

論文 鉄骨間柱の簡易柱脚部の有限要素解析と損傷評価

船倉 一将*1・森 浩二*2・佐藤 裕一*3・長沼 一洋*4

要旨： ALC パネル帳壁を固定する鉄骨間柱の簡易柱脚固定工法について、鉄骨埋め込み部の挙動と損傷状況を検証するため、三次元有限要素解析を実施した。柱脚部の固定形式、埋め込み長さ、H 鋼寸法、載荷方向、コンクリート種類を変数とした 6 体の試験体を解析した。ひび割れ状況、間柱モーメント分布、鉄筋付着応力分布およびコンクリート損傷指標を比較し、1/100 程度の部材角においても許容応力レベルにとどまるものがある一方で、コンクリートにやや大きな損傷を生じ得る補強詳細が存在することを示した。

キーワード： コンクリート—鋼の接合, 付着, 損傷指標

1. はじめに

コンクリートと鋼の合成構造においては、接合部分の定着、付着およびその健全性と損傷状態の評価が常に課題となる。既存工法に見られる基本的な課題例として、鉄骨露出柱脚の美観向上のためアンカーとベースプレートを床スラブコンクリートに埋め込んだ際、ベースプレートの浮き上がりによるパンチング破壊を生じる問題^{1,2)}が挙げられる。応用的な事例としては、鉄骨埋込柱脚³⁾の埋め込み部の縮減・簡易化の試みがあり^{4,5)}、そこではコンクリート部の損傷・破壊機構の解明が極めて重要な課題となっている。今後も新たな合成構造の開発にともなってコンクリートと鋼の接合部の損傷評価の重要性が高まると予想される。錯綜する配筋や特殊セメント系材料を駆使した接合部の局所的な損傷状態を把握する上で、実験計測には限界があり、有限要素解析による詳細な解明が期待される。

そこで本論は、埋め込み長さの少ないコンクリート—鋼の接合の例として、鉄骨造建物の ALC パネル帳壁固定用の簡易 H 鋼間柱^{6,7)}を想定した試験体を解析する。間柱が負担する荷重は主として風荷重であり、設計上は間柱上下端ともピン固定と仮定されるが、現実には柱脚周辺に複雑な応力・変形状態が生じると考えられる。試験体の柱脚部には曲げよりもせん断力が卓越する条件を設定し、柱脚部の固定形式、埋め込み長さ、H 鋼寸法、載荷方向、コンクリート種類を変数とした 6 体の挙動と

損傷状態について三次元有限要素法による検証を試みる。

2. 実験方法と解析概要

2.1 試験体と載荷装置

解析対象とする 6 体の試験体を表-1 に、代表的な試験体の解析モデルを図-1 に示す。試験体のコンクリート部分は地中梁と床スラブを模している。試験体 No.1~5 は風荷重などの外力を受ける間柱を想定し、基礎梁部を固定、鉄骨柱頭をピン支持として間柱の中央に集中荷重を与える。このうち No.1 は通常の間柱柱脚で、基礎梁に定着した建て込み用アンカーにベースプレートを介して柱脚を固定している。No.2~5 は簡易間柱柱脚で、柱脚は基礎梁に定着させず、間柱のウェブを貫通するダウエル筋で床スラブコンクリートに定着させる構造である。なお、床スラブコンクリートの側方破壊防止のため、柱脚を囲む U 字筋を床スラブに定着させている。No.2 と No.3 は同一形状で、No.3 は後打ちの床スラブ部分にポリプロピレン繊維補強コンクリートを使用する。No.4 は間柱を広幅の H 鋼とし、No.5 は間柱柱脚の埋込み長さを 150mm と短くする。一方 No.6 は、地震時に強制変位を受ける間柱を想定し、鉄骨柱脚の曲げに対する変形性能を確認するための片持ち梁載荷を行う。載荷は弱軸方向とし、No.2 を 90° 回転させた配筋としている。

間柱の支点間距離 L (床スラブ上端から上部ピン支点まで) は 3200mm で、その中央において正負繰り返し荷

表-1 解析対象試験体一覧

No.	形式	床スラブ	間柱	埋め込み長さ (mm)	載荷形式	載荷方向	総自由度数
1	アンカー	普通	H-250x125x6x9	200	両端支持	強軸	62495
2	62165						
3	ダウエル筋	PP 繊維	H-250x250x9x14	150	片持ち梁	弱軸	61280
4		64025					
5		普通	H-250x125x6x9	200	46587		
6				200	62006		

*1 京都大学大学院 工学研究科修士課程 (学生会員)

*2 京都大学大学院 工学研究科博士課程 (正会員)

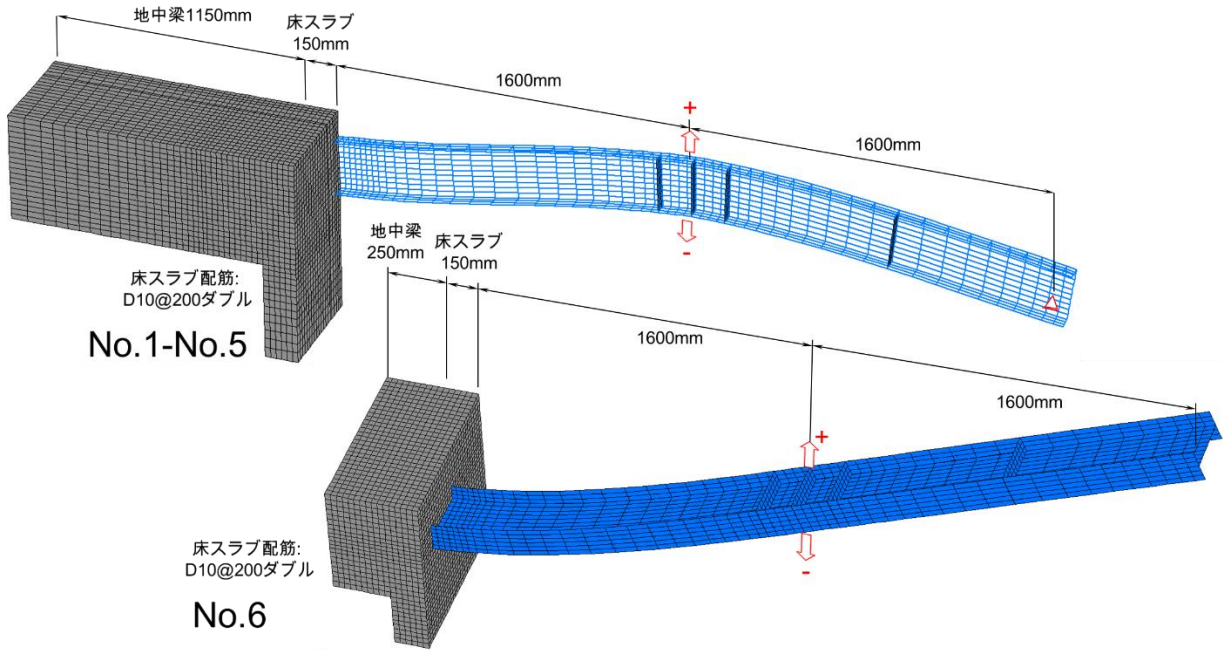
*3 京都大学大学院 工学研究科助教 博士 (工学) (正会員)

*4 日本大学 理工学部教授 博士 (工) (正会員)

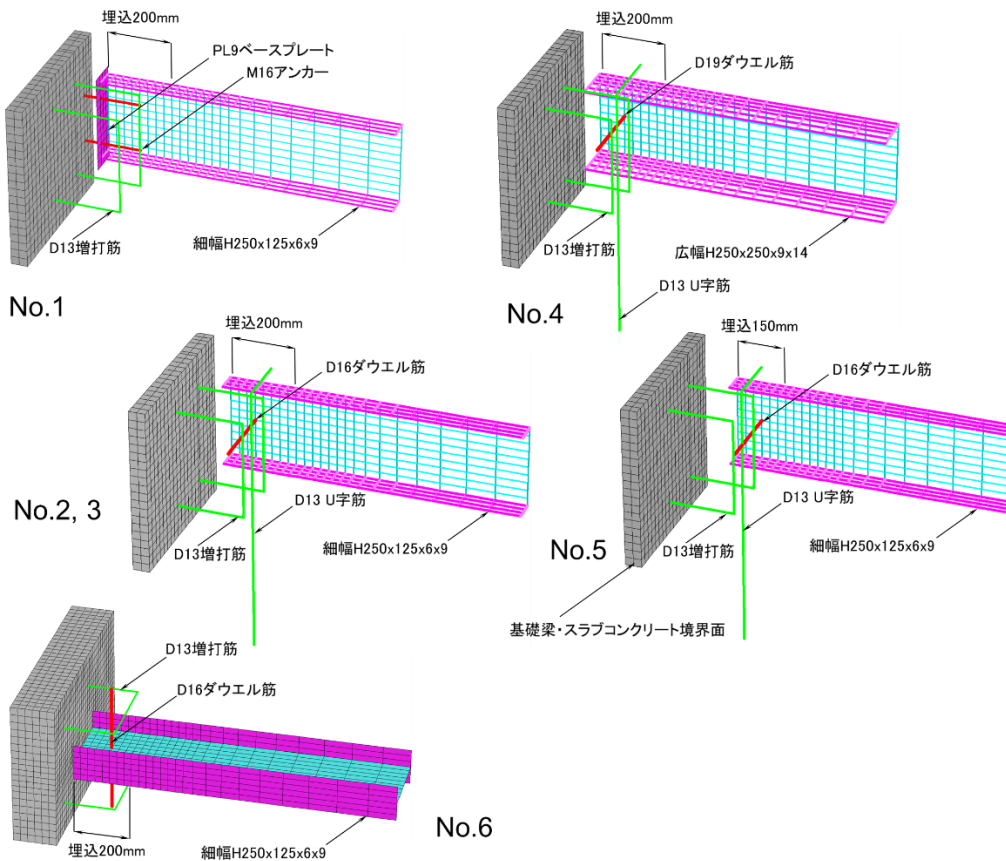
重を加える。荷重は図-1の上方向を正とする。No.1~5の荷重制御は、間柱の上下端をピンとした場合に中央が降伏する時の荷重 P_y に対して、 $P_y/3$ 、 $2P_y/3$ を正負3回、その後、間柱の支点間距離 L に対する部材中央変位 δ の比を基準として $\delta/L=1/400$ 、 $1/200$ 、 $1/100$ の正負3回の

繰返し荷重を行った。

No.6については柱頭を接合せず片持ち梁形式の荷重とし、部材角 $=\delta/(L/2)$ を基準として $1/400$ 、 $1/200$ 、 $1/100$ 、 $1/50$ の正負3回の繰返し荷重を行った。



(a) 解析モデル図(上: No. 1~5, 下: No. 6)



(b) 柱脚部モデル詳細図

図-1 解析モデル図

2.2 材料

地中梁は呼び強度 24 の普通コンクリート (F)、床スラブは呼び強度 18 の普通コンクリート (N) を使用した。No.3 の床スラブは呼び強度 18 の普通コンクリートにポリプロピレン短繊維を外割で 0.4vol.%混入した (PP)。表-2 にコンクリート、鉄筋、鉄骨およびポリプロピレン繊維の諸元を示す。

2.3 解析方法

間柱の定着・固定状況およびコンクリート部の損傷状況の把握を念頭に、試験体を三次元有限要素モデル化し、実験と同じ載荷履歴を与えて非線形解析を実施する。図-1(a)に示すようにコンクリート部は六面体要素で表現する。鉄骨については、解析プログラムの鋼材料履歴構成モデルが一軸応力下で高い精度を確保できることを考慮し、降伏の生じる No.1~5 は線材要素により表現した。一方、鉄骨が弾性範囲にとどまる No.6 は四辺形要素により表現した。No.1~5 は対称性を考慮して 1/2 モデルとしている。図-1(b)に柱脚付近の配筋モデルの詳細を示す。鉄骨とコンクリートの界面には接合要素を挿入し、剥離と滑りを考慮する。アンカー、ダウエル筋、U字筋には線材要素を用い、やはりコンクリート界面に接合要

表-2 材料諸元
(a)コンクリート

	σ_B (N/mm ²)	σ_t (N/mm ²)	ϵ_u ($\times 10^{-3}$)	E_c ($\times 10^4$ N/mm ²)
F	41.9	3.68	2.09	3.16
N	31.9	2.95	2.04	2.84
PP	31.9	2.96	2.16	2.66

F: 基礎梁, N: 床スラブ, PP: 床スラブ(No.3)

(b)鉄筋

	σ_y (N/mm ²)	σ_u (N/mm ²)	E_s ($\times 10^5$ N/mm ²)
D10	368	509	1.80
D13	357	493	1.75
D16	337	483	1.85
D19	379	549	1.85
M16	402	568	2.50

D10: スラブ筋, D13: 増打ち・軸補強筋, U字筋, D16: ダウエル筋, D19: ダウエル筋 (No.4), M16: アンカー(弾性係数 E_s は径 16mm と仮定したときの値)

(c)鉄骨

	部位	σ_y (N/mm ²)	σ_u (N/mm ²)	E_s ($\times 10^5$ N/mm ²)
H-250x125	W	321	453	2.05
	F	311	447	2.03
H-250x250	W	341	477	1.87
	F	306	471	2.10

W: ウェブ, F: フランジ

(d)ポリプロピレン繊維

長さ (mm)	密度 (g/cm ³)	径 (mm)	引張 強度 (N/mm ²)	断面	表面加工
30	0.91	0.7	500	矩形	エンボス

素を挿入して滑りを考慮する。これ以外の鉄筋は六面体コンクリート要素内の分散埋め込み鉄筋として考慮する。表-1 に各モデルの総自由度数を示す。総解析ステップ数は、No.1~5 が 1524, No.6 が 1440 である。鋼材、コンクリートおよび PP 繊維補強コンクリートの材料構成モデルは、筆者らの既往研究⁸⁾と同一のものを使用する。コンクリートの圧縮側応力~ひずみ関係は修正 Ahmad 式⁹⁾、引張側はひび割れ発生までは線形とし、ひび割れ発生後はテンションステイフニング特性¹⁰⁾、せん断伝達特性¹¹⁾、およびコンクリートの圧縮劣化特性¹¹⁾を考慮した。鋼材の応力~ひずみ関係は Bilinear 型とし、降伏後のひずみ硬化率を 0.01 とした。履歴特性には移動硬化則を適用した。ひび割れは非直交分散型とし、付着応力分布を考慮した擬似離散型ひび割れモデル^{12), 13)}を適用した。ひび割れの最小交差角は 20 度とした¹¹⁾。鉄骨とコンクリートの付着応力~滑り関係はバイリニアで表現し、初期勾配を 5.2×10^{-4} N/mm³、最大付着強度を 5.2N/mm²とした。

3. 解析結果

3.1 荷重-変形関係

各試験体の荷重-変形関係を図-2 に示す。それぞれのモデルについて、上段に実験結果、下段に解析結果を掲載した。両端支持強軸載荷の試験体 (No.1~5) では、いずれも中央たわみが 16mm (部材角 1/200 相当) を超えたあたりから剛性が低下するが、耐力低下は見られず、変形とともに緩やかに荷重は増大している。間柱中央の鉄骨には残留変形が見られ、鉄骨が曲げ降伏していたと考えられる。解析は全般に実験で見られる部材角 1/200 のサイクルでの履歴の膨らみの再現性がやや不十分であること、荷重を最大 21% 過大評価していることのほかは、載荷勾配、除荷勾配、各サイクル荷重ともに実験結果をある程度再現している。

3.2 ひび割れ状況

試験体 No.1~5 のたわみ 1/200 時のひび割れ状況、および No.6 の変形角 1/50 時のひび割れ状況を図-3 に実験と比較する。各図左が実験、右が解析である。上下フランジ両端付近のひび割れ方向は再現できているが、実験結果よりもひび割れの本数は多くなり、鉄骨の弱軸方向と平行なひび割れは実験よりも短くなった。また、実験ではあまり明瞭に見られなかった鉄骨強軸方向に平行なひび割れが見られる。一方、コンクリート部分側面の地中梁と床スラブの打ち継ぎ面に生じたひび割れは比較的实验結果をよく再現している。

3.3 曲げモーメント分布

両端支持の試験体 No.1~5 について、各載荷サイクル毎の鉄骨曲げモーメント分布を図-4 に示す。図中、横軸

は間柱鉄骨の位置を表し、原点が床スラブコンクリート表面、正側が載荷点側である。全般に部材角 1/200 まではコンクリート表面位置（横軸座標 0 の位置）のモーメントが最大になり、効果的な定着が実現していることが

分かる。一方、部材角 1/100 では表面以下のコンクリート埋め込み部のモーメント分布が一定になる傾向が見られる。これは、鉄骨とコンクリートの界面の付着が失われ、応力伝達機構が喪失しつつあることを示している。

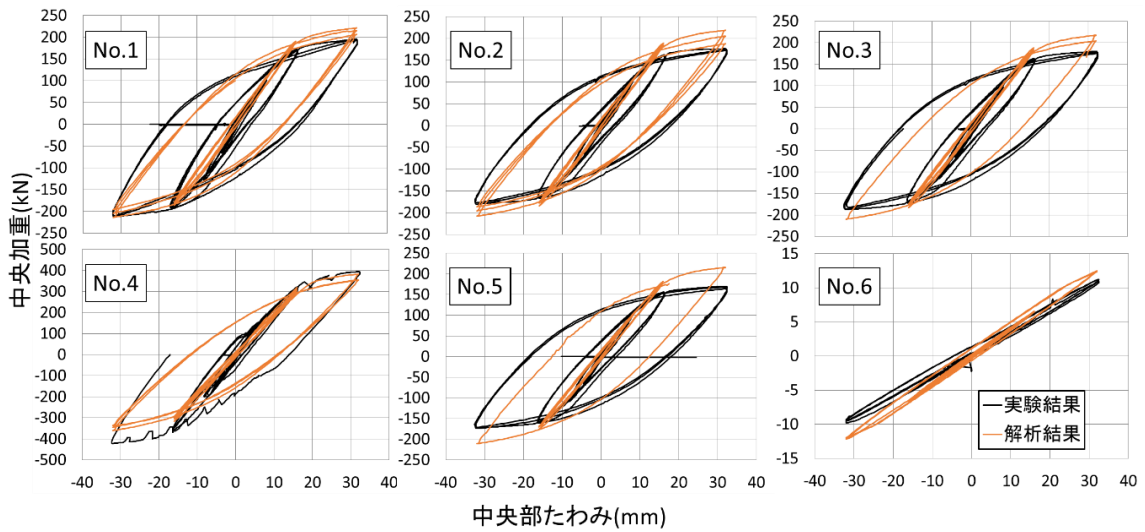


図-2 荷重—中央たわみ関係

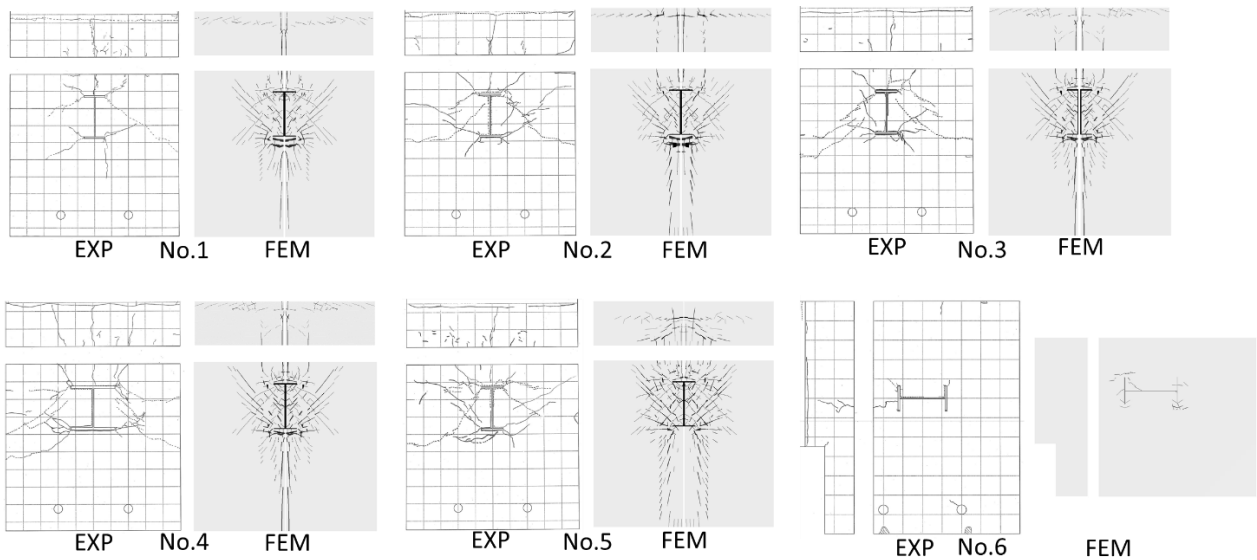


図-3 ひび割れ図（最終時、左:実験結果 右:解析結果）

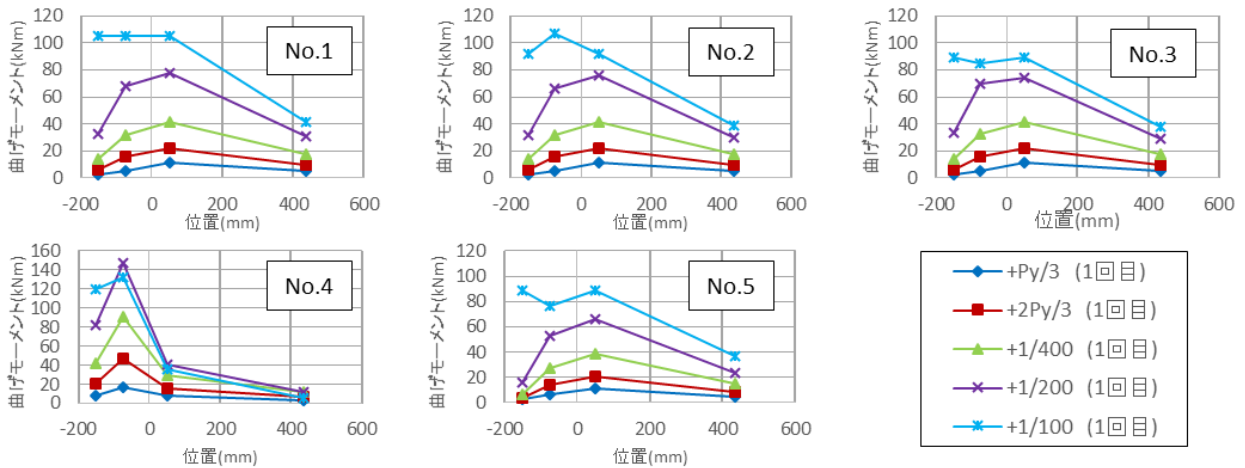


図-4 曲げモーメント分布

3.4 補強鉄筋の付着応力

部材角 1/100 時における U 字型補強筋およびアンカー筋 (No.1 のみ) の付着応力分布を図-5 に示す。図中 X 軸方向正の応力(引き抜き方向)を Y 軸方向正で表記している。No.4 で最大値 3.10kN, 最小値-2.84kN となった。No.1,4,5 で増し打ち筋の付着応力が 0 になっている箇所が見られる。これは、アンカーなしダウエル筋による柱脚の固定度が高い部分である。一方 No.2,3 においては他のモデルよりも増し打ち筋にかかる応力が高く、ダウエル筋の寄与が小さかったと考えられる。

4. コンクリートの損傷

4.1 赤井らによる損傷評価指標の概要

本論が検討対象とする間柱は鉄骨、鉄筋を含む鋼部分にそれほど大きな塑性変形が生じず、その健全性はほとんどコンクリート部分の健全性に依存する。コンクリートの損傷状態を一意に評価する手法として、赤井らが塑性ひずみエネルギーに基づく損傷指標 $Di(c)$ を提案しており¹⁴⁾、本節ではこの指標に基づく評価を試みる(図-6)。

損傷指標 $Di(c)$ は、各要素の全ひずみエネルギーから弾性エネルギーを差し引いたものを、最小主ひずみの値によって重み付き平均することにより求められる。圧縮強度到達時の塑性ひずみで除して基準化しており、 $Di(c) = 1.0$ となった時、部材の主たる抵抗機構を構成するコンクリート要素が概ね圧壊に達することを意味する。

4.2 損傷評価指標—中央たわみ関係

各サイクル時のピーク時における部材角の絶対値と損傷指標の値の関係を図-7 に示す。損傷指標値の大きさを考慮し、上段に No.1,3,6, 下段に No.2,4,5 を掲載した。 $Di(c)$ が 0.05 以下の場合はおおむね長期許容応力以内の状態にとどまっていることを意味し、いずれの試験体も部材角 1/200 まではこの範囲に収まっていることが分かる。一方、これ以上の部材角では No.6 を除いて $Di(c)$ がかなり増大し、埋め込み長さの短い No.5 は 0.8 近くに達している。ただし、すべての試験体で圧壊を意味する 1.0 を超えるものは見られず、本論の実験・解析の範囲ではコンクリート部の重大な損傷を避けることができている。

5. まとめ

簡易鉄骨間柱の埋め込み部の挙動と損傷状況を把握するため三次元有限要素解析を実施した。本論より得た知見を以下に示す。

- (1) 用いた解析モデルは、部材角 1/200 のサイクルでの履歴の膨らみの再現性がやや不十分であること、荷重を最大 21% 過大評価していることのほかは、載荷勾配、除荷勾配、各サイクル荷重ともに実験結果をある程度再現した。
- (2) ひび割れに関しては、一部実験と異なる形状が見られたが、コンクリート部分側面の地中梁と床スラブの打ち継ぎ面に生じたひび割れは比較的实验結果を再現している。

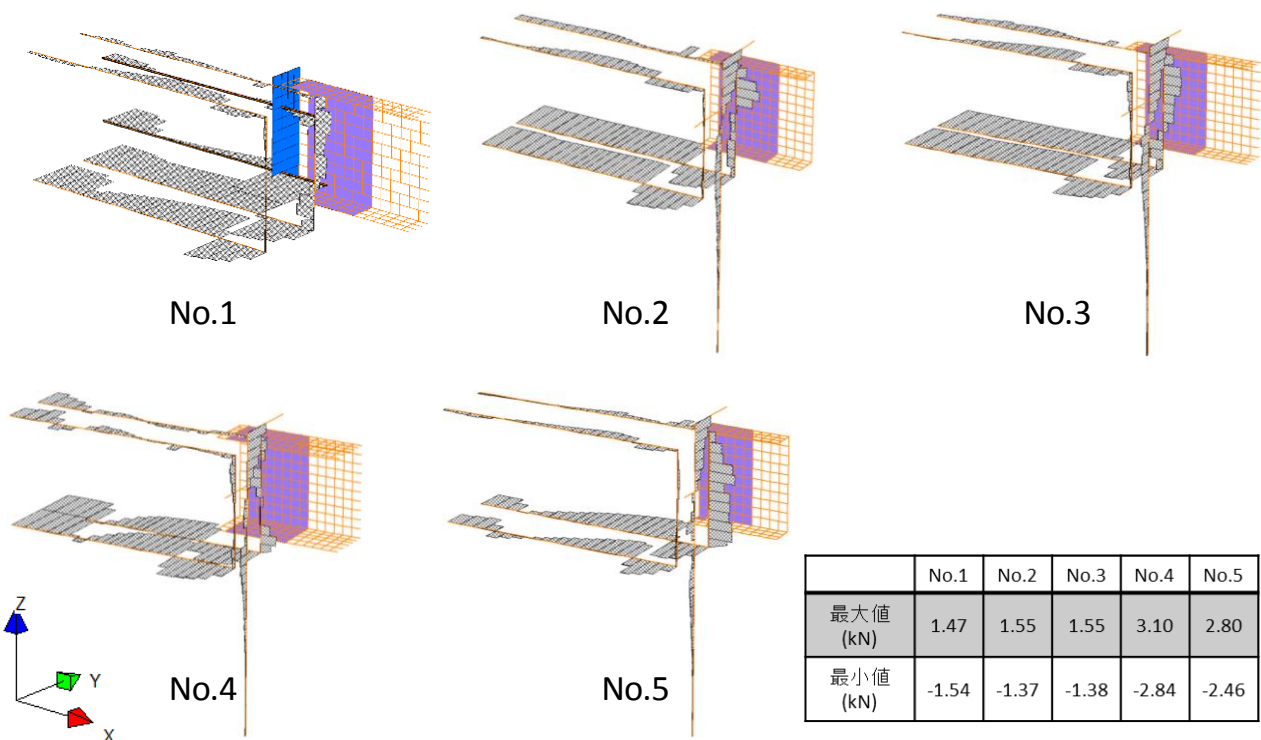


図-5 補強鉄筋の付着応力

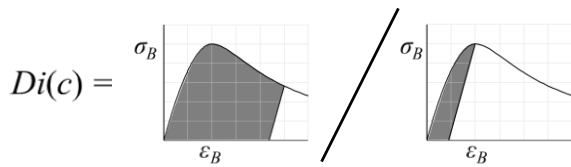


図-6 赤井らによる損傷評価指標の概要

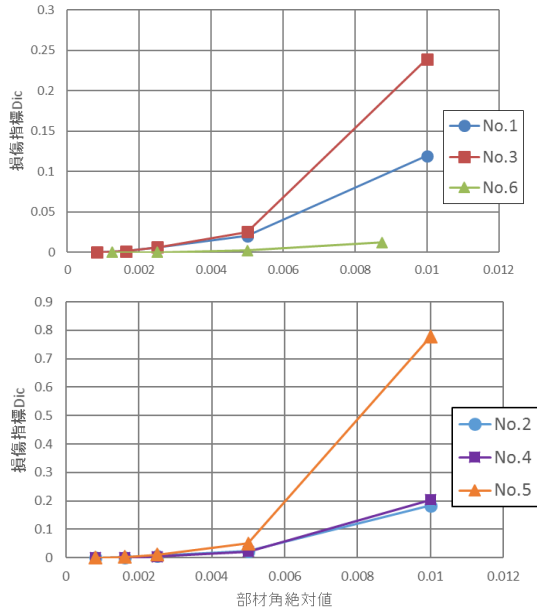


図-7 損傷指標—中央たわみ関係

- (3) 鉄骨の曲げモーメント分布図より、部材角 1/200 まではコンクリートへの効果的な定着がなされていることが確認できた。
- (4) 損傷指標を用いてコンクリートの損傷評価を試みたところ、本論の実験・解析の範囲では、重大な損傷は避けられていることが確認できた。

謝辞

本研究の実施に当たり、京都大学工学研究科・金子生教授に多大な支援をいただいた。ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) 山本遼太, 倉田真宏, 長江拓也, 寺田岳彦, 吹田啓一郎, 中島正愛: 繰返し載荷実験と最大耐力評価法, 浅い埋込み柱脚の弾塑性挙動と保有性能その 1, 日本建築学会構造系論文集, Vol.72, No.613, pp.147-153, 2007-05.
- 2) 植村具民, 山本遼太, 長江拓也, 寺田岳彦, 吹田啓一郎, 中島正愛: 鉄筋補強柱脚実験と塑性変形能力, 浅い埋込み柱脚の弾塑性挙動と保有性能その 2, 日本建築学会構造系論文集, Vol.73, No.623, pp.111-117, 2008-01.

- 3) 日本建築学会: 鋼構造接合部設計指針, 2012.
- 4) 金子佳生, 三橋博三, 大作亮平: 鋼繊維補強セメント系複合材料を用いた鋼構造柱脚とその変形特性, せん断破壊力学モデルを用いた接合部の変形評価, 日本建築学会構造系論文集, Vol.71, No.609, pp.181-188, 2006-11.
- 5) 金田学, 佐藤裕一, 金子佳生: スチールチップ補強セメント系複合材料による露出柱脚の耐震補強, 鋼構造年次論文報告集, Vol. 19, pp. 155-162, 2011.
- 6) 日本建築学会: 建築工事標準仕様書・同解説 (JASS 21 2005) ALC パネル工事, 2005.
- 7) 山口克彦, 佐藤尚隆, 飛田喜則: 簡易間柱柱脚工法の開発研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-1, pp.1149-1150, 2016-08.
- 8) 佐藤裕一, 森浩二, 長沼一洋, 金子佳生: 低速衝撃を受ける RC 架構の損傷と残存性能の有限要素解析, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.2, pp.613-618, 2017.
- 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) 長沼一洋, 山口恒雄: 面内せん断応力下におけるテンションスティフニング特性のモデル化, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 2, pp.649-650, 1990.10
- 11) 長沼一洋: 平面応力場における鉄筋コンクリート板の非線形解析モデル, 日本建築学会構造系論文集, 第 421 号, pp.39-48, 1991.3
- 12) Naganuma, K. et al.: Simulation of nonlinear dynamic response of reinforced concrete scaled model using three-dimensional finite element method, Proceedings of 13th World Conference on Earthquake Engineering (WCEE 13), Paper No.586, 2004
- 13) Sato, Y. and Naganuma, K.: Discrete-Like Crack Simulation of Reinforced Concrete Incorporated with Analytical Solution of Cyclic Bond Model, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.140, Issue 3, 2014.3; DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000864.
- 14) 赤井 冬来, 田嶋 和樹, 長沼 一洋, 佐藤 裕一: 塑性ひずみエネルギーに基づくコンクリート構造物の損傷指標」日本建築学会構造系論文集, 第 742 号, pp.1925-1933, 2017.12.