

1995 年兵庫県南部地震による土構造物の地震災害

菊山浩喜¹・横山俊治²

¹株式会社エーティック

²深田地質研究所

Earthquake damages of earth structures caused by the 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake

KIKUYAMA Hiroki¹ and YOKOYAMA Shunji²

¹ A-TiC Co., Ltd.

² Fukada Geological Institute

要旨：1995 年兵庫県南部地震では、丘陵の谷埋め盛土や海岸の埋立地に施工された土構造物が大きな被害を受けた。地震動による慣性力と剥離によって、次のような様々なタイプの被害が土構造物に生じた：①空石積み擁壁の横跳び、②コンクリート擁壁・ブロック積み擁壁・歩道の縁石・排水溝の側壁の傾動・転倒、③コンクリート吹付・モルタル吹付・張りブロック法枠工の剥離、④アスファルト舗装やコンクリート舗装・煉瓦敷きの水平移動、⑤階段通路の踊り場の土構造物の低角度衝上など。これらの土構造物の破壊はしばしば盛土中の開口クラックを伴っている。谷埋め盛土は硬質な上位層と下位の高含水で軟質な下位層からなるキャップロック構造をもっている。地震時盛土地すべりは丘陵を取り巻く斜面上の谷埋め盛土が強い地震動を受けて発生したもので、地震によって揺れている間、この二階建ての構造は益々不安定になる。上位層の破断と下位層の塑性変形によって盛土の全体は細かく破壊され、破壊された地すべり移動体は地表面を長距離移動した。地震時地表面変状は、素因として土構造物の形式や配置、盛土の品質、盛土の地表および地中の分布形態、地下水位、そして誘因として地震動の方位と強さに支配される。

キーワード：1995 兵庫県南部地震、地震動、盛土、土構造物、盛土地すべり、キャップロック構造

Abstract: The 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake did great damages to earth structures on valley-buried bank of hills and on reclaimed grounds of coastal area. The force of inertia and exfoliating caused by the earthquake vibration gave rise to the many types of damage for earth structures as follows: ① falling down with a jump from dry stone masonry, ② tilting and tumbling of concrete retaining wall, concrete block retaining wall, curb of footway and side walls of drain ditch, ③ exfoliating of concrete spraying, mortar spraying and concrete block pitching ④ horizontal spreading of asphalt pavement, mortar pavement and brick pitching on road and ground surface ⑤ low angle thrusting of constructions on the landing of stairs. These damages are often accompanied by open cracks into embankment. The valley-buried bank has a cap-rock structure of the upper rigid layer and the lower soft layer with high water content. The earthquake-induced landslide of bank took place at the valley-buried bank on slopes around hills by strong earthquake motion. This two-storied structure becomes more and more unstable during the period of shaking. Then the whole of bank was broken down into pieces by fracturing of the upper layer and plastic deformation of the lower layer, and the broken landside mass ran off on the long distance of the surface. The earthquake ground surface disturbances are controlled by type and arrangement of earth structures, quality

of bank, superficial and underground form of embankment, and underground water level as a basic factor, and orientation and strength of earthquake motion as a trigger.

Keywords: 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake, earthquake motion, embankment, earth structures, landslide of bank, cap- rock structure

1. はじめに

近年、大都市に限らず、小さな町までもが建物のほか様々な土構造物に地表を覆われ、街をつなぐ道路もほとんどアスファルト舗装に覆われている。そのために、街では地盤の中身が見えない。地盤の中身が見えないのは単に地表面が土構造物に覆われているだけでない。造成工事で本来の自然の地形が失われ、土構造物と自然地盤との間には盛土や埋め土といった人工地盤が隠れているからである。

地震時には、人工地盤は自然地盤以上に変形し、土構造物が様々な被害を受ける。街に住むひとびとは、地震被害を受けてはじめて、そこが人工地盤であったことや施工の善し悪しを知ることになる。

1995 年兵庫県南部地震では、阪神地域で大阪層群からなる丘陵の住宅地が大きな被害を受けた(釜井ほか, 1995 ; 横山ほか, 1997)。谷埋め盛土の被災である。これらの被害集中地域では、墓石の転倒率から推定した地震動加速度(菊山ほか, 1996) が約 250~300 ガル以上になっている。

本稿では 1995 年兵庫県南部地震による被災事例を用いて、土構造物の形式ごとに被災の特徴を明らかにする。そのうえで、①地震動による典型的な破壊形態(機構)はなにか、②土構造物の破壊に、土構造物の形式、盛土の形態(地形を含む)や層厚、耐震性の高い構造物の存在、地下水位、液状化、そして地表地震動の方向や強さがどのように影響するかについて考察する。

2. 兵庫県南部地震で発生した土構造物の破壊

2.1 土構造物の形式と破壊形態

横山ほか(1997)は兵庫県南部地震で発生した土構造物の様々な破壊形態を記載している。本論文では、土構造物の形式ごとに破壊形態の特徴を、多数の現場写真を用いて解説する。

(1) 道路のアスファルトやコンクリート舗装材

道路のアスファルトやコンクリートなどの舗装材は、地震時にはしばしばその直下の路床盛土(路盤材)との境界で剥離し、路床盛土の上を滑動している。滑動したアスファルト舗装材にはそれに垂直なクラックが形成されていて、しばしば開口している。クラックが路床盛土にまで達していて、さらに右横ずれを示す場合には、地表地震断層の証拠とされることが当初にはあった。

舗装材の移動によって形成される変形構造には、上述した開口クラックにみられる伸張構造(図 1a)とは別に、圧縮構造が見られることがある。圧縮構造は、最初の揺れで開口したクラックがその時の揺れとは反対向きの揺れで、開口したクラックが閉じたときに生じる構造で、様々な型式のものがある(図 1b~d)。

図 1b は、開口クラックによって離れていた舗装材が閉じるときに激しくぶつかってできた構造で、両側の舗装材の表面の一部が剥がれて山形に盛り上がっている。写真 1 は、大阪市内鞆公園の塀上面のコンクリート塗装で観察されたものである。図 1c は、離れていた舗装材の一方が反対側の舗装材の上に完全に乗り上げている。写真 2 がその事例である。また、アスファルト舗装材のクラ

ックに沿って、乗り上げている側と乗り上げられている側が場所によって真逆になっている事例もある（写真 3）。図 1d は、両方の舗装材がぶつかりあって山形に盛り上がっている。

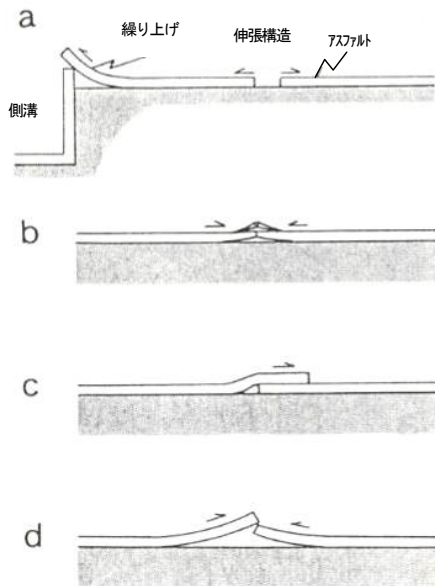


図 1 アスファルト舗装材の変形様式の模式図（横山ほか，1997） a：伸張構造（開口クラック）と側溝への乗り上げ，b：衝突型の圧縮構造，c：衝上型の圧縮構造，d：プレッシャーリッジ型の圧縮構造

(2) 公園などの煉瓦敷きや歩道の敷石

公園などの煉瓦敷きや歩道の敷石でも移動による変形が起こっている。変形の様式は、前述の舗装材の剥離と類似した水平方向の移動のほか、鉛直方向の跳躍移動も起きている。

西宮市高塚公園では、兵庫県南部地震時に様々な盛土構造物で破壊が発生した（図 2）。そのひとつが煉瓦敷きの水平移動である。移動した煉瓦敷きは敷石に乗り上げている（写真 4）。と同時に、この縁石とは反対側の縁石にも煉瓦敷きは乗り上げている。つまり、煉瓦敷きが一方の敷石に乗り上げた後、全体としては、煉瓦敷きは正反対の方向に移動したが、縁石に乗り上げた部分の煉瓦敷きはその場に残されたことを示している。そ

の結果、両縁石の中央付近を中心に煉瓦と煉瓦の隙間が開いてしまった。このような変形は地震動がなせる技である。

写真 5 は、宝塚の道路の敷石で起きた跳躍移動である。地震前の敷石群は素手では引き抜くことができないほど密に敷き詰められていたが、完全に跳び出している。

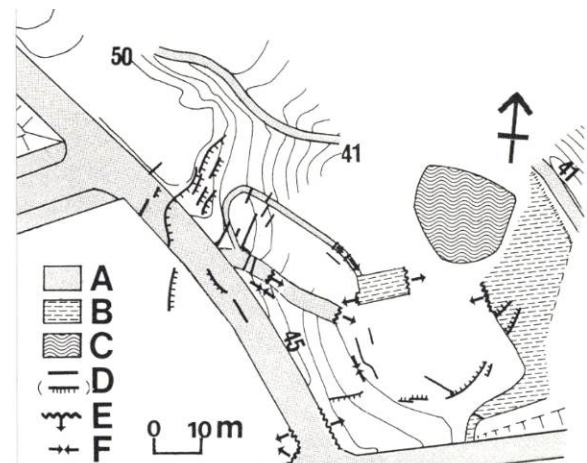


図 2 高塚公園の地表変状集中領域（横山・菊山，1998） A：アスファルトおよびコンクリート舗装，B：煉瓦敷き，C：池，D：開口クラック（括弧内：段差をもつ場合で、ケバ側が下がっている），E：乗り上げや押し被せ，転倒など圧縮を示す構造と移動方向（矢印方向），F：圧縮リッジ，数字：標高（m）

(3) 歩道等の縁石

道路端の歩道や中央分離帯に設置されている縁石には傾いたり、完全に破壊・転倒したりしているものがある。縁石とその背後の盛土との境界は縁石の傾動で開口していることが多い（写真 6）が、盛土の上端が傾動した縁石に向かってたわんでいることもある。道路の両側の歩道に縁石が設置されている場合はどちらの縁石も盛土と反対側に傾動しているので、互いの縁石の傾動方向は正反対になっている（図 3）。縁石をつくっているブロックの二つが屈曲して山形に折れ曲がって、プレッシャーリッジを形成していることがある。プレッシャーリッジの直下の盛土には盛り上がりは

なく、縁石と盛土は離れていることが多い。しかし、写真7の事例では、縁石と共にその直下の盛土も盛り上がっている。この事例については、地表地震断層による変形と考えている識者もいて、判断は難しい。

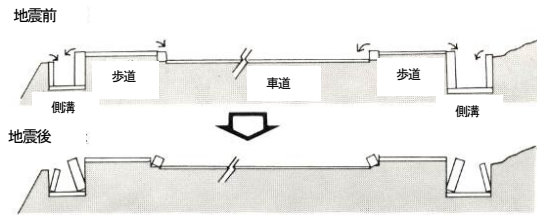


図3 道路端の三面張り側溝と歩道の縁石の配置とそれらの傾動方向を示す概念図

(4) 排水溝（三面張り側溝・U字溝）

三面張り側溝の場合、側溝の側壁が溝側に傾動しているものがある（写真8）。両側の側壁が溝側に傾動していることもあり（写真9）、傾動が大きくなって溝がつぶれている場合もある。

U字溝の場合は、溝底のコンクリートが破断して側壁が溝側に傾動する。側壁と背後の盛土との境界は分離し開口していることが多い（写真10）。三面張り側溝の側壁の傾動に伴う圧縮で鉄の蓋が折れ曲がっていることがある（写真11）。排水溝の縦方向からの圧縮によって、2枚のコンクリートの蓋が山形にもち上がって、プレッシャーリッジを形成している事例がある（写真12）。

(5) マンホール

マンホールでは、コンクリート管の継ぎ目のところで横ずれしていることがある。ずれは最上部のコンクリート管の底面で起こりやすい。ずれたコンクリート管によって盛土が圧縮されているが、剪断面は生じていない（図4）。芦屋市三条町の事例では、コンクリート管のずれの方向は斜面の最大傾斜方向と大きく斜交しているが、付近の墓石の転倒方向から推定される卓越水平加速度方位と一致している。

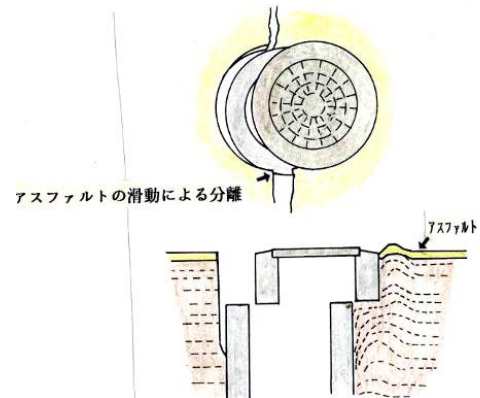


図4 マンホールのコンクリート管の横ずれのスケッチ（上）と推定断面図（下）（西宮市仁川旭が丘） コンクリート管は地表から50 cmの深さのつなぎ目でずれている。

(6) コンクリート擁壁とブロック積み擁壁

コンクリート擁壁は、擁壁板を横に繋いで擁壁を建設している点に特徴がある。ブロック積み擁壁の場合も、擁壁板を横に繋いで擁壁を建設している点はコンクリート擁壁と同じであるが、個々の擁壁板をコンクリートで連結したブロックでつづけている点に特徴がある。共に基礎の部分はL字型、逆T字型などにして、転倒を防止している。

地震時には、個々の擁壁板内に破断面を生じることが極めて少なく、擁壁板の境界の目地の部分で分離し、前方に傾動していることが多い（写真13）。擁壁の前方への傾動に伴って、擁壁と背後の盛土との境界は分離・開口し、盛土地盤中にも、しばしば擁壁と平行に開口クラックが形成されている。背後の盛土の締固めが不十分な場合は沈下を起こしている。図5はこのタイプの擁壁の傾動を模式的に示した図である。



図5 コンクリート擁壁・ブロック積み擁壁の傾動プロセス（基礎の部分は簡略化して図示）

(7) 石積み擁壁

石積み擁壁は整形した石材を噛み合わせて積み重ねた擁壁で、石材と石材をコンクリートで接合している場合もあるが、接合強度が小さいので、個々の石材はかなり自由に動きうる。

東灘区魚崎北町4丁目の住吉川護岸の石積み擁壁部分では、護岸の両側で、石積み擁壁の天端から少しさがった位置の石材群が「く」の字に折れ曲がったように孕みだして変形している（写真14）。変形が大きくなると、石材が跳び出して崩落している。石積み擁壁の変形プロセスを図6に示す。「く」の字に孕みだした位置が水平に連なっているため、これを観たある識者は水平な地表地震断層が出現したものであるとしたが、石積み擁壁の背後の地盤には断層は存在しなかった。石材が崩落しても背後の盛土が崩れないのが特徴である。石材群の孕みだしは石積み擁壁に特有の振動破壊である。

住吉川の右岸側では、高架橋のピア（橋脚）を取り巻いて、その周辺は激しく破壊されている。ピアの真横で、石積み擁壁の崩落が発生し、さらに近傍の民家も大きな被害を受けていた（写真15）。橋脚の振動が石積み擁壁や民家を破壊したものである。

一方、石積み擁壁と平行に3本の断層がアスファルト上に確認された（写真14）。こういった断層はしばしば地表地震断層の疑いがもたれたが、いずれもノンテクトニック断層であった。いずれの断層も地表では開口しているが、地下では閉じているようである。石積み擁壁に最も近い断層は天端のコンクリート板の端に沿って延びる。コンクリート板上に設置されたガードレールは道路側に傾き、断層に沿って下がっていることから、この断層は石積み擁壁のはらみだしに關係して形成されたノンテクトニック断層であると結論した。他

の2本の断層も、掘削で確認されたところでは断層の直下に地中埋設構造物が存在したことから、地中埋設構造物の振動がその上部の地盤を破壊して生じたノンテクトニック断層であると結論した。

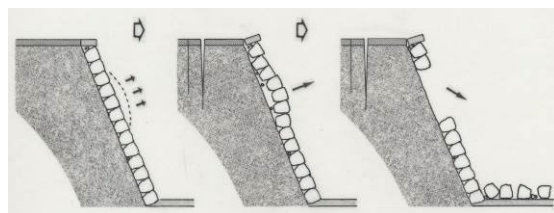


図6 石積み擁壁の変状と地表断層の形成過程を示す模式断面図（横山ほか、1997）

(8) 空石積み擁壁

空石積み擁壁は数10 cmから1 m前後の自然石を積み重ねただけの擁壁である。都市部では民家の敷地の外回りの生垣に、山間部では、民家の敷地の基礎地盤の擁壁のほか、段々畑の擁壁などに広く用いられている。

個々の自然石の接合力が小さいので、自然石一個だけが跳び出したり（写真16）、積んである自然石のすべてが道路に跳び出したりしている（写真17）。石積み擁壁でもまれに石材の跳び出しが観察される場合があるが、空石積み擁壁では、自然石が固定されていないことと、石のサイズが大きいため、自然石に作用する慣性力が大きくなり、横跳びを起こしやすい。

(9) 斜面に施工されたコンクリート吹付やモルタル吹付

斜面に吹き付けられたコンクリートやモルタルは剥離によって、比較的大きな破片に分裂して落下している（写真18）。コンクリート片の剥離では、しばしば座屈によってもち上がった山形構造が特徴である。吹付工は様々な地盤に施工されているが、コンクリートやモルタルが剥離しても、地盤はほとんど崩れていないのが通例である。

(10) 斜面の張りブロック法砕工

張りブロック法砕工では、ブロック間の連結が弱く、背後の地盤からも剥がれやすいため、破壊した部分はかなり自由に動いている。変形は小段の近傍に集中しやすく（写真 19）、そこでは張りブロックが座屈して山形構造が形成されている（図 7）。座屈による山形構造で特徴づけられる破壊形態は前述のコンクリート吹付や後述する階段通路の破壊形態と類似している。また、ここでも背後の地盤の崩れはほとんどない。

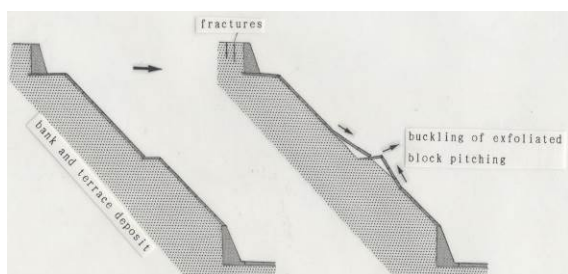


図 7 斜面の張りブロック法砕工の剥離・山形構造の形成プロセス

(11) 階段通路

神戸市は急傾斜地が造成されているために、造成平坦面と造成平坦面を結ぶ斜面上に階段通路（石材製、コンクリート製）を設置した通路が発達している。兵庫県南部地震では階段通路が大きな被害を受けた。変形は地形変換点に設置されている踊り場付近に集中している。その典型は、階段の斜面で地盤との境界に設置されているコンクリート側壁に生じた座屈による山形構造である。

山形構造には種々の形態がある（図 8）。コンクリート側壁の部材の継ぎ目で折れて山形にもち上がる例が多い（図 8b、写真 20）が、側壁の上面に張られたコンクリートの化粧板のみが継ぎ目で折れて山形にもち上がっている場合がある（図 8a）。側壁に発生した低角度の破断面に沿って上盤側の部材が前方に衝上している場合もある（図 8c）。しかし、この低角度の破断面から連続するクラッ

クが盛土中にまで伸びている事例はない。

西宮市高塚公園に下っていく南向き斜面に設置された遊歩道では、階段直下で生じた床張りコンクリート・排水溝（U字溝）がつくる押しかぶせ構造が観察された（図 2 参照、写真 21、図 9）

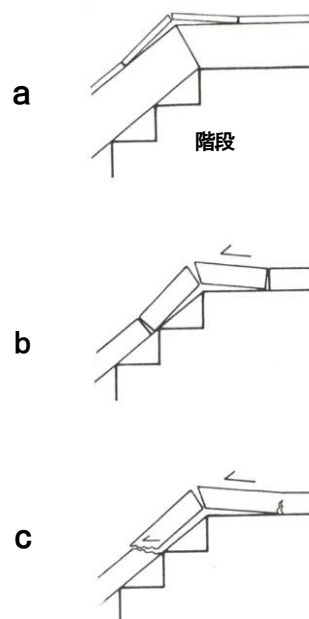


図 8 階段通路の破壊形態

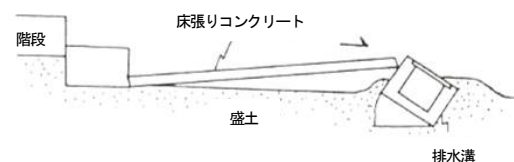


図 9 写真 21 の押しかぶせ構造の模式断面図

(12) 人工島周囲のケーソン式岸壁

兵庫県南部地震では、港湾施設も大きな被害を受けたが、人工島を囲むケーソン式岸壁（以下、ケーソンと呼ぶ）の被害もその一つである。ケーソンとは、海底の軟質な粘土層を置換した砂の上に直立した箱形のコンクリート擁壁で、重力式構造物である。

港湾施設耐震構造検討委員会（金子ほか、1996）

によると、ケーソン本体は海側へ水平移動し、海側に傾き（傾動）、沈下した（写真 22）。また、背後の盛土の変位に応じて開口クラックや陥没を生じた（写真 23）。ケーソン式岸壁の破損形態の概念図を図 10 に示す。液状化の発生に伴う噴砂がケーソンから離れた内陸部の建築構造物の周辺などで多数みられたが、ケーソン背後の 20～30 m の範囲では液状化の痕跡はほとんどなかった。これは、ケーソンの移動によって過剰間隙水圧の上昇が抑制された結果と推定されている。

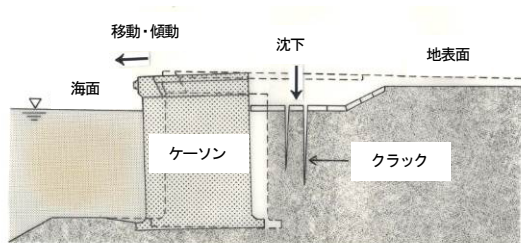


図 10 ケーソンの地震時破損形態の模式図

液状化の有無は、過剰間隙水圧比（1－初期平均有効応力に対する地震 20 秒後の平均有効応力比）の時間変化から推定された（一井ほか, 1996）。それによると、背後の盛土、置換砂のいずれも間隙水圧比が 1 に達するという意味での液状化には至らなかった。しかし、ケーソンがその直下の捨石マウンドに傾斜しながらめり込む現象が潜水調査で観察されている。また、多重剪断機構に基づくモデルを用いた有効応力解析でも、置換砂と背後の盛土の連続的な変形とケーソンのめり込む様相が示されている（一井ほか, 1996）。

過剰間隙水圧の上昇は背後の盛土と置換砂の剪断抵抗の低下をもたらしたが、その影響はこれらの地盤全体に著しい変形をもたらす形で現れたと推定されている。上記委員会の結論は、ケーソンの被害は慣性力と地震時土圧が主因であるが、それに加えて背後の盛土および置換砂の全体が過

剰間隙水圧の上昇で塑性変形したために、地震動のみによる変形よりも 2 倍程度大きくなったというものである。

2.2 地表地震動による土構造物の破壊機構と運動様式

地表地震動によって発生する破壊にはふたつの原因が考えられる。

ひとつ目は慣性力による破壊である。慣性力は地震動による水平加速度によって生じ、物の質量に比例する。そのため、規模の大きなものでも慣性力によって破壊される。

二つ目は、震動エネルギーの減衰の度合いが材料によって異なるために、合い接する材料の間で応答周期に違いを生じて発生する破壊である。それは典型的には剥離という形で現れる（横山・菊山, 1997）。

地震動によって発生した破壊現象を ①横跳び ②傾動・転倒 ③剥離 ④水平移動 ⑤低角度衝上の 5 タイプの運動様式の類型に分類し、そのうえで、これらの運動様式と破壊の原因を考察した。

【横跳び】

横跳びの典型は墓石・灯籠で観察できる。墓石・灯籠の破壊事例では、単に石造物がその場で横倒しになるというのではなく、横に跳んでいるのが特徴である（横山・菊山, 1997；横山ほか, 2002）。破壊の原因は慣性力である。

土構造物では、石積み擁壁（写真 15）や空石積み擁壁（写真 16, 写真 17）から一部の石材が跳び出す現象である。単なる落下ではなく、ある距離を跳んでいるのが特徴である。

【傾動・転倒】

傾動・転倒は土構造物の全体あるいは一部が前方に傾き、ついには倒れてしまう現象で、コンクリート擁壁、ブロック積擁壁（写真 13）、歩道の

縁石（写真 6）、三面張り排水溝の側壁（写真 8、写真 9）、破壊された U 字溝の側壁（写真 10）で発生している。破壊の原因は慣性力である。

慣性力が原因でありながら、コンクリート擁壁やブロック積み擁壁は、構造物の底面がある程度の強度で固定されているので、横跳びは起こっていない。また、歩道の縁石や排水溝の側壁は横に長いために横跳びが起こりにくく、倒れるだけである。

【剥離】

剥離は、岩盤や盛土の斜面表面に張り付いている板状の土構造物が剥がれる現象である。斜面勾配が大きくなると、剥離した板状の構造物が結果的に落下することがあるが、一部分が剥がれているだけで落下していないことも多く、剥離の定義に落下現象は含まない。剥離の典型は斜面のコンクリート吹付（写真 18）、斜面の張りブロック法枠工（写真 13）などで発生している。土構造物以外でも、土壁の漆喰（写真 24）やモルタル木造家屋のモルタル壁、建物の外装タイルなどで発生している。

細かく割れて崩れるのではなく、比較的大きな破片に割れて剥がれるのが剥離の特徴である。また、吹付コンクリートや張りブロック法枠工では割れた破片が座屈による山形構造（一種のプレッシャーリッジ）を形成している（写真 18、写真 19）。

【水平移動】

地震時には、水平に設置されている構造物でも水平移動が起こる。その典型は道路のアスファルト舗装で観察される（図 1、写真 2、写真 3）それは、路床盛土との間で剥離したアスファルト舗装材が路床盛土上を水平に移動する現象である（横山ほか、1997）。この水平移動には、剥離の原因となった材料間での地震動に対する応答周期の差と慣性力が作用していると考えられる。煉瓦敷きの

水平移動も原因は同じと考えられるが、西宮市高塚公園の煉瓦敷きのように、水平移動の際に個々の煉瓦の継ぎ目が開口し、左右両方の縁石に乗り上げている（写真 4）のをみると、慣性力の方が強く作用したかもしれない。

なお、歩道などの敷石（写真 5）や煉瓦が垂直移動しているところでは、慣性力が強く作用していると思われる。

【低角度衝上】

構造物に生じた低角度の破壊面に沿って、その上盤側が前方にせり出す現象である。地形変換点に設置された構造物で発生している。事例としては、階段通路の踊り場に設置されたコンクリート側壁（写真 20）や床張りコンクリート板（写真 21）のほか、三面張り側溝の側壁（写真 8）や空石積み擁壁（写真 25）でも観察されている。破壊の原因は慣性力である。

3. 人工地盤に発生したクラックの特徴と成因

活断層による直下型地震発生時には、地震の発生原因となった起震断層が地表に現れたものと考えられている地表地震断層が出現することがある。このほか、地表地震動（地盤の揺れ）によって生じるクラックもある。また、地震時に地すべりが発生することがあり、それによってもクラックが生じる。地表地震断層は、地球自身の運動に起因する造構作用（テクトニックな作用）によって直接生じた断層であるので、テクトニック断層と呼ばれる。それに対して、直接造構作用に因らない地震動によって生じたクラックや、地震動が引き金（誘因）であっても、最終的には重力による破壊である地すべりによって生じたクラックは、ノンテクトニック断層としてテクトニック断層と区別される（横山ほか、2015）。そして、前者は地震

性ノンテクトニック断層、後者は重力性ノンテクトニック断層と呼ばれることもある。

このような断層の識別が問題になったのが兵庫県南部地震である。出現した断層が地表地震断層（活断層）であるか否かは活断層の活動性（再来期間）を評価する上で重要になるからである。しかし、兵庫県南部地震では、活断層の認定が容易でないことが分かった。現実には、地表地震断層も、地震性ノンテクトニック断層も、地震時重力性ノンテクトニック断層もほとんど同じ場所で発生し、地表地震断層や地震性ノンテクトニック断層の一部が地すべりに転化するといったことが頻繁に起こるからである。

六甲断層系の南側の神戸市、芦屋市、西宮市、宝塚市の市街地では、道路のアスファルト舗装やグラウンドの中を多数のクラックが走った。六甲断層系の南側の神戸市須磨区から宝塚市南部にかけての地域を6ブロックに分けて、そこに発達するクラック方向をみると、ばらつきがあるものの、六甲断層系と平行に走っているクラックが多い（横山・菊山, 1998）。クラックの発生場所は宅地造成地盤の縁辺部、すなわち、平坦な宅地面から斜面に移り変わるところに集中する傾向がある。クラックは段差をもち開口しているものが多い。なかには横ずれ変位を示すクラックもある。

学校のグラウンド内に生じたクラックや道路に平行なクラックは特に連続性の良いものが多い。西宮市立上ヶ原南小学校のグラウンドに長さ 250m 以上、落差 10~20 cm で右横ずれを示すクラックが形成された。このクラックを横切るトレンチ掘削断面では、クラックは下盤側の深部に向かって斜めに成長し、約 4m の深度で消滅している（横田・仲津, 1996）。道路のアスファルト舗装を横切るクラックもアスファルト舗装が路床盛土と分離したときにできたものが多く、地下深部に延びな

い。

道路と平行な連続性の良いクラックが道路のアスファルト舗装に形成されているところでは、しばしばその直下に埋設構造物が存在する。鉄管のような埋設構造物は周囲を緩い盛土で囲まれているので、地震動で揺れやすい。そのために、埋設構造物が揺れることで、その直上のアスファルト舗装に、埋設構造物と平行な連続性の良いクラックが形成されるのである。このようにクラックは構造物の構造規制を受けるが、構造物の揺れが卓越水平地震動方位による方向規制を受けるので、結果的にクラックの方向も卓越水平地震動方位に支配されることになる。

西宮市立上ヶ原南小学校のトレンチでもうひとつ注目される点はクラックの発生位置が盛土の層厚が大きく変化しているところ（切り盛り境界）とほぼ一致していることである。このような事例は他の宅地盛土地域でも観察されている。

西宮市豊楽町では、完全に連結していないものの、過去の谷地形を再現するように切り盛り境界に沿って開口クラックが走り、地盤が明らかに斜面下方に移動しているところもある（図 11）ので、地すべりが発生したと判断された（釜井ほか, 1995）。

地震発生当時、横ずれ変位をもち変位量の大きな連続性の良いクラックのなかには地表地震断層と考えられたものもある。たとえば、西宮市の高塚公園では、当初、「甲陽断層が地表に現れた！」としてマスメディアで報道された。甲陽断層とされた断層は、走向がほぼ北東-南西～北北東-南南西で、南南西方向に住宅地まで延び、鉄筋モルタル造住宅の基礎を破壊した（写真 26）。この断層の北東延長が高塚公園内に現れた（図 2）。そこでは、主要なクラック群が埋立地の北側、すなわち谷の上流側の緩斜面に発生した。断層の最大開口

幅は30～40 cmで、斜面下流側がわずかに下がっている（写真 27）。このような特徴から、活断層の次は「地震時地すべりだ！」として騒がれ、ボーリング調査や伸縮計による動態観測が実施されたが、地すべり変動は観測されなかった。また、個々の構造物の変形は、北西から南東に向かって滑動したと想定された地すべりの運動と調和的な動きを示していない（横山・菊山, 1998）。たとえば、公園内に位置する煉瓦敷きでは、個々の煉瓦は東西方向に動き、しかも煉瓦敷きの東端と西端では移動方向が真逆で、外側を取り囲む縁石に乗り上げている（写真 4）。このような地表の構造物の動きは地すべりでは説明できないものである。一方、上述したように、斜面に設置された階段の最下段では、床張りコンクリート板のみが公園のグラウンドにせり出し、それによって斜面裾の水路を押しだし、転倒させている（写真 21）。類似の圧縮変形は斜面を下って公園に降りる遊歩道でも観察される。これらの圧縮変形は地すべり変動によるものではない。これら圧縮変形と調和的な変位方位を示すクラック群も、地震動によるノンテクトニック断層であると考えられる。高塚公園は谷沿いの池を埋めて造成されたもので、池の一部は現在も残っている（図 2）。

兵庫県南部地震では、多くの谷埋め盛土が被災したが、盛土の移動方向は必ずしも斜面下方だけではない。そして、変動域全体としてみると、斜面下方への盛土の移動は大きくない。地すべり対策が検討されたところもあるが、地震後にもすべり面が完全に連結した地すべりに発展することはない。

以上のように、兵庫県南部地震で人工地盤に発生したクラックの大部分は地震性ノンテクトニック断層である。

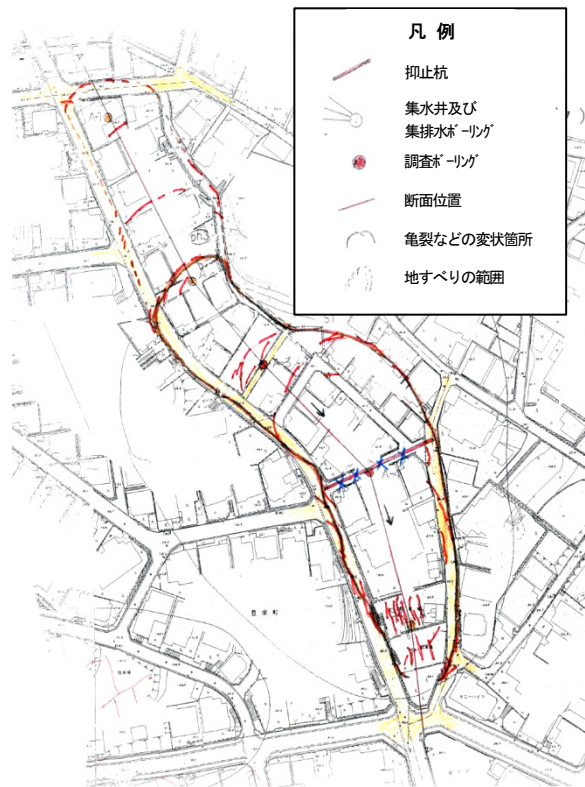


図11 豊楽町11番地のクラック群 谷埋め盛土の切り盛り境界、すなわち谷の形に添ってクラックが発生した。

4. 地震時盛土地すべり

兵庫県南部地震では、盛土の内部が目視できる程度に破壊・土砂移動をした広義の地すべり（以下、盛土地すべりと呼ぶ）が神戸市灘区西岡本 7 丁目（西岡本地すべり）、西宮市仁川百合野町（仁川地すべり）、宝塚市の宝塚ゴルフ場（宝塚ゴルフ場地すべり）で発生した。これら 3 地域の盛土地すべりには、発生前の地形条件、盛土の品質、卓越水平地震動方位との関係、破壊の形態などに共通点が認められる。いずれの場合も、段丘あるいは丘陵を造成した造成平坦面の谷埋め盛土で地すべりは発生した。特記すべきことは、地すべりに先行して地震動による開口クラック（ノンテクトニック断層）が多数発生したことである。地すべ

りは開口クラックの一部を主滑落崖とし、多数の開口クラックを切断している。以下では、各地すべりの事例について記述する。

(1) 西岡本地すべり

西岡本地すべりは段丘面上の浅い開析谷を埋めた盛土で発生し、段丘崖の直上の法肩が幅 22 m にわたって抉られた。段丘面は宅盤として整地されているために、法肩の遷急線は明瞭である。段丘崖に沿って住宅を取り巻くアスファルト舗装の道路には、段丘崖と平行に多数の開口クラックが形成され（写真 28）、路床盛土から剥離したアスファルト舗装材が段丘崖に向かってすべっている。路床盛土自体も段丘崖に向かってせり出している。せり出しに伴った盛土の塑性変形に対応して、開口クラックも段丘崖に向かってたわんでいる（写真 28）。段丘崖の麓には芦屋断層が走っているとされているが、上述のような特徴から、開口クラックは地震動によるノンテクトニック断層であると判断した。

西岡本地すべりの滑落崖は道路上に形成された開口クラック群を横切っている。滑落崖をみると、移動体の下底面は開口クラックの発達領域よりも深く、法肩で地表から 3 m 程度の深さである。開口クラック発達領域の直下の盛土は排水処理が十分ではなく、高含水で軟質である。

西岡本地すべりが発生した場所の西側の段丘崖は張りブロック法枠工が施工されていたが、地震動で剥離している（写真 19）。一方、東側の段丘崖は未開発で、長径が 50~60 cm の段丘礫が段丘下の道路に多数跳び出していた。段丘崖は、近在の墓石の転倒から推定された卓越水平地震動方位に直交した方向に延びている。

宅地として開発された段丘面の縁辺部で、段丘崖に沿って走る道路全面に多数の断層が発生し、段丘面上の開析谷を埋めた盛土が段丘崖に顔を出

すところで崩壊が発生した。これに加えて、段丘崖に施工された張りブロック法枠工が広範囲にわたって剥離した。このように断層崖付近に変形が集中したため、断層群の背後に広がる住宅地全体が、非常に低角度のすべり面に沿って、地すべりを起こしていると勘違いされ、1 ヶ月以上も住宅地への立ち入りが禁止され、道路は自衛隊によって封鎖された。しかし、開口クラックは浅所で消滅しており、変形の深度は深いものではない。崩壊部を観てのとおり、想定された低角度のすべり面は観察されなかった。

(2) 仁川地すべり

兵庫県南部地震で発生した最大の土砂移動現象が仁川地すべりである。仁川地すべりは、大阪層群とその上に堆積した段丘礫層からなる丘陵の法肩で発生した。丘陵の開析谷を埋め立てた谷埋め盛土が幅 100 m、高さ 30 m にわたって崩壊し、11~12 万 m^3 の土砂が仁川を越えて対岸にまで到達した。その際、大規模な移動土塊が土しぶきを上げて流れ下り、斜面東側に位置する西宮市仁川百合野町と仁川町 6 丁目の家屋 13 戸を押しつぶし、住民 34 名が死亡した。この谷埋め盛土は、阪神水道企業団甲山事務所が神戸市水道局上ヶ原浄水場建設に際して造成したもので、造成された平坦面とその直下の斜面との境界は遷急線が明瞭である。

本地震では、浄水場内の平坦面から斜面にかけて斜面の走向方向と平行な開口クラックが多数形成された（写真 29）。開口クラックは地表から 2~3 m の深さのものが多く、深くても 5 m を越えない。仁川地すべりの滑落崖はこれらの開口クラック群を横切っている。移動体の下底面深度は、開口クラックの発達領域よりも深部に位置していて、法肩の深いところで地表から 8 m 程度である。谷埋め盛土下底の軟弱堆積物は排土されておらず未処理のままで、開口クラックの発達領域よりも

深部の谷埋め盛土は高含水で軟質である。1995 年 1 月 21 日時点で、崩壊跡の複数箇所から地下水のしみ出しが捉えられている（佐々・福岡，1995）。対策工事中に、盛土の中に廃材などの人工物が混入していることを確認した。

この浄水場の南西側には甲陽断層が延びていることから、当初甲陽断層の断層活動によるものとする考えもあった。また、崩壊した地盤が谷埋め盛土であるという事実を認めず、大阪層群であると長らく主張されたのも特記すべき事実である。

(3) 宝塚ゴルフ場地すべり

宝塚ゴルフ場地すべりは、13 番コースの造成によって、比高 23 m の斜面内の谷を埋めた盛土で発生し、斜面下の 11 番コース上を移動した（写真 30，横山ほか，1995）。移動体の先端付近では、上位より移動体Ⅰ，移動体Ⅱ，移動体Ⅲと 3 層が重なっているのが観察される（図 12，図 13）。佐々・福岡（1995）は崩壊土量を 2～3 万 m³ と推定している。

13 番コースの崩壊跡には隣り合う二つの谷が現れ、崩落崖の背後や斜面には開口クラックが多数形成されていた。崩落崖や側方崖が開口クラッ



図 12 宝塚ゴルフ場地すべり移動体分布図

クを横切っていることから、開口クラック群の形成は地すべりの発生に先行したと考えられる。宝塚ゴルフ場付近の墓石の転倒方向は北西～西北西で、これから推定される卓越水平地震動方位に開口クラック群の走向は直交していることから、開口クラックの発生は地震動によるものである。

谷埋め盛土は、硬質な上位層と軟質な下位層からなる二階建て構造をもち、下位層と基岩の大阪層群との境界には、炭化していない植物片を含みヘドロ臭を発する高含水の青色粘土が分布していた。この粘土は造成前の谷埋め堆積物である。開口クラックは硬質な上位層で多発し、軟質な下位層の中では不明瞭になっている。

移動体Ⅰは、斜面の谷埋め盛土を主体とし、11 番コースの造成によって埋没した大阪層群からなる微高地の手前で停止している（図 13）。移動体の先端には 11 番コースのグリーンが位置している。そのグリーンから推定した移動体Ⅰの移動距離は約 80 m である（佐々・福岡，1995）。斜面に植わっていた樹木群の配置を換えることなく載せたまま、移動体Ⅰは移動している。

移動体Ⅱは 11 番コースに分布する軟質な盛土が移動・変形したもので、上記の埋没した微高地を少し乗り越えたところで停止している（図 13）。移動体Ⅱの大部分はその上面を移動体Ⅰに被われている。崩壊発生前後の地形図を比較し、移動体Ⅱの層厚の変化を推定すると、元々軟質な盛土の層厚の厚かったところが薄くなり、移動体の先端

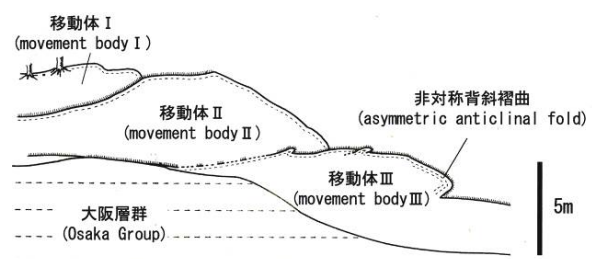


図 13 宝塚ゴルフ場地すべり移動体の重なり合い

は明らかに厚くなっている。移動体Ⅱの上面に残っている芝生は移動体Ⅱの下底に残っている芝生と元々は連続していたので、両者が重なっているところの距離が移動体Ⅱの移動距離になる。それは20～25 mしかない。埋没した微高地を越える辺りから、芝生に包まれた先端部の層厚は厚くなり、断層伝播褶曲（fault propagation fold）を形成している。褶曲の形成は軟質な盛土が薄くなり、移動体Ⅱは前進しようとしているのに、その下底面の移動速度が減衰したためである。

移動体Ⅲは、埋没した微高地の先で再び軟質な盛土に移動体Ⅱが乗り上げたとき、その荷重と押し出す力で軟質な盛土の一部が塑性変形したものである（図 13）。芝生に包まれた移動体Ⅲは非対称褶曲を形成し、移動体を包んでいる芝生にも小規模な非対称褶曲が形成された。移動体Ⅲの先端部では非変形の盛土との境界に粘土層が巻き込まれている。

地震動と関連づけて現象を整理すると次のようなプロセスが考えられる。13 番コースの崖の縁において地震動が増幅すると、下位の軟質な盛土は地震動によって間隙水圧が上昇し、液状化しないまでも著しい強度低下を起こした。一方、上位の硬質な盛土は、開口クラック群が多発して、板状あるいはレンズ状の土塊群に分断された。そうになると、下位の軟質な盛土に作用する上載荷重は不均質になり、軟質な盛土には局所的に大きな荷重が掛かるようになって、盛土層全体が益々不安定になった。地すべり発生域の谷埋め盛土は斜面に張り付いているため、斜面尻で軟質な盛土が斜面下方に押し出され、破壊は一気に盛土全体に及び、移動体Ⅰは 11 番コースのグリーンを先頭に 11 番コース上を高速で移動した。

移動体Ⅰは正面に微高地（No.2 ボーリングの西、図 12）が出てきたところで移動方向を南東から東

南東に変えているが、これは微高地を乗り越えられなかったと言うよりも、地震動によって強度低下し、移動体Ⅰが乗り上げるだけで容易に変形している状態になっていた軟質な盛土の上を必然的に移動した結果であると考えている。移動体Ⅱの発生は移動体Ⅰの荷重と前進する力で、移動体Ⅰの下底の軟質な盛土は前方に絞り出されながら、主要な変動域は次々と前進していったため、移動体Ⅱの移動距離は長くならなかったのである。

移動体ⅡもⅢも地震時でないと発生しない斜面変動である。そして移動体Ⅰは移動体Ⅱの発生によって長距離移動が可能になったと考えている。

5. 土構造物の破壊と盛土のクラックから推定される人工地盤の変形領域

はじめに、土構造物の破壊形態と土構造物と隣接する盛土の状態から、人工地盤の変形様式と変形領域を推定する。

コンクリート擁壁やブロック積み擁壁では、背後の盛土中にクラックが発生していることがあったが、多くの土構造物では、その周辺の盛土の脆性破壊はまれである。むしろ、土構造物が脆性破壊によって大きく変位している場合にも、盛土の変位量は少なく、盛土では塑性変形が起こっている可能性が高い。緑石の転倒や空石積み擁壁の横跳びでは、塑性変形による変位量も小さく、地震時の盛土の変形は弾性変形が主体であったかもしれない。

歩道の緑石や排水溝の側壁の傾動・転倒、アスファルト舗装材や煉瓦敷きの水平移動では、地震時の変位量は土構造物に集中し、盛土の永久ひずみは大きくなかった。

コンクリート擁壁やブロック積み擁壁の背後の盛土中のクラックの分布から背後の盛土の変形

領域を推定すると、脆性破壊は擁壁から背後の 1～2 m の範囲である。しかも、破壊時の擁壁の運動様式や背後の盛土中のクラックの開口状態は、地表ほど変位量が大きいことを示している。マンホールのコンクリート管の横ずれから推定された主要な塑性変形の深度は 1～2 m の範囲である(図 4)。

次はクラックの形成深度から推定してみよう。

横田・仲津(1996)は盛土中の比較的規模の大きなクラックの産状をトレンチで観察している。クラックは基盤の大阪層群中には発達していない。クラック深度は約 4 m である。このクラックで地表に生じた段差は最大 15 cm にしかすぎないので、クラック形成に伴う土砂移動量は極めて小さい。

盛土地すべりのすべり面深度はクラックの深度よりもさらに深い。たとえば、仁川地すべりの滑落崖に現れたクラック深度は 5 m を越え、すべり面深度は 8 m に達する。クラック深度とすべり面深度の間では、地震時の間隙水圧の上昇によって、塑性変形し、さらに破碎流動を起こしたと推察している。

6. 土構造物の破壊に影響する要因

(1) 卓越水平加速度方位の影響

墓石・灯籠のような底面形状の異方性が小さい構造物は卓越転倒方位が明瞭なので、地表地震動の水平地震動方位の指標として使用できる。図 14

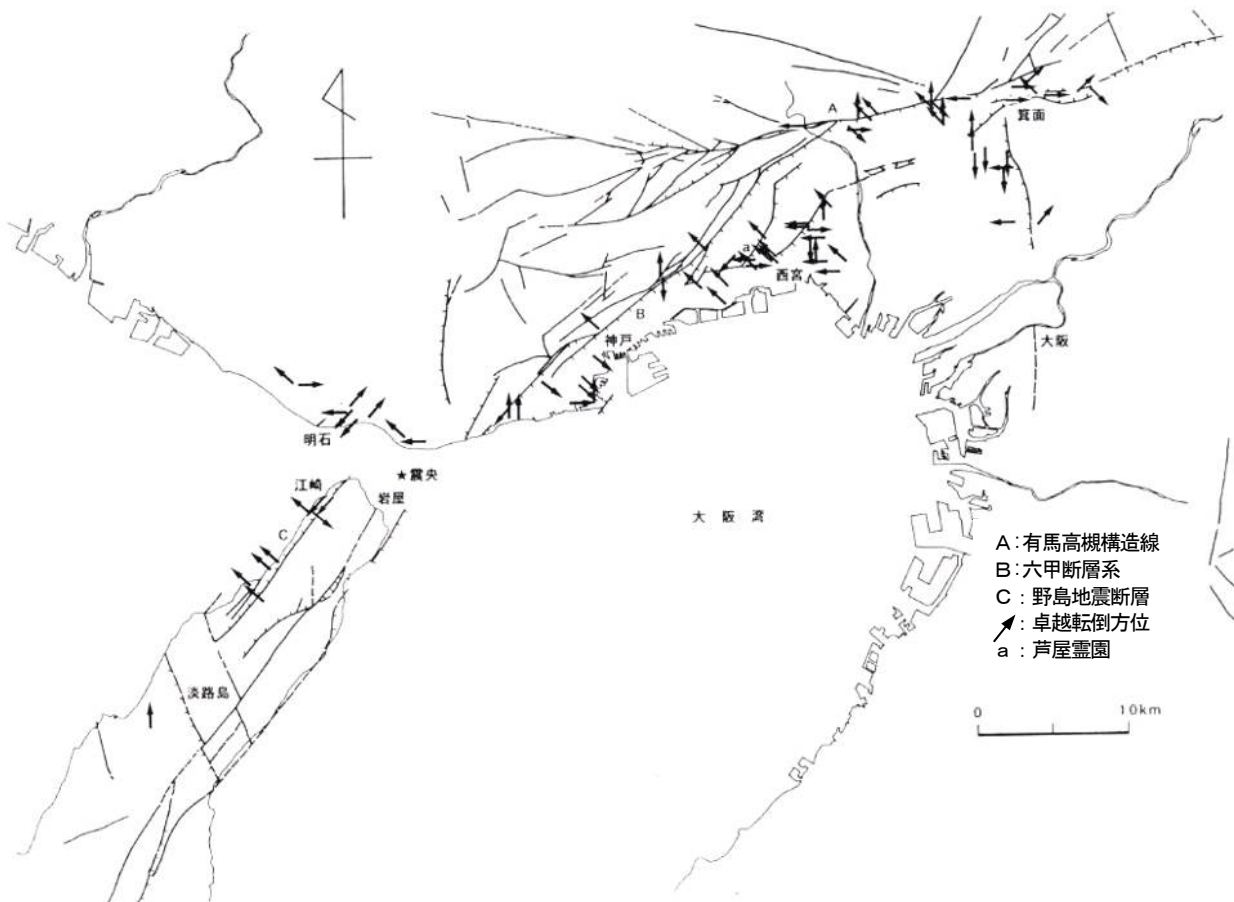


図 14 墓石・灯籠の転倒方位から推定した兵庫県南部地震の卓越水平地震動方位分布(横山・菊山, 1998)

は墓石・灯籠の卓越転倒方位から推定した卓越水平地震動方位である（菊山ほか，1996；横山・菊山，1998）．神戸市須磨区から東灘区にかけての地域は北東－南西走向の六甲断層系に直交する北北西と南南東が優勢である．芦屋市から西宮市にかけての地域は六甲断層系が北東－南西走向から北北東－南南西走向に変化するところで，南東と東が優勢である．

3 章で述べたように，六甲断層系の南側の神戸市須磨区から宝塚市南部にかけての地域に発達するクラックは，六甲断層系と平行に走っているクラックが多い．クラックの方向が卓越水平地震動方位に直交していることから，クラックは地震動によるノンテクトニック断層であると考えられる．

神戸市東灘区の南部の海上に位置する人工島「六甲アイランド」のケーソンは，東側と西側の岸壁に設置したものと，南側と北側の岸壁に設置したもので，ケーソンの水平変位量と計測加速度に大きな差がでた（高橋・菊地，1995）．水平変位量がもっとも大きかったのは南側のケーソンで，続いて北側のケーソンである．計測加速度はそれぞれ 545 ガルと 500～550 ガルである．これに対して，東側と西側のケーソンの水平変位量は半分以下で，計測加速度も 200 ガルと半分以下となって，その差は明瞭である．近傍の墓石・灯籠の転倒方位から推定した卓越水平地震動方位は南南東が優勢である（横山・菊山，1998）．海岸に沿って走る阪神高速道路の高架も水平地震動の方位規制を受けて北側に倒壊している．

(2) 地形の影響

崖の頂部のような凸型地形のところは地形効果で地震動が増幅する．崖の縁辺部で発生した西岡本地すべりや仁川地すべり，宝塚ゴルフ場すべりは地震動が地形効果で増幅したためと考えられる．丘陵の宅地造成は地形勾配のきつい斜面を

平地に造成するために，谷埋め盛土も雛壇状に施工されている．その結果，雛壇の崖に設置された多くのコンクリート擁壁やブロック積み擁壁が傾動・転倒した．

このような造成地では地形勾配の変化が著しくなり，被害は地形勾配の変換点付近にも集中した．地形変換点で発生した破壊には，西宮市高塚公園階段の踊り場で発生した床張りコンクリートの押しかぶせ構造や，階段通路の踊り場のコンクリート側壁の山形構造がある．

(3) 周辺の耐震構造物の影響

地盤を伝播してきた地震動は構造物を振動させるが，その構造物の揺れは再び周囲の地盤に伝わる．構造物に耐震性が大きいと，地盤は激しく揺すられることになる．高速道路のピアの近傍（写真 15）のほか，高層ビルのような耐震性の高い建物を取り巻く道路構造物や民家の破壊が大きくなる．

(4) 地下水の影響

盛土は，地下水に満たされるだけでも強度低下を起こす．そのため，地震を想定しなくても，健全な盛土造成において，谷底の軟弱堆積物の排土や暗渠排水の設置が必要なのである．地震時には，地下水が瞬間的に上昇することが知られている．地下水の上昇によって，盛土の強度低下の範囲が地表に向かって広がる．

(5) 液状化の影響

高含水の盛土は地震動によって液状化する可能性がある．液状化すれば，盛土の強度は著しく低下する．六甲アイランドのケーソンの破壊にみられたように，ケーソンの背後盛土，置換砂のいずれもが，過剰間隙水圧比（1－初期平均有効応力に対する地震 20 秒後の平均有効応力の比）が 1 になるという意味での液状化には至らなかった．ケーソンの被害は慣性力と地震時土圧が主因であ

るが、それに加えて背後盛土・置換砂の全体が過剰間隙水圧の上昇で塑性変形したために、地震動のみによる変形よりも2倍程度大きくなったと結論している（一井ほか，1996）。

谷埋め盛土や池の埋め立て盛土でも、締め固めがまずく、地下水の排出がうまくいっていないと、液状化に至らなくとも大きく塑性変形し、構造物の被災を大きくすると考えられる。

（6）土構造物の形態・層厚・構造の影響

宅地造成地では、谷埋め盛土の切り盛り境界にクラックや土構造物の破壊が集中している。盛土地すべりの滑落崖に現れた開口クラックの深さや西宮市上ヶ原地区のトレンチで確認したクラックの深さなどから推定されるクラック発生領域の深度から、脆性破壊の卓越領域は地表から3 m程度の深さで、5 mを越えることは希である。確認されている盛土の塑性変形もこの深度以浅で集中的に起きており、西岡本地すべりの滑落崖で観察されたように地表部ほど変形量が大きい。地震動による変形が浅所に集中するのであれば、下部の軟質盛土および谷底の軟弱堆積物が浅所に出現する谷埋め盛土、すなわち盛土層厚があまり厚くない谷埋め盛土が被災する可能性が高くなる。なぜなら、地下水処理が不十分な基盤深度が浅い谷埋め盛土では、地震時に地下水の上昇と地震動によって、強度低下した下位層の領域が浅部に向かって広がり、乾燥し固結した上位層と軟化した下位層からなる二階建て構造（キャップロック構造）が顕在化し不安定化するからである。このことは、造成年代の古い谷埋め盛土に小規模な谷を埋め立てたものが多く、今回の地震で大きな被害を受けたのはこのような谷埋め盛土であった（釜井ほか，1995）という事実と調和的である。

昭和31年施行の「宅造法」、昭和44年施行の「都市計画法」が谷埋め盛土の品質向上に一役を

担っているものと考えられる。これらの法規よりも造成年代の古い谷埋め盛土は、谷底の軟弱堆積物の処理や地下水の排水処理、締め固めなどの施工技術に問題があって、今回それが大きな被害の原因になったと理解される。

埋め立てられている谷の形状が谷埋め盛土の安定性に影響し、V字型の谷よりも底の浅いお椀型の谷（すなわち、谷の横断面で盛土の幅・厚さ比が大きい谷）で被害が大きくなるという研究もある（釜井ほか，2004）。このような谷形状を現実の谷に当てはめると、小規模な谷を埋め立てた谷埋め盛土が被災しやすいことを示すものであり、上述したようにこのような谷埋め盛土はキャップロック構造が顕在化している可能性が高いので、被災率が高くなったのである。

上記では、土構造物の破壊に影響する要因を6つ挙げて解説したが、これらの要因がそれぞれ独立に存在するのではない。複数の要因が相補的に作用して影響が大きくなる場所で大きな破壊が起きていると推察される。その典型が仁川地すべりである。

参考文献

- 一井康二・井合 進・森田年一（1996）：有効応力解析によるケーソン式岸壁の被災原因分析，阪神・淡路大震災に関する学術講演論文集，土木学会，397-404.
- 釜井俊孝・守随治雄・笠原亮一・小林慶之（2004）：地震時における大規模宅地盛土斜面の不安定化予測，地すべり，Vol.40，No.5，29-39.
- 釜井俊孝・鈴木清史・磯部一洋・山川和美・神保光昭・佐藤拓二（1995）：1995 兵庫県南部地震による都市地域の斜面変動について，兵庫県南部地震等に伴う地すべり・斜面崩壊 報告書，地すべり学会 兵庫県南部地震等に伴う地す

- べり・斜面崩壊研究委員会, 33-47.
- 金子俊六・矢島道夫・中野俊彦 (1996) : 港湾施設耐震構造検討委員会の検討結果について, 土木学会誌, Vol.8, 52-56.
- 菊山浩喜・横山俊治・中垣幸恵・柏木健司 (1996) : 墓石・灯籠の転倒調査から推定される 1995 年兵庫県南部地震の地震動, 土と基礎, Vol.44, 42-44.
- 佐々恭二・福岡 浩 (1995) : 西宮市仁川地すべりと発生予測, 兵庫県南部地震等に伴う地すべり・斜面崩壊 報告書, 地すべり学会 兵庫県南部地震等に伴う地すべり・斜面崩壊研究委員会, 145-170.
- 高橋邦夫・菊池喜昭 (1995) : 港湾施設の基礎の調査報告, 土と基礎, Vol.123, 95-99.
- 横田修一郎・永田秀尚・横山俊治・田近 淳・野崎保 (2015) : ノンテクトニック断層 識別方法と事例, 近未来社, 名古屋, 248p.
- 横田修一郎・仲津忠良 (1996) : 西宮市上ヶ原地区の例にみる兵庫県南部地震による盛土地すべりと旧地形に対応した地表での地割れの変位, 地球科学, Vol.50, No.5, 385-390.
- 横山俊治・藤田 崇・菊山浩喜 (1995) : 1995 年兵庫県南部地震で発生した宝塚ゴルフ場の斜面変動, シンポジウム「阪神・淡路大震災と地質環境」論文集, 日本地質学会, 97-102.
- 横山俊治・藤田 崇・菊山浩喜 (1995) : 1995 年兵庫県南部地震で発生した宝塚ゴルフ場の斜面変動, 地すべり学会 兵庫県南部地震等に伴う地すべり・斜面崩壊研究委員会編「兵庫県南部地震等に伴う地すべり・斜面崩壊研究報告書」, 61-77.
- 横山俊治・菊山浩喜 (1997) : 1995 年兵庫県南部地震時に発生した六甲花崗岩地域の斜面崩壊の運動様式と機構, 地すべり, Vol.34, No.3, 17-24.
- 横山俊治・菊山浩喜 (1998) : 墓石・灯籠の転倒方向からみた 1995 年兵庫県南部地震の水平地震動の方位と地表変状の方向規制, 地質学論集, No.51, 78-88.
- 横山俊治・菊山浩喜・田中英幸・海谷叔伸 (1997) : 1995 年兵庫県南部地震による盛土の地表変状の原因, 構造地質, No.42, 51-61.
- 横山俊治・水口真一・藤田勝代・嘉茂美佐子・菊山浩喜 (2002) : 花崗岩地域における地震時落石の発生場所・落下方向・到達距離の予測, 地すべり, Vol.39, No.1, 30-39.



写真1 コンクリート舗装材に生じた衝突型の圧縮構造（大阪鞠公園） 開口クラックが次の揺れで閉じたときに衝突し、一部が剥がれて山形に盛り上がった。



写真4 煉瓦敷きの水平移動による乗り上げ（西宮市高塚公園） 両側で乗り上げているので、中央付近の煉瓦の間は開口している。



写真2 2つに分離したアスファルト舗装材で一方が他方に乗り上げる（住吉霊園 住吉台の北）



写真5 歩道の敷石の跳躍（宝塚市売布ヶ丘）

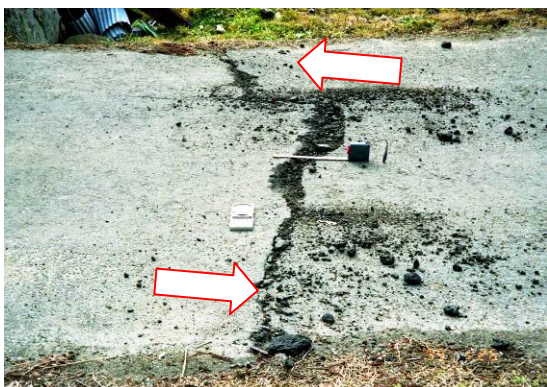


写真3 アスファルト舗装材の乗り上げ（川西市高山） 矢印はアスファルトの乗り上げ方向を示す。中央部は衝突で破壊している。



写真6 道路歩道の縁石の傾動・転倒（芦屋市旭ヶ丘） 縁石の上に歩道の煉瓦も乗り上げている。



写真7 地震動で発生した縁石のプレッシャーリッジ（淡路島北淡町 江崎灯台） 地表地震断層による変形との見方もある。歩道の煉瓦敷きは水平移動して縁石の上に乗っている。



写真10 U字溝の破壊を伴う側壁の傾動



写真8 三面張り側溝の側壁の傾動（西宮市高塚町10丁目）



写真11 U字溝の破壊・傾動に伴う鉄の蓋の折れ曲がり
地形変換点（写真の右側が登り坂）で三面張り側溝は低角度衝突で破壊している。



写真9 両側の側壁が傾動した三面張り側溝の事例（芦屋市三条町）



写真12 排水溝の蓋のプレッシャーリッジ（淡路島北淡町江崎灯台）



写真13 目地の部分で分離・傾動したブロック積み擁壁（宝塚市宝生ヶ丘）



写真16 空石積み擁壁からの自然石の跳び出し（神戸市東灘区）



写真14 石積み擁壁の変状と地表断層の産状（東灘区魚崎北町4丁目の住吉川沿い、横山ほか、1997） 石積のはらみ出しでガードレールは道路側に傾いている。



写真17 積んである自然石のほとんどが道路に跳び散った後の空石積み擁壁（神戸市東灘区） 自然石が崩れ去っても背後の盛土はほとんど崩れていないのが特徴である。



写真15 高速道路のピアの揺れが地盤に伝播し、ピア近傍の石積み擁壁、民家の破壊を大きくした（東灘区魚崎北町4丁目の住吉川沿い）



写真18 コンクリート吹付の剥離（神戸市東灘区岡本） 個々の地盤は風化花崗岩の破碎帯である。赤丸印は山形構造を示す。



写真 19 斜面の張りブロック法砕工の剥離（神戸市東灘区西岡本） 変形は小段に集中し、そこでは座屈によって山形構造が形成されている。



写真 22 ケーソン背後の沈下（青木港フェリー乗り場）



写真 20 階段通路の破壊タイプb（神戸大学）



写真 23 ケーソン背後の陥没（青木港フェリー乗り場）
陥没したところに海水が流れ込んだ。



写真 21 階段下の踊り場の床張りコンクリート板の押しかぶせ構造（西宮市高塚公園） その際、排水溝に押された地盤は盛り上がり、縁石は「く」の字に折れ曲がった。



写真 24 土壁の漆喰の剥離（池田市）



写真 25 空石積み擁壁に現れた低角度衝上に因る破壊



写真 26 「甲陽断層出現！」と新聞報道された現場（西宮市 高塚公園） 鉄筋モルタル造住宅の基礎が折れ曲がっている。



写真 27 活断層の次には地すべりとされたクラック群（西宮市 高塚公園） 地すべりを疑われ、伸縮計で計測されたが、地すべり変動は記録されなかった。



写真 28 西岡本地すべり（神戸市東灘区、横山・菊山、1998） アスファルトの移動と共に盛土の上部は斜面側にたわみ（aの矢印）、深部には伸びていない開口クラックも斜面側に変位している。



写真 29 仁川地すべり頂部に発達する開口クラック（o）と側方崖に現れた断面（西宮市仁川、横山・菊山、1998）



写真 30 宝塚ゴルフ場地すべり（宝塚市、写真は産経新聞社提供）