第26回橋梁等の耐震設計シンポジウム
講演論文集（2023年7月）

2023年トルコ・カフラマンマラシュ地震における橋梁被害

森 伸一郎[1]・Gulten Polat[2]・大里 重人[3]・小山 真紀[4]・千葉 達朗[5]・Nurcan Meral Özel[6]

[1]フェロー　博士（工）　愛媛大学特定教授　大学院理工学研究科（〒790-8577 愛媛県松山市文京町3）
[2]非会員　PhD.　Yeditepe大学准教授　Civil Engineering Dept.（34755 Atasehir, Istanbul, Turkey）
[3]非会員　文学士　株式会社土質リサーチ（〒156-0041 東京都東京都世田谷区大原2-27-31）
[4]正会員　博士（工）　岐阜大学准教授　岐阜大学流域圏科学研究センター（501-1193 岐阜市柳戸1-1）
[5]正会員　理修　アジア航測　先端技術研究所千葉研究室（〒160-0023 東京都新宿区西新宿6-14-1）
[6]非会員　工（博）　Boğaziçi大学教授　Kandilli Obs. Earthq. Res. Inst.（34684 Çengelköy-İstanbul/Türkiye）

1. はじめに

2023年2月6日トルコ南東部のカフラマンマラシュ（Kahramanmaraş）県付近に震央を持つ地震は，東アナトリア断層に沿って北東～南西に延びる長さ約300 kmの断層破壊を伴うMw=7.7(AFAD) ～7.8(USGS)の本震とその9時間後に北方を東西に長さ約100 kmの断層破壊を伴うMw=7.5(USGS) ～7.6(AFAD)の後発地震が起きて，トルコ南東部とシリアで膨大な数の建物が倒壊し，その結果，犠牲者の数が50,000人を超えるなど広範囲にわたり甚大な被害が生じた．このカフラマンマラシュ地震では多地点で強震観測記録が得られた．3月と4月に地震による土木・建築の構造物被害や地盤災害の実態を観察し，地震観測地点他で微動観測するなどの現地調査を実施した．ここでは，主に各地で確認できた被害橋梁の実状を報告する．

2. 被害調査の概要

トルコ国では，AFADにより地震観測が行われ加速度時刻歴がインターネットで公開されていた[1)]．翌日以降，記録をダウンロードして地震動記録の特性の理解とJMA震度やMM震度の計算などを行い，構造物被害の潜在性を検討した[2)]．さらに，地形を可視化することで，地盤のゆれが増幅しやすく構造物被害が危惧される地域の把握を容易にするようにした．USGSが衛星画像より読み取った地表断層線データを公開していた[3)]．また，国際人道支援チームにより衛星画像から読み取った被災建物分布データを公開しており[4)]，これらは調査の事前・最中・事後の全ての段階で活用した[2)]．

1回目の現地調査は第1著者と第2著者が3月3日から3月7日までの5日間，2回目の現地調査は第1著者と第4・第6著者が4月18日から4月24日までの7日間，いずれもGaziantepを拠点として実施した．現地調査範囲および地点の設定は，本震の揺れで大きな被害の懸念がある範囲で地震計周辺地域を優先した．

図-1に被害発生の可能性のある領域内での橋梁の分布を示す．被害・無被害・未確認に分けている．現地調査では，主に，地震観測地点および地震計を設置している町・集落での被害集中域での微動観測と建物等被害調査を行った[5),6)]．橋梁については，観測震度（JMA震度）が大きく，かつ，建物被害が

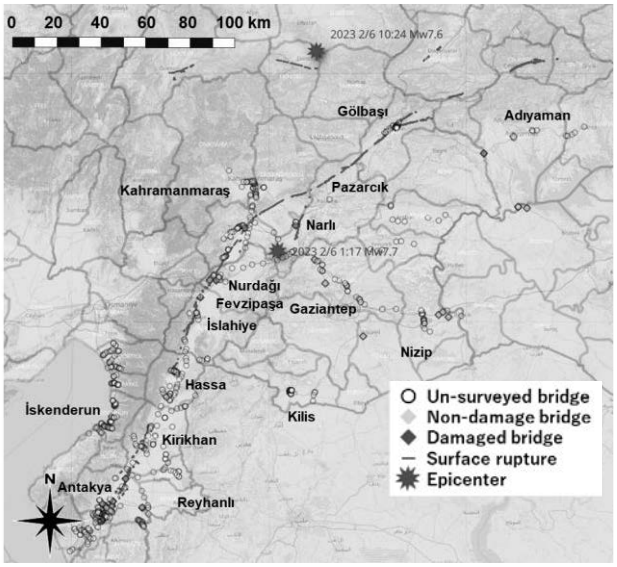


図-1　被害発生の可能性のある領域内での橋梁の分布

大きい地域での橋梁を主に調査した．経験上，一般に建物より橋梁の方が耐震性が高いためであり，1000を超える橋梁がありながら被害を受け通行止めとなった橋は15のみとの報告[7]があったためである．

2度目の調査に先立ち，Google Earth（以降，GEと記す）における地震直後の衛星画像の公開の範囲と撮影頻度が高くなっていたことから，橋梁の分布をあらかじめ探したり，被害橋梁を見つけたり，建物被害状況を把握したりして調査の効率化を図った．

気象庁震度で震度5強から，MM震度階で震度VIIIから橋梁に被害が出るものと考えられるので，そのような震度の揺れが見込まれる領域内にある橋梁をGE衛星画像より検出した．

被害の大きな4県において現地調査を実施した．4県とは，ガズィアンテプ（Gaziantep），カフラマンマラシュ（Kahramanmaraş），ハタイ（Hatay），アドゥヤマン（Adıyaman）である．厳密には，シャンルウルファ（Şanlıurfa）県内のものもあるが，数も限られておりGaziantepとの県境に近い．

橋梁調査への時間制限から調査した橋梁は36橋梁であり，何らかの被害があったもの12橋梁，被害がなかったもの24である．著者らが直接現地調査していないが他の研究者調査の被害橋梁の6橋を加えて18橋をプロットした．**図-1**には被害橋梁（18橋）を赤◆で無被害確認橋梁（24橋）を水色◆で示している．被害橋梁はヌルダウ（Nurdağı）より南に多い．なお，一部を除き，以降で示す橋梁の平面寸法と斜角は全てGE衛星画像より測定したものである．

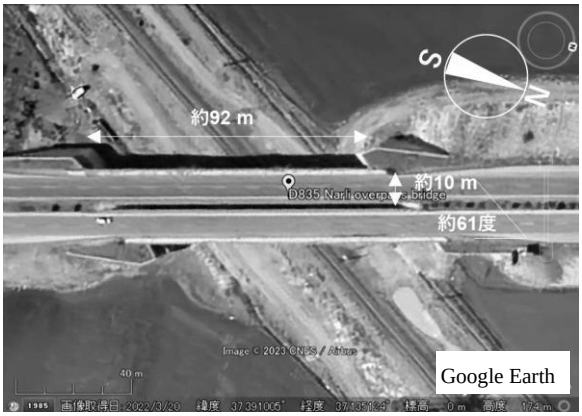


図-2　Narlı跨線橋のGE衛星画像（2022年3月20日撮影）


図-3　Narlı跨線橋の東側側面全景



図-4　Narlı跨線橋のP2橋脚の横梁を南側から見た写真

3. 跨道橋・跨線橋の地震被害

(1) Narlıの跨線橋

カフラマンマラシュ（Kahramanmaraş）県パザルジュク（Pazarcık）郡ナルル（Narlı）町にトルコ国鉄（TCDD）の線路を跨ぐ高速道路D835号線の跨線橋があり（37.390614° N, 37.134704°），2023年3月7日と4月23日に現地調査した．以降，Narlı跨線橋と言う．**図-2**にNarlı跨線橋のGE衛星画像（右が北）を示す．およそ南北に延びており，全長約92 m，橋幅約10 m，3径間ポステンPC桁橋であり，右斜角の約61度の斜橋で，同形状・同構造の橋梁が東西に2本ある．橋梁から約0.5 km離れたところに AFAD地震計TK.4615があり，PGAが664 cm/s^2, PGVが134 cm/s, JMA震度が6.2，MM震度がXIなどと大きな地震動があった．建物被害からはVIII–Xと判定した．

図-3にNarlı跨線橋の東側側面全景を示す．盛土で高度を上げて延ばした道路が鉄道を跨いでいる．

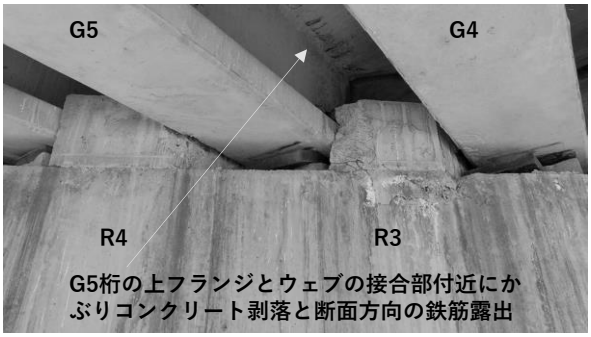
変電所が近接おり，変電所では碍子が地震で被害を受け，少なくとも3本交換されていたのを確認した．高い耐震性の変電設備の被害が生じており，地震動の大きさがうかがえる．さて，ここでは便宜のため，東側から見て左（南）より橋台A1，橋脚P1, P2，橋台A2とする．1橋梁の床版は9本のバルブ付きT型桁（西側よりG1–G9とする）からなり，それらの横変位拘束構造として6個のコンクリートシアキーが設置されている（西側よりR1–R6）．R1とR6はG1とG9の外側で横梁端部に設置されており，R2–R4はそれぞれ，G2–G3，G4–G5，G5–G6，G7–G8の間に設置されている．

この橋梁では横変位拘束構造のコンクリートシアキーと主桁が被害を受けた．**図-4**にP2橋脚の横梁を南側から見た写真を示す．左の橋脚は西側橋梁で端

部ブロックR6の外側へのせん断破壊している．右の橋脚は東側橋梁で，端部シアキーR1では北側の鋭角隅は外側に押し出されるようなせん断破壊しているのに対して，鈍角部に当たるR1の南側は無傷であり，シアキーと桁の間に隙間がある．その結果として，地覆のコンクリートパネルには南側に比べて北側が外へ飛び出るような段差が生じた．

一方，その隣のシアキーR2とR3では，シアキーが桁の下フランジに左から押されてシアキー頭部の破壊（R2）やシアキー基部でのせん断破壊が発生している．これらのことから，P２橋脚の上では，A1-P1の南側床版は鋭角側に横移動するするような動き，P1-P2の北側床版も鋭角側に横移動する動きがあったことがわかる．

図-5(a)，(b)は東側橋梁のP1の北側（P1–P2径間の桁の南端）の横梁上端の様子を示す写真である．コンクリートシアキーR3（エフロレッセンスが下に出ているもの）は，G5から左面に衝突されてクラックが入り，コンクリートが欠損剥落し，シアキー基部がせん断破壊している．シアキーR4はG5桁から右面に衝突されてコンクリートが欠損している．G5桁にはウェブ中央に軸方向の亀裂とコンクリート剥落しており，上フランジとウェブの接合部付近が曲げ破壊しており，フランジのかぶりコンクリートが剥落して，断面方向の鉄筋が露出していた．これらはG5桁が横変位拘束構造のコンクリートシアキーR3に衝突した際の反力が下フランジに右から左へ作用し，集中横荷重が片持ち梁の先端に作用したための基部の曲げ破壊であると理解できる．また，G5桁下のゴム支承パッドは前方に，G4桁下のゴム支承パッドは前方と左横方向に大きく移動している．以上のことから，桁は前後左右に振動しながらも鋭角隅方向（写真右側）により大きく変位したことがわかる．



(a)　G5–G4



(b)　G4–G3

図-5　Narlı跨線橋の東側橋梁P1北側（P1–P2径間の南）の横梁上端

(2) Nurdağı跨道橋

ヌルダウ（Nurdağı）の高速道路の上に跨ぐ建設中の跨道橋が落橋していた（37.169160° N, 36.731824° E）．以降，Nurdağı跨道橋と言う．2023年4月19日に現地調査した．橋梁から約1.7 km離れたところに AFAD地震計TK.2712があり，PGAが603 cm/s^2, PGVが109 cm/s, JMA震度が6.1，MM震度がXなどと大きな地震動があった．建物被害からはIX–XIと判定した．

図-6に調査時点の落橋痕跡を示す．すでに橋は撤去され，跨道橋に当たる下の高速道路の区間では舗装が補修されていた．**図-7**にGE衛星画像（2022年3月20日撮影）を示す．これによれば全長約35 m，橋幅約13 m，単径間の左斜角の斜橋で，斜角52度（橋軸と支承線となす角）である．GE衛星画像によれば，2014年5月時点では橋も道路もなかったが，2017年11月時点では橋台と上部工は確認され，2018年1月時点までなかった盛土が同年8月には認められ橋台の背面と翼壁で囲まれる領域に盛土が施工され



図-6　Nurdağı跨道橋の（2023.4.19時点）の落橋痕跡



図-7　Nurdağı跨道橋のGE衛星画像（2023.4.19時点）

ている． GEのStreet View（以降ではGESVと略す）により南側面と北側面が確認でき，ポステンPCのT桁橋であると推測される．なお，地震の翌日に撮影されたGE衛星画像（2023年2月7日）では，Nurdağı市の広範囲で雲がかかり，特にNurdağı跨道橋付近では厚い雲のため全く状況が認識できない．

図-8に西側橋台の橋座上の様子を示す．桁かかり長が短い．橋台上には，一部のゴム支承パッド（約40 cm四方）やコンクリート破片が残っていた．また，西側橋台には，橋軸方向に平行に設置された11個の横変位拘束構造（Lateral displacement restrainer）であるコンクリートシアキー（目測で45×45×10 cm程度）があり，ゴム支承パッドの痕跡があることから支承台座コンクリートと推測した．主桁は11本と推定した．

図-9に東側橋台の正面全景を示す．橋台胸壁に付いた中央部4つの長方形の影は（主桁2–3，4–5，7–8，9–10の間）横変位拘束構造のシアキーの影であると推察した．また，桁1と桁11の外側にも横変位拘束構造のシアキーがあり，東側橋台（A1）の南側端の鈍角側の外側シアキーは残っていたが，北側端の鋭角側の外側シアキーは外側へのせん断破壊により脱落しており，細い定着鉄筋が下方に伸びていた．西側橋台（A2）も同様で，鈍角側のシアキーは残り，鋭角側のシアキーは脱落しており定着鉄筋が下方に伸びていた．定着鉄筋は細く目測でD10程度であった．このコンクリートシアキーを横変位拘束構造の機能を期待するとすれば，鉄筋量は不足していると推察される．また，橋軸方向の変位制限装置としてのアンカーバーは見当たらなかった．

両橋台ともに，上部工床版の鋭角側の横変位拘束構造コンクリートシアキーがせん断破壊していたことから，床版の回転挙動によるものと推察された．床版の回転挙動を引き起こす要因として，(1)橋台からの桁衝突力，（2）変位拘束構造からの力，(3)下部構造の応答差がある[8]．

図-9の写真から描き起こしたスケッチを**図-10**に示す．鈍角側で残っている外側の横変位拘束構造のコンクリートシアキーのすぐ横に胸壁上部に桁の衝突痕がありコンクリートが局所的に破壊しているが，そこから下方と左斜め下方向にクラックが延びている．また，胸壁上端面には，その前面の局所破壊位置から左斜め方向に放物線状の2本のクラックが背面に漸近するように延びている．このクラックは，桁衝突による局所破壊位置への作用力によるせん断クラックであると推察される．また，西側橋台でも，点対称の位置に翼壁への桁の衝突痕が見られ，コンクリートが大きく剥落していた．このような橋台胸壁からの桁の衝突力の反力が床版の鋭角方向への（反時計回りの）回転を引き起こしたものと考えられる．



図-8　Nurdağı跨道橋の西側橋台の橋座上の様子

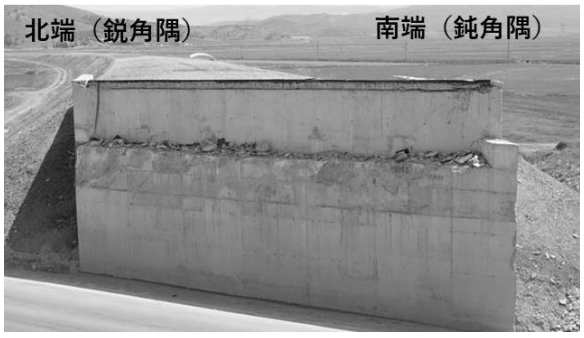


図-9　Nurdağı跨道橋の東側橋台の正面全景

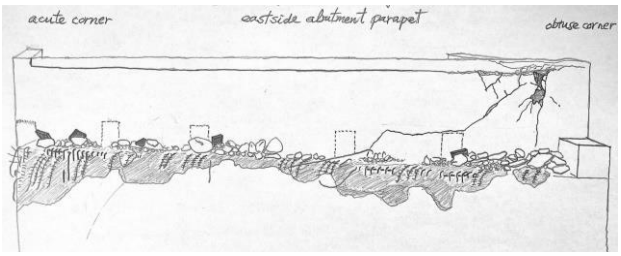


図-10　Nurdağı跨道橋の東側橋台上部の全景スケッチ

図-9，**図-10**からは，橋台前面壁の上部の隅角部のコンクリートが大きく剥落している．東側橋台では，鋭角側の方が下方向への剥落長さが長い．剥落部分の中には，隅部に配筋された鉄筋が露出しており，また，桁が落下する際の擦痕が付いているが．擦痕の間隔が等しくない．一方，西側橋台では，橋台前面壁の上部の隅角部のコンクリートは剥落していない．落下する際の擦痕の間隔はほぼ等間隔である．さらに，前述したように，支承台座コンクリート（と推察しているもの）が西側橋台では11個全て残存しているのに対して，東側橋台では，一つも元の位置にはなく，いくつかは破壊されて移動していた．これらのことから，地震動により橋軸方向に振動し，東側と西側の鈍角側では桁が橋台胸壁に衝突することで回転変位が生じたと言える．詳細に推察

すれば，最初に床版が東側に変位した際に東側の鈍角側桁が橋台胸壁に当たり回転が生じ始め，次に西側に揺り戻しで変位した際に西側鈍角側桁が早くに橋台胸壁に当たり，そこを回転軸として床版は大きく回転して桁が東側の横変位拘束構造のコンクリートシアキーを破壊し，沓座から脱落した桁は台座コンクリートも破壊して大きく変位して，鋭角側から桁が落下していったものと推察できる．

以上の考察から，横変位拘束構造が適切に設計されていなかったことが落橋した原因であると考えられる．

(3) Fevzipaşaの跨道橋

Gaziantep県イスラヒエ（İslahiye）郡を南北に走る高速道路D825線（Islahiye–Çevre道路）のフェヴツィパッシャ（Fevzipaşa）にあるインターチェンジの跨道橋（37.100929°N, 36.652272°E）に被害が見られた（調査：2023年3月7日）．橋梁から約0.4 km離れたところに AFAD地震計TK.2308があり，PGAが1788 cm/s^2, PGVが146 cm/s, JMA震度が6.3，MM震度がXIIなどと大きな地震動があった．周辺の建物被害からはVIII–Xと判定した．

図-11にこの橋梁全体のGE衛星写真（2022年7月15日撮影）を示す．この橋梁は，橋長約220 m，橋幅約13 mの6径間ポステンPCバルブT桁橋で，小判型断面の単柱式橋脚で支持されている．東側の北向き道路と西側の南向き道路に分離されて2橋がある．便宜上，北側より橋台A1，橋脚P1～P5，南側橋台A2と言う．**図-12**に北側から南側を望む橋梁全景の様子を示す．

図-13に西側橋梁 P1南面の見上げた様子を示す．1橋あたり10本の主桁からなり，橋脚横梁上面にはすべての主桁間に横変位拘束構造としてのコンクリートシアキーが設置されており（計9個），横梁端部には，約2倍の厚さのコンクリートシアキーが設置されている．横変位拘束構造は合計で11個である．

図-14に理解の助けとするために描いた主桁とコンクリートシアキーの相対的な関係の概念図を示す．寸法は作画のために仮定したものである．**図-13**には主桁（G1–G10）とコンクリートシアキー（R1–R11）の番号を示す．便宜的に，北から南に向いて，左から順に番号を打っている．この橋脚では，この橋梁で生じたすべての形態の被害が見られた．

図-15に主桁G2–G5と横変位拘束構造G2–G5の様子を拡大して示す．コンクリートシアキーでは，R4, R5が左右, R10, R11が右側において桁の下フランジ（バルブ）の衝突でコンクリートが欠損している．

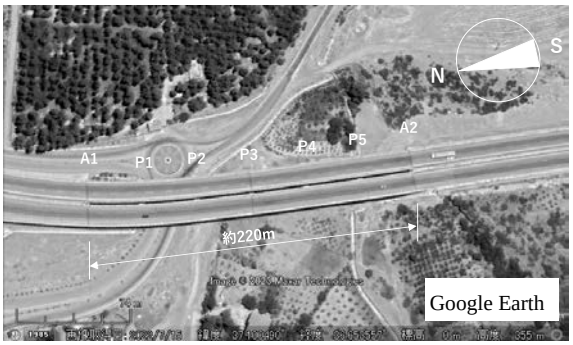


図-11 Fevzipaşa跨道橋の衛星写真（2022年7月15日撮影）



図-12 Fevzipaşa跨道橋の北側から南側を望む橋梁全景



図-13 Fevzipaşa跨道橋の西側橋梁 P1南面の見上げた様子

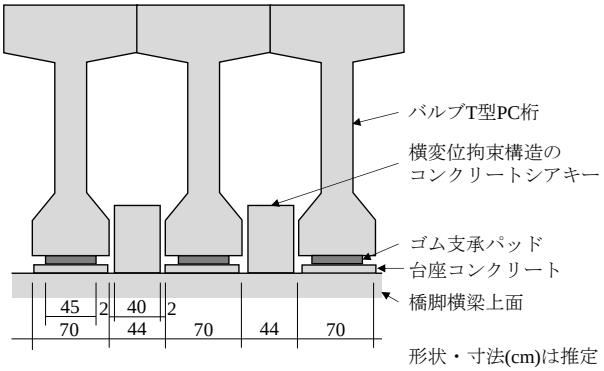


図-14 主桁と横変位拘束構造の相対的な関係の概念図

また，主桁ではG3の下フランジ下面西側のコンクリートが剥落しており，西側のR4との衝突によると推察される．

また，東側橋梁のP3橋脚北面の観察では，主桁G1, G7, G11のウェブ東側面に軸方向の大きなひび割

れが生じていた．図-16にP3橋脚上部の東端部主桁G11の周辺写真を示す．ウェブ東側面中央部に橋軸方向に幅広いひび割れがある．ひび割れの上側が下側よりも外に（東側に）出ているように見えるため，桁とコンクリートシアキーとの衝突によって作用する水平力に対して上フランジの構成する床版を固定端とする片持ち梁とする系をモデルとして考えた場合に東側面が引っ張りになるセンスの曲げ破壊によると推察される．さらに，G2, G3の主桁の下にあるゴム支承パッドが右ずれを伴いながら前面に大きく移動してきている．これは主桁の軸方向変位が大きくゴムパッドの橋軸方向のせん断変形が許容変形量を大きく上回り，パッドと桁や台座コンクリートの間の摩擦力が不足するなど非線形挙動の結果として発現したものと推察される．

以上のような被害は2橋の全橋脚・橋台の上で認められ，小判型断面の単柱式橋脚の周辺地盤では，コンクリートシアキーの破損に伴い落下したコンクリート片が直下を中心に散乱していた．散乱していた範囲は，破損シアキーの直下の点から遠いもので約 3m（西側橋梁P4北側の破損シアキーR3, R4, R6, R7, R8, R10の内で最も近いR3から約 3m ）に達していた．橋脚高さを型枠の寸法と枚数から推定して約10 mである．運動方程式より自由落下時間は約1.4秒であるので，水平方向の初速は約2.8 m/sとなる．桁とコンクリートシアキーの衝突でシアキーが破壊され，その結果としてコンクリート片が生じたとすると，その際の橋脚横梁の水平応答が最大で約2.8 m/sであったことになり，過大な地震応答が生じていたと言える．

また，直接的な損傷ではないが，東側P3橋脚基部からは全周にわたり泥水が噴出した痕跡があった．高いもので80 cm程度であり，埋戻し土の液状化によるものと推察される．

4. Antakya市における渡河橋梁の地震被害

アンタキヤ（Antakya）市には，シリアに源を発するオロンテス（Orontes）川が国境を越えてAntakyaの東に南から入り，アミク（Amik）湖を排水してできたAmik平野を大局的には山地外周を反時計回りに大きく孤を描き蛇行しながら， Antakya市に北から入り南下して市の中心部を流れる．この地域には，川と橋の少ないトルコ南東部の中では比較的橋が多い．橋梁被害が多かったので，章を改めて事例を詳述する．

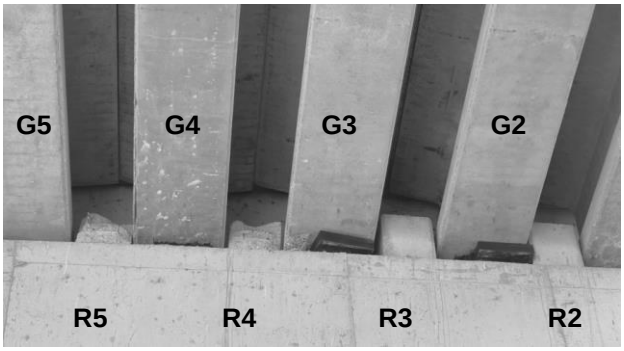


図-15 Fevzipaşa跨道橋の西側橋梁 P1南面主桁G2–G5と横変位拘束構造G2–G5の様子

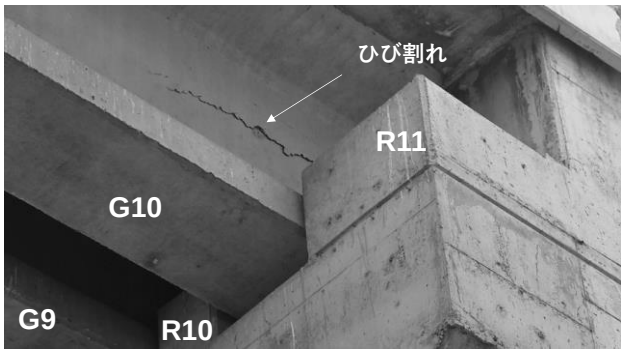


図-16 Fevzipaşa跨道橋P3橋脚上部の東端部主桁G11の周辺

(1) Bekir Karabacak橋

Orontes川に架かるベキール・カラバジャック（Bekir Karabacak）橋はAntakya市の中心部に位置して新旧街区を結ぶ重要な橋であるが重篤な被害が生じていた．図-17にこの橋のGE衛星画像（2023年4月26日撮影）を示す（36.215456°N, 36.162118°E）．写真上がOrontes川の上流である．上り下りで独立して2橋が平行に架けられており，橋軸は河川軸と右斜角を成し，橋脚上での床版の継ぎ目と橋軸との成す角度を測ると約77度の斜橋である．調査した2023年3月4日時点では，上流側の橋は被害を受けていた

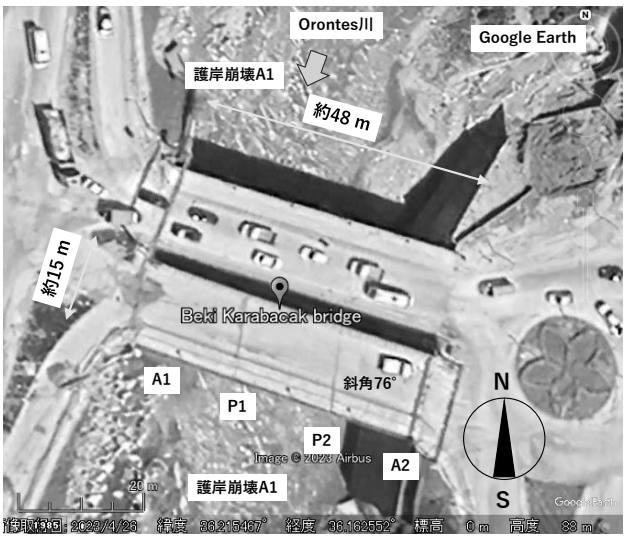


図-17 Bekir Karabacak橋の衛星画像(2023年4月26日撮影)

が応急措置がなされ，解体復旧工事等の車両などで交通量は多かった．一方，下流側の橋は使用されていなかった．便宜のため仮に写真左の右岸より，橋台A1（右岸），橋脚P1,P2，橋台A2（左岸）と言う．

橋の下から確認したところ，8本のPCのT桁橋である．橋長は約48 m，橋幅が約 15mであり，2橋は平行に架けられていたが，地震後は，左岸側に比べて右岸側の方が2橋の間隔が狭くなっている．

また，橋の周囲にあった多くの建物が倒壊もしくは解体のため撤去されており，被害率は30 %を大きく超過している．この橋梁中心から約0.24 km離れたところに AFAD地震計TK.3123があり，PGAが868 cm/s^2, PGVが186 cm/s, JMA震度が6.3，MM震度がXIなどと大きな地震動があった．この橋梁を調査した2023年3月4日時点では，橋梁の周辺はまだ，倒壊した建物が残っていた．周辺の建物被害からはX–XIと判定した．

図-18に下流側右岸から撮影した橋の側面を示す．薄い小判型断面の橋脚に載っている2径間の桁端部の間の鉛直線が橋脚中心より右岸側に大きく移動しており，その量はP2の上よりP1の上の方が大きい．P1 上では，A1–P1の桁の端部が橋脚に掛かっていない．なお，桁の長さと橋台–橋脚間の距離の比較から，後者が短くなっていた．A2橋台がせり出たのか，もしくは，河川内部に派生した左横ずれ断層があり北で左岸に南で右岸に向かう線で河川軸と鋭角に交差するようにあるのか，いくつかの仮説が考えられる．

図-19に下流側の橋の端部歩道の法線を左岸側から撮影した写真を示す．歩道の法線（赤白塗装）はA2–P2径間とP2–P1径間の間で折れ線（折れ点を矢印で示す）のように変化して，右岸側に向かって上流側に直線的にずれている様子がわかる．これらの径間が載るP2橋脚の上の2径間の床版の間に下流側で約14 cmの開きがあり，上流側には開きがないことから，およそ1 %の時計回りの回転移動していることになる．P1橋脚の上での床版間の開きは上下流側でほぼ同じであったため，平面回転移動は2径間分あることになり，右岸側端部では約30 cmとなる．現地で計測していないが，衛星画像で認知できることから，30 cm以上あると推察される．

図-18の状況を参照して現地の観察結果を述べる．A1–P1径間とP1–P2径間の床版の高さは22 cmの段差がある．P1 上では，A1–P1の桁の端部が橋脚に掛かっていない．橋の下面の状態を見るために，A1–P1径間のP1寄りにカメラを降ろして撮影した写真を撮影して観察した．**図-20**にA1–P1径間のP1寄り橋下



図-18 Bekir Karabacak橋の下流側右岸からの橋の側面



図-19 Bekir Karabacak橋の下流側橋の歩道法線の折れ



図-20 Bekir Karabacak橋のA1–P1径間のP1寄り橋下面

面を示す．8本のT型桁があり，その内，橋脚上面に載っていないのは，最下流の1本のみであり，2本目から8本目にかけては桁掛かり長さが，1–2 cm程度ずつ増えて行っているように読み取れる．また，橋脚の上下流の端面には10 cm高さの側壁とその上に10 cm程度の直方体コンクリートが設置してあり，横変位拘束構造を設けているが，その間の個々の桁には設けられてはいなかった．さらに桁掛かり長が短い．前述したようにP2橋舗装面での床版の開きは下流側で約 14 cm，上流側で0であるので，8本の間の開き差は約 12 cm程度，1本あたり1.7 cmとなり，橋の上面と下面での観察結果は整合する．すなわち，斜橋の鋭角隅が外側へ変位するような床版の回転であり，回転の原因は軸方向の桁と橋台胸壁の衝突によるものであると推察される．

橋台と背面地盤との接続部には右岸側で70–80 cm

の段差が，左岸側では30–40 cmの段差ができていた。右岸側では橋台背後地盤の沈下のため，橋台上の踏み掛け版が跳ね上がり，その下に橋のアスファルト舗装が入り込んでいた．その量は約40cmであった．この量だけ橋台間の距離が狭くなったことを意味しており，橋台のせり出しや橋台基礎の離隔の短縮が原因と考えられる．右岸側の沈下量が大きいのは，右岸側では上流・下流ともに河川護岸が崩壊して，背後の直径 1 m前後の巨石（ボルダー）が崩落したために橋台背後地盤の両側からの拘束が減少したためであると考えられ，河川護岸の崩壊は地震動の早い段階で起きたものと推察される．

4. まとめ

地震が起きて1か月後と2か月後に現地調査をして観察した橋梁は小規模・中規模の渡河橋または跨道橋・跨線橋であり，構造的にはPC桁橋またはRC桁橋の単純支持形式であった．被害橋梁はいずれも大きな地震動が観測されたところであり，被害形態としては，(1)横変位拘束構造であるコンクリートシアキーの損傷・破壊，(2)主桁の軸方向亀裂，(3)ゴム支承パッドの移動・脱落，(4)支承台座の損傷，(5)橋台胸壁コンクリートの損傷・剥落，というものに分類できた．そのメカニズムは，大きな地震動の揺れによる床版・主桁の変位であり，それが主桁と橋台胸壁の衝突，主桁と横変位拘束構造であるコンクリートシアキーの衝突，それによる斜橋の平面内回転，回転による横変位の増大であると考えられた．落橋したNurdağı跨道橋はその典型である可能性がある．

謝辞：本研究における現地調査に当たり，多くの方々にご支援・ご協力をいただきました．3月の現地調査では，京都大学防災研究所自然災害研究協議会には調査旅費助成を戴きました．また，トルコ国災害緊急事態管理庁（AFAD） には貴重なデータ提供で，同地震リスク低減部門のGeneral ManagerのOrhan Tatar博士からは現地調査許可を戴くのにお世話になりました．東北大学災害科学国際研究所の特任教授の竹谷公男先生およびJICA地球環境部防災グループの皆様には地震直後での現地調査に対して様々なご支援を戴きました．山口大学非常勤講師の村上ひとみ先生には，様々なご支援ご協力を戴き，4月の調査に同行して戴きました．芙蓉コンサルタントの故・大野二郎様，須賀幸一様，SkydioのTom Moss様、JIWの柴田巧様には，調査に当たり調査機材などでご支援戴きました．CODE海外災害援助市民センター事務局長の吉椿雅道様には，地震直後2月以降のアドゥヤマン（Adıyaman）の被災実況を教えていただきました．4月の現地調査は，科学研究費助成事業（特別研究促進費）「2023年トルコ南部の地震と災害に関する総合調査」として実施しました．兵庫県立大学教授の阪本真由美先生とBoğaziçi大学Technical ExpertのDilek Kepekçi様にはこの4月現地調査に同行していただきました．ここに記して深く謝意を表します．

参考文献

1) AFAD: TADAS (Turkish Accelerometric Database and Analysis System), 2023.2.7-2023.2.21(Downloaded). https://tadas.afad.gov.tr/event-detail/15499
2) 森 伸一郎，大里 重人，千葉 達朗：2023年2月6日トルコ・シリア地震の地震動と被害状況　インターネットから得られる情報に基づく地震動と構造物被害状況の予備的な工学的分析，2023年2月6日トルコ・シリア地震緊急報告会（オンライン公開），松山，2023.3.1.
3) USGS: Turkey Earthquake Emergency Response, Surface rupture lines, 2023.2.19, revised 2023.3.15. (Downloaded) https://usgs.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=5229bb842bd64b688d769abbefe43b46
4) 人道支援 OpenStreetMap チーム: HOTOSM Turkey Destroyed Buildings (OpenStreetMap Export), https://data.humdata.org/dataset/hotosm_tur_destroyed_buildings?fbclid=IwAR1Iu8ceLbEDAQhp95vMevj5UGINufknpmmVL6rdLzZkkRb8mhp0_wLqP0I
5) 森 伸一郎，大里 重人，千葉 達朗，Nurcan M. Özel, Gülten Polat：2023年トルコ・シリア地震の現地調査速報，2023年トルコ・シリア地震現地調査速報会（オンライン公開），松山，2023.3.15.
6) 森 伸一郎，大里 重人，千葉 達朗，Nurcan M. Özel, Gülten Polat：2023年2月トルコ・カフラマンマラシュ地震における各地の地震動と構造物被害，日本地球惑星科学連合2023年大会（JpGU-2023），U-1309，2023.5.
7) Middle East Technical University: Preliminary Reconnaissance Report on February 6, 2023, Pazarcık Mw=7.7 and Elbistan Mw=7.6, Kahramanmaraş-Türkiye Earthquakes, REPORT NO: METU/EERC 2023-01, 2023.
8) 川島 一彦，渡邊 学歩：斜橋における落橋防止構造の有効性に関する研究，土木学会論文集，No.675/I-55, 141-159, 2001. https://doi.org/10.2208/jscej.2001.675_141