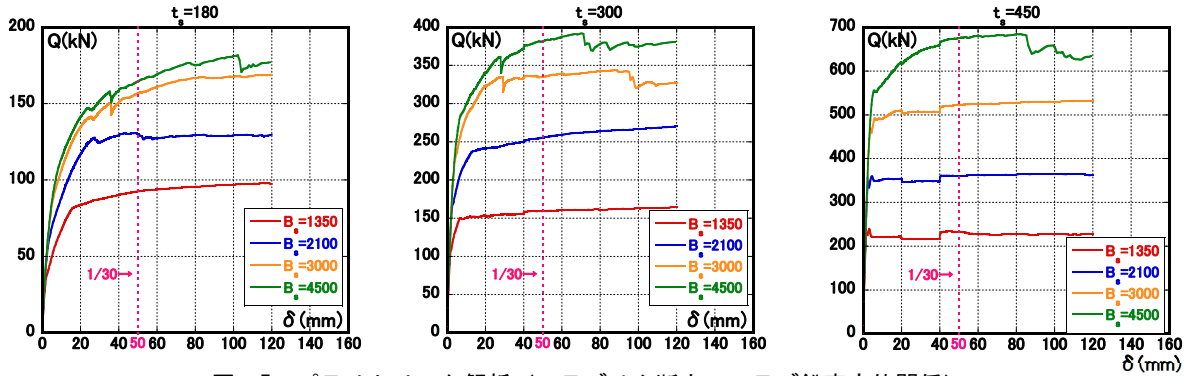


図-5 パラメトリック解析 (スラブせん断力～スラブ鉛直変位関係)

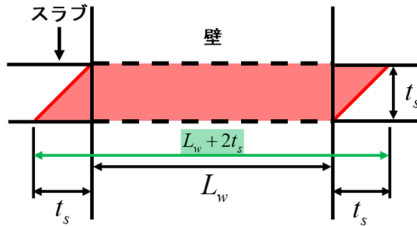


図-7 壁側面のねじりに対するスラブの協幅

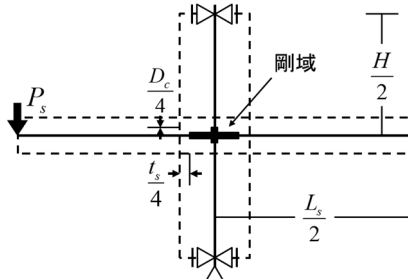


図-8 接合部の剛域

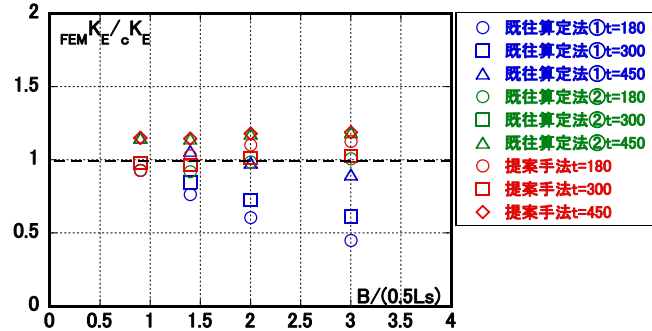
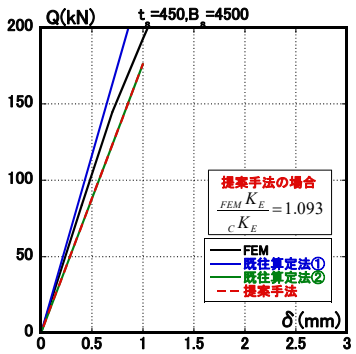
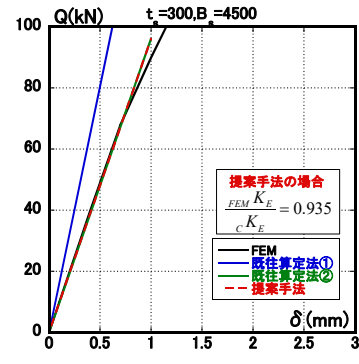
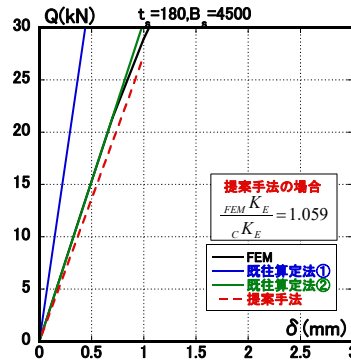
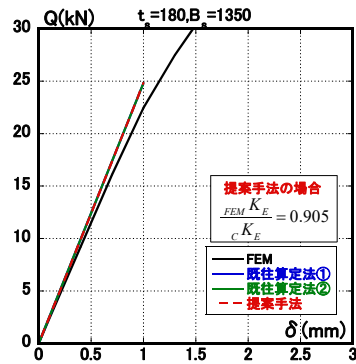


図-9 計算による弾性剛性と FEM 解析による弾性剛性の比較 (スラブせん断力～スラブ鉛直変位関係)

図-10 計算による弾性剛性と FEM 解析による弾性剛性の比較

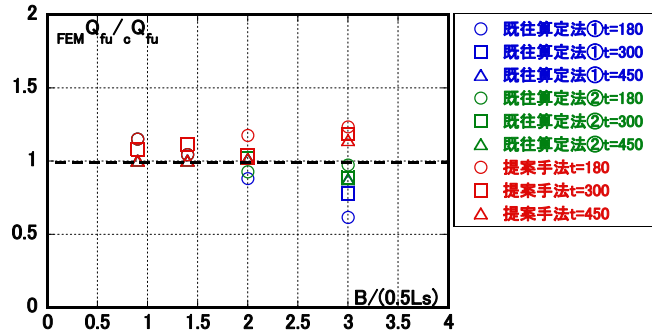
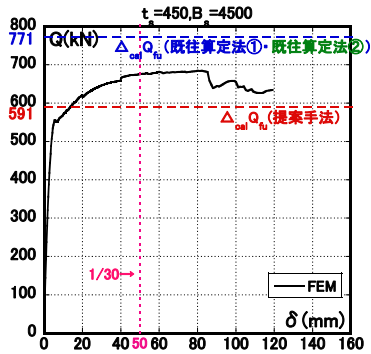
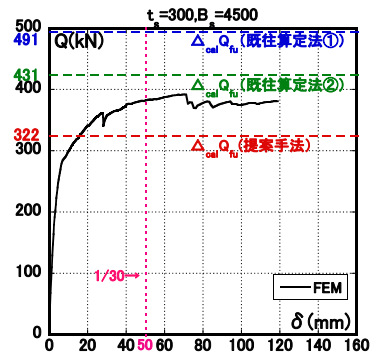
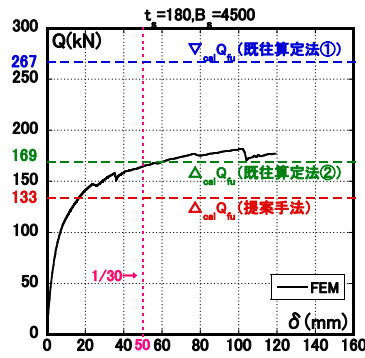
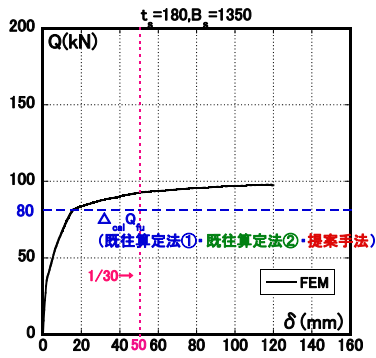


図-11 計算による最大耐力と FEM 解析による最大耐力の比較 (スラブせん断力～スラブ鉛直変位関係)

図-12 計算による最大耐力と FEM 解析による最大耐力の比較

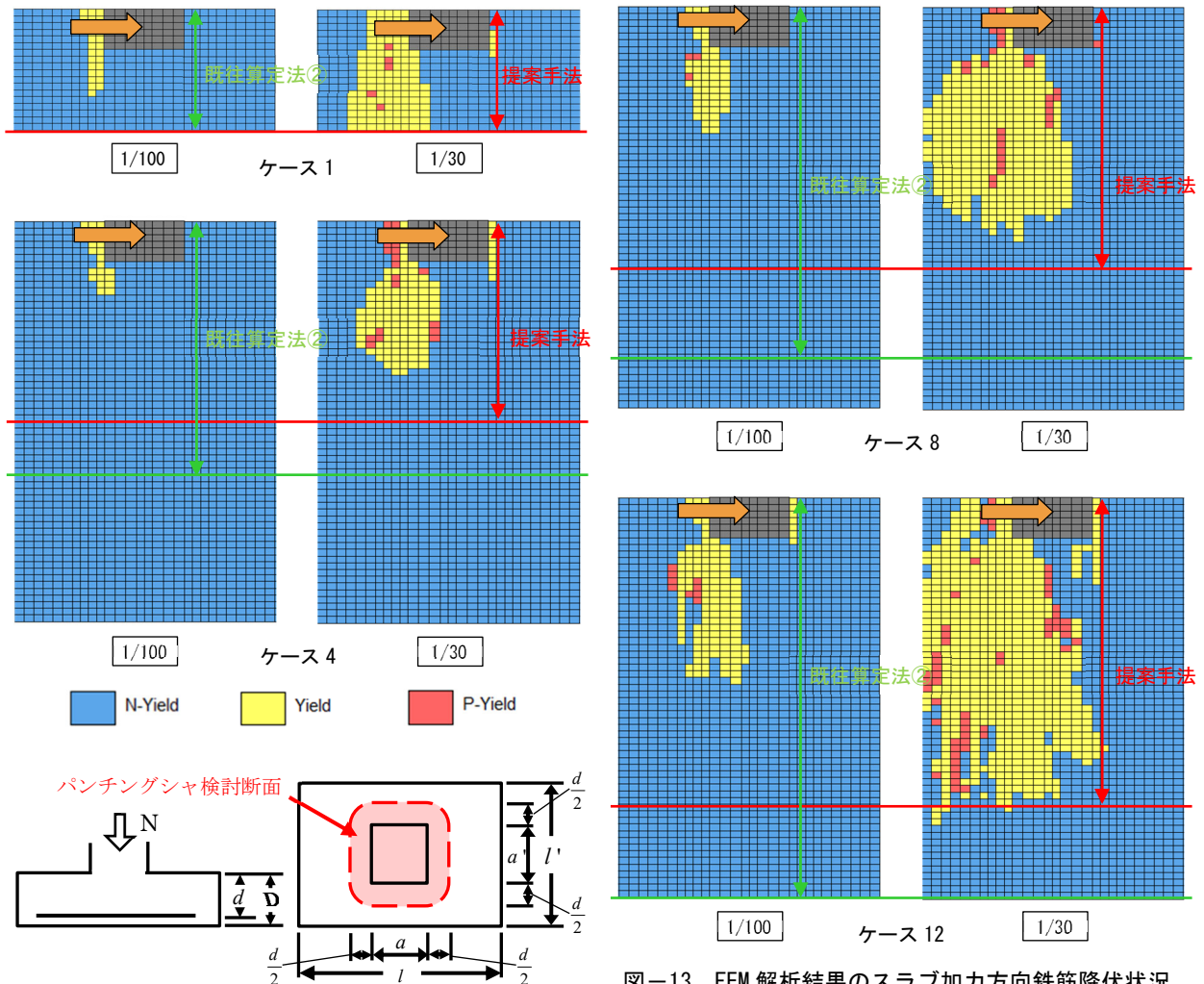


図-14 パンチングシャの検討

図-13 FEM 解析結果のスラブ加力方向鉄筋降伏状況と計算によるスラブ有効幅との比較

4. スラブ有効幅の検討

ここでは、柱とスラブによる架構のスラブ有効幅を既往算定法で算定した場合を検討する。既往算定法①は、スラブの全幅を有効とした場合、既往算定法②は、津田らの提案手法²⁾(壁とスラブによる架構の場合)である。

4.1 既往算定法①の概要(全幅有効の場合)

スラブ全幅を有効幅として、弾性剛性と曲げ終局強度を算定した。

4.2 既往算定法②の概要(壁とスラブによる架構の場合)

津田らが提案したスラブ有効幅算定法²⁾をそのまま準用し、弾性時のスラブ有効幅、曲げ終局強度時のスラブ有効幅を算定した。以下に、津田らの手法を示す。津田らは、壁とスラブによる架構の弾性時とスラブ曲げ終局強度時のスラブ有効幅の算定法を提案している。基本的に、スラブが負担するモーメントは、スパン中央位置から壁フェース位置に向かって広がると仮定しており、壁幅外のスラブ負担モーメントは壁側面のスラブのねじりによって壁に伝達すると仮定している。スラブのモーメントの広がり概念を図-6に示す。これに関する詳細は津田らの論文²⁾を参照願いたい。以下に示す算定式の単位はSI単位系であり、距離はmm、力はNである。

壁側面スラブのねじりに対する有効幅(eL_{jw})は図-7より式(1)となる。

$$eL_{jw} = \min(4t_s, L_w + 2t_s) \quad (1)$$

スラブ有効幅($e b_s$)を式(2)に示す。

$$e b_s = \frac{5}{3} \cdot eL_{jw} + \frac{t_w}{\omega} \quad (2)$$

弾性剛性時の壁フェース位置でのスラブ有効幅(C_e)は、式(3)で算定する。図-6におけるモーメントの広がりを45度に制限している。

$$C_e = \min\left(\frac{L_0}{2}, e b_s\right) \cdot \omega \leq B \quad (3)$$

スラブの平面形状が三角形のままでは、設計に用いる際に煩雑になるので、弾性時はこれを矩形に置換して、応力解析を行う。平面形状が三角形と矩形で、剛性が同じになるように、矩形の幅を求める。その幅は三角形の柱フェース位置の幅の2/3倍となる。

次に曲げ終局強度時のスラブ有効幅算定式(C_y)を式(4)に示す。曲げ終局強度時では、有効幅が弾性よりも広がると仮定し、45度の制限を省いた。

$$C_y = e b_s \cdot \omega \leq B \quad (4)$$

上式中、 t_s はスラブ厚、 L_w は壁長さ、 t_w は壁厚、 B はスラブ全幅、 L_0 はスラブ全長である。また ω に関しては片側スラブの場合は柱水平断面端部から、両側スラブの場

合は柱水平断面中央からを、スラブ有効幅としている。このため、 ω は両側スラブの場合は2、片側スラブの場合は1となる。

4.3 既往算定法の精度検証

既往算定法①②から算定されたスラブ有効幅を用いた十字型架構の弾性剛性を、FEM解析結果を用いて検証する。図-8のように、スラブと柱の接合部に剛域を仮定し、スラブと柱の曲げ剛性とせん断剛性により、十字型架構の弾性剛性を算定する。その検証結果を図-9、10に示す。図-9はスラブせん断力～スラブ鉛直変位関係であり、図-10は弾性剛性の比(FEM解析結果/計算結果)とスラブ平面形状の関係を示したものである。これらの図より、スラブ幅が小さい場合は既往算定法①(スラブ幅を全幅有効とした場合)でFEM解析結果と良好に対応するが、スラブ幅が大きい場合は全幅有効では弾性剛性を過大評価する。既往算定法②(津田らの手法)は、スラブ幅が大きい場合でも弾性剛性はFEM解析結果とほぼ対応している。

次にスラブの曲げ終局強度である。この検証結果を図-11～13に示す。図-11は、スラブせん断力～スラブ鉛直変位関係に計算によるスラブ曲げ終局強度を示したものであり、図-12は、曲げ終局強度の比(FEM解析結果/計算結果)とスラブ平面形状の関係を示したものである。図-13は、左側スラブの上端鉄筋の降伏領域と計算によるスラブ有効幅を比較したものであり、層間変形角が1/100と1/30の時を示した。FEM解析結果の黄色と赤色の部分がスラブ筋の降伏を表している。この検証においても、スラブ幅が小さい場合には既往算定法①による結果はFEM解析結果とほぼ対応する。しかし、スラブ幅が大きい場合はスラブ曲げ終局強度を過大評価する。既往算定法②による結果は、スラブ幅が大きくなるにしたがって、スラブ曲げ終局強度をやや過大評価する傾向があり、この時のスラブ筋の降伏領域に対して有効幅計算値は大きくなる。

上記検討結果より、既往算定法では十字型架構による弾性剛性とスラブ曲げ終局強度を過大評価する場合があるので、新たな算定法の提案が必要であると判断した。

4.4 提案手法の概要(柱とスラブによる架構の場合)

既往算定法②は壁とスラブによる架構の有効幅算定手法のため、同手法で柱側面のねじりに対するスラブ有効幅を算定すると、スラブ厚が大きい場合、柱せい外のねじりに対するスラブ有効領域が過大となる。そのため提案手法では、図-14に示した日本建築学会の「建築基礎構造設計指針」⁵⁾に示されている「パンチングシャ検討」を参考に、柱側面のねじりに対する柱せい外のスラブ協力をスラブ厚の半分とし、ねじりに対するスラブ有効幅算定式(eL_{jw})を式(5)とした。

$${}_eL_{jw} = \min(3t_s, D_c + t_s) \quad (5)$$

上式中、 D_c は柱せいである。

スラブ有効幅算定式(${}_e b_s$)を式(6)に示す。

$${}_e b_s = \frac{5}{3} \cdot {}_e L_{jw} + \frac{B_c}{\omega} \quad (6)$$

上式中、 B_c は柱幅である。

十字型架構の弾性剛性時とスラブ曲げ終局強度時のスラブ有効幅算定は、式(3)(4)を用いて算定した。

4.5 提案手法の精度検証

FEM 解析結果によるスラブの弾性剛性と計算による弾性剛性の比較を図-9, 10 に示す。これらの図を見ると、提案手法による弾性剛性は既往算定法②よりもやや小さくなる程度で FEM 解析結果とほぼ対応することが確認できた。

次に、スラブの曲げ終局強度である。提案手法による結果と FEM 解析結果の比較を図-11~13 に示す。これらの図を見ると、スラブ幅が大きい場合でも、提案手法によるスラブ曲げ終局強度は、FEM 解析結果と良好に対応した。ただし、スラブ筋の降伏領域に関しては、提案手法によるスラブ有効幅はやや過大評価する傾向にあるようである。

5. まとめ

鉄筋コンクリート造の柱とスラブによる架構のスラブ有効幅の検討を行った。

建築基礎構造設計指針を参考に、スラブのねじりに対する有効幅を定めた手法を FEM 解析結果に適用した結果、架構の弾性剛性とスラブ曲げ終局強度及びスラブ曲げ終局強度時のスラブ降伏領域の算定結果は FEM 解析結果と良好に対応することが確認できた。

今後、スラブの復元力特性の算定法の検討を行うとともに、マットスラブの設計法を考案したい。この場合、検討に用いた FEM 解析では、スラブはシェル要素によりモデル化したため、柱周りのスラブのパンチング破壊に対する設計法を別途検討する必要がある。

参考文献

- 1) 岸本剛・早川邦夫・岡靖弘・平松一夫：柱とスラブからなるフラットプレート架構の構造性能—その 1 水平加力実験—, 奥村組技術研究年報, No.32, 2006.7
- 2) 津田和明・稲井栄一・松井智也：鉄筋コンクリート造壁とスラブによる架構の復元力特性算定法に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 85 巻, 第 778 号, pp1643-1653, 2020.12
- 3) 西本昂平・津田和明：鉄筋コンクリート造梁に対するスラブ有効幅に関する研究 (弾性の場合), コンクリート工学年次論文集, Vol.42, No.2, pp.361-366, 2020.7
- 4) 西本昂平・津田和明：鉄筋コンクリート造梁の曲げ終局強度時のスラブ有効幅に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.43, No.2, 2021
- 5) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針, p170, 2002
- 6) 出雲淳一, 他：面内力を受ける鉄筋コンクリート板要素の解析モデル, コンクリート工学論文, No.87.9-1, pp.107-120, 1987.9
- 7) 長沼一洋：三軸圧縮下のコンクリートの応力~ひずみ関係, 日本建築学会構造系論文集, 第 474 号, pp.163-170, 1995.8
- 8) 長沼一洋：鉄筋コンクリート壁状構造物の非線形解析手法に関する研究 (その 1), 日本建築学会構造系論文報告集, 第 421 号, pp.39-48, 1991.3
- 9) 長沼一洋：三軸圧縮下のコンクリートの応力~ひずみ関係, 日本建築学会構造系論文集, 第 474 号, pp.163-170, 1995.8
- 10) Kupfer, H.B. and Gerstle, K.H.: Behavior of Concrete under Biaxial Stress, Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol.99, No.EM4, pp.853-866, Aug., 1973.
- 11) Eligehausen, R., Popov, E.P., and Bertero, V.V.: Local bond stress slip relationship of deformed bars under generalized excitations, EERC Report 83-23, Earthquake Engineering Research Center, Univ. of California, Berkeley, 1983.
- 12) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説, 2001