

論文 鉛直方向変位の拘束を考慮した RC 橋脚の荷重—変位特性

佐藤 昌志*¹・竹田 俊明*²・池田 憲二*³・高畑 智考*⁴

要旨: 実 RC 橋脚の上部工による拘束を想定し、橋脚天端の上下方向変位を拘束した状態及び橋脚天端の上下方向変位を拘束しない状態における水平交番荷重実験を行い、上部工による橋脚天端変位の拘束が荷重—変位特性、破壊性状等に及ぼす影響について検証を行った。その結果、鉛直方向変位を拘束した状態では、大変形時に鉛直方向軸力が 4 倍程度まで大きくなること、橋脚の変形性能が小さくなること等が明らかになった。

キーワード: 耐震設計, RC 橋脚, 水平交番荷重, 桁拘束, 段落し

1. はじめに

著者らは、これまでに RC 橋脚の荷重—変位特性に対して上部工による拘束が影響を及ぼすものと考え、実規模二径間連続桁橋梁模型を用いた、実橋梁に極力近い条件下での静的及び動的荷重実験を行ってきた¹⁾。その結果動的荷重実験では、桁の鉛直方向応答と橋脚の水平方向応答が連成する等、上部工による拘束が橋脚に影響を与えていることを示唆する結果が得られている²⁾³⁾。しかしながら、実験装置が大規模であることから、比較となる 1 質点系モデルを用いた荷重実験が困難であり、上部工による拘束効果を定量的に把握するには至っていない。

そこで、本研究では実構造物の 1/4 程度の規模の供試体を用い、橋脚鉛直方向の拘束条件を任意に変化させることのできる実験装置を考案して、上部工剛性に起因する橋脚の桁拘束効果が橋脚の耐力や破壊性状に与える影響について実験的に検討を行った。

2. 実験概要

2. 1 実験装置概要

図—1 に本研究で考案した実験装置の概要図

を示す。本装置は、上部工による拘束度を任意に制御可能とするために、RC 橋脚天端部に変位制御型のスクリュージャッキを設置している。また、水平方向加力は荷重を容易にするために橋脚基部にリニアウエーを介して油圧ジャッキにより行っている。

本研究では、上部工の桁拘束による影響を比較するために橋脚天端部を完全拘束する場合と、通常実施されている桁拘束が完全でない状態についての実験を実施することとした。すなわち、上部工死荷重に相当する鉛直荷重 88.2 kN を一定に保持し、橋脚供試体の鉛直方向変位を拘束しない A 荷重法、及び鉛直荷重 88.2 kN をスクリュージャッキにて荷重した後に、ジャッキストロークを固定し橋脚供試体の鉛直方向変位を拘束した B 荷重法の 2 種類の荷重条件下での水平交番荷重を行った。なお、実橋における支承による回転を再現するために、ジャッキ部と橋脚天端部はピン接合としている。

荷重荷重はロードセルで計測し、水平方向及び鉛直方向変位はワイヤー式変位計にて計測を行った。交番荷重は、基部主鉄筋歪が 1700 μ に達した時を降伏と設定し、その時点での荷重

*1 北海道開発局 札幌開発建設部 所長 札幌道路事務所 工博 (正会員)

*2 北海道開発局 部長 札幌開発建設部 (非会員)

*3 北海道開発局 開発土木研究所 室長 構造研究室 (正会員)

*4 榊長大 札幌支店 技術部 (正会員)

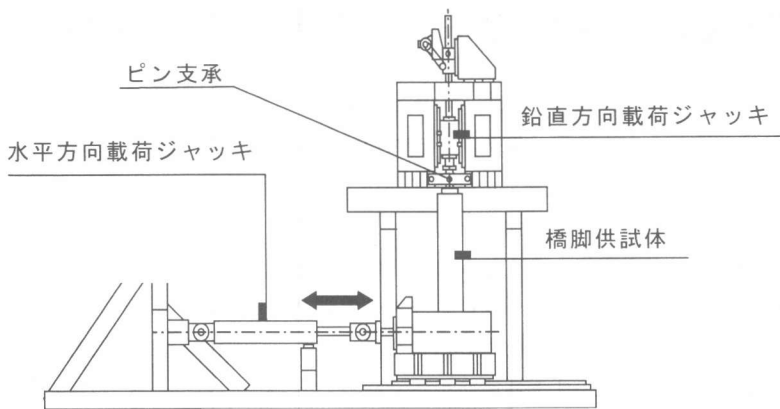


図-1 実験装置概要図

点変位を降伏変位 δy 、水平荷重を降伏荷重 P_y として $2\delta y$ 、 $3\delta y$ ・・・と変位振幅を漸増させて繰り返し載荷する方法により実施した。

各変位振幅における繰り返し回数は3回とし、正、負いずれかの載荷荷重が P_y を下回った時点を終局と定義している。

2. 2 供試体概要

実験に用いた供試体は既設道路橋を想定した主鉄筋の段落しを有する RC 橋脚柱を用いた。

供試体形状は、実構造物の 1/4 程度の規模とし、躯体高 2.0 m、断面寸法 0.5 m × 0.5 m の正方形断面であり、基部より高さ 0.9 m の位置で主鉄筋の段落しを行っている。鉄筋径は、主鉄筋 D13、帯鉄筋 D10 であり、引張主鉄筋比 $P_t = 0.8\%$ 、横拘束筋の体積比 $\rho_s = 0.36\%$ とした。なお、供試体は、主鉄筋段落し部における曲げ先行破壊となるように設計を行った。断面分割法による計算結果は、曲げ耐力 86.9 kN、せん断耐力 157.6 kN であり、せん断余裕度は 1.81 である。

供試体名称は、A 載荷法に用いたものを N-A、B 載荷法に用いたものを N-B とした。

本実験に用いたコンクリートの設計基準強度は $f'_{ck} = 20.6 \text{ MPa}$ であり、実験時の材令における平均圧縮強度は $f'_c = 27.9 \text{ MPa}$ であった。

また、用いた鉄筋はいずれも SD295A であり

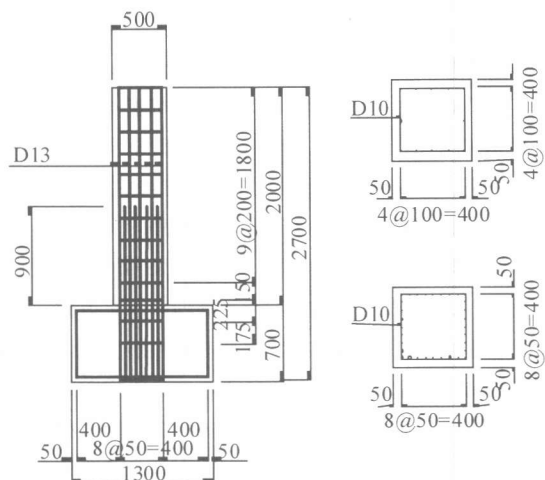


図-2 供試体概要図

その降伏点強度は 351 MPa である。供試体の形状寸法と配筋状況を図-2 に示す。

3. 実験結果

3. 1 破壊性状

終局状態の N-A 供試体を写真-1 に、N-B 供試体を写真-2 に示す。

N-A 供試体は、 $1\delta y$ の時点で基部から全長の 2/3 の高さ程度まで 10 cm ~ 15 cm の間隔で曲げひび割れが発生し、段落し部では曲げひび割れからせん断型に移行したひび割れが発生している。 $2\delta y$ では、損傷が段落し部に集中し、供試体が段落し部で角折れ状に変形しているのが目視によっても確認できた。また、段落し部のせん断ひび割れは 45 度より浅い角度で



写真-1 N-A 供試体



写真-2 N-B 供試体

の進展が見られ、主鉄筋かぶり付近における縦方向割裂ひび割れも認められた。3 δy では段落し部での帯鉄筋の降伏及びかぶりコンクリートのはらみだしが確認された。4 δy では段落し部のかぶりコンクリートが大きく剥落し、終局状態を迎えた。

N-B 供試体については、N-A 供試体と同様に 1 δy で基部から 2/3 の高さ程度まで曲げひび割れが発生している。ひび割れ間隔は 20 cm 程度となっており、N-A 供試体よりひび割れの間隔は若干大きくなっている。また、段落し部では 1 δy で既にせん断型ひび割れの著しい進行が認められた。2 δy では、せん断ひび割れの進展とともに、主鉄筋かぶり付近における縦方向ひび割れ、段落し部の帯鉄筋降伏及びかぶりコンクリートのはらみだしが認められた。

3 δy では、段落し部の鉄筋座屈、かぶりコンクリートの剥落とともに N-A 供試体よりも急激な耐力低下がみられた。4 δy では大きな段落し部のかぶりコンクリートの剥落により、終局状態を迎えている。

3. 2 荷重—変位関係

表-1 に実験結果の一覧を、図-3 に各供試体の水平荷重—水平変位の関係、図-4 に包絡線分布の比較を示す。表中の δy 、 P_y は基部

主鉄筋歪が降伏点に達した時点の荷重点位置における変位、荷重荷重であり、 δu 、 P_u は交番荷重によって荷重荷重が P_y より増大し、やがて P_y を下回る時点（終局時）の荷重点変位、荷重荷重である。なお、図-4 の計算値は、断面分割法によって圧縮側端歪が 3500 μ までの曲げモーメント—曲率関係を求め、平面保持の仮定をもとに算出している。柱高さ方向の要素分割は 10 分割とし曲率変化を仮定している。

鉛直方向変位を拘束しない N-A 供試体では 2 δy 荷重時に最大荷重 102.9 kN を示した後にゆるやかに荷重が低下し、4 δy で終局となった。

一方、鉛直方向変位を拘束した N-B 供試体では 3 δy 荷重時に最大荷重 132.3 kN を示した後に急激に荷重が低下し、4 δy で終局となった。降伏荷重、最大荷重は N-B 供試体が 20 % 程度大きな値を示しており、降伏変位、終局変位は N-B 供試体が 10 % 程度小さな値を示している。

N-B 供試体は、ひび割れ発生による供試体の伸びによって鉛直方向荷重が増加し、柱耐力が増大するものの、せん断ひび割れによる損傷が急激に進行することによって耐力が急激に低下したものと考えられる。また、この急激な耐力

表-1 実験結果一覧

供試体	変位(mm)		荷重(kN)			終局時
	δy	δu	P_y	P_u	P_{max}	
N-A	238	980	867	809	1029	4 δy
N-B	218	868	1041	671	1323	4 δy

低下により、変形性能も低下していると思われる。また、包絡線分布の実験値と計算値を比較すると、N-B供試体は降伏荷重が比較的同様の値を示しているが、変位については計算値との整合性が得られなかった。

3.3 鉛直荷重-変位関係

図-5にはN-B供試体の鉛直荷重と変位の関係を各 δy (変位振幅)毎に示している。

N-A供試体は、鉛直荷重を88.2kNで荷重制御を行っているため鉛直荷重がほぼ一定であるが、N-B供試体は鉛直変位を固定していることより、水平変位が暫増するに従い鉛直荷重が増加している。この鉛直荷重の最大値は361.7kNとなっており、N-A供試体と比較すると4倍程度の増加となる。

また、3 δy までは履歴曲線が凹型をしており供試体が傾くことにより荷重が増加していることが見てとれる。しかしながら、4 δy の終局時には段落し部における主鉄筋の座屈等の発生により、柱の耐力が低下したため角折れが生じ、変位を増加させた場合でも鉛直荷重の増加は見られず、初期の鉛直荷重と同様の荷重において変位のみが延びる傾向となった。

これは、柱部材が上部工の桁拘束を受けた場合には、初期の曲げ及びせん断の損傷が起きても、かぶりコンクリートの剥落が起きるまでは、ほぼ健全な状態としての挙動を示し、柱に作用する軸力の増加によって計算値の耐力より大きくなる。しかしながら、主鉄筋の座屈及びかぶりコンクリートの剥落が生じると損傷が段落し部に集中し、柱の角折れにより作用軸力低下による耐力の減少が生じ、柱が急激に終局に至ることを意味している。

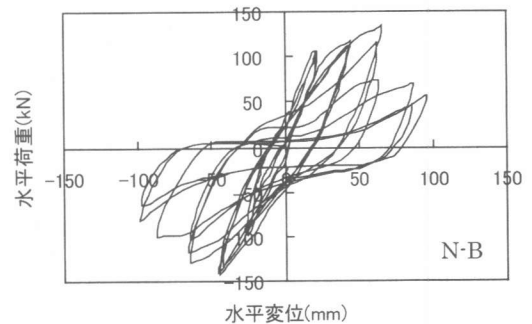
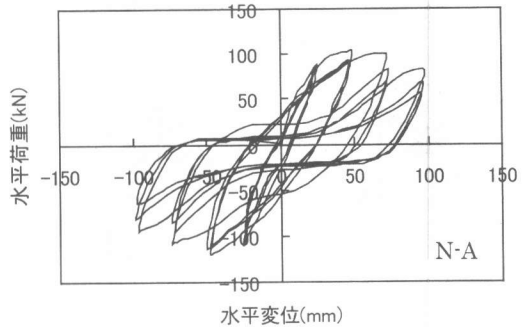


図-3 各供試体の荷重-変位関係

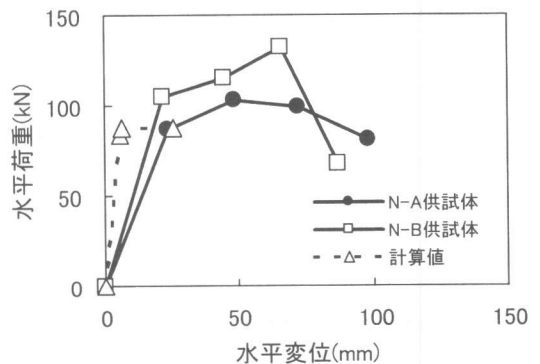
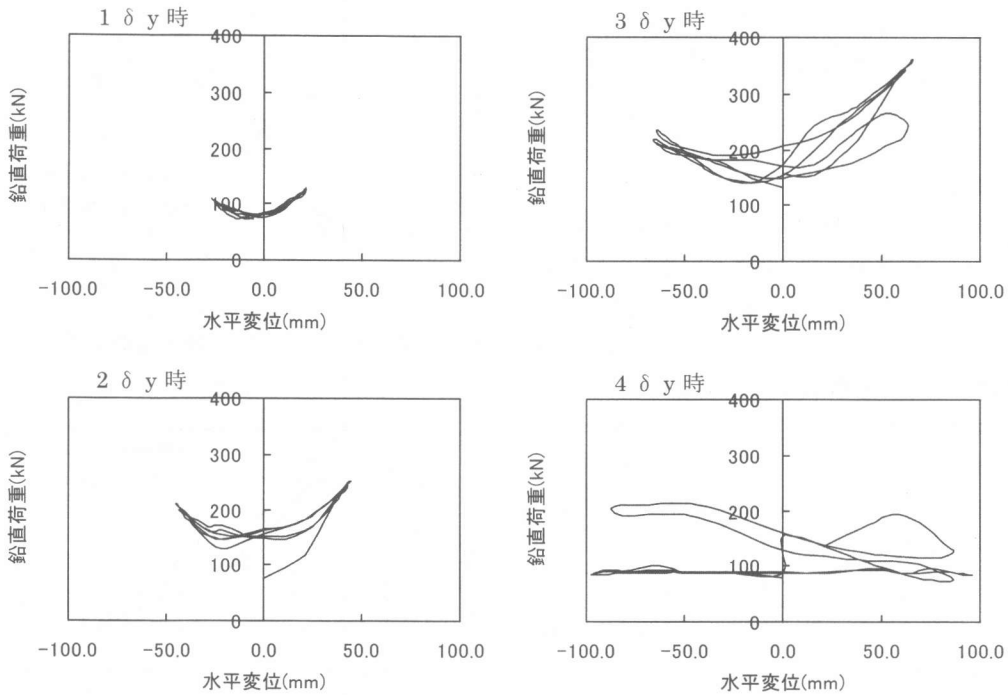


図-4 包絡線の比較



図—5 N-B供試体の各変位振幅毎の鉛直荷重—変位関係

3. 4 靱性能

図—6にエネルギー吸収量と変位振幅の関係を示す。エネルギー吸収量は、各変位振幅における1回目の荷重変位関係より算出している。

各供試体ともに3 δ yまではほぼ同程度の値で線形的に増加しているが、4 δ yについてはN-B供試体が3 δ yの場合と同様の値で推移しているのに対し、N-A供試体の場合は減少傾向を示している。また、終局時のエネルギー吸収量は、N-B供試体がN-A供試体の10%程度高い値となっている。

図—7に等価剛性と変位振幅の関係を示す。原点と設定変位振幅時の載荷荷重点を結んで得られる等価剛性は、エネルギー吸収量と同様に各変位振幅における1回目の荷重変位関係より算出している。降伏時及び終局時については、各供試体ともにほぼ同一の値を示しているが、2 δ y、3 δ yについては、N-B供試体の方が25%～40%程度の増加が見られる。これは、同様の供試体を用いているため、降伏時及

び終局時の損傷程度に大差はないが、載荷方法（上部工の拘束）によって破壊進行過程が異なっていることを示唆している。

図—8に等価粘性減衰定数と変位振幅の関係を示した。等価粘性減衰定数は、各変位振幅の正負1ループ当たりのエネルギー吸収能力（履歴ループによって囲まれた面積） ΔW を載荷時に弾性的に部材に蓄積されるエネルギー（正負の平均） W で除した値であり、

$$h_{eq} = \Delta W / (4 \pi W)$$

で表されるものである。

N-A供試体は、エネルギー吸収量と同様の傾向を示し、3 δ yまではほぼ線形に増加し、その後急激な減少傾向を示している。これに対し、N-B供試体は、終局時まで線形に増加する傾向を示している。終局時に、N-A供試体が17%で有るのに対しN-A供試体は22%程度の値を示し、30%程度大きい値を示している。これは、荷重変位関係によるとN-B供試体の方が急激な損傷進行により終局時の変位が小

さくなっているが、エネルギー吸収量（履歴ループにより囲まれる面積）が大きいことによるものと考えられる。

4. まとめ

段落しを有する RC 橋脚の耐震問題において、上部工の拘束効果の影響を検討する目的で橋脚天端部の鉛直変位の拘束条件を任意に変化させることのできる実験装置を考案し、RC 橋脚模型を用いて橋脚天端部の鉛直方向変位を完全拘束させた場合と、従来までの実験方法と同様に拘束させない場合について静載荷交番実験を実施した。本実験の範囲内で得られた結果を整理すると、

- 1) 橋脚天端を拘束する場合には拘束しない場合と異なり、初期の変位振幅の段階から段落し部にせん断ひび割れが発生する。
- 2) 上部工の拘束を受ける場合には、曲げひび割れの発生によりひび割れ幅分の柱の伸びが生じ、この軸方向伸びを拘束するため軸力が増加する。拘束しない場合と比較すると、RC 柱の耐力はやや大きくなるが、変形性能が小さくなり、損傷が急激に進行することがある。
- 3) 鉛直方向の変位が拘束される場合には、変位拘束がない場合に比較して 4 倍程度の鉛直荷重の増加が確認された。
- 4) 鉛直変位の拘束により、降伏時及び終局時の損傷状況に大差はないが、損傷の進行過程は異なる。

謝辞

本実験の実施および論文作成に当り、室蘭工業大学工学部建設システム工学科 岸徳光教授、松岡健一教授には多大なるご助言を頂きました。ここに深甚に謝意を表します。

参考文献

- 1) 三田村，吉田，佐藤，岸：実規模二径間連続桁模型を用いた RC 橋脚の荷重-変位特性，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21，

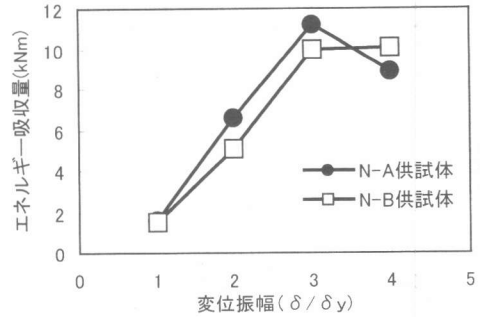


図-6 エネルギー吸収量の比較

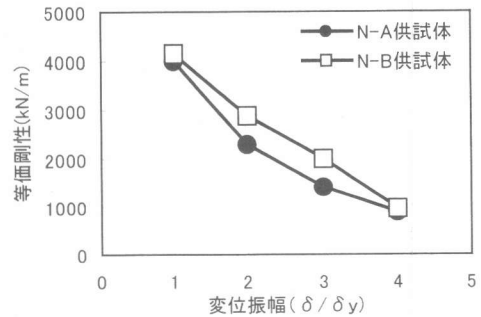


図-7 等価剛性の比較

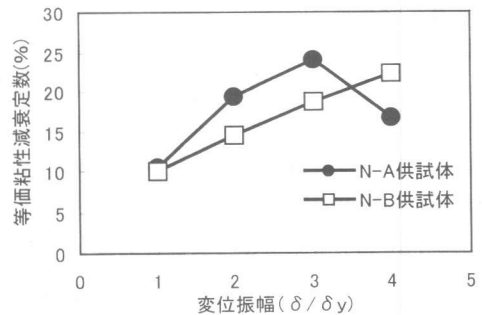


図-8 等価粘性減衰定数

No.3, pp.1207-1212, 1999

2) 新山，佐藤，池田，長谷川：実規模 2 径間連続桁を用いた RC 橋脚の急速制動加振実験における動的特性，京都大学 都市直下型地震による構造物の衝撃破壊の解明と防止策に関するワークショップ，pp.76-85，1999.2

3) 吉田，佐藤，谷本，今野：RC 橋脚模型基部に衝撃的加速度が作用する場合の動的応答性状に関する実験研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.20，No.3，pp.991-996, 1998