

トルコ・コジャエリ地震による交通施設の被害概要

Damage of Transportation Facilities in the Kocaeli Turkey Earthquake

Kawashima Kazuhiko Suzuki Takeyasu
川 島 一 彦* 鈴 木 猛 康***
Hashimoto Takao
橋 本 隆 雄**

ま え が き

1999年8月17日午前3時2分、トルコ北西部の工業都市Kocaeli (コジャエリ, 旧名 Izmit) の南約11kmを震央とする M7.4の地震が発生した。本地震は北アナトリア断層帯の右横ずれ断層によって発生したもので、トルコで最も人口の密集した地域を襲い、18 000人以上の人命を奪った。筆者らは、土木学会トルコ地震被害調査団の交通施設調査班として、9月5日より9月11日まで被災地の被害調査を実施した。その橋梁と鉄道における被害状況の概要を報告する。

図-1に調査ルートを示す。断層はマルマラ海の海底から一旦 Golcuk に上陸し、再度海底下に消失してから Izmit 湾の南に再上陸し、Sapanca 湖を經由して Akyazi まで、ほぼ東西方向に走っている。道路は、高速道路 (Motorway) が2本東西方向に走り、一方鉄道は、イスタンブールとアンカラを結ぶ東西系と南から北上して Sakarya (旧名 Adapasari) に終着する南北系の2本がある。

以下に、これらの道路、鉄道と断層が交わる個所で、発生した代表的な被害例を示す。

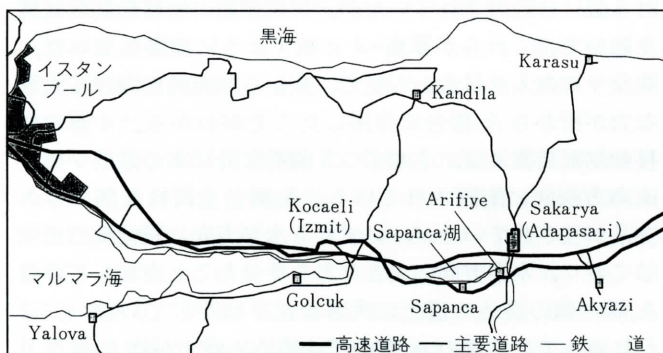


図-1 調査ルートの主要な鉄道、道路の配置と断層

1. 道路施設の被害

1-1 概 要

コジャエリ地震では、主として Kocaeli より東の地震断層に沿った地域で道路施設に被害が発生した。湿地帯に盛土して建設された高速道路の沈下や橋台取付け部における段差等、我が国でもよく見られる被害のほか、断層が道路を横断したり、橋梁を横切ることにより、断層変位そのものが道路施設に甚大な被害を与えた。また、断層変形に伴い、断層に比較的近い領域では右横ずれの大きな地盤の塑性変形が発生、これが橋梁の下部構造を移動させ、支承に残留変形を与えていることも特徴として挙げられる。

1-2 Arifiye 周辺の道路被害

図-2に Arifiye 地点周辺の高速道路と高速道路をオーバーパスする道路橋、ならびに河川横断橋梁の配置を、地震断層の位置とともに模式的に示す。図に示すように高速道路は、西から東へと全体的に北へと方向を変えながら東西方向に走るが、蛇行を繰り返し、この間に高速道路をオーバーパスする4つの道路橋 (No.1～No.4) を通過する。地震断層の走行はほぼ東西方向であるので、断層を東西の点線で記すと、断層は No.1 橋梁と No.2 橋梁の間で高速道路を斜めに横切り、No.2 橋梁の北側橋台付近を通過して、再び No.4 橋梁の手前で高速道路を斜めに横切っていることがわかる。さらに断層は河川 (Sakarya 川) の左岸をかすめ、トヨタ自動車合弁工場 (TOYOTA SA.) の敷地内へと連続している。以下に、これら5橋梁を対象として実施した調査結果をまとめる。

1) Arifiye 橋 (No.3 橋梁)

Arifiye 橋 (Arifiye Viaduct) は両端の橋台と3基の壁式橋脚で支持された4径間単純 PC 斜橋 (斜角約70度) であり、床版は連続していた。中央部の2径間が高速道路を、

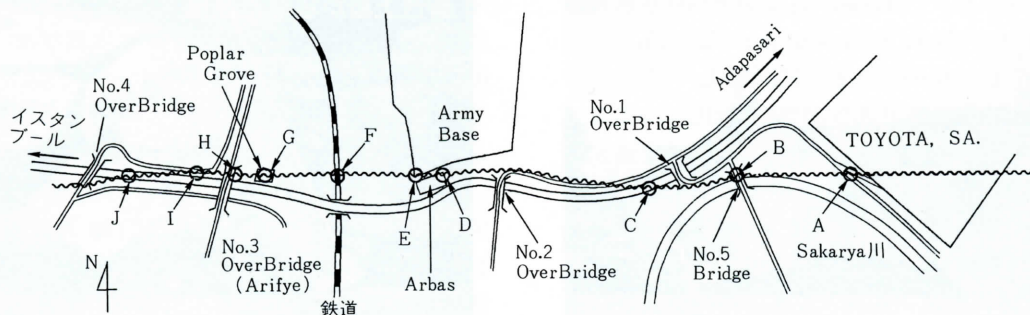


図-2 Arifiye 地点周辺の高速道路のオーバーパス橋梁、河川橋梁と地震断層の関係

*東京工業大学 土木工学科 教授 工博
** ㈱千代田コンサルタント 都市計画部

*** ㈱熊谷組 技術研究所 工博

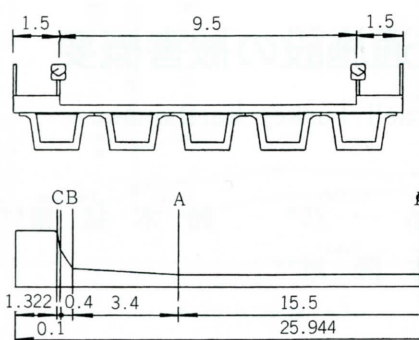


図-3 Arifiye 橋の断面

また両端の2径間が高速道路の両側の側道をオーバーパスしている。橋長は4@26m=104mであり、有効幅員は12.5mである。ここでは、北側から順に、A₁橋台、P₁、P₂、P₃橋脚、A₂橋台と呼ぶこととする。地震により4径間とも南側の端が落下する形で落橋した。上部構造は、プレキャストUビームを5本横に重ねた構造となっており、桁の断面は図-3に示すとおりである。

本橋を調査した9月7日段階では、すでに写真-1に示すように上部構造は撤去されており、A₁、A₂橋台と、P₁、P₃橋脚のフーチングの一部を残すのみとなっていた。写真-1、写真-2は、それぞれ、A₁橋台、A₂橋台を示したものである。

中央のP₂橋脚のフーチングはすでに撤去されたため、すでに埋め戻しされていた。積層ゴム支承は写真-3に示すように30cm×30cm程度の平面寸法で、厚さは約10cmであり、上鋼板や下鋼板はない。固定、可動の区別があったわけではなく、おそらく、単にゴムパッド上に桁が設置されていたのではないかと考えられる。鉄筋のかぶり厚は、基礎、フーチングでは75mm、橋脚部では50mmである。コンクリート強度は、躯体コンクリートでは、30MPa、鉄筋強度（降伏強度）は420Mpa（以上）である。

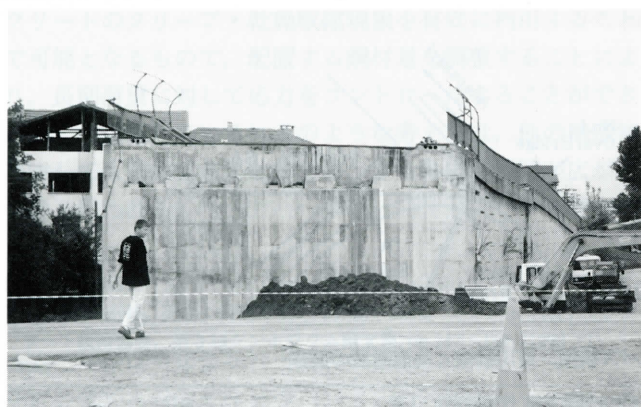


写真-1 Arifiye 橋 A₁橋台



写真-2 Arifiye 橋 A₂橋台



写真-3 ゴム支承

被害は、A₁～P₁間の桁はほぼ水平に、また、P₁～P₂、P₂～P₃、P₃～A₂間の3連の桁がいずれも桁の南端が落下する形で落橋した。A₂橋台では、橋軸直角方向の鉄筋コンクリート製桁移動制限装置がボックス桁間と両側面（合計6個）に設置されていたが、東側側面の桁移動制限装置を除いて、これらが写真-4に示すように損傷していた。クラックの入り具合から見て、東から西方向に向けて大きな力が桁からA₂橋台に作用したことがわかる。1個の桁移動制限装置には、3本ずつ5個所に計15本の鉄筋が橋軸直角方向面に配置されている。A₂橋台上には数個のゴム支承が残されていたが、いずれも水平方向に残留変位を生じており、水平方向に大きな力を受けたことを示している。A₂橋台側の裏込め盛土に大きな沈下は生じていない。これに対して、北側のA₁橋台では裏込め盛土が約1m沈下



写真-4 A₂橋台の桁移動制限装置の損傷



写真-5
A₁橋台側部
テールアルメ
の損傷

しており、側面のテールアルメ部においても写真-5に示すようにコンクリートブロックが大きくゆがみ、大きな相対変位が生じたことを表している。ただし、A₁橋台では橋軸直角方向の移動制限装置にはそれほど大きな損傷は生じていない。

P₁橋脚を支持していたフーチングには、損傷は生じていない。フーチングの平面寸法は、橋軸方向には5.3m、橋軸直角方向には14mである。橋脚は壁式で、橋軸方向の壁厚は1m、橋軸直角方向の幅は13.65mである。フーチング上には橋脚下端の鉄筋が残されている。径22mmの丸鋼が250mm間隔で配置されている。配力筋は径16mmで250mm間隔で配置されていた。また、帯鉄筋は径16mmで高さ方向には500mm間隔で配置されていた。

9月8日に本橋を再調査した際には、P₃橋脚のフーチングが撤去された段階で、フーチング下には約1.2m軸方向に@4本=8本配置されているのが確認された。杭の主鉄筋は直径32mmもしくは20mmの丸鋼で、杭1本あたり12本配置されていた。径3mmスパイラル筋が杭の上部では75mm間隔で、また、下部では150mm間隔で配置されていた。

シュミットハンマを用いてA₂橋台の前面コンクリートの強度を3回測定した結果、それぞれ55MPa、60MPa、52MPaであり、平均すると56MPaであった。また、P₁橋脚を支持していたフーチング上面では、46、50、46MPaであり、平均すると47MPaであった。上述したように、躯体コンクリートの設計基準強度は30MPaであり、コンクリート強度に関してはまったく問題はない。建築物の柱の強度を測定すると、コンクリートがまわっていてシュミットハンマで測定が可能な個所では一般に16~25MPaであり、コンクリートがまわっていない個所では10MPa以下と推定される。こうした建築用のコンクリートに比較すると、本橋に限らず橋脚コンクリートの強度はしっかりしたものであった。

断層は、本橋のA₁橋台とP₁橋脚の間をほぼEW方向に横切っていた。A₁橋台とP₁橋脚の下を横切る側道にはA₁橋台から5m程度の位置に下水道管とマンホールが設置されており、この下水道管が目測によれば4m程度軸線直角方向にずれているのが確認され、断層がこの位置を横断したことを示していた。



写真-6 ポプラ林で確認された断層のずれ



写真-7 断層による配水管のずれ

下水道管に損傷をもたらした断層を東側にたどっていくと、数軒の家屋に損傷をもたらした後、トウモロコシ畑を抜け、ポプラ林に入っていく。ポプラは数列にわたり整然と植えられていたが、この列が写真-6に示すように、断層によって切断されていた。断層変位を計測すると、ある列では3.5m、その隣の列では4.3mであった。また、下水道管を横切った断層を西にたどると、やがて高速道路を浅い角度で横断するが、その手前では排水用の直径1.4mのコンクリート製ヒューム管が写真-7に示すように軸線直角方向にずれていた。この移動量を計測すると、3.6mであった。こうした点から見て、本橋周辺では3.5~4.3m程度の断層変位が生じたことは確実である。

こうした断層運動に伴い、A₁橋台を基準とすれば、P₁橋脚~A₂橋台が橋軸方向にはA₂側に、また、橋軸直角方向には西側に大きく変位したと考えられる。橋軸方向の向きと断層の方向からみて、断層は橋軸方向から約70度の角度で本橋を横断したと考えられることから、A₁橋台を基準とすれば、これに最も近いP₁橋脚では、橋軸方向、橋軸直角方向の変位 d_{LG} 、 d_{TR} は以下のように推定される。

$$d_{LG} = \Delta \times \cos 70^\circ = 4.0 \times \cos 70^\circ = 1.36\text{m}$$

$$d_{TR} = \Delta \times \sin 70^\circ = 4.0 \times \sin 70^\circ = 3.76\text{m}$$

ここに、 Δ は断層変位であり、上述の断層移動量から4mと仮定した。

P₂、P₃、A₂と断層から離れるに従い地盤の移動量は減少したと考えられるが、こうした断層変位が基礎に作用した結果、いずれの桁も橋台もしくは橋脚の端側から落下したのではないかと考えられる。A₁橋台位置では橋軸直角方向の桁移動制限装置がほとんど損傷を受けていないのに対して、A₂橋台側では西側に向かって桁移動制限装置に力が作用したのは、断層がA₁橋台~P₁橋脚間を横断した



写真-8 No.1 橋梁（手前左から右橋台にかけ断層が走っている）

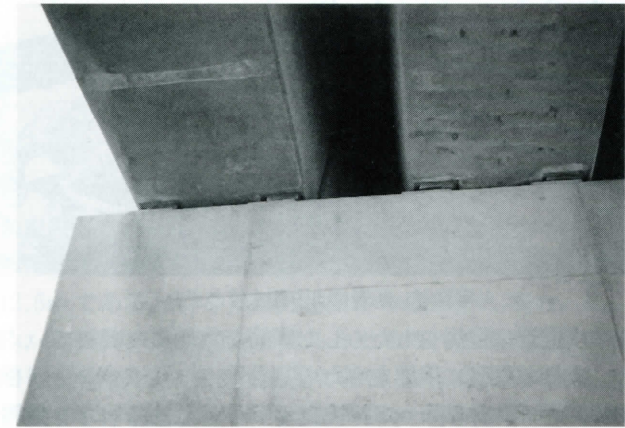


写真-9 桁の残留変位を表すゴム支承（No.1 橋梁）

ため、この間が開き、桁が単純に落下したのに対して、 A_2 橋台では $P_3 \sim A_2$ 間の桁が A_2 橋台と衝突し、このため橋軸直角方向西向きの力が作用したためと考えられる。

2) Arifiye 橋周辺の高速道路オーバースパス

落橋した Arifiye 橋周辺で図-2 で No.1, No.2 ならびに No.4 で区別したオーバースパス橋梁の調査結果をまとめる。まず、図の最も東側に位置し、Toyota 合併自動車工場（TOYOTA SA）と Toyota 病院の中間に位置する写真-8 の 2 径間単純のオーバースパス（No.1 橋梁）では、橋の西側 50m 程度から南側の橋台付近を断層が通過した。この橋は Arifiye 橋と同じく壁式橋脚を採用し、積層ゴム支承によって支持されている。側道がなく本線部だけを横断するため 2 径間となっている。上部構造はプレキャスト U ビームを 4 本並べた形式となっている。

橋本体には地震動による損傷は特に認められない。これは橋脚高さが約 5 m と低く、両端を橋台で拘束された構造形式のため、橋としての振動が生じにくかったためと考えられる。地震により積層ゴム支承には写真-9 に示すように橋軸直角方向（南西側）に向かって最大 5 cm 程度の残留変位が生じていた。これは、本橋が断層の北側に位置したため、橋脚が橋軸直角方向（北東側）に移動した結果、積層ゴム支承にはこれとは反対方向の残留変位が生じたと考えられる。なお、No.1 橋梁の南側取付け道路の盛土が断層で寸断されたほか、南側の橋台では前面の押さえ盛土が沈下し、橋台側部の被覆コンクリートが剥離した。

No.1 橋梁のさらに約 400m 西に位置するオーバースパス



写真-10 No.2 橋梁の橋台支承部の損傷



写真-11 地震断層によって水平移動したフェンス

（No.2 橋梁）は、上部構造がプレキャスト U ビームを 5 本並べたもので、南側に側道があるため、本線部 2 径間＋側道部 1 径間の計 3 径間単純橋となっている。損傷は全体として軽微であるが、北側の橋台（ A_1 ）において写真-10 に示すように前面のパラペットが壊れ、このコンクリート片が橋軸直角方向の移動制限装置上に散乱しており、桁が A_1 橋台に衝突したことを示している。本橋梁でも No.1 橋梁と同様に、橋脚上の積層ゴム支承が桁とともに 2～3 cm 程度橋軸直角方向に移動したが、移動方向は東側であり、橋脚が相対的に西側へとずれていることになる。No.1 橋梁では断層は橋梁の南を走っており、No.2 橋梁では断層が橋梁の北側を走っていることから、断層より北では全体的に地盤が東へ、逆に断層より南では全体的に地盤が西へと移動したと推定できる。

No.2 橋梁から約 100m 離れた位置（高速道路の北側）に Arbas 自動車工場（Arbas Arac Kadlama Fabrikasi）があるが、この敷地の南西コーナーにあるコンクリート製フェンスが写真-11 に示すように地震断層によって右横ずれで移動した。移動量は 4.3m に達する。この断層はさらに西進し、軍用地の西側境界にあるコンクリート製壁を突き抜け、トウモロコシ畑につながっている。この先、断層はさらに西進し、後述するように鉄道線路を横断して軌道に被害を与えた後、前述したポプラ林（ここでの移動量は 3.5～4.3m）を経由して落橋した Arifiye 橋に達している。

Arifiye 橋から約 400m 西側に位置する No.4 橋梁は、写真-12 に示すように No.2 橋梁と同じくプレキャスト U

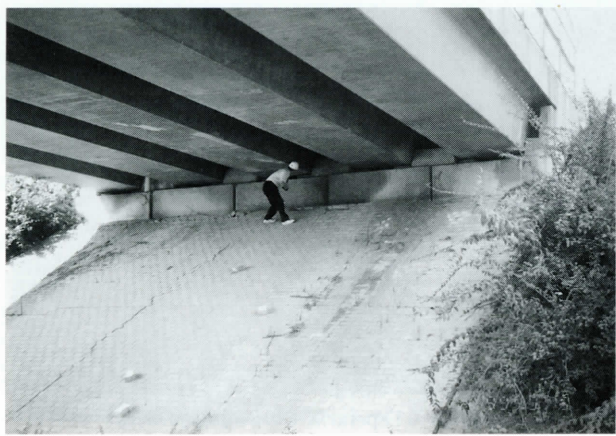


写真-12 No. 4 橋梁の損傷

ビームを5本並べた3径間単純橋である。この橋梁ではNo. 2 橋梁と同様に橋台において前面のパラペットが壊れた以外は、目立った被害は生じていなかった。イスタンブール方面行きの車線（北側の車線）に、幅5 mm程度のクラックが道路を横断するように生じており、橋台前面の盛土斜面のブロックにも同様にクラックが生じていた。図-2よりわかるように、この橋の東を断層が斜めに横切ったため、No. 3～No. 4 橋梁の間では道路の補修が必要となった。調査時点ではイスタンブール行きの車線の補修を終えており、この車線を対面通行として利用し、アンカラ行きの車線（南側の車線）で舗装の打替え工事が行われていた。

3) Toyota 病院周辺の河川横断橋 (No. 5 橋梁)

図-2のNo. 4 橋梁から南下し、Sakarya 川を横断する道路橋 (No. 5 橋梁) である。写真-13に示すように、橋の中央部は完全に水没し、兩岸の2径間部分だけが岸側を上、川側を下に大きく傾斜するという特異な被害を生じた。川幅から推定すると、4径間（もしくは3径間）単純橋と推定される。北側の橋台（A₁橋台）位置では、写真-14に示すように桁は川下側（東側）に約3 m移動した位置で落下している。A₁橋台における桁かかり長は60cmである。兩岸の橋台を結ぶ位置に相当するあたりに流木がたまった箇所が3箇所あり、おそらくこれが転倒した橋脚の位置ではないかと考えられる。

川の左岸側（北側）に沿って断層が通過しており、これが写真-15に示すようにA₁橋台の背面あたりを直撃している。この断層に伴う地盤の変位により、橋台に対して橋脚



写真-13 No. 5 橋梁の落橋



写真-14 No. 5 橋梁 A₁橋台と落ちた桁



写真-15 左岸堤防下部を通過する地震断層

が川下側（東側）に引き倒された結果、桁が落下したと推定される。

1-3 製紙工場の栈橋への連絡橋

道路ではないが、橋梁の被害ということで、ここに示しておく。本橋は、KocaeliにあるSEKA製紙工場の栈橋に連結するコンクリートスラブ橋であり、写真-16に示すように全体で約30径間程度が2 m以上沈下した。橋脚は直径800mmの円形断面で、海面付近から下は鋼管杭となっている。主鉄筋は径30mmの丸鋼で、帯鉄筋としては径10mmの丸鋼が150mm間隔で配置されていた。橋脚の上部は桁と剛結されている。

地震により、岸側に近い11径間部分で、写真-17に示すように、橋脚の中間高さでせん断破壊が生じた。せん断耐力の不足と考えられる。なお、本橋の周辺では、断層運動の痕跡は認められない。



写真-16 SEKA 製紙工場栈橋への連絡橋



写真-17 橋脚のせん断破壊

1-4 その他

Sakarya の東で高速道路が Sakarya 川を横断する地点では、橋梁の取付け部の盛土が沈下して段差が生じ、桁が橋台と橋軸直角方向に10cm 近くずれる被害が発生した。それより東では、道路、橋梁の顕著な被害は発生していない。

一方、Kocaeli より西では道路施設にほとんど被害が発生していない。イスタンブールと Kocaeli の間には、いくつか大きな橋梁区間がある。とくに Kocaeli の中心部より約 2 km 北上した地点の高速道路の高橋脚部であるが、多少支承部に地震による移動の痕跡が認められるものの、無被害の状態である。なお、イスタンブールにおいては地震動は比較的小さく (80Gal 程度)、ほとんどが丘陵地で岩盤上であるため地震動の増幅も小さく、道路施設に被害は生じていない。ボスポラス橋は第1, 第2とも無被害であり、これが被災地の復旧に重要な役割を果たした。

2. 鉄道施設の被害

2-1 概要

コジャエリ地震による鉄道施設の被害は、地震の規模と比較すると小さかった。鉄道が高架となっているのはイスタンブールのみであり、また駅舎の倒壊が発生しなかったことが、被害を小さくとどめた原因であろう。しかし、鉄道線路が少なくとも3箇所地震断層と交差することとなり、線路が断層変位によって大きく湾曲させられることとなった。以下に、これら3箇所の被害状況を紹介する。

2-2 Tepetarla 駅周辺での線路の蛇行

Tepetarla は Sapanca 湖の西に位置する小さな村である。Tepetarla 村ならびにその東に位置する高速道路の位置関係を、模式的に図-4に示す。Kocaeli と Sapanca のほぼ中間に Tepetarla 駅があり、駅から北へ約150m 程度

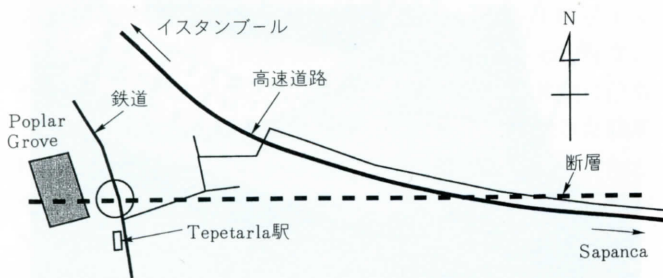


図-4 Tepetarla 駅周辺の鉄道、高速道路の配置と地震断層



写真-18 Tepetarla での鉄道線路の湾曲



写真-19 撤去された枕木

の位置において、1.5m 程度盛土をした上に軌道が設置されていた箇所を断層が横断し、線路の湾曲が生じた。航空写真から判断すると、湾曲の大きさは3 m 程度と考えられる。調査時点 (9月9日) ではすでに大きな湾曲は修復されていたが、まだ、写真-18に示すように300m 程度の区間にわたってゆっくりとした湾曲が残されていた。線路の両側には断層の動きがはっきり残されており、これが断層運動によって生じた損傷であることは間違いない。断層の向きはほぼ EW であり、線路の方向は N30°W であることから、断層は約60°の角度をもって線路を横断したことになる。写真-19は地震後に撤去された枕木を示したものである。レールの蛇行の半波長は4 m 程度であり、したがって、8 m 程度の波長でレールの蛇行が生じたと推定される。

線路から断層を西方向にたどると、約150m 離れた位置にポプラ林がある。ここでも木はもともと一列に植えられており、これが断層により写真-20に示すように右横づれに切られていた。このずれ量から断層変位を推定すると、水平変位が2.5m であったほか、さらに断層の南側は約1 m 沈下していた。

2-3 Sapanca 湖の南岸地点の線路の蛇行

Sapanca 湖の南岸沿いでは、線路の補修歴が認められた。この箇所では、高さ8~10m の段丘上に高速道路が、その下を鉄道と側道がほぼ南北に走っている。断層はこれをほぼ東西方向に横断し、このため湖岸のコンクリート擁壁が230mm 横方向 (護岸の軸方向に直角方向) にずれており、さらに段丘面に建設されていたコンクリート製擁壁



写真-20 ポプラ林を横断する地震断層

にも損傷を与えている。補修された枕木（RC 製）のうち、断層面から北側に存在する38本はいずれも上面が北側に回転している。これは、断層運動に伴いレールには北向きの力が作用し、このため、枕木が回転したものを、そのままの形で応急的に復旧したためと考えられる。

軌道の横には、撤去されたレールや枕木が残されていたが、レールは大きく湾曲しており、枕木も中央部で鉄筋が露出するほどに損傷している。この断層は、Sapanca の湖岸の別荘に甚大な被害を与え、Sapanca ホテルの南を横切り、湖岸の施設を破壊しながら湖中へと東方向へ消えた主断層に平行する副断層であり、再び湖の東南の湖岸に上陸したものと考えられる。断層は、高速道路下を通過してさらに東へと延長していると思われるが、鉄道背面の高速道路のコンクリート擁壁に2本縦にクラックが入っただけで、高速道路自体には大きな被害を与えなかった。

2-4 Arifiye 橋周辺の線路の蛇行

Arifiye 橋の北東約500m の位置では、Arifiye 橋を落橋させたと同じ断層が鉄道を横断した。線路はほぼ南北方向で、これにほぼ東西方向に断層が線路を横断している。補修後もレールは約100m にわたって1.8m 程度蛇行しており断層運動によって生じた食い違いをとりあえず100m 区間にわたって吸収する形で復旧したことを示している。調査した時点（9月8日）では、架線の支持ポール位置の移動が行われていた。軌道横には撤去、取り替えられたレールや枕木が残されていた（写真-21）。

この地点から西へ約300m の位置にはポプラ林があり、前述したように、ここでは一列に植えられていたポプラの木の移動から、断層変位は3.6~4.5m と推定されている。

ま と め

Kocaeli, Golcuk, Sapanca, Sakarya の道路、鉄道施設に被害調査を9月8日、9日の2日間にわたって実施した。この結果は、以下のとおりである。

- ① 道路施設では、Sapanca に近い Arifiye 橋（高速道路のオーバークロッシング）、Toyota 病院近くの橋（川の横断橋）が落橋した。これらは同一の地震断層によって生じた被害である。また、この地区では、ほかにも桁移動制限装置、橋台パラペット、桁、支承等の様々な被害が生じている。今回調査した範囲では、



写真-21 撤去されたレールと枕木

これらは断層運動によって引き起こされたと考えられる。また、このほかに Kocaeli 周辺の製紙工場において、栈橋に取り付く橋の沈下が生じた。これは、橋脚のせん断耐力が不足したために起こったせん断破壊によるものである。

- ② 鉄道施設としては、Sapanca 湖周辺の3個所において断層が軌道を横断し、このため軌道の蛇行が生じた。いずれも現在は復旧されているが、まだ軌道に湾曲を残したまま復旧された箇所がある。撤去されたレールは大きく蛇行し、RC 製枕木も中央部分で鉄筋が露出するほど損傷を受けている。
- ③ 上記のように、今回の地震では、道路施設、鉄道施設に大きな被害をもたらした原因は断層変位である。被害を受けた施設の周辺で実測できた断層変位は、最大で4.3m に及んでおり、こうした地盤変位を受けて基礎が移動し、下部構造を移動させたり引き倒された結果、橋梁の被害が生じており、また、直接断層変位が線路を横断した結果、軌道に被害が生じている。
- ④ 建築物の被害に比較すると、道路、鉄道施設の被害は比較的小さかったが、この原因としては、以下の理由が考えられる。
 - Ⓐ 高速道路のオーバークロッシングは、橋脚高さが約5m と低く、2~4 径間程度とスパンが短く、さらに、橋桁の両端が橋台で拘束されており、自己振動しにくい構造である。また、被災した橋梁以外に大きな構造物は存在しておらず、被害を受ける構造物自身が少なかった。
 - Ⓑ Arifiye 橋では、フーチング下に基礎が確認されたが、基礎はしっかりした構造であった。
 - Ⓒ 橋梁のコンクリートの強度を測定すると、50 MPa 程度あり、建築物に使われているコンクリートよりはるかに質がよい。

最後ではありますが、Arifiye 橋の諸元はトルコ道路総局に出張中の帆足博明 JICA 専門家に調べていただいた。ここに記して厚くお礼申し上げる次第である。

〔参考文献〕

- 1) 川島、橋本、鈴木：トルコ・コジャエリ地震による土木構造物の被害、Report No.727/EERG99-7、東京工業大学土木工学科 耐震研究グループ (1999)