

道路橋の崩壊シナリオデザイン設計法の実現に向けた 耐力階層化鉄筋を用いたRC橋脚の載荷実験

横澤直人・河原井耕介・中尾尚史・大住道生

1. はじめに

道路橋示方書（以下「道示」という。）V編¹⁾では、設計地震動を超える地震動が発生し得ること、津波や断層変位等に対しては、影響を受けない架橋位置とすることを標準としつつも、やむを得ず架橋する場合には致命的な被害を受けにくい構造とすることが規定されている。

超過作用に対して、橋が崩壊に至るまでのシナリオを想定し、損傷部材を制御することで望ましいシナリオへの誘導を図る崩壊シナリオデザイン設計法²⁾及びその実現手段である耐力階層化鉄筋が検討されてきた²⁾。図-1に示すように、耐力階層化鉄筋は、柱基部及びフーチング内部で付着を切り、下端部に遊間を設けることで、橋脚の限界状態2（損傷等は生じているが、耐荷力が想定する範囲で確保されている限界の状態⁴⁾）に相当する変位を超過した後、作動を開始し、橋脚耐力を増加させる。これによって橋脚耐力が支承耐力を上回り、橋脚が倒壊等する前に支承部に損傷を誘導し、比較的早期に復旧可能なシナリオに転換することができる。ここで単に軸方向鉄筋量を増加させて耐力を増加させると、橋脚でエネルギー吸収することなく支承部が損傷してしまうことになり、従来の設計地震動に対する要求性能を確保することができない。耐力階層化鉄筋を用いた構造

は少ないコスト増で設計地震動にも超過作用にも対応できる構造と考えられる。

本研究では、耐力階層化鉄筋を用いたRC橋脚の縮小模型を作成し、載荷実験を通じて応答を確認した。なお、本研究では、耐力階層化鉄筋を用いていない供試体を使用した実験⁵⁾（以下「対照実験」という。）との比較を行った。

2. 載荷実験の方法及び結果

2.1 供試体の設計の考え方及び諸元

本研究で使用した供試体の配筋図及び柱断面図を図-2及び図-3に示す。供試体の寸法、配筋及び材料諸元は対照実験⁵⁾に準じており、これに耐力階層化鉄筋を追加した。耐力階層化鉄筋は、載荷による曲げに対して上縁側及び下縁側にD13（SD490）を各5本ずつ配置した。耐力階層化鉄筋の配置位置、種類及び本数は、支圧板の離隔確保、鉄筋同士の干渉回避及び耐力階層化鉄筋による橋脚耐力の必要増分を基に決定した。なお、事前解析により、耐力階層化鉄筋の作動後の橋脚耐力が約20%増加することを確認した。また、写真-1に示すとおり道示V編¹⁾に基づいて推定した塑性ヒンジ領域（フーチング上端から328mmの範囲）の耐力階層化鉄筋は、鋼管に覆われたさや管構造とし、鉄筋及び鋼管の間に粘土を詰め、打設時にコンクリートが流入しないようにした。

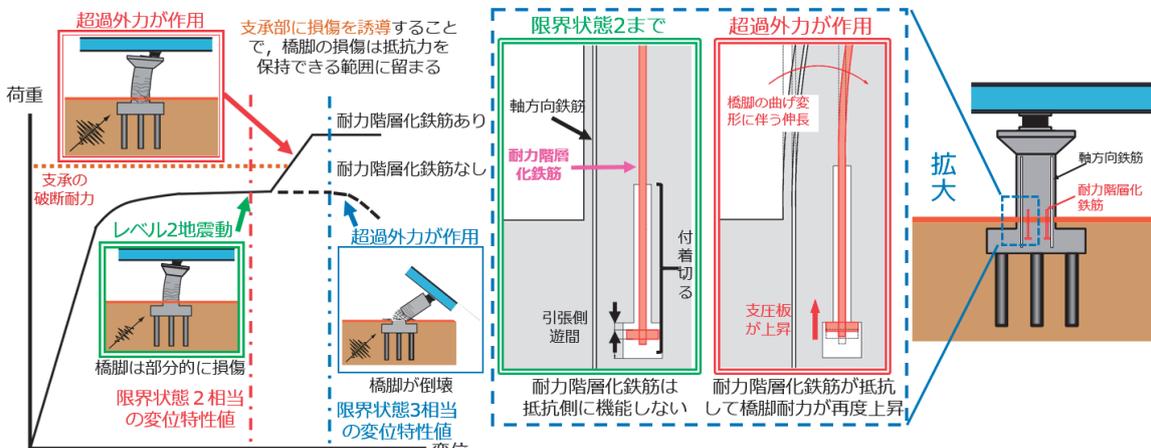


図-1 耐力階層化鉄筋の考え方（文献3)に加筆）

耐力階層化鉄筋の下端部の構造を図-4に示す。図-1に示したとおり、橋脚が限界状態2を超えた後に、耐力階層化鉄筋が橋脚と一体となって抵抗し、橋脚の耐力を増加させるように、支圧板上側に遊間を設けた構造としている。既往の研究²⁾に準じた供試体の解析モデルを作成し、ファイバー解析の結果から耐力階層化鉄筋が作動を開始する変位（以下「作動開始変位」という。）が60mm程度となるように、遊間長は9mmと設定した。

供試体で使用したコンクリートは、普通ポルトランドセメント、最大粗骨材寸法は13mmとした。実験前日に実施した強度試験では平均圧縮強度は27.1N/mm²であった。軸方向鉄筋、帯鉄筋及び耐力階層化鉄筋の平均降伏強度は、356.1N/mm²、338.8N/mm²及び558.7N/mm²であった。

2.2 載荷方法

セットアップ状況を写真-2に示す。供試体は、橋脚軸線と床面が平行になるように横向きに設置し、軸力載荷装置によって死荷重反力に相当する荷重を作用させながら、大変位加振機で水平荷重を作用させた。対照実験⁵⁾に準じて、せん断スパンは3,000mm、軸力は360kN（1N/mm²）と設定した。また、載荷方法は変位制御による正負交番繰返し載荷とし、対照実験⁵⁾において設定された、橋脚基部断面の最外縁の軸方向鉄筋が降伏するときの載荷点位置における水平変位（初降伏変位11mm）を基準変位 δ_y として、載荷振幅を $\pm n\delta_y$ （ $n=1,2,\dots$ ）とし、各3回繰返し載荷した。

2.3 柱基部の変位計測

本実験では、橋脚の変形や鉄筋の応答を確認するために変位やひずみの計測を実施した。このう

ち、3章で扱う柱基部の変位計測については、塑性ヒンジ領域の曲率を計測するために、図-5のように、フーチング上面を基準として30mmから510mmの範囲に各80mm間隔で合計7つの変位計を設置した。

2.4 実験結果

図-6に水平荷重及び水平変位の関係を示す。今回の実験では、4 δ_y までは対照実験⁵⁾と概ね同様

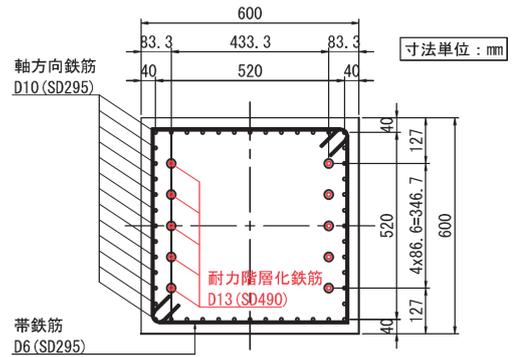


図-3 供試体の柱断面図



写真-1 耐力階層化鉄筋の上端部

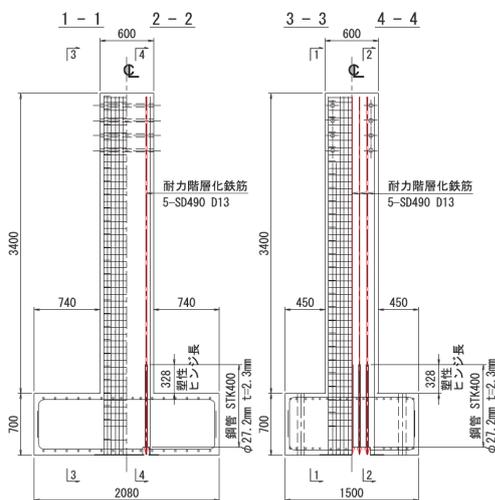


図-2 供試体配筋図

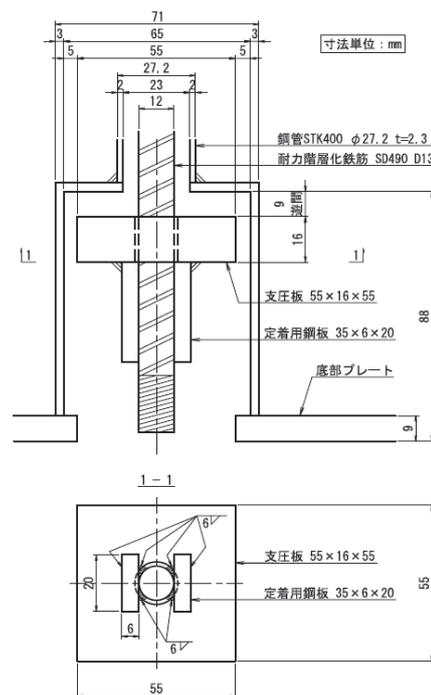


図-4 耐力階層化鉄筋の下端部

の結果であるが、 $5\delta_y$ から耐力が増加し、 $6\delta_y$ の1サイクル目で最大耐力179.0kNに達した。 $5\delta_y$ 載荷時には、柱基部に多数のクラックが生じ、 $6\delta_y$ 載荷時にかぶりコンクリートの剥落が始まった。また、対照実験⁵⁾と比較して、橋脚の最大耐力が約20%増加しており、図-1で示した支承部への損傷誘導を可能とする増加量であると判断できる。

一方、供試体の設計段階では、 $6\delta_y$ (66mm)載荷時に耐力が増加するように遊間を設定したが、実験では水平変位が45mm ($5\delta_y$ 載荷時)から耐力階層化鉄筋が作動していることが確認された。

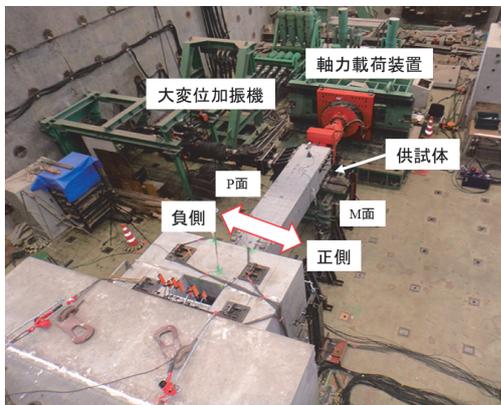


写真-2 セットアップ状況

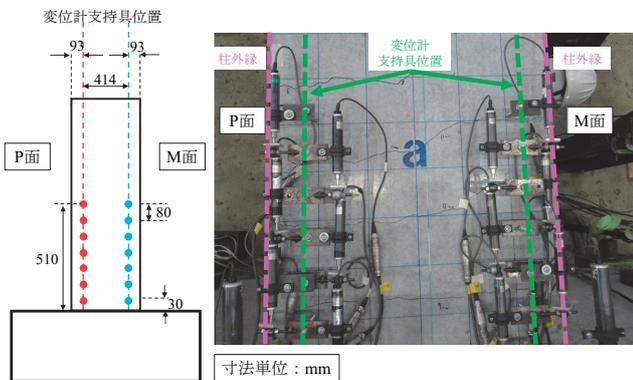


図-5 柱基部の変位計測

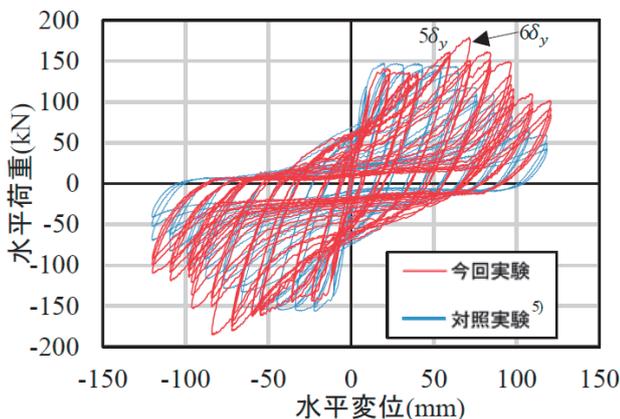


図-6 載荷実験における荷重変位関係

3. 耐力階層化鉄筋の挙動分析

3.1 再現解析に基づく作動開始変位の分析

耐力階層化鉄筋の作動開始変位が想定より小さかった原因は作動時の遊間長が製作時よりも小さくなっていたためと考え、耐力階層化鉄筋の作動開始変位における遊間長を推定するために再現解析を行った³⁾。図-7に示すとおり、遊間長の設定を変化させて再現解析を行った結果、載荷実験と同様の水平変位で耐力階層化鉄筋が作動を開始する遊間長は6.05mmであり、2.95mm分作動開始変位が減少していたことが確認された。

3.2 作動開始変位に影響を与える要因の分析

耐力階層化鉄筋の作動開始変位に影響を与える要因として、実験結果から軸方向鉄筋の塑性変形に伴う橋脚の残留伸び及び軸方向鉄筋のフーチングからの伸び出しが生じていることを確認した。図-8に載荷サイクルごとの残留伸び量及び伸び出し量の推移を示す。橋脚の残留伸びは、P面及びM面それぞれに設置した変位計の合計値が一致した時の柱基部から510mmの範囲の変位の合計値であり、図-8において載荷を繰り返すごとに変位が蓄積されている。また、伸び出しによる変位は、

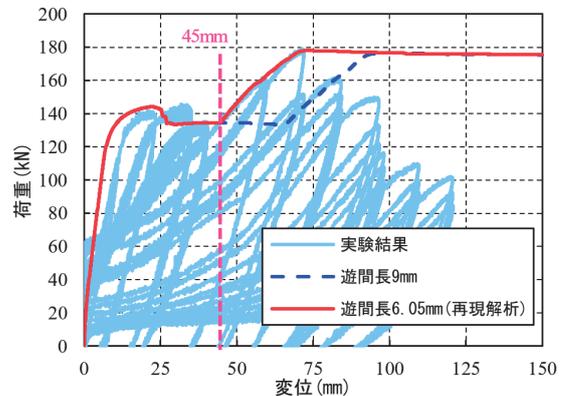


図-7 再現解析の結果

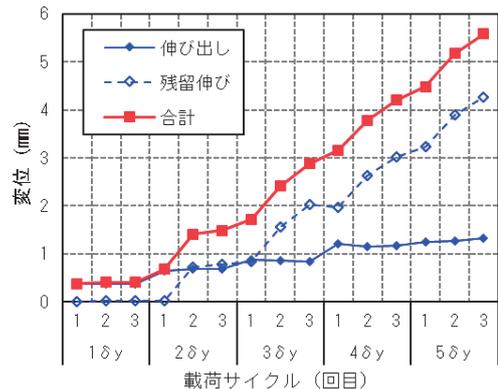


図-8 載荷サイクルごとの伸び出し量及び残留伸び量

柱基部に設置した最下端の変位計の計測値から算出した値を使用した。橋脚の残留伸びによって柱鉛直方向に変位が生じ、軸方向鉄筋の伸び出しによって柱基部が回転することで、耐力階層化鉄筋に変位が生じ、遊間量が減少する。

図-9に耐力階層化鉄筋が作動を開始した56_yの1サイクル目における耐力階層化鉄筋の変位及び橋脚の水平変位の関係を示す。耐力階層化鉄筋の変位は、図-5の計測変位から耐力階層化鉄筋位置の変位を換算して算出した。橋脚の残留伸びによる変位が1.96mm、軸方向鉄筋の伸び出しによる変位が0.90mm、変位の合計値は2.86mmであり、再現解析から推定される作動開始変位の減少量に概ね一致していることから、これらの要因が作動開始変位を減少させた要因であると考えられる。

以上の検討結果から、耐力階層化鉄筋を用いた橋脚の設計にあたっては、塑性ヒンジ部の変形に伴う橋脚の変位に加えて、橋脚の残留伸び及び軸方向鉄筋の伸び出しの影響を考慮して遊間の設定を行う必要があることが明らかになった。

4. まとめ

本研究では、耐力階層化鉄筋を用いたRC橋脚

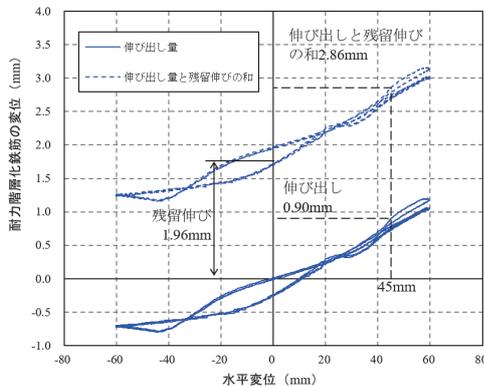


図-9 56_yにおけるP面側耐力階層化鉄筋の変位

の载荷実験を行い、耐力階層化鉄筋によって想定どおりに橋脚耐力が増加することを確認した。一方、耐力階層化鉄筋の作動開始変位を評価するためには、柱の曲げ変形だけでなく、橋脚の残留伸び及び軸方向鉄筋の伸び出しを考慮する必要があることを確認した。

今後は、橋脚の残留伸び及び軸方向鉄筋の伸び出しの定量的な評価方法や、橋脚及び支承以外の部材を考慮した橋全体系の耐力階層化を実現する構造設計法について検討を行う予定である。

謝 辞

本研究の遂行にあたり、筑波大学システム情報系庄司学教授から貴重なご意見をいただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V耐震設計編、2017
- 2) 大住道生、中尾尚史、石崎覚史、庄司学：破壊尤度の制御による道路橋の崩壊シナリオデザイン設計法の提案、土木学会論文集A1（構造・地震工学）、Vol.77、No.4（地震工学論文集第40巻）、pp.I_360~I_372、2021
- 3) 横澤直人、河原井耕介、中尾尚史、石崎覚史、大住道生：崩壊シナリオデザイン設計法の実現に向けた耐力階層化鉄筋を用いたRC橋脚の载荷実験、土木学会論文集A1（構造・地震工学）、Vol.78、No.4（地震工学論文集第41巻）、2022（掲載決定）
- 4) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 IV下部構造編、2017
- 5) 星隈順一、運上茂樹、長屋和宏：载荷繰返し回数の影響を考慮した鉄筋コンクリート橋脚の変形性能評価法、土木技術資料、第39巻、第2号、pp.32~37、1997

横澤直人



研究当時 土木研究所構造物メンテナンス研究センター橋梁構造研究グループ 研究員、現つくば中央研究所道路技術研究グループ舗装チーム 研究員
YOKOZAWA Naoto

河原井耕介



土木研究所構造物メンテナンス研究センター橋梁構造研究グループ 交流 研究員
KAWARAI Kosuke

中尾尚史



研究当時 土木研究所構造物メンテナンス研究センター橋梁構造研究グループ 専門研究員、現舞鶴工業高等専門学校建設システム工学科 講師、博士(工学)
Dr. NAKAO Hisashi

大住道生



土木研究所構造物メンテナンス研究センター橋梁構造研究グループ 上席 研究員、博士(工学)
Dr. OHSUMI Michio