

2016年熊本地震により被災した 南阿蘇橋・制震ダンパー取り付け部の3次元FEM解析

藤原 昌紀¹・須田 郁慧¹・西山 聡一郎¹・秋山 充良²

¹学生会員 早稲田大学大学院 創造理工学研究科建設工学専攻（〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1）

²正会員 博(工) 早稲田大学教授 創造理工学部社会環境工学科（〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1）

1. はじめに

南阿蘇橋(図-1)は、熊本地震の際に制震ダンパーの RC 製取り付け部に損傷が生じ、南側橋台ではそれが完全に取り外れている。南阿蘇橋は、これまでに 2 度の耐震補強が施されている。平成 10 年には落橋防止システムが設置され、平成 21 年にはレベル 2 地震動の照査を満足させるため、橋軸および橋軸直角方向に制震ダンパーが取り付けられている。この 2 度目の耐震補強時には、平成 10 年に設置済みの落橋防止構造が妨げとなったため、制震ダンパーの取り付け部は橋軸直角方向の変位制限構造を兼ねる形で橋台支承部の横に据え付けられた。

橋軸方向の応答を抑える制震ダンパーの RC 製取り付け部は、その設計時に、橋台上面と取り付け部の下面でのせん断破壊を想定した照査が行われている。しかし、実際には、その面で破壊しておらず、特に南側では、アンカー筋の先端を含む面で押抜きせん断破壊を呈している(図-2)。

この原因としては、I) 桁が橋軸直角方向に震動し、変位制限装置を兼ねる RC 製取り付け部に衝突し、取り付け部を損傷させた、II) 橋台背面部が周辺の地すべりに巻き込まれる形で橋軸方向に押し出され、その途中で制震ダンパーに圧縮力が作用したが、取り付け部がその力に耐えられず取り外れた、III) 桁が橋軸方向に震動し、ダンパーに作用した引張力に RC 製取り付け部が耐えられず取り外れた、の 3 つのシナリオが考えられた。

本稿では、3次元非線形FEM解析により南阿蘇橋・制震ダンパー取り付け部の被害分析を行うとともに、この種の構造の設計法について考察する。



図-1 南阿蘇橋の全景



図-2 南阿蘇橋被災状況

2. 3次元有限要素解析による被害分析

被害分析に先立ち、FEM モデルの妥当性を参考文献 1)に示される実験結果と比較することで検証した。これは、杭とフーチングの縁端距離に関する検

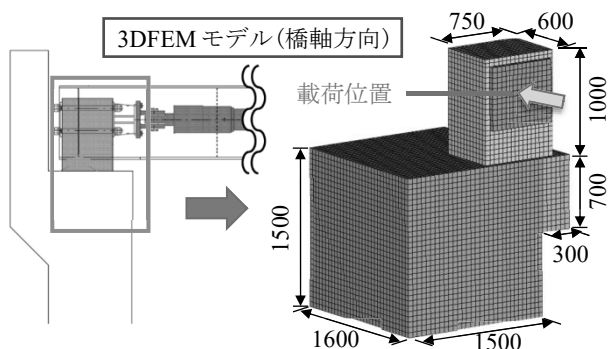


図-3 解析モデルの例

討論文であり、南阿蘇橋と同じく杭がフーチング外側に押し出される際、フーチング部に押抜きせん断破壊をもたらしている。南阿蘇橋の解析に先立ち、まず、この実験結果を再現できる FEM モデルを検討した。使用した解析コードは、DIANA10.2 である。再現解析の結果、概ね実験結果およびそこに示される損傷形態を再現できたことから、同 FEM モデルを南阿蘇橋の制震ダンパー取り付け部に適用した。解析モデルを図-3 に示す。

設計計算書に示される保有水平耐力は橋軸方向で 975kN、橋軸直角方向で 1400kN であった。一方、FEM 解析で得られた荷重－変位関係を図-4 に示す。橋軸方向で 1049kN、橋軸直角方向で 690kN の最大荷重が得られた。制震ダンパー取り付け部は図-5 に示したように、橋台天端の隅角部に存在する。このため、図-5 に示されるように、隅角部では作用力に対して抵抗する鉄筋やコンクリートが少なくなる弱部方向がある。

FEM解析では、橋軸直角方向の桁衝突を想定した図-5の右側方向に力を作用させているので、弱部方向の解析となり、その結果は設計時に想定した破壊面と異なり設計値を大きく下回ったものと考えられる。橋軸方向には、ダンパーに圧縮力がかかることを想定した押し込み力を作用させた。その結果、1049kNとほぼ設計時の想定通りの耐力が得られている。なお、橋軸方向でも、ダンパーに引張力が作用すると(図-5の弱部方向)、橋軸直角方向と同様に、保有水平耐力は小さくなると推測される。

いずれの場合も、破壊が進行する面は、設計で想定された取り付け部下端と橋台天端の設置面とならず(図-6の「設計で照査した破壊面」)、主引張りひずみが大きくなる方向に沿って、押抜きせん断破壊を呈する結果となった。

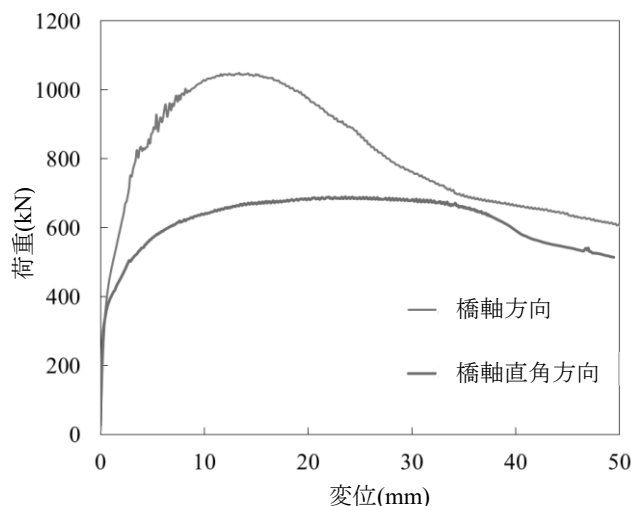


図-4 荷重－変位関係

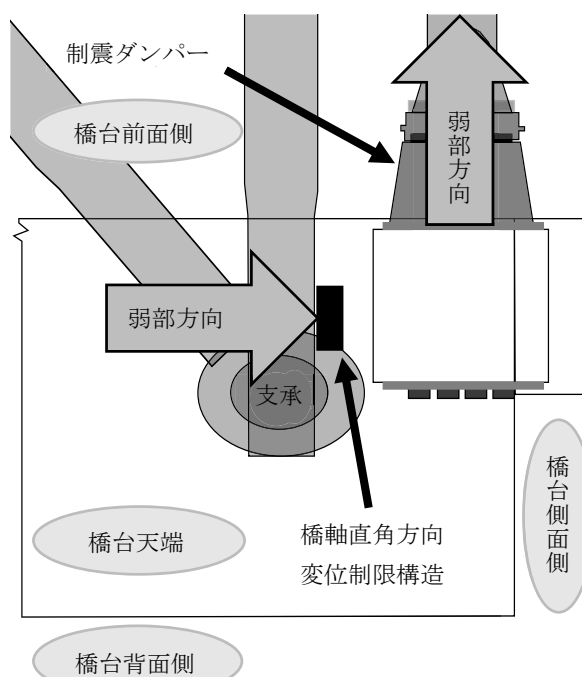


図-5 弱部方向模式図

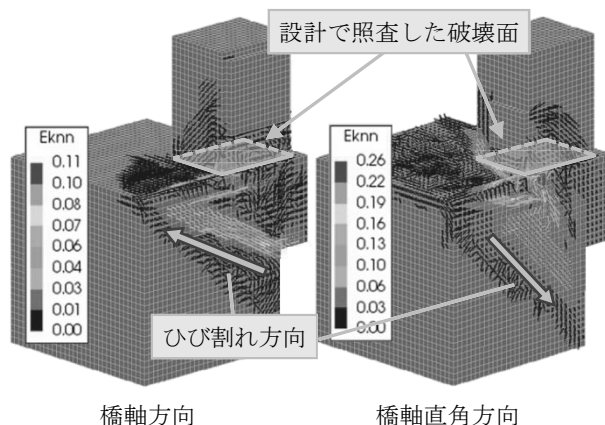


図-6 主引張りひずみコンター図

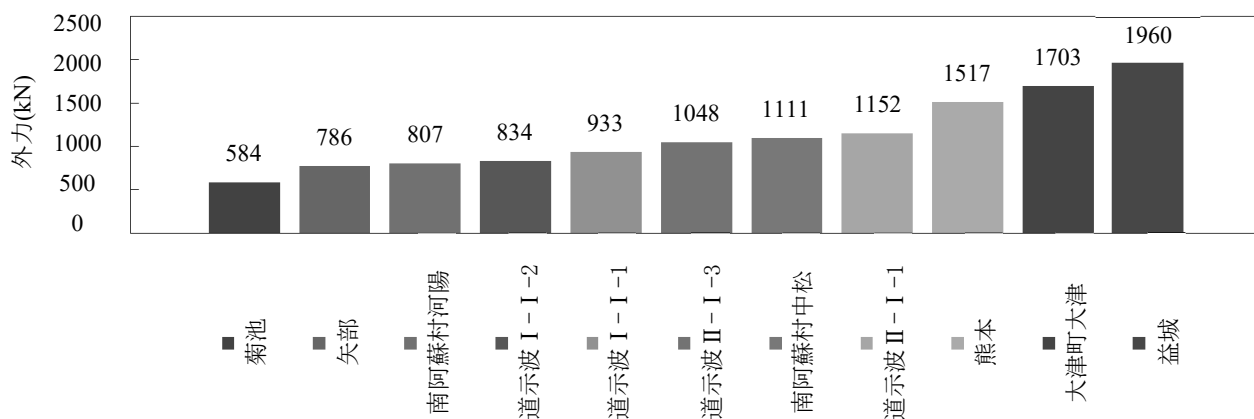


図-7 橋軸方向 外力比較図

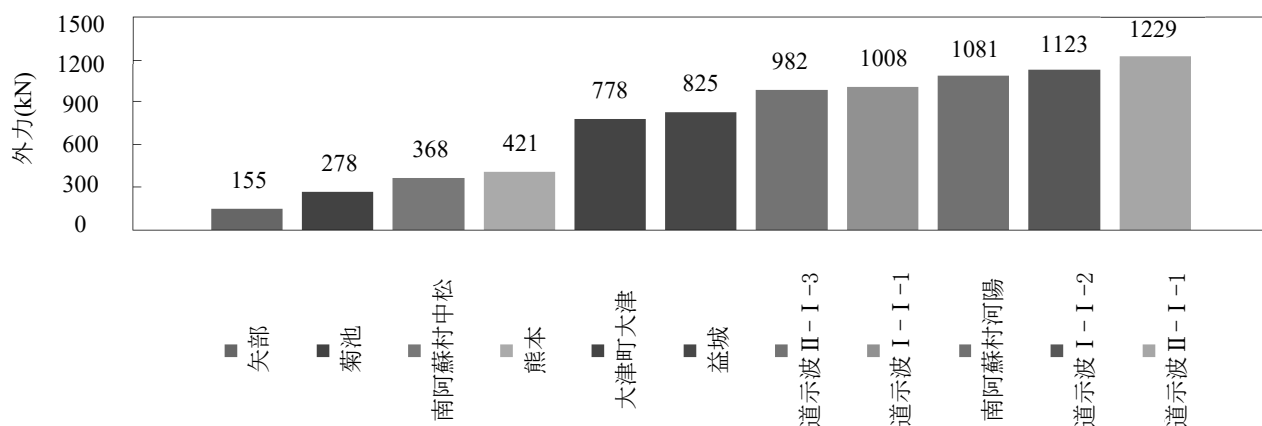


図-8 橋軸直角方向 外力比較図

3. 観測波を用いた作用力の推定

南阿蘇橋の2回目の耐震補強の際、レベル2地震動に対する照査が行われている。その設計計算書に示される対象橋梁の固有値解析結果を基にして、橋梁全体を簡易的に一質点系モデルと見なし、橋軸方向・橋軸直角方向に対して線形動的解析を実施した。

解析にあたり、制震ダンパー取り付け部に作用する外力は、既往の論文²⁾を参考にして、支承部の反力から求めた制震ダンパー取り付け部付近の桁の質量が取り付け部に衝突すると仮定して算出した。動的解析で用いた地震動は、道路橋示方書に規定される設計波（道示波）と熊本地震の際に南阿蘇橋の周辺で観測された幾つかの地震波を用いた。

推定された、橋軸方向および橋軸直角方向の制震ダンパー取り付け部への作用力をそれぞれ図-7および図-8に示す。特に南阿蘇橋に一番近い南阿蘇河陽で観測された波を用いた場合、橋軸方向で807kN、橋軸直角方向で1081kNの作用力が推定された。この簡易的な動的解析や、図-2に示されるように、制震ダンパー取り付け部の橋軸直角方向内側に桁衝突痕

がみられたことから、制震ダンパー取り付け部は、橋軸直角方向への桁と取り付け部の衝突により損傷した可能性が高い。

ただし、橋台ジョイント部の損傷(図-2の右下)や南阿蘇橋周辺の地すべりの様子(図-1)から、橋軸方向への橋台の移動も考えられ、今後も継続した検討が必要である。

4. ダンパー取り付け部の照査法の提案

現状は、制震ダンパー取り付け部の下端においてせん断力に対する照査が行われており、南阿蘇橋で起きたような、橋台部に押抜きせん断破壊が生じることは照査項目に入っていない。

耐震設計では、想定した破壊位置に想定した破壊モードを誘導することが極めて重要である。RC製の制震ダンパー取り付け部と橋台部の耐力階層化を図ることで、a) 確実に制震ダンパーにおいて地震エネルギーの吸収を図る、b) 地震後の修復作業の容易さを考慮し、橋台取り付け部の押し抜けせん断破壊を防ぐ。この目的のため、以下の照査式(1)および

(2)を提案する.

$$P_d < P_M < P_{S1} < P_{S2} \quad (1)$$

$$P_d < P_{S1} < P_M < P_{S2} \quad (2)$$

ここに、 P_d ：制震ダンパーの最大発現力、 P_M ：制震ダンパー取り付け部の曲げ耐力、 P_{S1} ：制震ダンパー取り付け部のせん断耐力、 P_{S2} ：橋台部の押抜きせん断耐力、である。両式を用いる場合の耐力階層化の模式図を図-9に示す。

式(1)、あるいは式(2)を用いて耐力階層化を行うことにより、制震ダンパー取り付け部のせん断耐力(P_{S1})を橋台部の押抜きせん断耐力(P_{S2})が上回り、破壊面を橋台部の押抜きせん断破壊から、設計で照査を行っていた、制震ダンパー取り付け部下端へと誘導できる。なお、確実に制震ダンパーを機能させるためには、その最大発現力 P_d の推定も重要である。

5. パラメトリック解析

FEM解析の結果より、押抜きせん断破壊面は、制震ダンパー取り付け部のアンカー筋の埋込み長さに依存していると仮定し、埋込み長さ(設計時はアンカー径の15倍である435mm)をパラメトリックに変化させることで、保有水平耐力と破壊位置への影響を調べた。埋込み長さは、橋台拡幅部と同じ長さである700mm、アンカー径の30倍である870mm、解析モデルの下端までの長さ1500mmの3条件とした。

表-1に解析結果の一覧を示す。橋軸方向・橋軸直角方向ともにアンカー筋が長くなるのに伴い耐力の増加が見られた。また、橋軸方向の埋込み長さ870mm以上のモデルにおいては、破壊面が橋台部の押抜きせん断破壊から、設計時の想定である破壊面(図-6参照)に誘導されたが、弱部方向となる橋軸直角方向では、制震ダンパー取り付け部下端への破壊面の誘導は困難であった。

6. まとめ

本稿では、南阿蘇橋のダンパー取り付け部が2016年の熊本地震で被災した原因について、3次元有限要素解析により分析を行った。南阿蘇橋では、橋台天端の隅角部に落橋防止構造を兼ねる形でダンパー取り付け部が据え置かれており、作用力に対する抵抗が小さい方向が存在するため、その方向に容易に押し抜けせん断破壊することが分かった。

3次元有限要素解析や動的解析、制震ダンパー取り付け部の橋軸直角方向内側に見られた桁衝突痕か

ら、桁の衝突により生じた橋軸直角方向への水平力により押抜きせん断破壊が生じた可能性が高い。

この破壊を防ぐためには、取り付け部と橋台の一体化を図るための大掛かりな補強が必要となるため、南阿蘇橋で行われたような隅角部に制震ダンパー取り付け部を設けることは不適當である。

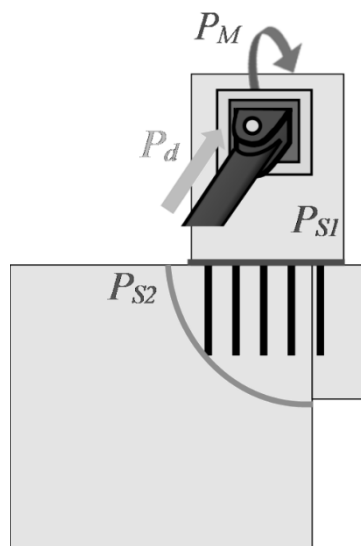


図-9 耐力階層化概要図

表-1 FEM 解析による保有耐力の比較

埋込み長さ(mm)	435	700	870	1500
橋軸方向耐力(kN)	1049	1353	1482	1496
橋軸直角方向耐力(kN)	690	874	976	1087

謝辞：本稿の作成にあたり、九州工業大学 名誉教授 幸左賢二先生には、被害分析の過程で多くのご助言を賜りました。また、土木学会地震工学委員会性能に基づく橋梁等構造物の耐震設計法に関する研究小委員会(矢部正明委員長)より、南阿蘇橋の構造詳細など、多くの貴重な情報の提供を受けました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 宮脇祐太, 幸左賢二, 白戸真大, 野々村佳哲：杭とフーチングの縁端距離に関する解析的検討, 第11回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造物の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, B3-2, 2008.
- 2) 木野村宏昭, 藤田亮一, 貞松昌憲, 秋山充良：熊本地震により損傷した南阿蘇橋の再現解析, 第20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, pp.239-244, 2017