

1999年8月トルコ地震による地盤災害

丸井 英明*

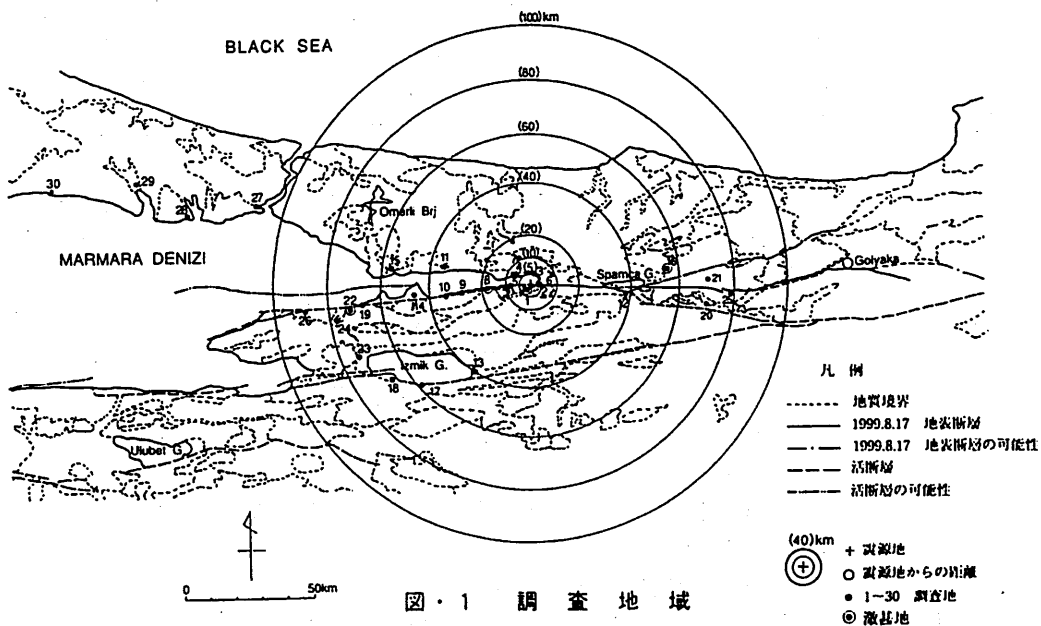
守随 治雄**

1. はじめに

1999年8月17日にトルコ北西部でM7.4の大地震が発生し、工業都市イズミット市及び周辺部で極めて甚大な人的被害並びに物的被害が発生した。死者は1万5千人以上、負傷者2万4千人以上に及んでいる。筆者らは9月25日から10月1日にかけて現地調査を行い、とくに被害状況と地盤条件との関連について考察した。現地では、トルコ人のハサン・ゲンチャ氏（日本工営、アンカラ事務所）が同行し、現場での聞き取り調査を行いながら調査した結果、短期間ながら多くの情報を入手できた。

トルコは北緯36°～42°、東経26°～45°に位置し、国土面積は78万km²で、6250万人の人口を有する。北の黒海沿岸から南の地中海沿岸にかけて、東西方向に並行して幾つかの山脈が連なっており、西から東に向かうにつれ、標高が高くなっている。国土の大半を占める小アジア半島の北部を北アナトリア断層が東西に伸びており、この断層沿いに頻繁に大規模地震が発生している。今回の地震の被害は図-1に示すように、小アジア半島の北西端のマルマラ海に沿った地域で発生している。

本報告は、現地調査の結果に基づき、地盤条件との関連を中心として、今回のトルコ地震の被害状況をとりまとめたものである。



* 新潟大学積雪地域災害研究センター

** 日本工営(株) 中央研究所

2. 地震の概要

今回の地震は、震源地の都市名をとってイズミット地震とよばれる。トルコ北部には、東西方向に 1200 km にわたって北アナトリア断層という活断層が走っており、この断層はトルコの国土が載っているマイクロプレートとその北側のユーラシアプレートとの境界をなしている。今回の地震はこの断層の西端付近で発生している。1939 年にこの断層の東端において M7.8 の大地震が発生して以来、震源が西方に移動しながら M7 規模の地震が相次いで発生している一方、断層の西端付近では過去に大地震が発生していなかったことから、大地震発生の可能性が指摘されていた。今回の地震の発生状況は以下の通りである。

- ・震源位置：北緯 40.74 度、東経 29.89 度、深度 18km のイズミット湾東端で 1999 年 8 月 17 日現地時間午前 3 時 2 分に発震。
- ・地震規模：マグニチュード 7.4、東西走向の右横ずれ断層破壊。水平最大加速度は SAKARYA(ADAPAZARI)の 0.42G。
- ・地表断層：MTA のホームページによれば、右横ずれ変位を示す地表断層が、北アナトリア断層に沿って、GOLCYK 西の KARAMURSEL から、SAKARYA の南、AKYAZI を通り、GOLYAKA までの延長約 160km で認められ、GOLCUK の西と SAPANCA 湖では海面（湖面）に没している。

3. 調査地域

今回調査した地域を図-1 に示した。調査は以下の行程で実施した。

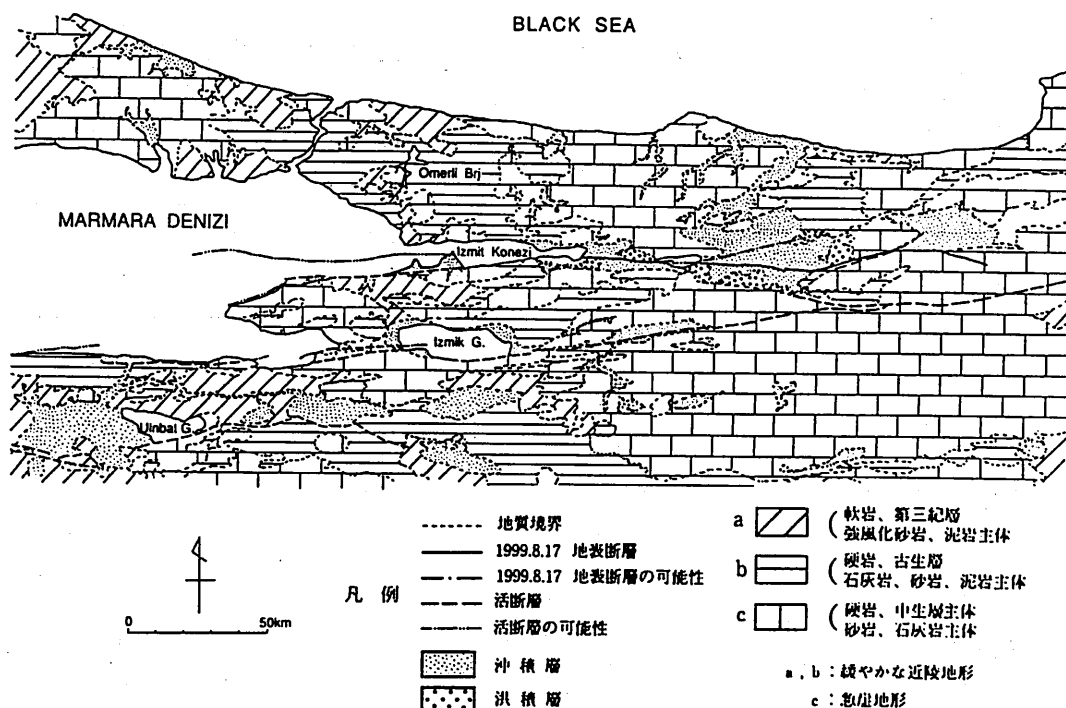
- 9 月 25 日（土）：午後イスタンブール到着、トルコ人のハサン・ゲンチャ氏と調査行程を打ち合わせる。地質図など収集資料の検討を行う。
 - 9 月 26 日（日）：イスタンブール西方の AVCILACEKMECE を踏査する。イスタンブール以西ではここだけで被害があったとのことである。その後、さらに西方の CEKMECE、SIRIVRI の調査を行う。
 - 9 月 27 日（月）：GEBSE にある MARMARA 研究センターの地球科学部門を訪問し、情報収集を行う。その後、HEREKE、YCVACHIE、BAHCECIK、DEGIRMENDERE、ULASIT、KARAMURUSEL、ALTINOVA、NALISOY、YALOVA、CINARCIK といった、震源地西側の活断層付近を中心に調査を行う。
 - 9 月 28 日（火）：SAPANCA、AKYAZI、KARAPURCEK、SAKARYA(ADAPAZARI)、IZMIT、DERINCE といった震源地東側の活断層付近を中心に調査を行う。
 - 9 月 29 日（水）：AM3:00 頃、M4.8 の余震で目覚め、早朝より踏査。GOLCUK は、町の東側と中心部で被害状況が異なっており、相当時間を費やし調査を行った。その後、20~30km 南方で地表断層に並行して東西に連続する活断層沿いの被害状況を調べるため、IZNIK、NARLICA、SOLOZ、ORHANGAZI の調査を行う。
 - 9 月 30 日（木）：ISTANBUL 市内の被害調査を行う。
 - 10 月 1 日（金）：早朝イスタンブール空港に向かい、空港にて調査結果の検討を行う。
- なお、上記調査地域の内、下線を施した地域は特に詳細な調査を行った地域である。

4. 地質概要

当該地域の地質は、中生代ジュラ紀の砂岩、石灰岩、頁岩が広く分布し、北アナトリア断層の北部、特にイスタンブール付近には、石灰岩、砂岩、泥岩主体の古生層が広範囲に認められる。一方、北アナトリア断層南部には、二疊紀から三疊記の砂岩、礫岩、シルト岩が東西に連続し、比較的広範囲に認められる。

それら基盤岩を侵食して、東西あるいは南北に小沢が発達し、海岸、湖岸、小沢などの周囲には、中新世～鮮新生の強風化砂岩・泥岩や、洪積層、沖積層が分布している。とりわけ、北アナトリア断層、及び併走する活断層沿いには、洪積層、沖積層が発達し、とくにサカリア川の洪水氾濫による堆積物が分布する SAKARYA 付近、イズミット湾沿岸の GOLCUK や IZMIT 付近には、沖積層が広く分布している。また、イズミット湾沿岸域には、南北性の小沢による扇状地堆積物や三角州、人工地盤（盛土）が局部的に認められる。

現地踏査の結果、同じ硬岩であっても、生成年代の違いによって岩盤状況に差異があり、中生代ジュラ紀の砂岩、石灰岩を主体とした地域、および古第三紀の石灰岩、砂岩を主体とした地域は、急崖斜面を形成している。一方、新第三紀の砂岩、泥岩は地表付近でかなり風化しており、いわゆる軟岩で、地形的にも角のとれた緩やかな丘陵斜面を形成している。以上の考察に基づき、調査地域周辺の地盤状況を取りまとめたものが図-2 である。同図には、MTA による地質図¹⁾を参照しつつ行った現地調査結果に基づき、著者らが行った地盤区分を表示している。



図・2 地質調査周辺岩盤(地盤)区分図(MTA 地質図(1999)¹⁾を基に岩盤(地質)区分した)

表・1 調査地点の概要一覧表

No.*1	調 査 地 点	被害 状況*2	震源地から の 距 離	地 質	断層との関係	備 考
1	BAHCECIK	○	5 km以内	沖 積 層	地表断層付近	震源地 2 km 以内
2	YCVACHIE	○		沖 積 層	地表断層付近	当地点から西でビル倒壊目立つ
3	IZMIT	○		沖 積 層	地表断層北側 5 km	沖積層が古生層にアバット
4	DERINCE	○	5 ~ 10 km	沖 積 層	〃	谷埋め、切盛造成地
5	GOLCUK	○		沖 積 層	地表断層直上	盛土、三角州、地下水位高い、海底地すべり
6	IZMIT 東 7 Km	○		沖 積 層	地表断層北側 5 km	石油タンク傾斜
7	IZMIT 北西 7 Km		10 ~ 20 km	古 生 層	地表断層北側 10 km	高層ビル切土で岩着
8	DEGIRMENDERE	○		沖 積 層	地表断層直上	扇状地、盛土、地下水位高い、海底地すべり
9	ULASIT		20 ~ 40 km	中 生 層	活断層付近	旧期の岩盤すべり跡
10	KARAMURSEL	○		沖 積 層	〃	沖積層が中生層にアバット
11	HEREKE			中・古生層	活断層北側 10 km	急崖に人家多数
12	SAPANCA	○		沖 積 層	地表断層付近	液状化、洪積層に被害なし
13	IZNIK	△	40 ~ 60 km	沖 積 層	地表断層南方の活断層付近	液状化
14	ALTINOVA			沖 積 層	活断層付近	農村地帯
15	GEBZE	△		第三紀層～古生層	活断層北側 15 km	MARMARA 研究センター被害
16	SAKARYA (ADAPAZARI)	○		沖 積 層	地表断層北側 10 km 推定活断層付近	SAKARYA 川の氾濫源、 地下水位高い
17	NARLICA		60 ~ 80 km	中 生 層	地表断層南方の活断層直上	旧期の岩盤すべり跡
18	SOLOZ			沖 積 層	地表断層南方の活断層付近	沖積層が中生層にアバット
19	NALISOY	○		沖 積 層	活断層付近	沖積層が第三紀層にアバット
20	KARAPURCEK	△		沖 積 層	地表断層南方の活断層付近	洪積層との境界付近
21	KARAPURCEK 高速道路	△		沖 積 層	地表断層北側 5 km	橋脚基礎に変状
22	YALOVA	○		沖 積 層	活断層直上	南北性の小沢多数有 三角州
23	ORHANGAZI			沖 積 層	活断層に挟まれた地区	背後斜面の古生層砂岩は採石場
24	YALOVA 西			第三紀層	活断層付近	幅 40 m、奥行 80 m の地すべり
25	AKYAZI	○	80 ~ 100 km	沖 積 層	地表断層直上	旧泥岩付近、地下水位高い
26	CINARCIK	○		沖 積 層	活断層付近	沖積層が第三紀層にアバット
27	ISTANBUL		100 km 以上	古 生 層	推定活断層北側 30 km	震源地から 110 km
28	AVCILACEKMECE	○		第三紀層	〃	沢に盛土、震源地から 140 km
29	CEKMECE			沖 積 層	—	沖積層が第三紀層にアバット
30	SILIVRI			古第三紀層	—	海岸沿いに沖積層

* 1 図・1 の番号に一致

* 2 ○: 激甚 (死者 500 人以上)、○: 大、△: 小

5. 踏査結果

調査地点の概要を表-1 に示した。同表は、今回調査した No.1～No.30 の各地点を、震源地からの距離に従って並べたもので、図-1 上に表示した各地点に相当する。

各地点における被害状況の比較検討を行った結果、被害の大小が必ずしも、震源地からの距離並びに断層からの距離に依存していないことは興味深い。震源地からの距離が 2km 以内に位置する BAHCECIK(No.1 地点)では被害が大きいことはもちろんであるが、震源地からの距離が 5km 以内の地点よりも、10km に位置する DERINCE(No.4 地点)や、GOLCUK(No.5 地点)の方が被害が甚大であった。同様に DEGIRMENDERE(No.8 地点)、SAKARYA(ADAPAZARI)(No.16 地点)、YALOVA(No.22 地点)で被害が甚大である。また、震源地から 100km 以上離れた ISTANBUL(No.27 地点)では殆ど被害がないにもかかわらず、さらに震源地より離れた AVCILACEKMECE(No.28 地点)でかなりの被害が発生している。

それらの被害の差異の原因について、図-2 に表示した地盤区分図に基づいて、地質、断層との関係、人工地盤の影響などに関して考察を行った。以下、被害が激甚であった調査地域を中心に踏査結果を記す。

A. GOLCUK(No.5 地点、表-1 参照、以下同様)

A-1. 東側地域

海岸沿いに地盤の大規模な変状が認められた。図-3 に水没範囲を表示した。地盤が幅約 550m、奥行き最大 150m 程度が水没し、その内幅約 300m は現在も約 2m 水没したままの状態である(写真-1)。海底地すべりによる沈下の可能性がある。また、図-3 の西側では、奥行き約 35m 程度で幾条かのクラックが 100m 程度連続し、東側の海底地すべりによる沈下に伴い、小ブロック化し、海側へ水平移動した可能性がある。いずれも盛土地盤がかなり含まれた沖積層で、かつ、海水を盛土内に浸透し、盛土内の地下水位が高い状況にあったことが推測される。

A-2. 西側地域

地表断層直上におけるビルの壊滅的被害状況を図-4 に示す。幅約 100m で 1km 以上(東西～南東方向)連続し、ビルが倒壊している(写真-2)。地形的に沢の出口付近で沖積層が厚く堆積しているところで地表断層が発達し、被害が集中的に発生している。



写真-1 GOLCUK 東側地域/海底地すべり

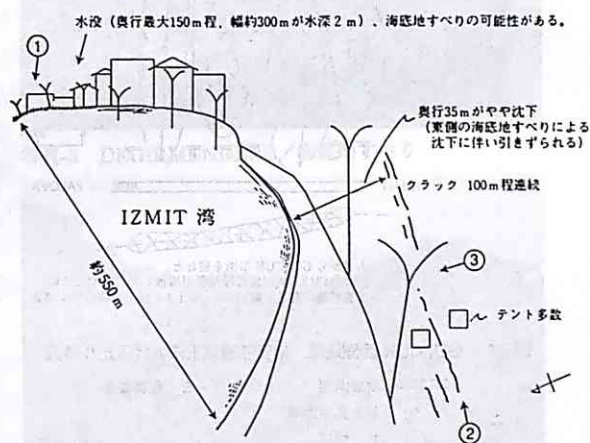


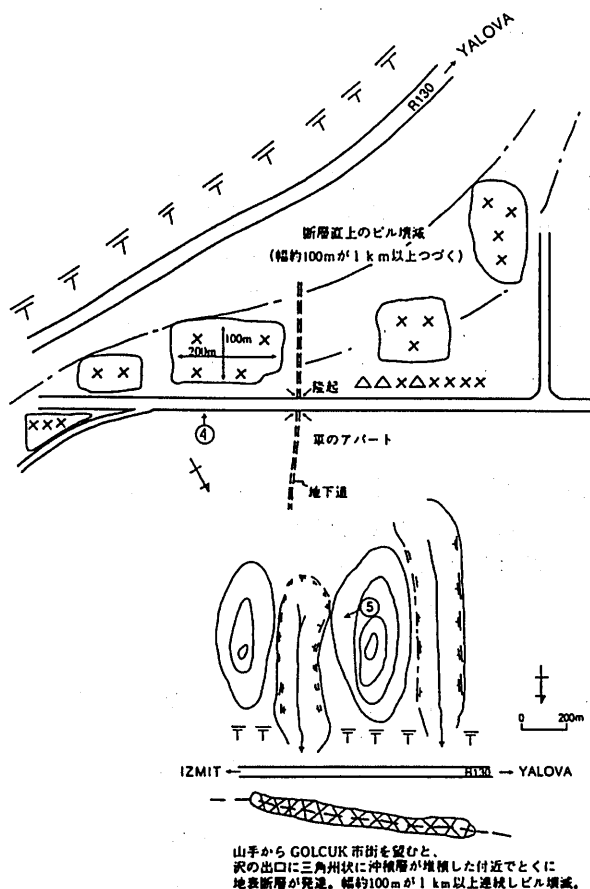
図-3 GOLCUK 東側地域水没範囲とクラックの連続性

①: 写真番号

B. SAKARYA(ADAPAZARI)(No.16 地点)

ADAPAZARI は、黒海に注ぐ SAKARYA 川の洪水氾濫による堆積物で広く覆われており、地下水位は 1~3m と浅い。当地域は、1967 年の MUDURNU 地震(M7.1)でも、液状化被害を受けている。土木学会のホームページ³⁾によれば市街地で地盤液状化によるビルの倒壊の被害が報告されている。

今回の踏査において、旧河道を想定させるような直線的な道路に沿って、延長約 500m にわたって両側のビルが壊滅的な被害を受けている状況が認められた(写真-3)。建物の基礎の型式は殆どは直接基礎のように見受けられた。今回の地震による建物の被害において共通している点は、殆どのビルで 1 階部分が座屈していることである。また、局部的に道路が隆起している箇所も認められ、地表断層から 10km 程度の距離にあるが、地震動が相当強かった様子がうかがわれる。



図・4 GULCUK 西側地域、地表断層直上におけるビル壊滅

- ==: 地表断層 -⑤: 写真番号
- ⊗: ビル集中倒壊
- ×: ビル倒壊
- △: ビル被害

図・5 DEGIRMENDERE 地域におけるクラックの連続性

C. DEGIRMENDERE(No.8 地点)

◎ 当地域においても、海岸沿いに大規模な地盤の変状が認められた。図-5 に連続して生じたクラックの分布状況を示す。図中 A 地域には、扇状地堆積物が分布しており、テンションクラックが約 100m にわたって連続し、50cm 程海側へ水平移動を生じた可能性がある（写真-4）。地震前の海岸線はかなり海側に位置していたものと推測される。図中 B 地域は、自然地山（沖積層）を主体とするが、図中の断面図（a—a'）に示すように、かつては栈橋にしていた箇所を盛土していたものと推測される。A 地域と同様、クラックが連続して分布しており、海岸側で一部沈下し、公園が消失している（写真-5）。海底地すべりの可能性がある。地表断層面上であること並びに地下水位が地表付近と高いことが被害を大きくしたものと考えられる。



写真-2 GOLCUK 西側地域/地表断層直上のビル倒壊状況



写真-3 SAKARYA(ABAPAZARI)/道路両側のビル倒壊状況



写真-4 DEGIRMENDERE/A 地域末端部状況



写真-5 DEGIRMENDERE/海底地すべり



写真-6 DERINCE/谷地形部のビル倒壊状況



写真-7 BAHCECIK/震源地から 2 km 以内のビル倒壊状況

D. DERINCE(No.4 地点)

当地域は、イズミット湾北側斜面に位置し、沖積層の分布は広くないものの、古生層の丘陵地に入江状に小沢が入り込み、沖積層がアバットした地形・地質状況を示している。そのため住宅地は、谷埋めや、切土・盛土を行って造成しており、谷地形部（写真-6）、切土・盛土境界部などの不整形地盤構造により地震動が増幅されやすい箇所において被害が著しい。

E. BAHCECIK(No.1 地点)

当地域は、震源地に最も近接した町で、2km 以内に位置する。そのため、地表断層付近で、沖積層が分布する箇所の建物は甚大な被害を受けている（写真-7）。

F. YALOVA(No.22 地点)

当地域は地表断層を延長した活断層の直上に位置する。地形的には、南北方向の小沢が発達しており、そこから供給された土砂などにより、比較的広い範囲に沖積層（三角州）が形成されている。そのために、ビルが倒壊している箇所が幾つか認められ、被害が顕著である。

G. AKYAZI(No.25 地点)

当地域は、地表断層直上に位置する。旧河道付近は、沼地を呈しており、地下水位も高い（地表付近）。そのような箇所では建物がかかなり激しく倒壊している。しかしながら、当地域では人口が少ないために、前述の A～F 地域と比較して被害は少ないが、もし、他の地域と同様に人口稠密であれば、同程度の被害を生じていた可能性がある。

H. AVCILACEKMECE(No.28 地点)

当地域は、震源地から約 140km 離れており、しかも推定活断層から北側 30km の位置にある。地質は、一部で沖積層の部分もあるが、全体的には第三紀層で構成されている。元々沢地形の所に盛土している箇所で、しかも、建物の基礎が直接基礎で段違い構造となっている箇所で被害が大きい。また、そのような基礎の場合、地質が第三紀層であっても、地震の影響を受け、建物が倒壊している。

一方、同様の条件からなるものの、地質が古生層で構成されている ISTANBUL では、殆ど被害を受けていない。

I. IZMIT, KARAMURSEL, NALISOY, CINARCIK(No.3, No.10, No.19, No.26 地点)

これらの地域は、古生層、中生層、第三紀層などの基盤上に沖積層が堆積している地域で、かつ、IZMIT を除く各地域は、地表断層の延長に位置する活断層付近に位置している。なお、IZMIT の場合は、地表断層から 5km 離れているものの、震源地から 5km 以内に位置しており、他の 3 地点に比較して、最も震源地に近い。これらの地域では、不整形地盤構造により地震動が増幅されやすいことなどにより被害が発生したものと考えられる。また、CINARCIK は震源地から約 90km 離れている。震源地から 100km 程度離れていても、活断層付近であれば、このような地盤構造には留意する必要がある。

J. ULASIT, NARLICA(No.9, No.17 地点)

これらの地域は、中生層の硬岩で構成されており急崖を呈している。いずれも活断層付近ないしは直上に位置しており、今回の地震によるすべりは生じていないものの、過去の地震で岩盤すべりを生じており、活断層付近の中生層の硬岩からなる斜面には留意する必要がある。

6. まとめ

被害状況の考察結果から、被害の大小は地盤状況および地下水位に密接に関係していることが判明した。

震源地から 20km 以内の、地表面断層直上においては、被害が激甚であるものの、地表断層からやや離れると、震源地に近くても被害が減少している。ただし、その場合でも、地盤が沖積地であったり、谷状地形に盛土している場合には被害が大きい。また、三角州や扇状地堆積物、あるいは盛土が広範囲に分布している地域では、地下水位が高く、そのため、そのような地域が震源地から 20km 以内に位置する場合には、大規模な海底地すべりを生じた可能性がある。

また、同様な地盤構成で、かつ地下水位が高い地域は、震源地から 80km 程度離れていても、揺れによる大きな被害を伴っているようである。今回、水平加速度の最大値を記録紙、被害が激甚であった SAKARYA(ADAPAZARI)は、震源地から約 60km 離れているものの、SAKARYA 川の氾濫原堆積物が広範囲に堆積し、地下水位が高い地域であった。

一方、震源地から、140km 離れていても、基盤が第三紀層で構成されている地域では、沢部を盛土している箇所、建物の基礎構造が平坦でなく段違いに造成されている箇所などでは、大きな被害を被っている。今回の地震によって、より震源地に近い ISTANBUL 周辺においては大きな被害は認められなかったが、ISTANBUL では、基盤が古生層主体であるものの、谷地形部に盛土して、ビルを建設している箇所がしばしば見受けられた。将来、直近地域で大地震が発生した場合には被害発生の可能性はある。

北アナトリア断層は、世界で最も活発に活動している断層の一つである。今回の調査によって、被害の大小が地盤状況および地下水位と密接に関係しており、都市開発のあり方に問題があることがわかってきた。したがって、十分に地表踏査を行い、劣悪な地盤の分布や、浅層地下水位の分布を把握し、地震時における被害想定を目標としたハザードマップの作成が急務と考えられる。また、大規模な海底地すべりを生じた箇所においては、詳細な調査と、それに基づく早急な対応、対策工の検討が必要と考えられる。

参考文献

- 1) MTA, GENEL MUDURLUGU, www.mta.gov.tr, 1999
- 2) MTA, Geological Map of Turkey, 1:2,000,000, 1989
- 3) (社)日本土木学会, wwwsoc.nacsis.ac.jp/jsce2/report/index.html