

論文 打継目およびブリーディングがRC 高架橋柱の耐震性能に 及ぼす影響についての解析検討

宮城敏明*¹・渡邊弘子*¹・玉井真一*²・岡本 大*³

要旨：コンクリートの打継目およびブリーディングが鉄道高架橋柱の耐震性能に及ぼす影響を確認することを目的として実大交番繰返し載荷実験および帯筋の拘束効果を考慮した非線形有限要素解析を行った。実験結果より、打継目およびブリーディングの存在は柱部材の耐震性能に影響を与え、また打継目が存在する場合でも帯筋量を増加させることにより、靱性率を大幅に改善できることが確認できた。また、解析結果は荷重変位関係において実験値とよく一致し、水平荷重の低下時における各段の帯筋ひずみレベルに着目して分析することにより、RC柱の耐震性能を評価できることがわかった。

キーワード：靱性、耐震性能、有限要素解析

1. はじめに

阪神大震災では、鉄道高架橋の柱上端部において多くの被災状況が観察された。その被災原因は、コンクリートの水平打継目の存在およびブリーディングの影響による柱上部のコンクリート強度の低下が考えられた。そこで、打継目およびブリーディングがRC 高架橋柱の耐震性能に及ぼす影響を確認することを目的として、実大サイズの交番繰返し載荷実験を行った。さらに、解析により既設RC 高架橋の耐震性能を評価する目的で、二次元非線形有限要素法による検討を行った。特に、解析においては復旧仕様[1]に示されているコンクリートの応力ひずみ関係を用いて帯筋の拘束効果を考慮した。実験および解析のパラメータは、打継目の有無、コンクリートの打設方向および帯筋量である。

2. 実験概要

2. 1 実験方法

ラーメン高架橋の柱には地震時に上下逆対称の曲げモーメントが作用すると考えられるが、実験では、柱高さの1/2を試験区間として取り出したカンチレバー型試験体に水平力を載荷した。

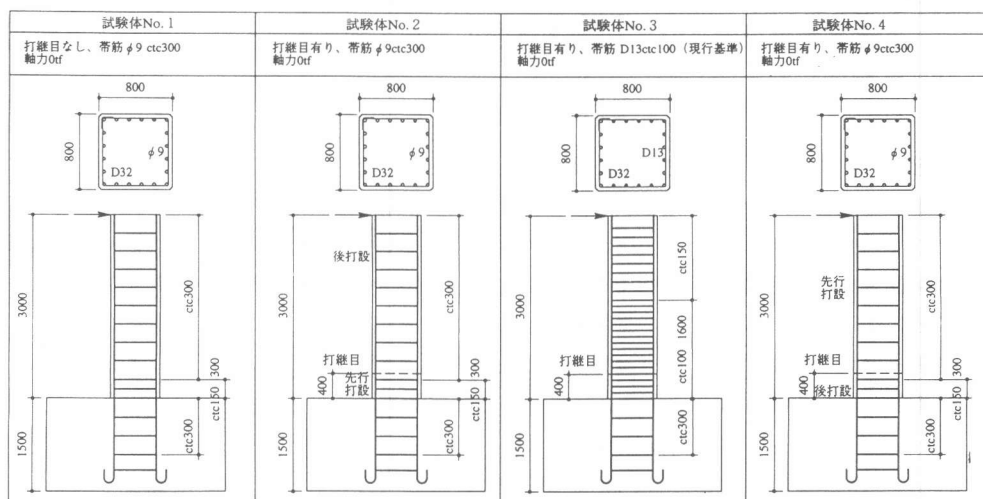
2. 2 実験ケース

実験パラメータとして、打継目の有無、コンクリートの打設方向および帯筋量（せん断補強筋量）を考慮し、図-1に示すNo.1～No.4の4ケースの実験を行った。No.1は、柱に打継目を設けない一体打ちコンクリートである。No.2～No.4は、柱下端から400mmの高さに打継目を設けた。No.1、No.2およびNo.4の帯筋は $\phi 9$ が300mm（せん断補強筋比0.053%）ピッチに対して、No.3の帯筋はD13が100mmピッチ（せん断補強筋比0.317%）に配筋している。No.3のせん断補強筋比は現行の鉄道構造物等設計標準[2]に示される靱性率4以上を確保するよう決められた基準を満足するよう決定している。No.4は試験体の柱部分をできるだけ実構造物の柱上部の打継ぎ部分に近い状態となるよう、柱コンクリートを逆打ちして製作した試験体である。

*1 東急建設（株）技術本部技術研究所土木構造研究室（正会員）

*2 東急建設（株）技術本部土木技術部技術第1課、工修（正会員）

*3 東急建設（株）技術本部技術研究所土木構造研究室、工修（正会員）



図－1 試験体寸法・配筋図

2. 3 柱高さ方向でのコンクリート強度分布

ブリーディングによる強度低下を確認するため、No. 1 および No. 4 の高さ方向のコンクリートの強度分布をシュミットハンマーにより測定した。シュミットハンマー試験にあたっては、推定強度の精度を高めるため、事前に同サイズの試験体を別に作製しコアを採取して強度試験を行った。その結果、ブリーディングによるコンクリート強度低下の割合は 1 割（No. 1）から 3 割（No. 4）程度であった。

2. 4 載荷方法および計測項目

試験体は、フーチング部を反力床に P C 鋼棒で固定した。水平力はサーボ制御の 150tf アクチュエータにより載荷し、曲げ降伏前や除荷時には荷重制御、曲げ降伏後には変位制御した。

試験体への載荷は、定変位正負交番繰返して行った。

載荷サイクルは、まず鉄筋応力度が計算上 200N/mm²に達するまでを正負 1 サイクル載荷した。次に、主鉄筋のひずみをモニターしながら荷重制御で正方向へ載荷し、主鉄筋が降伏した時点を降伏荷重 P_y 、降伏変位 δ_y と定義した。

降伏荷重以降は変位制御とし、 $\pm 1 \delta_y, \pm 2 \delta_y, \pm 3 \delta_y \cdots$ までの載荷を正負 3 回ずつ繰り返した。載荷終了は、最大耐力から負勾配領域に入り復元力が降伏耐力の 80% 以下に低下するまでとした。

計測は、躯体水平変位（加力高さ、柱基部）、柱中心線上の鉛直変位、柱脚部主筋の抜け出し、曲率分布、主筋ひずみおよび帯筋ひずみについて行った。

3. 解析概要

3. 1 解析モデル

解析モデルは、図－2 に示すような二次元平面応力問題とし、柱の奥行きを板厚として考慮した。コンクリートは 8 節点アイソパラメトリック要素、主筋および帯筋は埋込鉄筋としてコンクリート中にバー要素として設定した。主筋の抜け出しは今回のモデルでは考慮していない。No. 2 ～ No. 4 は打継目を考慮して厚さ 40mm の要素を設定した。特に、No. 4 はブリーディングの影響を考慮するため柱上部と下部とで材料定数を変えた。

3. 2 材料定数および解析条件

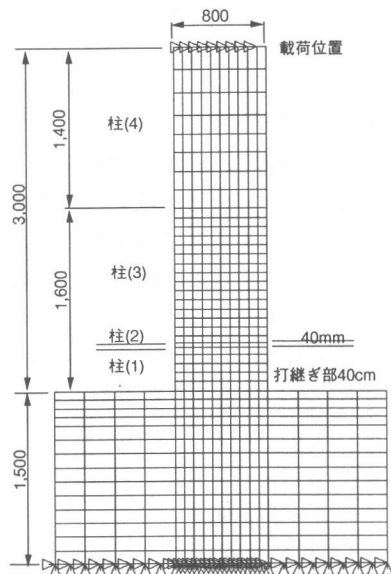
解析ケースは実験と同様4 ケースとした。表－1 に解析に用いた鉄筋の材料定数を、表－2 にコンクリートの材料定数を示す。鉄筋強度、コンクリート圧縮強度および弾性係数は材料試験により測定された値を用いた。No. 4 の柱(3)におけるコンクリートの圧縮強度は、ブリーディングによるコンクリート強度低下を考慮して、柱(4)の圧縮強度の80%とした。

コンクリートの引張強度 f_t は圧縮強度 f'_c より $f_t=0.23 \times f'_c^{2/3}$ [3]で算定し、引張応力のカットオフ値とした。特に、打継目における引張強度は一般部の45%と仮定した[4]。

コンクリートの破壊基準として、Drucker-Prager型を用いた。粘着力 c は、 $c=f'_c \times (1-\sin \phi)/2 \cos \phi$ と設定し、内部摩擦角 ϕ を30度と仮定した。

クラックのモデルは分散クラックモデルを採用した。引張主応力がコンクリートの引張強度を超過したらクラックが発生すると仮定し、クラック発生後のコンクリートのせん断剛性を初期剛性の10%と仮定した。引張側の終局ひずみ ϵ_u は、 $\epsilon_u = 2 Gf/(f_t \times h)$ で設定した[5]。ここで、 Gf は破壊エネルギー、 h はクラックバンド幅（最小メッシュ幅）である。

特に、コンクリートの圧縮側応力ひずみ関係においては、図－3 に示すような復旧仕様[1]の基準を用いて帯筋による拘束効果を考慮した。鉄筋の応力ひずみ関係はバイリニアと仮定し、Von Mises型の破壊基準を用いた。



図－2 解析モデル

表－1 鉄筋材料定数

鉄筋種類	降伏強度 N/mm ²	弾性係数 x10 ⁵ N/mm ²	ポアソン比 ν
主鉄筋 D32	313	2.02	0.3
帯鉄筋 $\phi 9$	344	2.06	0.3
帯鉄筋 D13	351	1.85	0.3

表－2 コンクリート材料定数

ケース名	柱位置	圧縮強度 N/mm ²	引張強度 N/mm ²	弾性係数 x10 ⁴ N/mm ²	粘着力 N/mm ²	引張側の 終局ひずみ	備考
No.1	柱(1)	24.5	1.90	2.28	7.07	0.0022	圧縮強度、弾性係数：材料試験より
	柱(2)	24.5	1.90	2.28	7.07	0.0045	打継目無
	柱(3)	24.5	1.90	2.28	7.07	0.0022	圧縮強度、弾性係数：材料試験より
	柱(4)	24.5	1.90	2.28	7.07	0.0009	"
No.2	柱(1)	26.2	1.98	2.52	7.56	0.0021	圧縮強度、弾性係数：材料試験より
	柱(2)	26.2	0.89	2.52	7.56	0.0095	打継目、柱(1)の引張強度の45%
	柱(3)	25.4	1.94	2.55	7.33	0.0022	圧縮強度、弾性係数：材料試験より
	柱(4)	25.4	1.94	2.55	7.33	0.0009	"
No.3	柱(1)	29.8	2.16	2.57	8.60	0.0020	圧縮強度、弾性係数：材料試験より
	柱(2)	29.8	0.97	2.57	8.60	0.0087	打継目、柱(1)の引張強度の45%
	柱(3)	25.9	1.97	2.44	7.48	0.0022	圧縮強度、弾性係数：材料試験より
	柱(4)	25.9	1.97	2.44	7.48	0.0009	"
No.4	柱(1)	22.8	1.81	2.27	6.58	0.0024	圧縮強度、弾性係数：材料試験より
	柱(2)	22.8	0.81	2.27	6.58	0.0105	打継目、柱(1)の引張強度の45%
	柱(3)	21.5	1.74	2.40	6.21	0.0024	逆打ち部、圧縮強度：柱(4)の80%
	柱(4)	26.9	2.02	2.40	7.77	0.0008	圧縮強度、弾性係数：材料試験より

3. 3 載荷方法および拘束条件

水平方向の載荷は、柱頂部において正側片側に強制変位を与える方法とした。実験と同様主筋が降伏した時点の荷重を降伏荷重、このときの変位を降伏変位と定義した。拘束条件はフーチング下端の節点をX、Y方向で固定とした。

4. 実験および解析結果

4. 1 降伏荷重および降伏変位

実験による各ケースの降伏荷重、降伏変位および鉄筋抜け出し量、解析による降伏荷重および降伏変位を表-

3に示す。No. 1～No. 3において降伏荷重は実験値と解析値とでよく一致している。No. 4では解析値が大きく、解析においてブリーディングの影響によるコンクリート強度低下を大きくする必要があると思われる。降伏変位はいずれのケースにおいても実験値と解析値では5～8mmの差がみられる。その理由は、解析モデルにおいて柱基部の鉄筋の抜け出しを考慮していないことが原因と思われる。実験における降伏変位 δy から鉄筋の抜け出しによる変位量 δn を差し引いた躯体変形 δl と解析における降伏変位とはほぼ一致している。

4. 2 荷重－変位曲線

実験による各試験体の荷重－変位曲線を図-4に示す。No. 1とNo. 2およびNo. 4の比較により、打継目の存在は水平耐力は変らないものの試験体の靱性率は小さくなることがわかる。No. 2とNo. 3との比較により、打継目が存在する場合でも帯筋量を増加させた場合靱性率を改善できることが確認できる。また、No. 1、No. 2およびNo. 4において、荷重の低下位置と帯筋降伏または帯筋ひずみが大きく伸びた時期とが一致しているのが確認できる。No. 3は帯筋が降伏しても荷重は維持している。

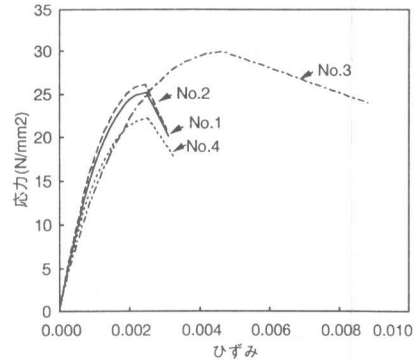


図-3 応力ひずみ関係 (柱(3))

表-3 降伏荷重および降伏変位

ケース名	降伏荷重 P_y (kN)		降伏変位(mm)			
	実験値	解析値	実験値 δy	抜け出し量 δn	躯体変形 δl	解析値
No. 1	471.0	488.6	16.6	6.3	10.3	11.8
No. 2	507.2	504.2	20.0	6.8	13.2	11.9
No. 3	503.0	503.3	20.8	8.2	12.6	11.8
No. 4	448.9	503.2	15.6	5.2	10.4	12.0

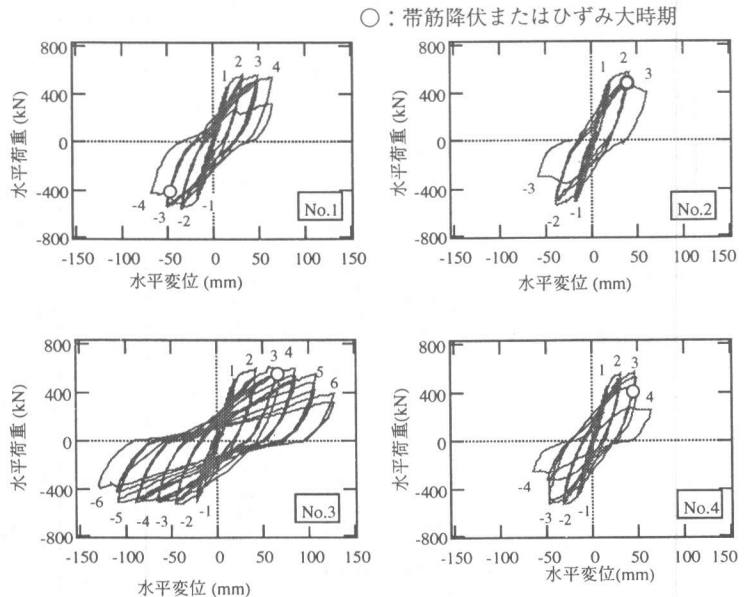
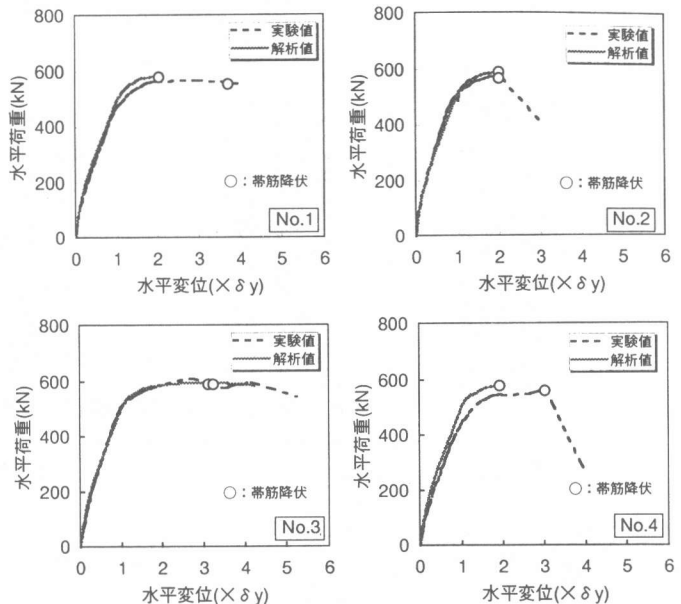


図-4 荷重－変位曲線(実験値)

次に、実験および解析における荷重－変位（ $\times \delta y$ ）関係を図－5に示す。解析において、No. 1、No. 2およびNo. 4では帯筋降伏時に水平荷重が低下し計算が終了した。No. 3の場合は帯筋降伏後も水平荷重の低下が見られず、 $3.5 \delta y$ 時から徐々に水平荷重が低下し $5 \delta y$ 時計算が終了した。このような解析結果の傾向は実験結果と同様な傾向となっており、荷重－変位曲線もよく一致している。No. 1の場合、帯筋の降伏は実験値では $4 \delta y$ 時、解析値では $2 \delta y$ 時に見られた。No. 2の場合、実験値および解析値は帯筋の降伏時期が一致している。No. 4での帯筋降伏時期は、実験値では



図－5 荷重－変位曲線(実験値、解析値)

$3 \delta y$ 時となっているのに対し、解析結果では $2 \delta y$ 時となっている。その原因は、No. 4の実験値ではコンクリートのブリーディングによりせん断強度が低下するとともに曲げ耐力も低下し、相対的に曲げせん断耐力比が大きくなっているものと思われる。したがって、解析においてNo. 4のブリーディングによるコンクリート強度の低減率を大きくする必要があると思われる。

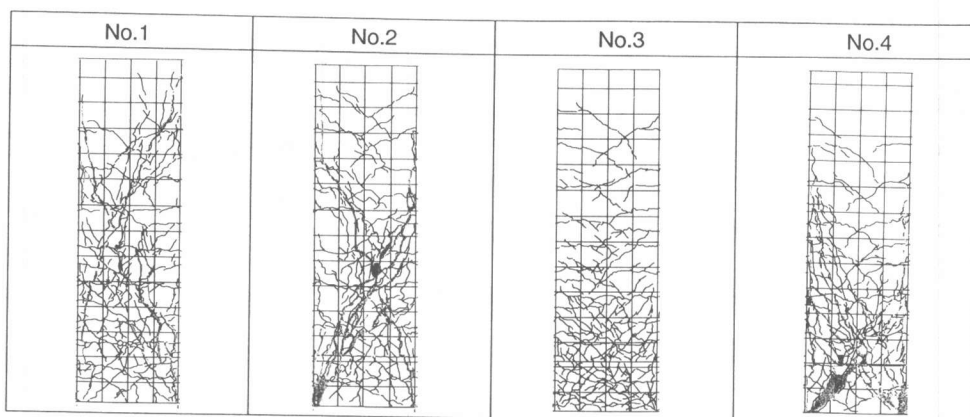
4. 3 ひび割状況

実験における各試験体の終局状態のひび割れ状況を図－6に示す。いずれのケースにおいても試験体は曲げ降伏後せん断破壊した。No. 1およびNo. 2は大きな斜めひび割れが試験体全体に斜めに横切っている。No. 4での斜めひび割れ位置は、No. 1およびNo. 2に比べ低い位置にある。No. 4はコンクリートを逆打ちして作製した試験体であり、柱下部のコンクリート強度がブリーディングによって低下していることによる影響と考えられる。No. 3のひび割れは柱基部に集中し、終局時における斜めひび割れも柱基部に見られる。

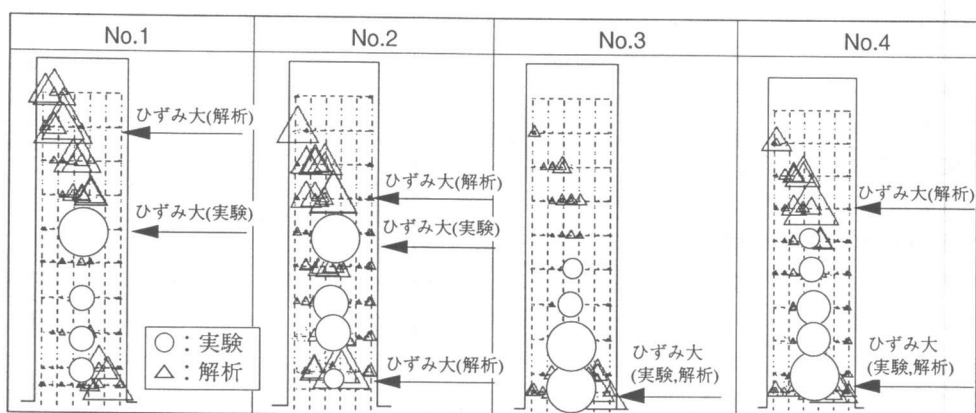
4. 4 帯筋ひずみ

水平荷重の低下時における帯筋ひずみ分布を図－7に示す。No. 1では実験、解析結果とも柱上部の帯筋ひずみが大きくなり、実験結果における斜めひび割れ発生位置と一致している。No. 2の実験結果では柱上部の帯筋ひずみが大きく、No. 4では柱基部の帯筋ひずみが大きくなっている。No. 2、No. 4の解析結果では柱上部、基部ともに帯筋ひずみが大きくなっている。実験および解析結果における相違は、前述した降伏荷重差による影響と考えられる。No. 3では実験、解析結果とも柱基部で帯筋ひずみが大きく、終局時の斜めひび割れ発生位置と一致している。

以上より、実験および解析結果において水平荷重低下時の各段における帯筋ひずみレベルに着目することにより、RC柱部材の曲げ降伏後のせん断破壊を評価することができると考える。しかしながら、No. 1およびNo. 4の帯筋降伏時期において実験、解析値に相違がある。コンクリート強度および鉄筋構成則等をパラメータに数値シミュレーションを行い、解析精度を向上させる必要があると思われる。



図－6 終局時のひび割れ状況（実験結果）



図－7 帯筋ひずみ分布（実験結果、解析結果）

5. おわりに

打継目およびブリーディングがRC高架橋柱の耐震性能に及ぼす影響を確認することを目的として、実大サイズの試験体を作製し交番繰返し載荷実験を行った。また、帯筋の拘束効果を考慮した二次元非線形有限要素法による解析検討を行った。

今回の実験および解析結果から、以下のことがわかった。

- (1) 打継目およびブリーディングの存在は試験体のせん断耐力を低下させる。
- (2) 打継目が存在する場合でも、帯筋量を現行示方書を満足するように配筋すれば、靱性率を大幅に改善できる。
- (3) 本解析方法による荷重変位関係は実験結果とよく一致している。
- (4) 水平荷重の低下時における帯筋ひずみレベルに着目することにより、RC柱部材の曲げ降伏後のせん断破壊が評価できると考える。

参考文献

- [1] 日本道路協会：兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に係る仕様および復旧仕様の解説(案) pp.参9-11, 1995.6
- [2] 鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物 鉄道総合研究所, 1992.11
- [3] 土木学会：コンクリート標準示方書設計編, 1996.7
- [4] 国分正胤博士論文選集：新旧コンクリート打継目に関する研究, pp.7-38, 1974.10
- [5] 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の破壊力学に関するコロキウム, 1990.3