鉄筋コンクリート巻立て補強された橋脚に対する塑性ヒンジ長の一試算

国立研究開発法人土木研究所　正会員　○宮田　秀太，岡田　太賀雄，大住　道生

１．はじめに

平成 24 年の道路橋示方書Ⅴ耐震設計編(以下，道示Ⅴ)から，鉄筋コンクリート橋脚(以下，RC 橋脚)の塑性変形能の評価方法は，塑性ヒンジの形成メカニズムを踏まえ見直され，塑性ヒンジ長は，軸方向鉄筋のはらみ出し現象に着目し，軸方向鉄筋や帯鉄筋等の配筋条件を考慮した上で，構造細目や軸力に適用範囲を設けた式により算出することが規定された．一方，鉄筋コンクリート巻立て補強された RC 橋脚(以下，RC 巻立て橋脚)の塑性ヒンジ長は，平成 14 年の道示Ⅴに規定されている算出式に，補正係数 C_p を乗じたものが用いられている[4] (**表-1** 参照)．本研究は，RC 巻立て橋脚を対象に**表-1** に示す式(2)の適用性を確認するために，軸方向鉄筋比の異なる 2 つの実験供試体を対象とし，塑性ヒンジ部の軸方向鉄筋への座屈解析を行った．

表-1　塑性ヒンジ長の算出式

	平成 14 年 道示Ⅴ	平成 24 年 道示Ⅴ
算出式	$L_p=0.2h-0.1D$ ・・(1) ただし，$0.1D \leqq L_p \leqq 0.5D$	$L_p=9.5\,\sigma_{sy}^{-1/6}\,\beta_n^{1/3}\,\phi'$ ・・・(2) ただし，$L_p \leqq 0.15h$
凡例	h ：橋脚基部から慣性力作用位置までの距離 D ：断面高さ	h ：同左 σ_{sy} ：軸方向鉄筋の降伏点 ϕ' ：軸方向鉄筋の直径 β_n ：抵抗を表すばね定数(=$\beta_s+\beta_{co}$) β_s ：横拘束鉄筋の抵抗を表すばね定数 (=$\frac{384\,E_0\,I_h}{n_s\,d'^3\,s}$) β_{co} ：かぶりｺﾝｸﾘｰﾄの抵抗を表すばね定数 (=$0.01c_0$) E_0 ：横拘束鉄筋のヤング係数 I_h ：横拘束鉄筋の断面二次モーメント s ：横拘束鉄筋の間隔 d' ：横拘束鉄筋の有効長 n_s ：有効長内に配置される軸方向鉄筋本数 c_0 ：かぶり厚さ

２．解析対象とした実験供試体

座屈解析対象の供試体諸元[5),6)]を**表-2** に，損傷図を**図-1** 及び**図-2** に示す．No.1 供試体は，軸方向鉄筋比が平成 24 年 道示Ⅴ(式(2))の導出の元となった諸元の供試体[1)~3)]に近く，塑性ヒンジ部におけるかぶりコンクリートの剥落が確認されている[5)]．この実験結果からは，軸方向鉄筋の座屈状況は読み取れないが，破壊性状からかぶりコンクリートの剥落は，軸方向鉄筋の座屈によるはらみ出しに起因していると推測される．No.2 供試体は，No.1 供試体より軸方向鉄筋比が小さい低鉄筋比のものを対象としている．塑性ヒンジ部の損傷範囲は狭く，軸方向鉄筋が座屈しはらみ出そうとする力が巻立て部のかぶりコンクリートの抵抗力に対して相対的に小さかったことが要因とされている[6)]．これらの破壊メカニズムに着目し，軸方向鉄筋の座屈解析を行い，座屈長やはらみ出し現象との比較を行った．

表-2　対象とした実験供試体諸元[5),6)]

種別	項目	単位	No.1供試体		No.2供試体	
			既設部	補強部	既設部	補強部
寸法	断面寸法	mm	1880*400	2140*660	1800*600	1950*750
	巻立て厚	mm	—	130	—	75
	載荷高さ	mm	2270	2270	2400	2400
	せん断ｽﾊﾟﾝ比	—	5.7	3.4	4.0	3.2
軸方向鉄筋	種別	—	SD295	SD295	SD295	SD490
	軸方向鉄筋径	mm	D13	D13	D10	D13
	軸方向鉄筋間隔	mm	90.0	200.0	156.4	155.8
	軸方向鉄筋比	%	0.81	0.65	0.20	0.37
帯鉄筋	種別	—	SD295	SD295	SD295	SD345
	帯鉄筋径	mm	D6	D13	D6	D6
	帯鉄筋間隔	mm	200	100	75	50
	帯鉄筋有効長	mm	1800	400	1720	1870
	帯鉄筋体積比	%	0.04	1.27	0.10	0.14
ｺﾝｸﾘｰﾄ設計基準強度		N/mm^2	27	27	21	30

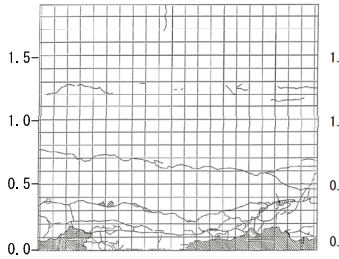

図-1 No.1 供試体の損傷図[5)]

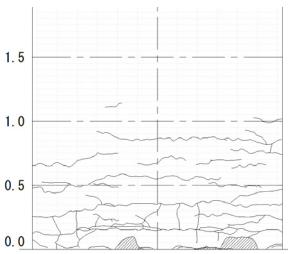

図-2 No.2 供試体の損傷図[6)]

３．解析概要

解析方法は文献[2),3)]と同様とし，幾何学的非線形性を考慮した塑性座屈解析とした(**図-3**)．軸方向鉄筋の塑性化範囲は，橋脚断面の初降伏曲げモーメントと最大曲げモーメントの関係より求め，これをモデル化範囲とした．軸方向鉄筋の応力度ひずみ関係は，修正 Menegotto-Pinto モデルとした．軸方向鉄筋の座屈を拘束する効果は，帯鉄筋とかぶりコンクリートの抵抗を表すバネ値としている($K=K_s+K_c$)．帯鉄筋の抵抗 K_s は有効長 d を支間とする両端固定梁の曲げ剛性により算出した．かぶりコンクリートの抵抗 K_c は，か

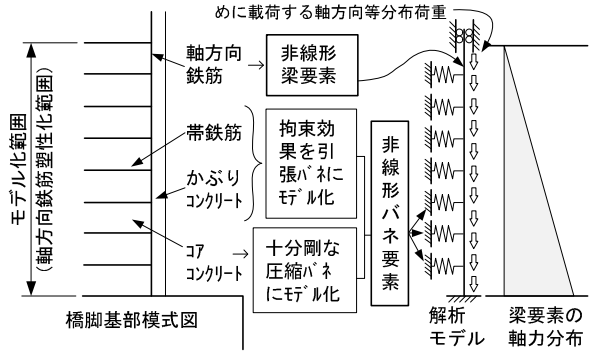

図-3　FEM による座屈解析モデル

キーワード　鉄筋コンクリート橋脚，低鉄筋比，鉄筋コンクリート巻立て補強，軸方向鉄筋，座屈長

連絡先　〒305-8516　茨城県つくば市南原 1-6　（国研）土木研究所構造物メンテナンス研究センター　ＴＥＬ029-879-6773

ぶりコンクリートのバネ値算出係数 k_0，軸方向鉄筋の純かぶり c_0，帯鉄筋間隔 s の積により算出した．

No.2 供試体は，次章に示す実験結果と解析結果の比較より，軸方向鉄筋の座屈長に差が確認された．そのため，実験における破壊メカニズムを再現することを目的とし，かぶりコンクリートが比較的健全な状態を抵抗 K_c が大きい状態と仮定し，前述の方法により算出した抵抗 K_c を基本値として，**表-3** に示すように抵抗 K_c 値を変化させた試算も行った．

4．解析結果

軸方向鉄筋の座屈解析結果を**図-4** 及び**図-5** に示す．図中には実験結果 [5), 6)]におけるかぶりコンクリートの剥落状況や軸方向鉄筋の座屈状況の写真も合わせて示す．座屈モード図は，軸方向鉄筋をモデル化した範囲の下端鉛直反力-上端鉛直変位を用いて荷重変位関係を描き，最大耐荷力点に達したときの水平変位を作図している．解析より算出する座屈長の計上方法は，文献 [2),3)]と同様とし，最大水平変位点を座屈の腹として決定している．座屈モード図には，座屈長を計上する際の主要点(モードの腹と節)を示す．

No.1 供試体では，解析より求まる座屈長が 180mm となる．**図-1** の損傷図やかぶりコンクリートの損傷写真と比較して，解析結果とかぶりコンクリートの剥落範囲は概ね一致した(**図-4**)．No.2 供試体では，解析より求まる座屈長が 210mm となる．**図-2** の損傷図や軸方向鉄筋の座屈状況と比較しても，解析結果による座屈長が長くなっている(**図-5**)．かぶりコンクリートの抵抗 K_c を変更させた結果を**図-6** に示す．実験結果と解析結果を一致させるためには，かぶりコンクリートの抵抗 K_c の値を，約 100 倍以上まで上げなくてはならない結果となった．

図-7 には，抵抗 K_c を基本値としたときの解析結果と実験結果及び式(2)による算出結果を比較した．なお，**表-1** に示す上限値は考慮していない．図より No.2 供試体の評価精度が劣ることが分かる．

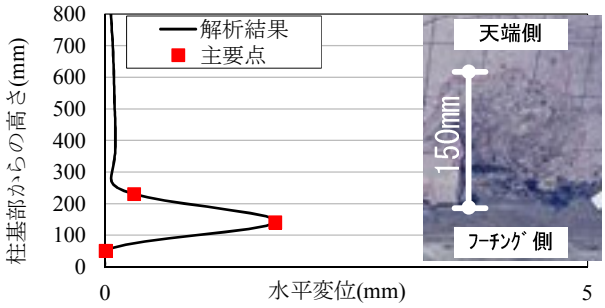

図-4 No.1 供試体に対する解析結果

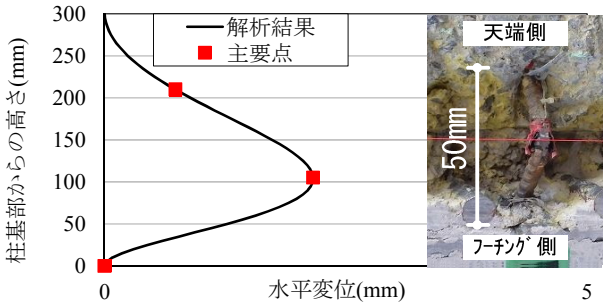

図-5 No.2 供試体に対する解析結果

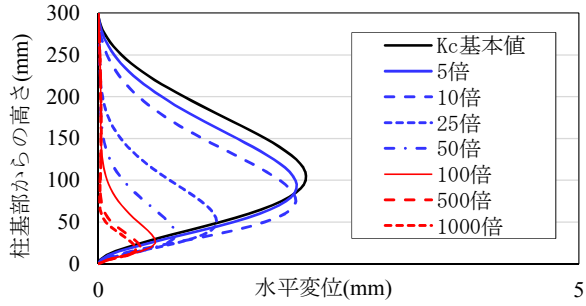

図-6 No.2 供試体に対する K_c を変更させた解析結果

表-3 解析ケースの抵抗値

	No.1 供試体	No.2 供試体							
K_c 倍率	---	基本値	5	10	25	50	100	500	1000
K_s	511	0.1							
K_c	74	17	85	170	425	850	1700	8500	17000
K	585	17	85	170	425	850	1700	8500	17000

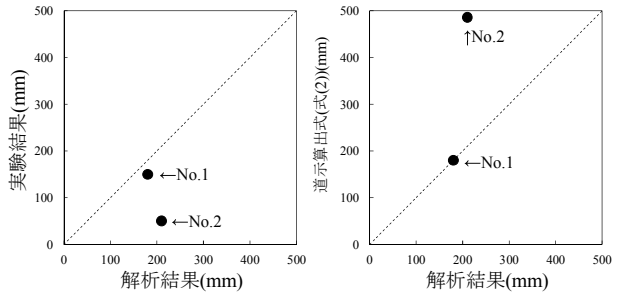

図-7 解析結果と実験及び式(2)との比較

5．まとめ

軸方向鉄筋比が式(2)の導出の元となった諸元に近い供試体は，座屈解析の結果，実験結果のかぶりコンクリートの剥落範囲に近い座屈長・はらみ出し現象を得ることができた．一方，低鉄筋比の供試体は，実験結果に近い座屈長を得ることはできず，破壊メカニズムが異なることが影響している可能性を確認した．この結果を踏まえて，今後も RC 巻立て橋脚の破壊メカニズムを適切に評価する検討を行い，塑性ヒンジ長の算出式を検討していく．

参考文献

1)星隈順一，堺淳一，小森暢行，坂柳皓文：鉄筋コンクリート橋脚の地震時限界状態の評価手法に関する研究，土木研究所資料 No.4262，2013.3. 2)浅津直樹，運上茂樹，星隈順一，近藤益央：軸方向鉄筋の座屈解析による鉄筋コンクリート橋脚の塑性ヒンジ長に関する研究，土木学会論文集，No.682，I -56，177-194，2001.7. 3)堺淳一，星隈順一：軸方向鉄筋のはらみ出し現象に着目した鉄筋コンクリート橋脚の塑性ヒンジ長の評価，構造工学論文集，Vol.60A，pp.782-795，2014.3. 4)玉越隆史，白戸真大，星隈順一，堺淳一：既設橋の耐震補強設計に関する技術資料，国土技術政策総合研究所資料 No.700，2012.11. 5)長屋和宏，大塚久哲，星隈順一：壁式橋脚の鉄筋コンクリート巻立て補強とその効果，土木学会第 51 回年次学術講演会，pp.552-553，1996.9. 6)鬼木浩二，井上崇雅，中尾尚史，篠原聖二，岡田太賀雄，星隈順一：橋脚の RC 巻立て補強における高強度鉄筋の適用がアンカー定着特性と補強効果に及ぼす影響，構造工学論文集，Vol.63A，pp.289-300，2017.3.