

断層変位成分を含む地震動に対する 耐力階層化鉄筋を用いた構造の適用性検討

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V耐震設計編（以下「道示V編」という。）において、断層変位の影響を受ける可能性に対して、その「影響を受けないよう架橋位置又は橋梁の形式の選定を行うことを標準」とし、やむを得ず影響を受ける場合には、「少なくとも致命的な被害が生じにくくなるような構造とする等」の「必要な対策を講じなければならない」とされている¹⁾。これを実現する方法として、設計段階において、構造形式に応じた橋の崩壊に至るまでのシナリオ（以下「崩壊シナリオ」という。）を想定し、損傷を最小限にとどめられるシナリオに転換する設計法が考えられる。

筆者らは、桁橋を対象に、部材耐力を階層的に設定し、崩壊シナリオを転換することで致命的な被害を回避する方法として耐力階層化鉄筋を提案した²⁾。耐力階層化鉄筋は、橋脚の限界状態2に相当する変位を超過した後に作動を開始し、橋脚耐力を増加させ、損傷部材を制御することによってシナリオの転換を実現する。

本研究では、連続桁橋に断層変位成分を含む地震動が作用する状況を想定し、耐力階層化鉄筋を使用した構造による崩壊シナリオの転換可能性を検証した。

2. 耐力階層化の目的と部材耐力の設定

耐力階層化鉄筋は、軸方向鉄筋と並行して設置されており、付着を部分的に切ることによって、橋脚が限界状態2を超えた後に作動を開始し、橋

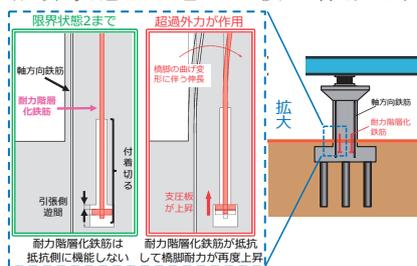


図-1 耐力階層化鉄筋の機構イメージ²⁾

脚耐力を増大させる（図-1）。耐力階層化鉄筋を用いて橋脚及び支承部の耐力を階層的に設定し、支承部に損傷を誘導することによって、断層変位に対して、橋脚の倒壊を回避し、早期復旧を実現することができる（図-2）。

本研究では、文献⁴⁾に示される鋼5径間連続桁橋（図-3）に耐力階層化鉄筋を適用して解析モデルを作成した。橋軸方向については、レベル2地震時には橋脚が塑性化する設計とし、支承部の水平耐力は橋脚の水平耐力を上回るように設定した。レベル2地震動よりも大きな影響を与える断層変位が作用する時には、耐力階層化鉄筋によって増大した橋脚耐力が支承耐力を上回るように設定した。このように階層的に耐力を設定することで、断層変位が作用しない場合は、耐力階層化鉄筋を作動させずに、基礎等と比較して相対的に修復が容易な橋脚を塑性化させることで早期復旧を実現し、断層変位が作用する場合には、支承部に損傷を誘導し、橋脚の倒壊を回避する構造とした。また、支承部の中で復旧が比較的容易な支承アンカーボルトに損傷を誘導するものとし、橋脚が限界状態2を超えて限界状態3に至るまでの間に破断するように支承アンカーボルトの耐力を設定した⁵⁾。橋軸直角方向については、断層変位が作用しない場合、橋脚は塑性化せずに抵抗し、断層変位が作用する場合には、耐力階層化鉄筋を使用しなくても支承アンカーボルトが先行して破断するため、橋脚の倒壊は回避される構造となっている。

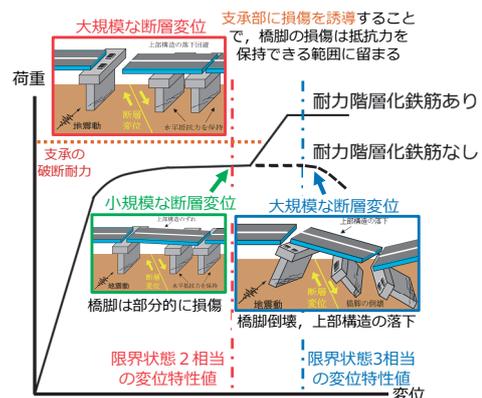


図-2 耐力階層化によるシナリオの転換³⁾

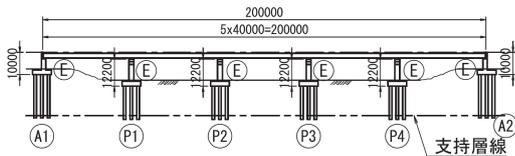
3. 解析方法

3.1 解析条件及び解析モデル

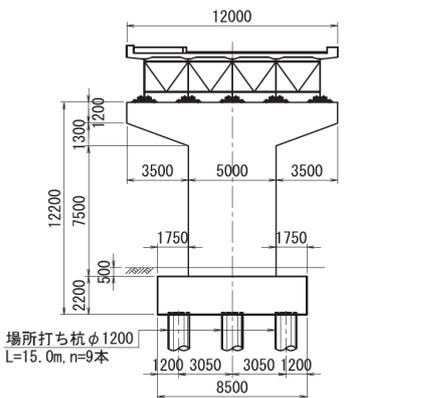
本研究では、前述した橋梁の3次元骨組みモデルに対して、地震動が作用している間に断層変位が生じる状況を想定した時刻歴応答解析を行った。

上部構造は1本の線形はり要素でモデル化した。橋脚は、現行基準¹⁾における照査を満足するように文献⁴⁾から鉄筋の径及び材質を変更した。耐力階層化鉄筋は、D51 (SD490) を使用し、軸方向鉄筋に変更して図-4のように配置し、橋軸方向の超過外力に抵抗するものとして非線形ばね要素で1本ずつモデル化した。図-5に示すように、耐力階層化鉄筋は、非線形ばね要素並びに遊間としてモデル化し、遊間長は12.8mmとした。

支承は、文献⁴⁾に基づき、全支点積層ゴム支承とし、支承条件は、橋台部の支承では橋軸方向を弾性、橋軸直角方向及び鉛直方向を固定に、橋脚部の支承では橋軸方向及び橋軸直角方向を弾性、鉛直方向を固定とした。積層ゴム支承は、支承ア



(a) 橋梁全体の側面図



(b) 上下部構造の正面図及び側面図

図-3 対象橋梁一般図

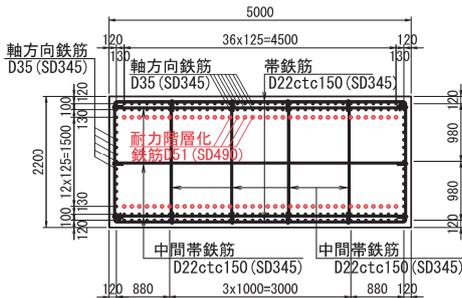


図-4 橋脚の寸法及び配筋

ンカーボルト破断後に支承と橋脚天端間の摩擦力のみ負担するようにモデル化した(図-6)。なお、支承ばねは橋軸方向と橋軸直角方向で独立して設定しており、破断挙動は両方向で連動しない。

このほか、実挙動を評価できるように、上部構造とパラペットの衝突、パラペットの破壊及び橋台背面土の影響等を考慮した³⁾。

3.2 入力条件

実設計において断層の位置、変位量、走向を確定的に推定することは困難であるが、本稿では、提案構造の効果を確認するためそれらを仮定して、地震動及び断層変位による変位波形を合成した変位波形を入力することで断層変位の影響を考慮することとした。地震動による変位波形は、道示V編に規定されるII種地盤レベル2地震動(タイプII)1波目の加速度波形¹⁾を基に作成し、断層変位による変位波形は、2016年熊本地震の観測結果を参考に、変位速度は2m/s、変位量は3m、地震動による変位波形の最大値が生じる時刻に断層変位が終了するものとして4.09秒から5.59秒の間に断層変位が作用することを仮定して設定した。

橋軸方向及び橋軸直角方向の両方向同時に作用する場合は設計上厳しい条件であると考え、本稿ではP1橋脚及びP2橋脚間に断層走向が橋軸方向に対して45度方向に位置する右横ずれ断層を想定し(図-7)、A1橋台及びP1橋脚には地震動による変位波形を、P2橋脚からA2橋台には地震動及び断層変位による変位波形を合成した変位波形を入力した(図-8)。

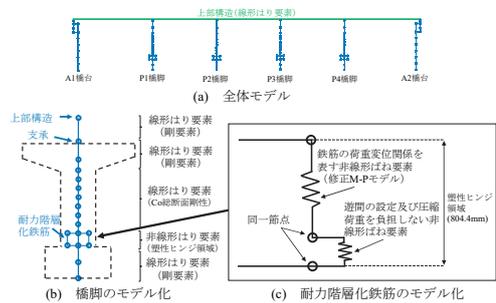


図-5 橋全体及び橋脚のモデル化

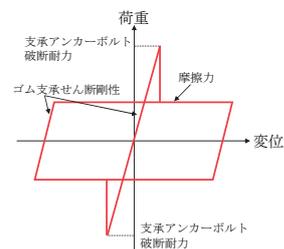


図-6 支承のモデル化

4. 解析結果と考察

4.1 橋脚の荷重変位関係

図-9に橋脚の橋軸方向の荷重変位関係を示す。断層変位が作用する前は、全ての橋脚は弾性域で応答した。断層変位が作用する間（4.09秒から5.59秒）では、P1橋脚が正側で降伏（A1橋台側の鉄筋が降伏）し、耐力階層化鉄筋による橋脚耐力の増加が確認された。一方、断層変位が作用した後では、P2橋脚からP4橋脚が正負両側で降伏し、正側で耐力階層化鉄筋による橋脚耐力の増加が確認された。

4.2 支承の時刻歴応答

ゴム支承反力の橋軸方向の時刻歴応答を図-10に示す。断層変位が作用する間（4.09秒から5.59秒）に、P1橋脚及びA1橋台において支承反力が支承アンカーボルトの破断耐力に達した。P1橋脚及びA1橋台の支承が破断したのは、断層位置を挟んで起点側（A1橋台、P1橋脚）の方が終点側（P2橋脚～A2橋台）より支点の数が少ないために支承1基あたりの分担荷重が相対的に大きく、起点側の応答が増大したためと考えられる。

断層変位終了後には、P2橋脚、P3橋脚、P4橋脚及びA2橋台において支承反力の増加が生じたが、いずれも支承アンカーボルトの破断耐力には達しなかった。支承反力が増加したのは、断層変位終了に伴い入力変位が反転し、上部構造の位相が下部構造基部に対して遅れたことによって上部構造及び下部構造間の相対変位量が増大したためと考えられる。

次に、橋軸直角方向の応答を図-11に示す。断層変位が作用する間（4.09秒から5.59秒）に、

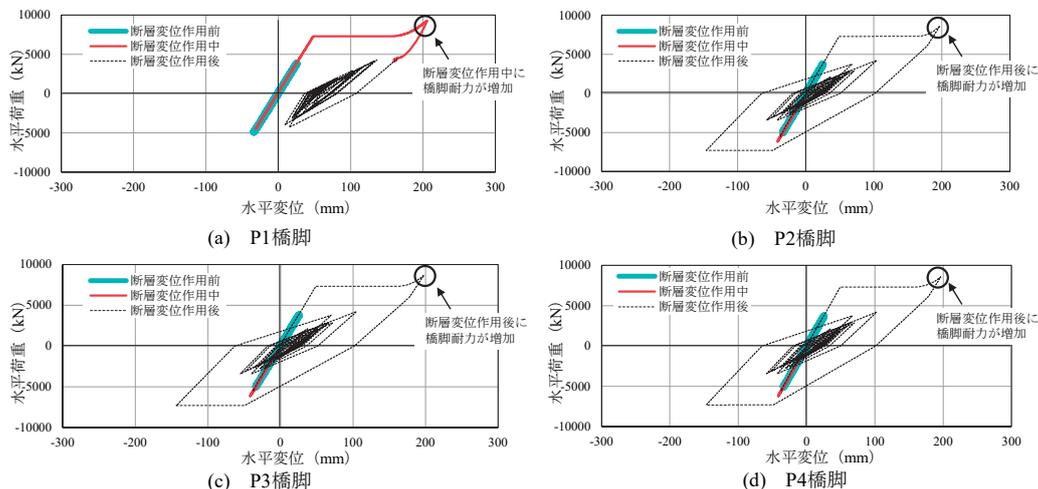


図-9 橋脚の橋軸方向の荷重変位関係

P1橋脚及びP2橋脚の支承反力が支承アンカーボルトの破断耐力に達した。P1橋脚及びP2橋脚の支承が破断したのは、断層位置で下部構造に作用する変位方向が正負反転し、断層に隣接する橋脚位置で変形が最も大きくなったためと考えられる。断層変位終了後には、P3橋脚及びP4橋脚において支承反力が増加し、このうちP3橋脚で支承アンカーボルトの破断耐力に達した。これは、P1橋脚及びP2橋脚の支承アンカーボルトの破断後、P3橋脚の支承アンカーボルトの分担荷重が増大したためと考えられる。

4.3 考察

耐力階層化鉄筋を導入した橋軸方向で支承アンカーボルトが破断耐力に達したのは、P1橋脚のみであった。そこで、P1橋脚の最大荷重作用時刻を確認したところ、支承アンカーボルトが破断した時刻と一致しており（4.57秒）、P1橋脚に限界状態2を超える変位が生じた後、耐力階層化鉄

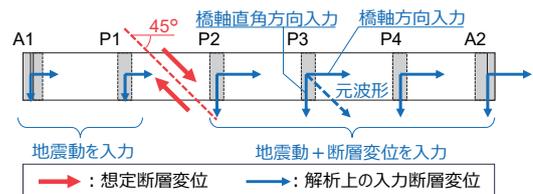


図-7 想定断層位置及び断層変位入力方法

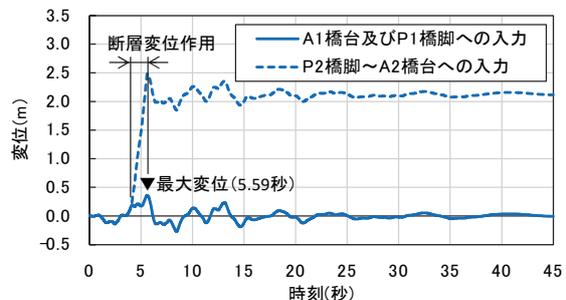


図-8 入力変位波形（橋軸方向・橋軸直角方向共通）

筋が作動してP1橋脚の耐力を増加させている間に、支承アンカーボルトが先行して損傷している。耐力階層化鉄筋が無い場合は、橋脚は限界状態3を超過し、橋脚の倒壊に至るおそれがあるが、支承に損傷を誘導することで橋脚の倒壊を防ぎ、支承破断後も上部構造が橋脚に支持されることで落下を免れており、本研究で想定したシナリオに転換できることが確認された。なお、橋軸直角方向では、耐力階層化鉄筋を使用していないが、橋脚が限界状態3に達する前に支承アンカーボルトが破断することを確認している。

また、設計段階では超過外力が作用すると全支承が一律に損傷することを想定しているが、動的解析の結果では支承の損傷時刻にばらつきが見られた。一方、耐力階層化鉄筋を使用することで、動的応答による影響があっても、静的に設定した階層化耐力に従って損傷を誘導し、シナリオを制御できることが示された。他方、部材耐力や作用

の大きさに関するばらつきの影響は考慮しておらず、この点について今後検討する必要である。

5. まとめ

本研究では、断層変位に対して少なくとも致命的な被害が生じにくくなるような構造とする等の必要な対策の具体的方法の一つとして、耐力階層化鉄筋を用いた構造を提案し、これによって想定した損傷シナリオに転換できることを確認した。

一方、実際の設計への適用に向けては、作用や部材特性の様々な不確実性を踏まえた検討を行う必要がある。今後も設計地震動以外の作用も含めて、高いレジリエンスを有する橋梁構造の実現に向けて取り組んで参りたい。

謝 辞

本研究について貴重なご意見をいただいた筑波大学システム情報系庄司学教授に謝意を表する。

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) 横澤直人、河原井耕介、中尾尚史、大住道生：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、土木技術資料、第64巻、第9号、pp.32~35、2022
- 3) 横澤直人、河原井耕介、中尾尚史、大住道生：耐力階層化鉄筋を用いた損傷制御による断層変位対策の有効性に関する解析的検討、第25回橋梁等の耐震設計シンポジウム、pp.1~8、2022
- 4) 日本道路協会：道路橋の耐震設計に関する資料、1997
- 5) 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

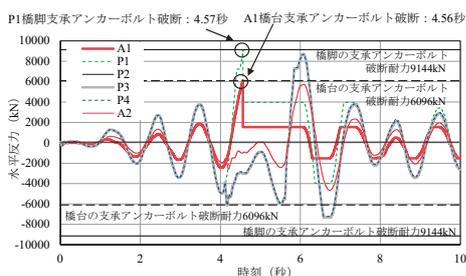


図-10 橋軸方向の支承反力の時刻歴応答

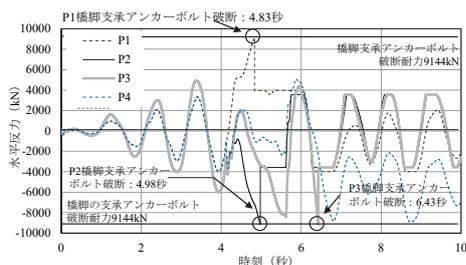


図-11 橋軸直角方向の支承反力の時刻歴応答

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