

フラットプレートと鉄筋コンクリート造細柱からなる 架構システムの開発

フラットプレートの押し抜きせん断破壊に関する実験と解析

飯塚 崇文^{*1}・今井 和正^{*1}・山崎 英一^{*2}・一色 裕二^{*2}

Keywords : flat plate, slender column, punching shear, finite element analysis

フラットプレート, 細柱, 押し抜きせん断, 有限要素解析

1. はじめに

当社ではフラットプレートと鉄筋コンクリート造柱からなる架構システムの開発に取り組んでいる。この架構システムでは地震時水平力を耐震壁などに集約的に負担させるため、柱は鉛直力のみを支持すればよく、高強度コンクリートによる細柱柱部材の適用が可能となる。

このような場合、細柱との接合部におけるフラットプレートの押し抜きせん断破壊を防止することが重要となる。同破壊を防止するための接合ディテールを考案し、実大試験体の載荷実験および有限要素解析によりその有効性を確認した。

2. 実験概要

試験体の形状・配筋を図-1に示す。試験体は、実寸法（スラブ厚さ 350 mm, 想定柱径 $\phi 275$ mm）とした。柱径よりも外径寸法が大きい支圧板（直径： $\phi 600$ mm）

表-1 試験体一覧

Table 1 List of specimens

試験体名	柱位置	支圧板位置	補強仕様
No.1	内柱	スラブ内	無補強
No.2	内柱	スラブ内	リング筋 (範囲： $\phi 900$)
No.3	内柱	スラブ内	リング筋 (範囲： $\phi 1000$)
No.4	内柱	スラブ下面	リング筋 (範囲： $\phi 1000$)
No.5	内柱	スラブ内	せん断補強筋 (40-D13)
No.6	外柱	スラブ内	せん断補強筋 (40-D13)

共通事項 ・スラブ厚さ：350mm、 ・スラブ筋：D22-@100（柱際は@75）
・支点間距離：2100mm（No.6は三辺支持、他は四辺支持）
・コンクリート目標強度：30N/mm²

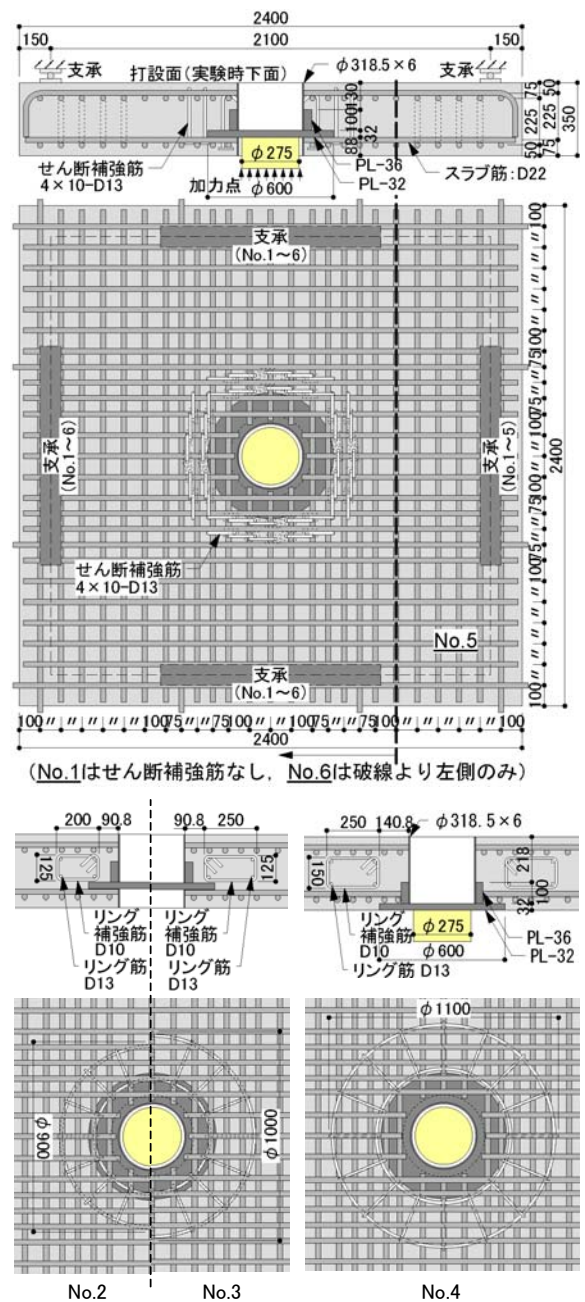


図-1 試験体形状及び配筋
Fig.1 Specimens

*1 技術センター建築技術研究所建築構工法研究室

*2 設計本部 構造グループ

を床スラブコンクリートに内蔵させることで、柱が直接床を支持する場合に比べて押し抜きせん断破壊に対する抵抗面積を大きくすることが基本ディテールの特長である。試験体は表-1に示す6体であり、No.1が無補強で、No.2~4にはリング筋による補強が、No.5、6には定着板付せん断補強筋²⁾による補強が施されている。No.2とNo.3の比較によりリング筋補強範囲の影響を、No.3とNo.4の比較により支圧板位置の影響を把握する計画とした。せん断補強筋の効果を確かめるNo.5とNo.6のうち、No.6では外柱接合部の耐力を把握するため三辺支持加力とした。スラブ上端からコンクリートを打設し、実験時に上下反転させて上面(打設時下端)より加力を行った。鋼材とコンクリートの強度試験結果を表-2および表-3に示す。

表-2 鋼材の引張試験結果
Table 2 Material properties of Steel

種別	使用部位	降伏点 N/mm ²	引張強さ N/mm ²	伸び %
SM490A t=32	支圧板	351	523	32.6
SS400 t=36	補剛板	263	453	41.5
SD345 D22	スラブ筋	374	605	18.2
SD345 D13	せん断補強筋	397	572	19.6
SD295A D13	リング筋	384*	540	18.0
SD295A D10	リング補強筋	375	509	22.3

※:0.2%オフセット法による。

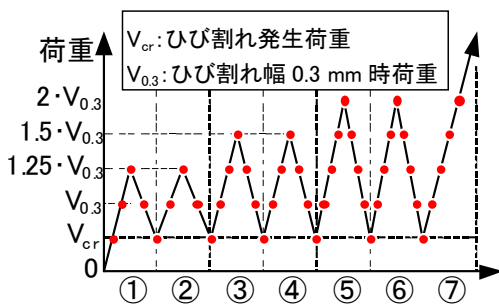


図-2 加力スケジュール
Fig.2 Loading program

加力は、柱位置に対する繰返し圧縮载荷とし、支持条件は支点間距離が2100mmの四辺支持(No.6のみ三辺支持)とした(図-1および図-2参照)。

3. 実験結果とその検討

荷重と載荷点たわみの関係を図-3に、実験結果一覧を表-4に示す。載荷点たわみは、載荷点の鉛直変位から支承位置の鉛直変位を差し引いて求めた。いずれの試験体においても、下面に放射状のひび割れが発生した。無補強試験体No.1では691kN時に押し抜きせん断による破壊が生じ、荷重が急激に低下した。リング筋補強を施したNo.2およびNo.3は、その後の剛性が若干低下しながら荷重が増加した。支圧板をスラブ下

表-3 コンクリートの強度試験結果
Table 3 Material properties of concrete

試験体	圧縮強度 N/mm ²	割裂引張強度 N/mm ²
No.1	29.9	2.58
No.2	28.9	—
No.3	32.1	2.21
No.4	31.6	—
No.5	34.2	2.50
No.6	33.9	—

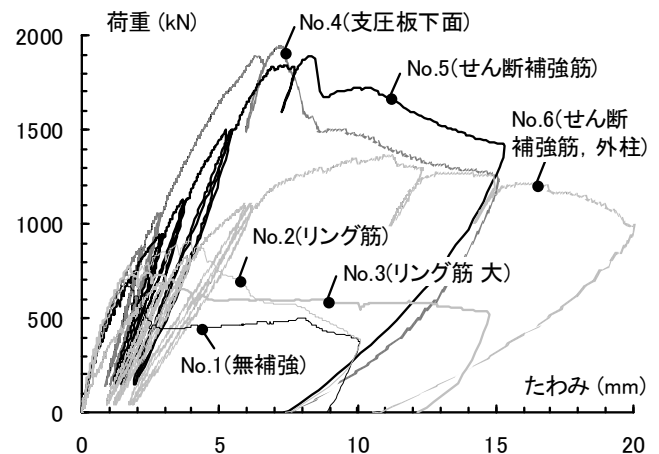


図-3 荷重-たわみ関係
Fig.3 Load-displacement relationships

表-4 実験結果一覧
Table 4 Test result

試験体名	放射状ひび割れ発生		放射状ひび割れ幅0.2mm		放射状ひび割れ幅0.3mm		最大荷重時		円弧状ひび割れ発生		耐力計算値*(kN)	
	荷重(kN)	たわみ(mm)	荷重(kN)	たわみ(mm)	荷重(kN)	たわみ(mm)	荷重(kN)	たわみ(mm)	荷重(kN)	たわみ(mm)	補強域内	補強域外
No.1	191	0.27	541	1.02	691	1.61	691	1.61	470	2.52	—	740
No.2	291	0.53	702	1.61	748	1.99	909	3.97	853	3.01	796	933
No.3	200	0.26	601	1.10	750	1.56	780	1.71	709	2.02	—	767
No.4	156	0.20	550	0.98	700	1.43	1943	7.27	1892	6.45	1303	2004
No.5	151	0.22	601	1.34	750	1.91	1889	8.22	1126	3.63	2412	1884
No.6	50	0.09	502	1.67	552	1.95	1361	11.17	1201	7.01	1668	1220

※文献[3]による。下線付きは、補強領域内と領域外の計算値のうち小さい方の値。

面に設置した No. 4 は剛性低下が最も少なく、耐力が最も高かった。せん断補強筋を配した No. 5 は No. 4 と同程度の耐力を示した。外柱部を想定した No. 6 は、剛性、耐力ともに No. 5 より小さかった。いずれの試験体においても下面に円弧状のひび割れが観察されたことから、押し抜きせん断破壊が生じたものと判断される。

ACI の算定式³⁾より求めた押し抜きせん断耐力を表-4に示す。支圧板から上端筋までの距離を有効厚さ d とした。No. 3 においては、せん断ひび割れがリング補強筋鉛直部を横断しない位置に観察されたため、補強筋を耐力算定に考慮しなかった。同手法により、各試験体の最大耐力がお概ね適切に評価できている。

4. 3次元FEM解析

4.1 解析概要

解析は、汎用FEM解析ソフト DIANA⁴⁾を用い、試験体全体を3次元でモデル化して単調漸増解析を行った。

4.1.1 実験試験体のモデル化

解析は、面外せん断補強筋が無い No. 1 試験体と補強筋を有する No. 5 試験体を対象とした。図-4に試験体の要素分割図を示す。コンクリートと載荷支圧板は六面体要素を用い、スラブ筋とせん断補強筋は埋込み型離散鉄筋要素、コンクリートと載荷支圧板の間には低い荷重状態で発生した剥離や付着～滑り性状を考慮す

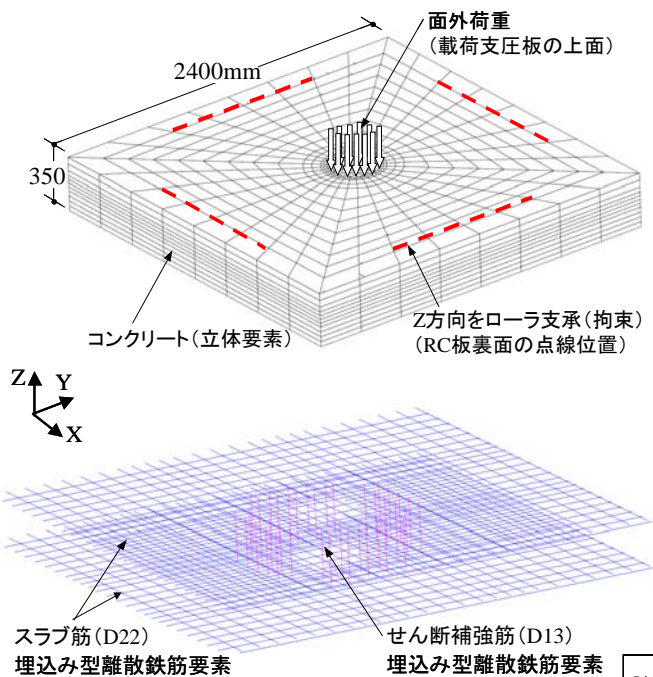


図-4 解析モデル

Fig. 4 Mesh arrangement for analysis

るために界面要素を用いた。鉄筋要素は軸剛性のみで、コンクリート要素に重ね合わせてモデル化した。

拘束条件は、実験と同様、試験体底面の4辺をローラ支持とした。本解析では、荷重制御のみでは最大耐力後の荷重-変位関係まで求めることは困難であったため、最大耐力付近までは荷重制御で等分布荷重を加えたが、それ以降は、変位制御により鉛直荷重を求めた。収束計算は、割線剛性法を用いて行い、エネルギーノルムが0.1%未満の場合、収束したと判断した。

4.1.2 材料構成則

コンクリートは、1軸応力-ひずみ関係に基づく直交異方性体とし、面外方向へ進展、拡大したひび割れ挙動を回転分散ひび割れモデルで評価した。表-5に、解析に用いた材料特性を示す。圧縮側の応力-ひずみ関係は、図-5に示すように強度上昇域から圧縮軟化域まで統一的に表現出来る Thorenfeldt モデル⁵⁾を基本

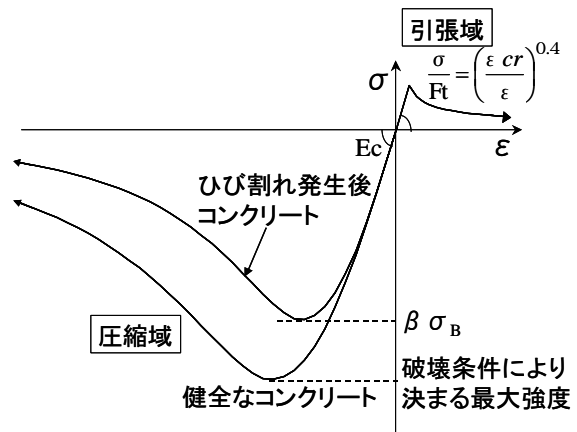


図-5 コンクリートの1軸応力-歪関係

Fig. 5 Uniaxial stress-strain relationship for concrete

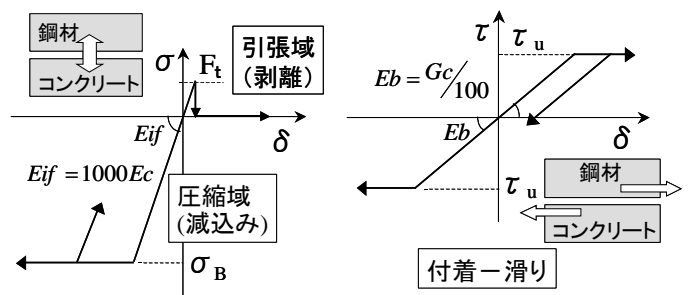


図-6 剥離と付着-滑り関係の解析モデル

Fig. 6 Exfoliation of concrete and bond-slip model for joint element

表-5 使用材料

Table 5 Mechanical properties of materials

試験体	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	使用部位など	降伏点 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
No. 1	29.9	1.9	30	スラブ筋: D22	374	605	192
No. 5	34.2	2.1		補強筋: D13	397	572	190
				支圧板: t=32	351	523	205

に、ひび割れ発生後は圧縮強度の低減⁶⁾を考慮した。引張側は、ひび割れ発生前までは弾性とし、ひび割れ発生後は鉄筋とコンクリート間の付着作用を考慮した出雲モデル⁷⁾を用いた。スラブ筋とせん断補強筋の応力-ひずみ関係は、バイリニア型モデルとした。

鋼材とコンクリート間の剥離と減り込み性状は、コンクリートの引張強度で負担応力がゼロとなる弾塑性型の垂直応力～垂直変位関係でモデル化し、付着～滑り性状はバイリニア型の接線応力～滑り関係を双方の構造要素間に設けた(図-6)。

4.2 解析結果

4.2.1 荷重-変位関係とひび割れ状況の比較

図-7に、解析と実験による荷重 P -変位 δ 関係の比較を示す。両試験体の初期剛性、最大耐力については、解析値は実験結果と概ね良好な対応を示したが、せん断補強筋を有する No.5 試験体の場合、試験体底面に円弧状ひび割れが発生した変形 4mm 付近から最大耐力に達する P - δ 関係において、解析値は実験値を下回った。その理由として、本解析では、ひび割れ面と主歪方向の一致を仮定したもとでコンクリートのせん断

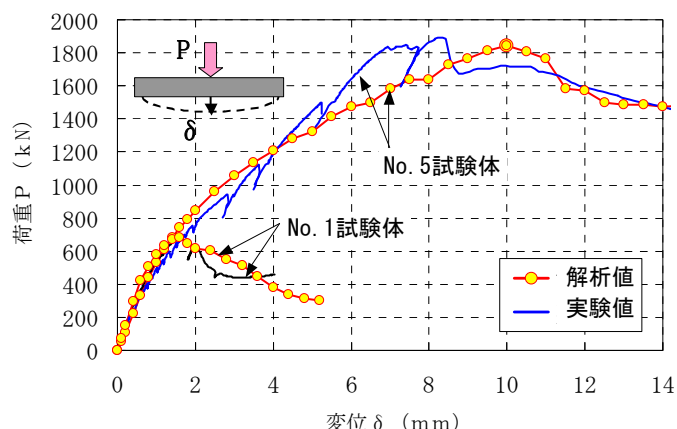
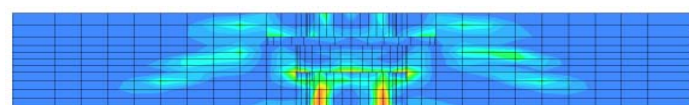


図-7 解析結果と実験結果の比較

Fig. 7 Comparison of analysis and experiment



(a) 最終ひび割れ状況 (実験結果)



(b) 最大耐力時の最大主歪 ϵ_1 分布 (解析値)

図-8 実験終了時のひび割れ状況と最大主歪(主引張)分布の比較

Fig. 8 Comparison of crack patterns and tensile principal strain

応力を算定しており、主応力方向が大きく回転する2次ひび割れについて、初期ひび割れとの相互関係が考慮されていないことが影響したと考えられる。破壊経過は、実験と同様、載荷支圧板の周辺より試験体底面のローラ支承位置を結ぶ対角線上で、ひび割れ幅やせん断ひずみが局所的に増大すると共に、 P - δ 関係でも徐々に緩やかな勾配となり最大耐力に達した。

図-8に、最終ひび割れ状況と最大耐力時の最大主歪分布の解析値を示す。最大主歪は、腹部中央部のせん断ひび割れ面に沿って、スラブ上面側から下面まで斜め帯状に分布した。

4.3 地震力を受けるフラットプレートの終局耐力

No. 5 試験体を対象として、柱スラブ接合部分に鉛直荷重と載荷支圧板の図心に対して対称な位置で等しい鉛直荷重を双方逆方向に作用させ、終局耐力時の鉛直荷重と作用モーメントの関係を検討した(図-9)。

解析は荷重制御で行い、最大耐力は発散する直前に収束した解析 STEP とした。最大耐力時のモーメント M_u は、鉛直荷重 ΣP に偶力間距離 e を乗じて求めた。図-10に、鉛直載荷実験の最大耐力、及び軸力と曲げ

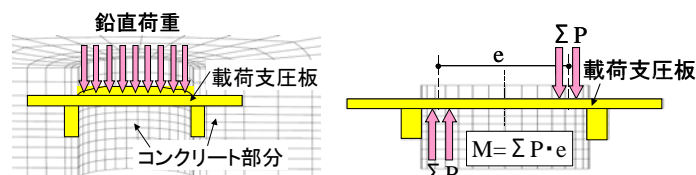


図-9 柱スラブ接合部に作用させた軸力とモーメント

Fig. 9 Vertical load and moment

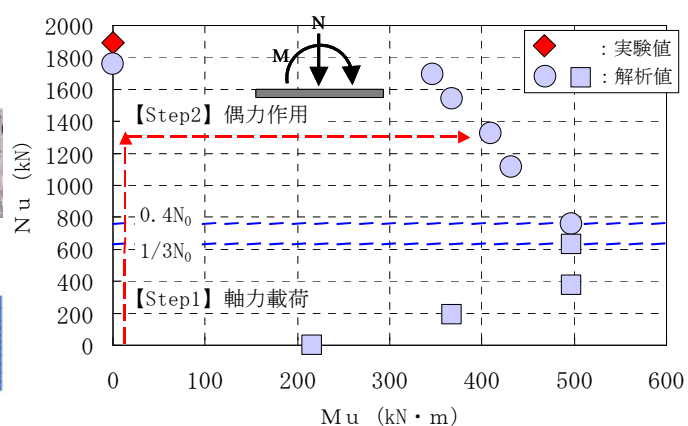


図-10 M-N作用時の終局耐力の各解析値

Fig. 10 Analytical ultimate strength and interaction diagram

を作用させた場合の各終局耐力を示す。 $0.4N_0 \leq N$ の軸力範囲(●印)では、図-8 (a)に示す最終ひび割れ状況と同様に、載荷支圧板より下部側でせん断破壊の性状を示し、終局耐力はモーメントが加わることで減少した。しかし、前述とは異なり、載荷支圧板より上部側でせん断破壊に至った $N < 0.4N_0$ の軸力範囲(■印)では、終局耐力はモーメントと共に増加した。

参考文献

- 1) 今井和正, 村松晃次, 岡田直子, 寺嶋知宏, 服部敦志, 小室努: 超高強度コンクリートを用いた RC 長柱の構造性能 その 1~3, 日本建築学会学術講演梗概集, C-2, pp. 319-324, 2010 年
- 2) 飯塚崇文, 小野英雄, 児玉城司, 是永健好, 小室 努, 征矢克彦, 野崎 博: プレート定着型せん断補強鉄筋のせん断補強効果と建築構造物への適用, 日本建築学会技術報告集, 第 29 号 pp.133-138, 2009 年 2 月
- 3) ACI Committee 318: Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318M-08) and Commentary, pp.190-194, 2008
- 4) DIANA Foundadion Expertise center for Computational Mechanics:DIANA Finite Element Analysis Users manual 9.2 TNO Building and Construction Research, 2002
- 5) Vecchio, F, J. etal.: Compression Response of Cracked Reinforced Concrete, J. Str. ASCE, pp. 3590-3610, 1993
- 6) Thorenfeldt, E. etal.: Mechanical Properties of High - Strength Concrete and Applications in Design, in Proc. Utilization of High-Strength Concrete, 1987
- 7) 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, JCI, No. 87. 9-1, pp. 107-170, 1987. 9

5. まとめ

フラットプレートと軸力柱による架構システムの構造性能を把握するため、実大寸法のフラットプレート試験体の押し抜きせん断実験と F E M 解析を行った。以下に、主な知見を示す。

- ①フラットプレートー柱接合部に生じる鉛直力を模擬した押し抜きせん断実験を行い、破壊性状と最大耐力について把握した。最大耐力は ACI の押し抜きせん断耐力算定法でお概ね適切に評価できることを確認した。
- ②実験試験体の No. 1 と No. 5 を対象として 3 次元非線形 F E M 解析を行い、実験での押し抜きせん断挙動を概ね良好に再現出来ることを確認した。
- ③地震荷重が作用した場合のフラットプレートの終局耐力は、曲げモーメントが加わることで、鉛直載荷実験の最大耐力より低下することが判った。