論文 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

西本 昂平^{*1}·津田 和明^{*2}

要旨:鉄筋コンクリート造梁に対する曲げ終局強度時スラブ有効幅は,現在,「建築耐震設計における保有耐力と変形性能(1990)」に示された手法を用いることが一般的である。これに対し,さらなる算定精度向上のため,新たな曲げ終局強度時スラブ有効幅算定法の検討を行うことにした。これら有効幅算定法を用いた強度をFEM 算定結果を用いて検証した結果,提案手法によるスラブ有効幅を用いた強度算定結果が最も精度の良いことが分かった。

キーワード:スラブ,有効幅,FEM 解析,曲げ終局強度

1. はじめに

筆者らは既報¹⁾において鉄筋コンクリート造梁に対す る弾性時スラブ有効幅についての検討を行った。この際, 既報²⁾の,梁せいとスラブ厚が同じ場合の弾性時スラブ 有効幅算定手法を適用した。この手法を用いて弾性時ス ラブ有効幅を算定した架構の剛性は,日本建築学会の「鉄 筋コンクリート構造計算規準・同解説(2010)」³⁾の手法 を用いてスラブ有効幅を算定した架構の剛性に比べ,そ の差は僅かではあったものの,FEM 解析結果と良好に対 応した。

ここでは、梁曲げ終局強度時のスラブ有効幅の検討を 行った。現在、日本建築学会の「建築耐震設計における 保有耐力と変形性能(1990)」⁴⁾に従って、曲げ終局強度 時スラブ有効幅を、梁側面から 1mを有効範囲とし梁の 曲げ終局強度を算定することが一般的である。しかし、 この算定精度を検討した研究は少なく、その精度は明確 となっていない。そこで、本報では、梁の曲げ終局強度 時のスラブ有効幅を全幅、梁側面から 1m とした場合、 そして筆者らの提案法とした場合の梁曲げ終局強度を求 めることにより、スラブ有効幅算定法の検証を行うこと にした。

2. 弾性時スラブ有効幅の提案手法

弾性時スラブ有効幅(C_e)は、図-1に示すように梁 のスパン中央がローラー支持されているモデルから考案 した。このモデルの妥当性に関しては、既往研究^{5,6}のに 準じて設定した。このローラー位置では鉛直反力を生 じ、この力の影響範囲(この領域をモーメントに対して 有効とする)は、柱に向かって比例的に広がると仮定し ている(この広がり角度は45度を上限とする)。この 際、柱幅外の負担モーメントは柱側面の捩れ剛性によっ て伝達されると考えており,スラブ厚と梁せいが同じ場 合には,柱側面のスラブの曲げ剛性(EI)と捩れ剛性 (GJ)が同じになる時を柱フェースラインでのスラブ 有効幅としている。この際,モーメントに対するスラブ 有効領域は三角形となるが,これを矩形に置換した場合 の幅を弾性時有効幅としている。この方法をスラブ厚と 梁せいが異なる場合に適用したところ,その有効幅から 算定される架構弾性剛性は FEM 解析結果と良好に対応 することが確認できた。このことは,既報¹⁾に報告し ている。このスラブ有効幅算定式を式(1)~(3)に示す。 これに関する詳細は既報¹⁾を参照願いたい。

$$EI = GJ \tag{1}$$

$$b_s = \frac{5}{3} \cdot (D_c + 2t_s) + \frac{B_c}{\omega}$$
(2)

$$C_e = \frac{2}{3} \cdot \min\left(\frac{L_0}{2}, {}_e b_s\right) \cdot \omega \le B \tag{3}$$

上式中の記号に関しては図-1を参照願いたい。 ω は 両側スラブの場合 $\omega=2$,片側スラブの場合 $\omega=1$ とし,後述の式においても同様である。これらの単位はSI単位 系であり,力はN,距離はmmである。



*1 近畿大学大学院 産業理工学研究科 (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)

3. 曲げ終局強度時スラブ有効幅の検討

3.1 現行算定法の概要

現行算定法として検討した手法は以下の二つである。

1) スラブ全幅を有効幅(以下,検討手法1と称す)

2) 梁側面から片側に 1mを有効幅(以下,検討手法2 と称す)

3.2 提案手法の概要

ここでは、梁曲げ終局強度時のスラブ有効幅(C_y)提 案手法の概要を記す。基本的には、梁曲げ終局強度時の スラブ有効幅は2章の弾性時有効幅の柱フェースライン の有効幅と同じである。曲げひび割れ発生後は、曲げ剛 性が低下することから、有効幅が弾性時より増大する可 能性が大きいと考えている。この考えに基づき、45度の 制限を外した。梁曲げ終局強度時のスラブの有効幅提案 式を式(4)に示す。

$$C_v = {}_e b_s \cdot \omega \le B \tag{4}$$

式(4)中の記号に関しては図-1を参照願いたい。

3.3. 曲げ終局モーメント算定法

スラブ引張側の曲げ終局モーメントは式(5)で表される。

$$_{b}M_{u1} = 0.9n_{b}a_{b\,b}\sigma_{y}d_{b} + 0.9n_{s}a_{s\,s}\sigma_{y}d_{s}$$
 (5)

梁下端引張側の曲げ終局モーメントは式(6)で表される。

$${}_{b}M_{u2} = 0.9n_{b}a_{b\,b}\sigma_{v}d_{b} \tag{6}$$

式(5), (6)中, *nb*, *ns* は梁引張主筋, スラブ筋本数, *ab*, *as* は梁引張主筋, スラブ筋断面積, *boy*, *soy* は梁主筋, ス ラブ筋降伏強度, *db*, *ds* は梁, スラブ有効せいである。

3.4 算定精度検証

(1) FEM シミュレーション解析

鉄筋コンクリート造梁に対するスラブ有効幅に関す る既往実験は少なく,有効幅を梁側面から 1m とするか 全幅とするか程度の検討しかなく,詳細な検討をしたも のがほとんどないことから,十分な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。先 ず,田尻らの実験結果^{¬)}(No.1)の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。実験において,No.1 は直 行梁がなし,No.4 は直行梁がありである。昨年度の弾性 剛性の検討^{¬)}では直交梁の効果がさほど大きくなかった ことを踏まえて,できるだけ単純なモデルで検討を行い たいことから,No.1 を対象にシミュレーション解析を行 った。また,本検討において,柱梁接合部を切り出した モデルで検討したのは、1)これと同様な既往研究が多く、 2) できるだけ単純なモデルで検討を行い、それを対象と した算定法構築後,架構モデルに適用し,差異がある場 合は算定法の補正を考えるためである。次に、シミュレ ーション解析モデルを図-2 に、試験体諸元を表-1 に 示す。同図の茶色の要素はヤング係数を緑色の要素の10 倍とし、弾性としている。実験では境界条件を加力方向 梁端部はローラー支持とし、スラブの加力方向端部は自 由としている。そのため、解析モデルでは鉄骨の治具を 再現し(青色の要素),端部全接点をローラー支持,ヤン グ係数は 2.05×10⁵ (N/mm²) としている。スラブ加力方 向端部は実験同様、自由としている。コンクリートは六 面体要素とし,梁主筋は線材要素,梁のせん断補強筋及 びスラブ筋は埋め込み鉄筋としてモデル化した。シミュ レーション解析対象実験に対応させ、スラブ下端筋を有 効として解析を行った。また、解析対象モデルをハーフ モデルとし、切断面全節点に対象条件(加力方向軸回り の回転、スラブ加力直交方向の軸変形を拘束)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⁸⁾ (C=1.0), コンクリートの圧縮応力度~ひずみ度曲線は 修正 Ahmad モデル⁹, コンクリートの応力度歪関係は修 正 Ahmad モデル, ひび割れ面のせん断伝達特性は Al-Mahaidi モデル¹⁰, ひび割れ後の圧縮強度・ひずみ度低 減は長沼モデル,付着応力度~滑り関係は Elmorsi らの モデル11),全ての鉄筋の応力度~ひずみ度関係は,降伏 後剛性を弾性剛性の 1/1000 とするバイリニア型とし,主 筋の付着強度は日本建築学会の「鉄筋コンクリート造建 物の靭性保証型耐震設計指針・同解説」12)の付着強度式 で算定し、その時のすべり変位を 3.0 (mm) とした。

シミュレーション解析より得られた荷重~部材角関 係の結果を実験結果と比較して、図-3に示す。FEM 解 析結果の剛性は実験結果に比べ、若干大きくなったが、 これは、鉄筋とコンクリートの付着特性のモデルが実験 と異なっているのではないかと考えられる。しかし、両 結果の最大耐力を比較すると強度比(FEM 最大耐力/実 験最大耐力)は 1.069 であり、解析結果は実験結果を十 分に再現できていると判断し、この解析仮定を用いてパ ラメトリック解析を行うことにした。



	断面(mm)	360×360	
柱	主筋(SD390) 12-D16		
	帯筋(SHD685)	D10@144	
梁	断面(mm)	240×320	
	主筋(SD490)	加力方向:3+3/3+2	
		加力直交方向:3+3/3+3	
	あばら筋(SHD685)	D10@96	
スラブ	スラブ筋(SD295A)	D10@192	
	スラブ厚(mm)	128	

表-1 モデル試験体諸元



図-3 荷重~部材角関係

表-2 共通諸元

柱	階高(mm)	3000	
	断面(mm)	800 imes 800	
	主筋(SD345)	12-D29	
	帯筋(SD295A)	D10@100	
梁	梁幅(mm)	400	
	引張主筋(SD345)	5-D29	
	あばら筋(SD295A)	D10@100	
スラブ	加力直交方向	6000	
	スパン長(mm)		

ケース	(mm)	(mm)	スラブ筋比
1, 28, 55			
2, 29, 56			0.600
3, 30, 57			
4, 31, 58			
5, 32, 59		150	1.072
6, 33, 60			
7, 34, 61			
8, 35, 62			1.680
9, 36, 63			
10, 37, 64			
11, 38, 65			0.450
12, 39, 66			
13, 40, 67	600		

表-3 パラメーター覧

梁せい スラブ厚

解析

8, 35, 62	600 700 800		1.680	5000
9, 36, 63				6000
10, 37, 64		200	0.450	4000
11, 38, 65				5000
12, 39, 66				6000
13, 40, 67			0.804	4000
14, 41, 68				5000
15, 42, 69				6000
16, 43, 70			1.260	4000
17, 44, 71				5000
18, 45, 72				6000
19, 46, 73		250	0.360	4000
20, 47, 74				5000
21, 48, 75				6000
22, 49, 76			0.643	4000
23, 50, 77				5000
24, 51, 78				6000
25, 52, 79				4000
26, 53, 80			1.008	5000
27. 54. 81		81		

※解析ケース 1~27 の梁せいは 600(mm), 28~54 は 700(mm), 55~81 は 800(mm)である。



図-4 パラメトリック解析結果(柱せん断力~層間変形角関係)



図-6 因子別検証

(2) FEM パラメトリック解析

パラメトリック解析は実建物を想定し、解析を行った。 共通諸元を表-2に、パラメータ一覧を表-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 位置を弾性とし、ヤング係数を10倍としている。昨年度 の検討¹⁾において,梁せいと柱断面を変動させ解析を行 ったが、これらが変動しても算定精度は大きく変わらな かったため、本報では梁せい、スラブ厚、スラブ筋比、 スパン長をパラメータとして、計81ケース行った。ま た,本検討では通常の設計よりもスラブ筋比が大きい場 合も対象としているが,これは,広範囲に検討を行うた めである。解析より得られた柱せん断力~層間変形角関 係の例を図-4 に示す。同図には各手法から算定された 有効幅を用いた曲げ終局強度の計算結果を示した。同図 をみると、検討手法1のスラブ全幅有効の曲げ終局強度 に達するもしくは近づくのは、比較的大変形時であり、 マクロ的な第二折れ点柱せん断力(ほぼ曲げ降伏点)に 近いのは、検討手法 2、提案手法でスラブ有効幅を算定 した場合であることが分かる。

次に、パラメトリック解析結果を用いて、各スラブ有 効幅算定法を用いた梁曲げ終局強度時の架構水平せん断 力算定結果の精度検証を行った。これらの検証結果を図 -5に示す。グラフの縦軸が FEM 最大耐力 (Q_{FEM})、横 軸が各手法から算出された有効幅を用いた、梁曲げ終局 強度時の柱せん断力の計算値 ($Q_{ful} \sim Q_{fu3}$)である。強度 比の平均値及び変動係数は、検討手法1が0.962,0.206、 検討手法2が1.540,0.1153、筆者らの提案手法が1.276, 0.1461である。検討手法1では多くのケースが危険側に 評価し、ばらつきがみられた。検討手法2では全ケース が安全側に評価したが、平均値がやや大きくなる傾向が 得られた。筆者らの提案手法を用いた場合、検討手法2 と同様に、全体的に安全側に評価したが、やや変動係数 は大きかった。

次に,梁せい,スラブ厚,スパン長,スラブ筋比に対 する強度比の因子別検証を行った。その検証結果を図-6に示す。同図の縦軸は強度比(FEM最大耐力/計算値) であり,横軸は各構成因子である。また,同図の黒の点 線は±15%を示している。梁せいに関しては,検討した 全ての手法において,回帰直線の傾きは小さかった。ス ラブ厚,スパン長に関しては,若干の傾きが生じた。ス パン長 6m 以上は,基本的に検討範囲外と考えており, 今後,必要に応じて検討したい。スラブ筋比に関しては, 検討した全ての手法において回帰直線に大きな傾きが生 じた。また,設計でよく用いられるスラブ筋比に対する 算定精度に関しては,今後詳細に検討したい。全般的に みると,提案手法でスラブ有効幅を算定した場合の梁曲 げ終局強度時柱せん断力と FEM 最大耐力の比は,因子 別検証での回帰直線の傾きは小さく,最も精度が良いと 言える。

スラブ筋比に対して強度比の回帰直線の傾きが大き く生じた要因を検討するため、パラメトリック解析結果 を用いて FEM 最大耐力時のスラブ上端筋及びスラブ下 端筋の降伏状況の検討を行った。その結果を図-7 に示 す。同図の a)~d)の左図がスラブ上端筋降伏状況,右図が スラブ下端筋降伏状況であり,黄色(最大耐力時降伏), 赤色(最大耐力時以前の降伏)の要素は鉄筋の降伏を示 している。ここでは、梁せいを 700 (mm)、スパン長を 5000 (mm) のケースの解析結果を示した。同図から、ス ラブ筋比が大きくなるにつれ,スラブ上端・下端ともに 鉄筋の降伏範囲が狭くなる傾向が認められた。このよう な現象が生じた原因に関しては、今後、詳細に検討した い。また、計算では、スラブ引張側の場合は全てのスラ ブ筋が引張状態であると仮定し,スラブ圧縮側の場合は, スラブ筋を無視して算定している。今後, FEM 解析結果 のスラブ筋の降伏が引張か圧縮かを調べ、圧縮降伏して いる場合はその影響を検討したい。



4. まとめ

梁曲げ終局強度時のスラブ有効幅算定法の検討を行 った結果,以下の知見が得られた。

- スラブ全幅を有効幅とした場合、多くのケースが 危険側に評価し、他の手法に比べ、ばらつきがみ られた。
- 梁側面から1mを有効幅とした場合,全てのケースが安全側に評価したが,平均値がやや大きくなる傾向が得られた。
- 3) 筆者らの提案手法を用いた場合,梁側面から1m を有効幅とした場合と同様に全体的に安全側に 評価したが,強度比の因子別検証における回帰直 線の傾きは最も小さく,今回の検討結果では最も 算定精度が良いことが分かった。
- 4) スラブ筋比に対する強度比の因子別検証では、回 帰直線の傾きが全般的に大きくなった。これは、 スラブ筋比に伴うスラブ筋降伏領域の変動に起 因している。このような現象が生じる要因は今後 詳細に検討したい。
- スラブ筋比に対する算定精度に関しては、通常の設計よりも広範囲で検討を行った。今後、この影響も詳細に検討したい。

今後,スラブ筋比における回帰直線の傾きが生じる要 因及びスラブ筋比に対する算定精度に関して,詳細に検 討を行いたい。

参考文献

- 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, No2, pp.361-366, 2020.7
- 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

- 日本建築学会:鉄筋コンクリート構造計算規準・同 解説, pp.63-72, 2010
- 日本建築学会:建築耐震設計における保有耐力と変 形性能,1990
- 5) 鈴木紀雄,小谷俊介,青山博之:鉄筋コンクリート 造スラブ付き柱はり立体接合部に関する実験的研 究,コンクリート工学年次講演会講演論文集, pp.425-428, 1983
- 今津祥地郎,草川和広,北嶋圭二,中西三和,安達 洋:RC 造建物のスラブ付き十字形柱梁接合部の多 数回繰返し載荷実験 その1 実験概要,日本建築学 会学術講演梗概集,pp127-128, 2019.9
- 7) 田尻清太郎,柏尚稔,加藤博人,壁谷澤寿一,福山 洋:RC 造スラブ付き十字形部分架構の減衰性能に 関する実験,日本建築学会学術講演梗概集,pp353-354,2015.9
- 出雲淳一,島弘,岡村浦:面内力を受ける鉄筋コン クリート板要素の解析モデル、コンクリート年次論 文集, No.87.9-11, pp.107-120, 1987.9
- 9) 長沼一洋:三軸圧縮下でのコンクリートの応力~ひ ずみ度関係,日本建築学会構造系論文集,第474号, pp163-170, 1985.8
- Al-Mahaidi,R.S.H.:Nonlinear Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Deep Members,Report 79-1,Dep.of Structural Engineering, Cornell Univ.,Jan. 1979
- Elmorsi, M., Kianoush, M.R. and Tso, W.K. : Modeling bond-slip deformations in reinforced concrete beamcolumn joints, Canadian Journal of Civil Engineering, Vol.27, pp.490-505, 2000.
- 12) 日本建築学会:鉄筋コンクリート造建物の靭性保証 型耐震設計指針・同解説,2001