

地震時の超過作用を受けた橋梁の損傷制御を目的とした RC 橋脚の配筋に関する一提案

秋本 光雄¹・佐藤 京¹・寺澤 貴裕²・葛西 聡³

¹正会員 （国研）土木研究所寒地土木研究所 （〒062-8602 北海道札幌市豊平区平岸 1-3-1-34）

²正会員 修（工） （国研）土木研究所寒地土木研究所

³正会員 工修 （国研）土木研究所寒地土木研究所

1. はじめに

近年、南海トラフ巨大地震や首都直下地震等の大規模地震発生の切迫性が指摘され、これらの地震や津波による道路橋の被害防止・軽減対策が喫緊の課題となっている。現行の耐震設計基準により、設計地震動（レベル2地震動）に対し橋を構成する各構造が限界状態を超えないよう耐荷性能を満足する設計が行われるが、設計地震動を超える作用（以下、「超過作用」という。）に対しては、具体的な規定が示されていない。

道路橋には緊急輸送道路等、地域の防災計画等において期待される機能を担うことが求められ、超過作用に対しても早期復旧、早期機能確保の観点から致命的な損傷を回避する必要がある。そのため、補修しやすい部位に損傷を誘導・制御するような設計方法の確立が必要と考えられる。

これまでの研究¹⁾で、桁橋でかつ免震橋を対象とした超過作用に対する望ましい損傷制御手法として、橋脚と支承の耐力を階層化し支承にロックオフ構造を採用することなどによって損傷部位を支承に誘導することが早期復旧の観点から望ましい損傷シナリオであることを報告した。

本報では、支承部への損傷制御の実現性を検証するためのRC橋脚実験供試体の設計を行い、その配筋方法の一例を報告する。

2. 下部工の耐力階層化

(1) 支承耐力と橋脚耐力の関係

図-1は免震構造を対象に、橋脚と支承の耐力の大

小関係を示した水平荷重—水平変位曲線である。実際のレベル2地震動に対する設計では、支承耐力が橋脚耐力を上回るケースAと、支承耐力が橋脚耐力を下回るケースBが存在する。ケースAでは支承より先に橋脚が損傷し、作用が大きくなるにつれて橋脚の損傷が進展するが、ケースBでは橋脚より先に支承が損傷し、以後作用が大きくなっても橋脚の損傷は進展しない破壊形態となる。

(2) 望ましい損傷シナリオ

ケースBの中でも、支承耐力を「橋脚の降伏耐力以下」にするケースと「橋脚の降伏を超え最大耐力以下」にするケースの2通りある。それぞれのケースは、橋梁の架橋条件等により被災後の復旧作業のしやすさを考慮して選定することが考えられるが、前者の場合、橋脚耐力を過度に高める必要があり、基礎工を含めた橋全体系の設計合理化を踏まえると超過作用に対し、後者のケースが望ましい損傷シナリオである。

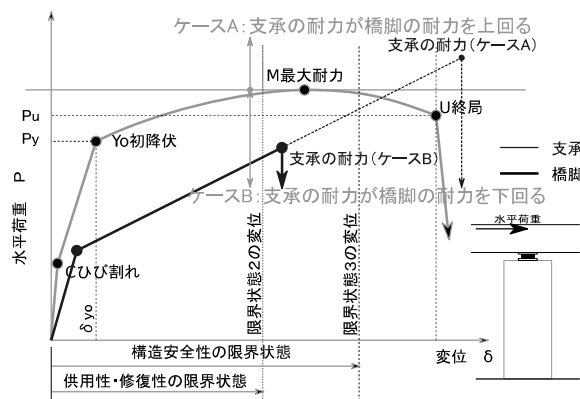


図-1 支承と橋脚の耐力の関係（免震）

3. 損傷制御を実現するための文献調査

(1) 既往の文献資料の収集・整理

望ましい損傷シナリオを実現させるためには、橋脚降伏耐力と最大耐力の間に支承耐力を制御する必要がある。設計上意図したとおりの耐力制御ができたとしても、部材を構成する材料のバラつき等から地震による実際の挙動の中で意図的に耐力制御ができるかどうか課題がある。橋脚の最大耐力と降伏耐力との差異が大きいくほど支承の損傷制御の実現性が高まると考えられる。そこで図-2に示すように、設計計算上の降伏耐力に対し実験による最大耐力との差異が大きくなる橋脚の設計条件を確認するため、既往の文献調査により RC 橋脚模型及び SRC 橋脚模型の実験結果を収集し、整理した。

(2) RC 橋脚の模型供試体

図-3は、文献調査により複数の RC 橋脚供試体の P- δ 関係において、実験結果から得られた最大耐力 P_{max} と設計計算上の保有耐力 P_a との耐力比 (P_{max}/P_a) を軸方向鉄筋比別にプロットしたものである。また、図-4は調査を実施した複数供試体のうち、1 供試体について実験結果を示したものである。これら文献調査から耐力比 (P_{max}/P_a) を整理すると、概ね 1.0~1.2 倍と耐力差が小さいことを確認した。調査した供試体はせん断スパン比が概ね 3~5 であり、ディーブビーム効果のような平面保持の仮定が適用できない耐荷力特性は特に持たない。このような橋脚は曲げ応力で軸方向鉄筋が決定され、断面の中央付近の鋼材もあまり多くないことから、保有耐力と最大耐力の差異が生じにくいものと推察される。

(3) SRC 橋脚の模型供試体

文献調査により複数の SRC 橋脚供試体について耐力差の整理を行った。図-5は、1 供試体についての荷重・変位履歴曲線を示したものである。調査した SRC 橋脚供試体は、最外縁の軸方向鉄筋より断面内部の鉄骨材が H 形鋼あるいは鋼板を配置したものなど様々あるが、図-6に示した橋脚断面内部に鋼板を複数枚入れた供試体断面⁴⁾において、最大の耐力比 2.071 倍を得ていた。SRC 橋脚はせん断スパン比については RC 橋脚と同様 3~5 であるが、最大耐力は降伏耐力の概ね 1.2~2 倍程度と RC 橋脚より耐力差が大きいことを確認した。これは SRC 橋脚の場合は断面の中央付近に配置する鋼材が多いことから、これが引張縁の鉄筋が降伏した後、さらに橋脚の耐力を大きくしているものと推察される。

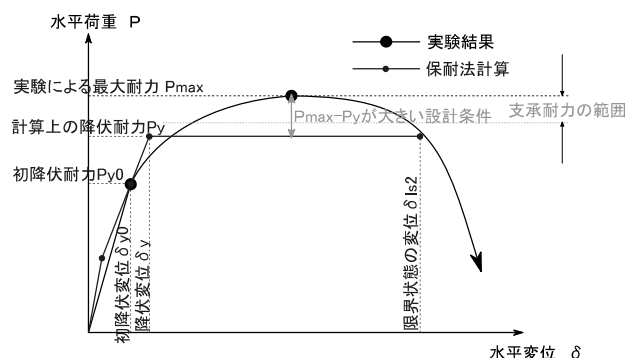


図-2 橋脚供試体の計算上の耐力と最大耐力の差

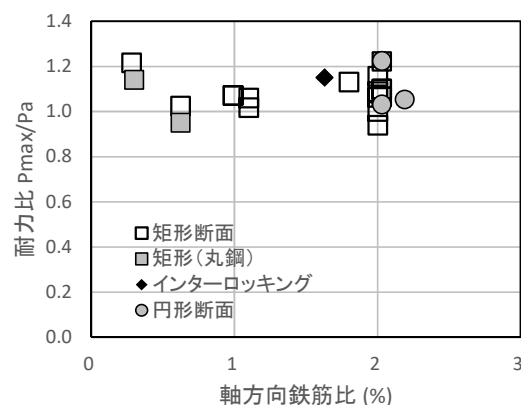


図-3 RC 橋脚供試体の最大耐力と降伏耐力の比

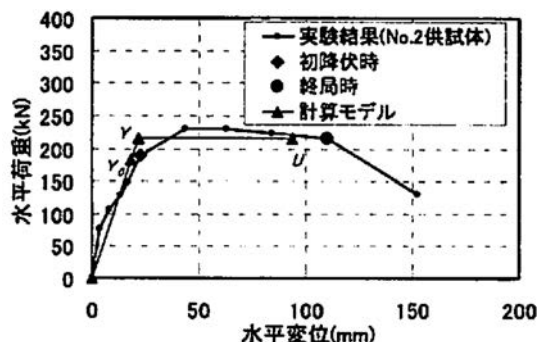


図-4 RC 橋脚供試体 (No.2) の P- δ 関係²⁾

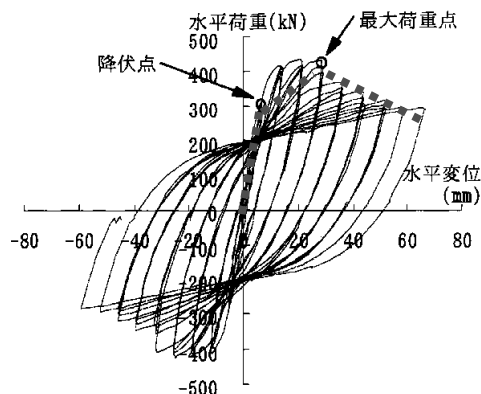


図-5 SRC 橋脚の荷重・変位履歴曲線 (A-2)³⁾
(点線は筆者が加筆)

4. 損傷制御を確認するための供試体の設計

(1) 供試体の設計

橋脚の降伏耐力と最大耐力の差異が大きくなる設計条件を実験で検証するため、供試体の設計と配筋方法の検討を行った。供試体は、星隈ら³⁾が行った実物大橋脚の載荷実験における供試体を参考に、柱部が 2400mm×2400mm の矩形断面を有する実橋を想定したモデル橋脚を設計・解析した後、1/4 倍に縮小した RC 橋脚供試体(□600×600mm, 高さ 1800mm)とした(図-7)。

(2) 供試体の解析方法

供試体は新設橋の桁橋の橋脚を想定し、1 基の橋脚の頂部に図-8 に示す免震ゴム支承を配置した供試体を設計し、以下の 2 ケースで解析を行った。

ケース①：耐力階層化無し

(支承耐力>橋脚最大耐力)

ケース②：耐力階層化有り

(橋脚降伏耐力<支承耐力<橋脚最大耐力)

ここで、ケース①の「耐力階層化無し」は、支承耐力を支承せん断ひずみ 250%として設計をしたものであり、ケース②の「耐力階層化有り」は、支承耐力が橋脚最大耐力以下になるよう支承下杓取付ボルトにロックオフ荷重を設定し、支承金物に耐力の上限を設けることで損傷部位が支承となるよう制御したケースである。免震支承等の積層ゴム系の支承はせん断ひずみ 250%を超えるとハードニングが生じて変位に対して反力が大きくなり、支承本体で制御するのが困難であるため、下杓取付ボルトにロックオフ荷重を設定した。さらにケース②では、ケース①の標準的な軸方向鉄筋の配置(図-9)に対し、

なお、各ケースの損傷制御の効果は、ファイバーモデルのプッシュオーバー解析により P-δ 関係を確認した。

(3) 解析結果

ケース①の P-δ 関係を図-11 に示す。橋脚の軸方向鉄筋は D13×32 本、鉄筋比 1.13%とし、鉄筋量はレベル 2 地震動に対し弾塑性設計となるよう配筋した(図-9)。このケースでは、橋脚はレベル 2 地震時に降伏しエネルギー吸収が図れる、鉄筋量が少なく合理的な設計となるなどの特徴を有するが、最大耐

力と設計上の降伏耐力の差異がほとんどなく、実際の設計では支承に望ましい位置で損傷制御することが困難であるケースと推察される。

ケース②の P-δ 関係を図-12 に示す。橋脚の軸方向鉄筋は、最外縁が D10×32 本、断面内部が D19×13 本で鉄筋比は 1.67%である(図-10)。最外縁の軸方向鉄筋量はレベル 1 地震動で決めることで鉄筋径を小さくし、断面内部の軸方向鉄筋量はレベル 2 地震動で決定した。軸方向鉄筋量はケース①と比較して増加するが中間帯鉄筋のラップ長(鉄筋径の 40 倍)が必要なくなるため、全体の鉄筋量はケース①と同程度である。このケースではレベル 2 地震動で橋脚が降伏し、エネルギー吸収が図れるとともに最大耐力と降伏耐力の差を大きくとることができるため、耐力階層化による支承部への損傷制御に有効な配筋法であると考えられる。

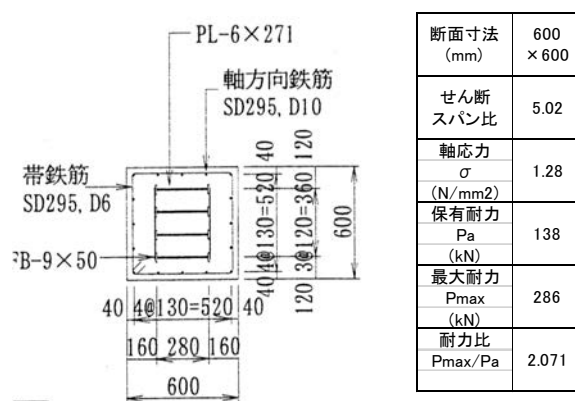


図-6 SRC 橋脚の供試体断面 (SRC-4)⁴⁾ (左) と耐力比 (P_{max}/P_a) (右)

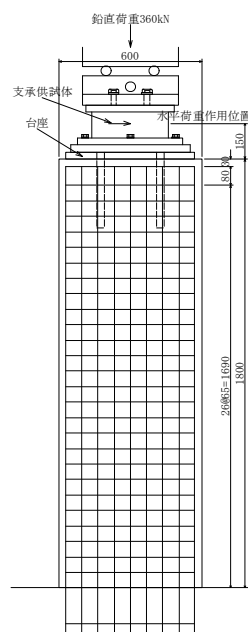


図-7 縮小供試体の概要図

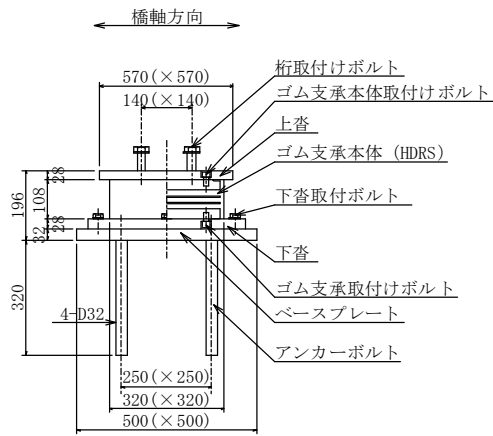


図-8 縮小供試体の支承部側面

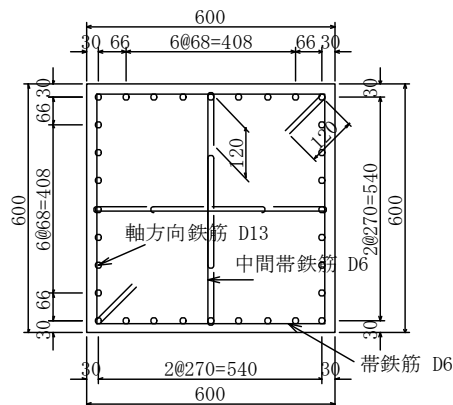


図-9 縮小供試体の配筋断面 (ケース①)

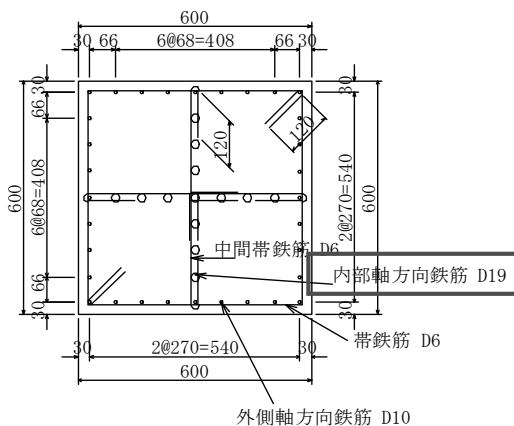


図-10 縮小供試体の配筋断面 (ケース②)

5. おわりに

支承部への損傷制御の実現性を検証するための供試体設計と配筋方法の検討を行った。既往の文献調査から RC 橋脚供試体と SRC 橋脚供試体の実験結果を整理し、超過作用時に耐力階層化による支承部への損傷制御を行う上で、SRC 構造の方が有利であることを確認した。その結果を受けて、橋脚断面内に軸方向鉄筋を配置することで橋脚の最大耐力と降伏

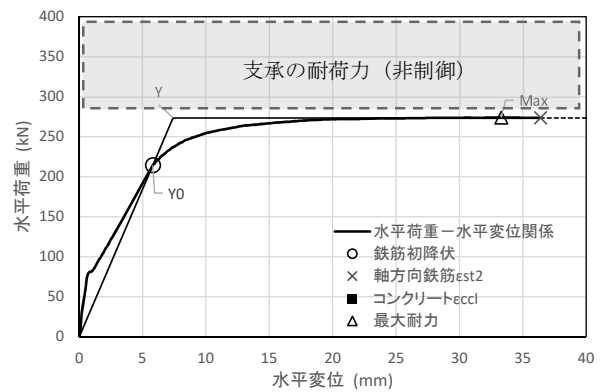


図-11 橋脚供試体の耐力特性 (ケース①)

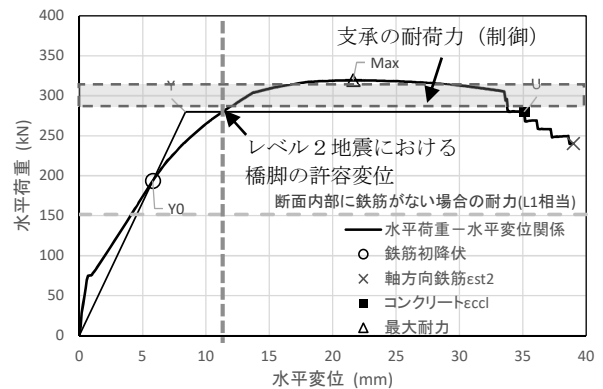


図-12 橋脚供試体の耐力特性 (ケース②)

耐力の差異を大きくすることが可能となり、支承に損傷を制御する実現性が高まることを確認した。

今後は、本報で検討した供試体を製作し、各種実験等により耐力階層化を検証する予定である。

参考文献

- 1) 秋本光雄, 西弘明, 佐藤京: 超過作用に対する桁橋の損傷シナリオに関する検討, 第 21 回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp225-228, 2018.7.
- 2) 星隈順一・運上茂樹・川島一彦・長屋和宏: 載荷繰返し特性と塑性曲率分布に着目した曲げ破壊型鉄筋コンクリート橋脚の塑性変形性能とその評価法, 構造工学論文集, Vol.44A, pp.877-888, 1998.3.
- 3) 村田清満・池田学: SRC 柱の動的耐力、変形性能に関する実験的検討, 第 2 回地震時保有水平耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp.183-188, 1998.12.
- 4) 長屋和宏・運上茂樹・星隈順一: SRC 橋脚の非線形履歴特性に関する実験的研究, 第 24 回地震構造研究発表講演論文集, pp.769-772, 1997.7.
- 5) 星隈順一・運上茂樹・長屋和宏: 鉄筋コンクリート橋脚の変形性能に及ぼす断面寸法の影響に関する研究, 土木学会論文集, No.669/V-50, pp.215-232, 2001.2.