

高変動軸力を受ける RC 造ト形柱梁接合部の損傷状況が有効強度に及ぼす影響に関する解析的研究

正会員 ○趙 能 1* 同 高嶋 勇太 1* 同 鈴木 裕介 2**
同 前田 匡樹 3*** 同 谷口 与史也 4****

柱梁接合部 接合部降伏 軸崩壊
有効強度係数 強度低下率 β_j FEM

表-1 試験体諸元

実験試験体	試験体名	T12-20T6C5	T12-30T6C5	T15-20T6C5	T15-30T6C5
	破壊モード	軸崩壊	軸崩壊	軸崩壊	梁曲げ降伏
柱	階高 (mm) × スパン (mm)	1350 × 1850			
	幅 (mm) × せい (mm)	250 × 250			
	配筋	12-D16 (SD345)		12-D16 (SD490)	
	降伏強度 (MPa)	395	393	544	530.8
	ヤング係数 (GPa)	193	202	187	194
	帯筋	2-D6 @ 50 (SD295)			
梁	階高 (mm) × せい (mm)	225 × 275			
	配筋	5-D13 (SD490)			
	降伏強度 (MPa)	537	534.9	529	534.9
	ヤング係数 (GPa)	189	194	179	194
	あばら筋	2-D6 @ 50 (SD295)			
	降伏強度 (MPa)	434	417	409	417
接合部	横補強筋	2-D6 3set (SD295)		2-D6 3set (SD295)	
	降伏強度 (MPa)	434	417	409	417
	ヤング係数 (GPa)	188	202	207	202
コンクリート	圧縮強度 (MPa)	64.9	94.9	65	93.3
	ヤング係数 (GPa)	32.8	39.7	33.5	39.2
主要パラメータ					
接合部補強比 T_h/T_{bv}		0.206	0.306	0.206	0.306
接合部拘束効果 $P_u \sigma_w / \sigma_s$		0.0252	0.0264	0.0251	0.0268
柱梁強度比	正載荷側	4.16	5.53	4.51	5.59
	負載荷側	1.27	1.24	1.54	1.57
下柱軸力比	正載荷側	0.49	0.36	0.47	0.36
	負載荷側	-0.61	-0.61	-0.62	-0.61
β_j	正載荷側	1	1.79	1	1.81
	負載荷側	0.86	0.93	0.92	1.01

1. はじめに

高層 RC 造建物における下層部のト形柱梁接合部では、地震時に高変動軸力が作用し、載荷方向によって柱梁強度比が大きく変動する。そのため、引張軸力が作用する側（以下、負側）で接合部降伏が生じその損傷が大きくなると圧縮軸力が作用する側（以下、正側）では軸崩壊が発生することが報告されている¹⁾⁻³⁾。この軸崩壊の発生には、負側での接合部の損傷によるコンクリートの有効強度の低下が影響するとして検討されている⁴⁾。

本研究では高変動軸力を受けた実験試験体¹⁾⁻³⁾を解析対象とした FEM モデルを作成し、実験及び解析の破壊モードについて比較検討する。次に、接合部の変形や各設計因子が接合部降伏後の軸崩壊（コンクリート有効強度係数 a_2 ）に及ぼす影響について解析的に比較検討する。

2. 解析概要

2.1 解析モデルの概要

表-1 に解析対象試験体の諸元を示す。文献¹⁾⁻³⁾における実験試験体計 12 体のうち負側の強度低下率 β_j が 0.85 ~ 1.00 程度の 4 体を解析モデルとして計画した。これら 4 体の経験変形角 Re に対する接合部の残存軸耐力を評価するため、 $Re = 1, 2, 3, 4\%$ それぞれのときの接合部内コンクリートの有効強度係数 a_2 について検討した。各試験体名の詳細は文献¹⁾⁻³⁾を参照された。要素分割及び境界条件を図-1 に示す。

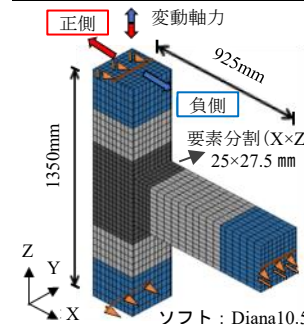


図-1 解析モデル

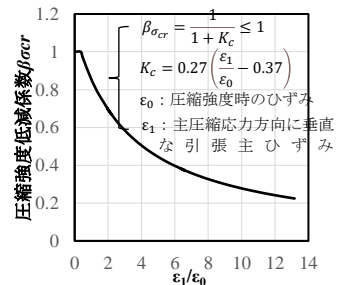


図-2

Vecchio and Collins モデル

2.2 材料構成則

コンクリートには、圧縮挙動はコンクリート標準示方書モデル⁶⁾を用い、横補強筋拘束効果による圧縮強度の上昇及び軟化域勾配の上昇は修正 Kent-ParK 式⁷⁾により評価する。また、図-2 に示す Vecchio and Collins のモデル⁸⁾により横ひび割れによる圧縮強度の低減を評価する。引張側の上昇域は線形弾性、下降域を Hordijk モデル⁹⁾により評価する。鉄筋は一軸非線形の bi-linear とし、降伏後の剛性は初期剛性の 1/100 とした。柱、梁主筋とコンクリートとの付着を CEB-FIP モデル¹⁰⁾でモデル化する。

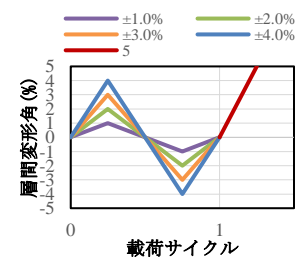


図-3 荷重スケジュール

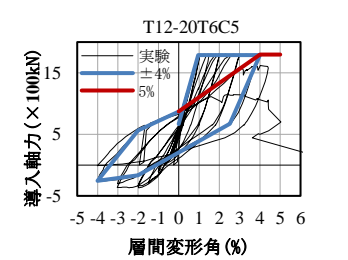


図-4 導入軸力

3. 解析モデルの妥当性の検討

3.1 荷重方法

図-3 に解析の荷重スケジュールを示す。実験¹⁾⁻³⁾においては、 $R = \pm 1/800 \sim +1/20$ までの漸増繰返し荷重である。

図-4 に導入軸力を示す。図中の黒

図-3 荷重スケジュール 図-4 導入軸力

解析では、実験と同様とする場合、次に記す変動軸力の入力データや、解析時間が膨大となることから、正負 1 サイクルを実施したのち $R = +1/20$ rad. まで柱頭部 X 軸方向に強制変位を与えた。正負 1 サイクルの荷重レベルは図中に示す 4 ケースとした。図-4 に導入軸力を示す。図中の黒

線は実験における導入軸力と層間変形角の関係である。解析では、実験の導入軸力を可能な限りかつ簡易に入力するため、黒線を多直線で近似（青及び赤線）し、水平強制変形の増分に対応する軸力を導入した。

3.2 荷重変形関係及び破壊性状

本節では、T12-20T6C5 試験体の経験層間変形角 $R_e=4\%$ モデルを例に、解析結果と実験結果を比較する。図-5 に荷重変形関係及び破壊性状を示す。正側と負側の最大耐力、及び初期剛性（正側）が同程度であることを確認した。 $+4\%$ の除荷から -4% 載荷時にかけて解析結果の剛性が実験に対し過大であるのは、前述の通り、変動軸力の入力の簡略化や解析時間短縮のため小変形時の繰返し載荷を除いたためと考えられる。 $\pm 4\%$ の後の正側載荷において、 $R=+4.5\%$ に耐力が急激に低下、実験と同様に軸崩壊したことを確認した。破壊性状では、 $R=-4\%$ に、実験と同様に接合部斜め中央部の損傷集中が確認でき、軸崩壊に至った経緯も実験結果と同様に負側の損傷が接合部の有効強度に影響したためと考えられる。

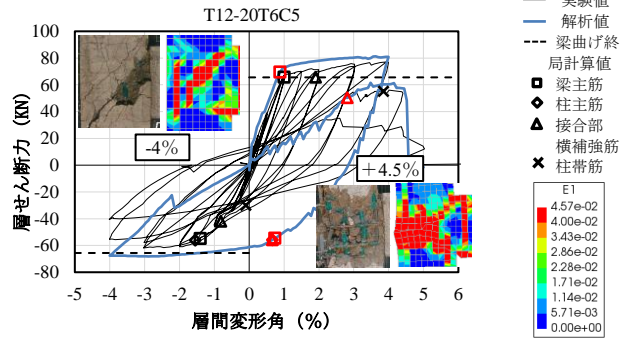


図-5 荷重変形関係及び破壊性状

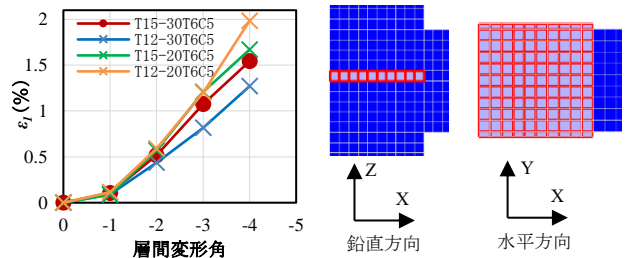


図-6 層間変形角- ϵ_1 関係 図-7 ϵ_1 の要素位置

4. 有効強度係数の検討

図-6 に経験層間変形に対する X 方向のひずみ ϵ_1 関係図を示す。 ϵ_1 は図-7 に示す接合部中央の要素の X 方向ひずみ度の平均値である。載荷が進むにつれ、接合部損傷が大きくなるのが分かる。本解析に適用している Vecchio and Collins モデルにより、 ϵ_1 を有効強度係数 a_2 に換算した結果を図-8 に示す。 R_e が増加するにつれて a_2 は小さくなり、特に、2%時に急激に低下することを確認した。以上、4つのモデルに対し、 R_e に対する a_2 の推移を定量的に評価した。次に、各設計因子と a_2 の関係について、実験値¹⁾と比較し整理した。図-9 より β_j と a_2 に明確な相関関係は見られなかった。 β_j の範囲が狭く評価に表れにくかったと考える。図-10、図-11 より、 a_2 は接合部拘束効果と接合部補強比にそれぞれ強く相関していることが分かった。

図-8 $R_e - a_2$ 関係
 図-9 $\beta_j - a_2$ 関係
 図-10 $P_w \sigma_{wy} / \sigma_B - a_2$ 関係
 図-11 $T_h / T_{by} - a_2$ 関係

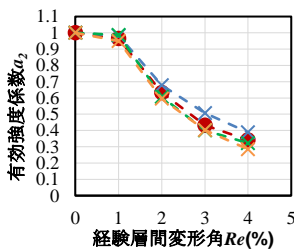


図-8 $R_e - a_2$ 関係

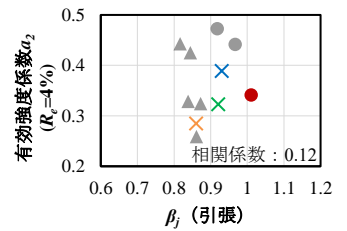


図-9 $\beta_j - a_2$ 関係

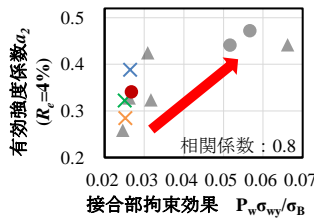


図-10 $P_w \sigma_{wy} / \sigma_B - a_2$ 関係

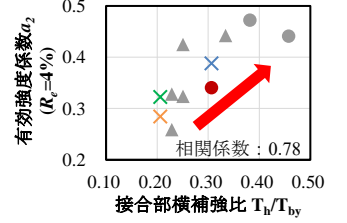


図-11 $T_h / T_{by} - a_2$ 関係

5. まとめ

- (1) 高変動軸力を受けるト形柱梁接合部実験試験体を対象として作った FEM モデルの解析結果により、最大耐力や破壊モードが実験と同程度であることを示し、実験を再現できることを示した。
- (2) 強度低下率 β_j と経験層間変形角 R_e を変数として作った 16 体モデルの解析結果により、各経験層間変形角と有効強度係数 a_2 の関係を明らかにした。
- (3) 本検討の範囲内では、有効強度係数 a_2 が接合部横補強筋と相関が強いことを明らかにした。

謝辞

本研究は、(一社)ニューテック研究会の「機械式定着工法研究委員会」の研究の一部として実施したものである。ここに記して、関係各位に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 村上久志, 他: 接合部横補強筋及び軸力が RC 造ト形柱梁接合部の構造性能に及ぼす影響に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.2, pp.205-210, 2017
- 2) 村上久志, 他: 高変動軸力を受ける RC 造ト形柱梁接合部の破壊性状と構造性能, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.2, pp.223-228, 2018
- 3) 西田智康, 他: 変動軸力の大きさが接合部降伏するト形柱梁接合部の破壊性状及び構造性能に与える影響に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.2, pp.253-258, 2019
- 4) 萩原大樹, 他: 高変動軸力を受ける RC 造ト形柱梁接合部の軸崩壊に影響する因子の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.44, No.2, pp.469-474, 2022
- 5) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造体有水平耐力計算規程・同解説, 2021
- 6) Mackawa, K., Okamura, H., and Pinanmas, A. Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete. Spon Press, 2003
- 7) B. D. Scott, R. Park, M. J. N. Priestley: Stress-Strain Behavior of Concrete Confined by Overlapping Hoops at Low and High Strain Rates, Journal Proceedings, Vol.79, No.1, pp.13-27, 1982
- 8) F. J. Vecchio, M. P. Collins: The modified compression field theory for reinforced concrete elements subjected to shear, ACI Journal, No.83, No.22, pp.219-231, 1986
- 9) D. A. Hordijk: Local Approach to Fatigue of Concrete, PhD thesis, Delft University of Technology, 1991
- 10) CEB-FIP MODEL CODE 2010 DESIGN CODE, Tomas Telford Service Ltd, Baulay, T.
- 11) Moment Redistribution in Continuous Beam of Earthquake Resistant Multistory Reinforced Concrete Frames, Bulletin of New Zealand National Society for Engineering, Vol.9, No.4, pp.205-212, 1976
- 12) 萩原大樹, 前田匡樹, 鈴木裕介, 小池拓矢: 高変動軸力が作用する RC 造ト形柱梁接合部の曲げ降伏後の軸崩壊発生条件に関する検討, コンクリート工学年次論文集, 2023 (印刷中)

*大阪公立大学大学院 修士課程

**大阪公立大学大学院 准教授・博士 (工学)

***東北大学大学院 教授・博士 (工学)

****大阪公立大学大学院 教授・博士 (工学)

* Graduate student, Osaka Metropolitan University

** Associate Professor, Osaka Metropolitan University, Dr.Eng.

*** Professor, Tohoku University, Dr.Eng.

**** Professor, Osaka Metropolitan University, Dr.Eng.