

岩盤の表面ないし内部に立地する構造物を 地表地震断層から守るために地盤を改良する工法の提案

PROPOSAL OF GROUND IMPROVEMENT METHOD TO PROTECT STRUCTURES ON OR IN ROCK MASSES FROM DAMAGES BY SURFACE EARTHQUAKE FAULTS

谷 和夫*
Kazuo TANI

Surface earthquake faulting caused significant damage on various structures including rock foundations of bridges and dams in Kocaeli Earthquake in Turkey and Jyu-jyu Earthquake in Taiwan occurred in 1999. Lifeline structures such as railways, roads and pipelines may need to site crossing potential earthquake faults. Thus, adequate counter-measures should be taken to avoid any catastrophic destruction or fatal failures of such civil engineering structures on or in rock masses as crossing active faults. A new idea of ground improvement method, utilizing unconsolidated surface layer dispersing localized shear deformations, is proposed to reduce damage by surface earthquake faults.

Key Words: rock mass, fault, ground improvement, earthquake damage, surface earthquake fault

1. はじめに

(1) 地表地震断層による土木構造物の被害

1999年に相次いで起こったトルコのコジャエリ地震と台湾の集集地震を契機として、地震動だけでなく地表地震断層によって土木構造物が被害を受ける問題が注目されている。地表地震断層は、地盤の表面ないし内部の一部に局所的なせん断変形(断層変位、地盤のずれ)が集中して発達した地形(段差、亀裂や撓曲など)である。

地表に立地する建築物および土木構造物または表層地盤の内部に建設される地中構造物(トンネルなど)が地表地震断層を覆って、または横切って立地していた場合、地盤のずれによって構造的な損傷を被る。例えば、集集地震(1999年)では、変位が数メートルに及ぶ逆断層によって、石岡郷の堰(コンクリート・ダム)で右岸側ゲートと堤体が破壊したり、同じく石岡郷の豊橋や霧峰郷の烏溪橋の橋脚基礎が移動して桁が落下したりする被害が発生した。いずれも岩盤に基礎を置いていた。また、地表面に立地する構造物だけでなく、岩盤中の山岳トンネル(丹那トンネルなど)に被害が及んだ事例も少なくない。

しかし、これまで地表地震断層による被害の事例は地震動による被害に比べて少なかったため、あまり注目されてこなかった(谷, 2000)。

(2) 被害低減方策の必要性

現在、地表地震断層による被害が予測される場合、立地場所を変更したり、構造物の一部を地盤の変形に追従する可撓形式の構造としたりする以外の対処方法はない。例えば、米国西海岸の設計基準(法律)では、一部の公共構造

* Ph.D 横浜国立大学大学院 工学研究院

物の立地を制限する条件（断層線から 50 フィートの範囲）がある。また、ニュージーランドのクライド・ダムには堤体内の一部にスリップ・ジョイントを設置して基礎地盤のせん断変形に対応する構造としている。

しかし、鉄道や道路などの公共交通機関や、電気・ガス・上下水道・通信などパイプ・ケーブル網からなる線状の土木構造物（ライフライン・インフラ）は、地震によって地表地震断層が現れると予想される場所にも立地せざるを得ないケースが考えられる。また、地表地震断層などのせん断変位は数メートルにおよぶことがあるため、構造物の種類によっては可撓構造とすることで対処することが難しい場合も想定される。このように立地制約や構造上の制約があるインフラの場合には、外的作用である断層変位が数メートルと通常の建築物や土木構造物の設計で考慮する作用より数オーダー厳しく、被害確率も非常に低いことを斟酌すると、地震直後にインフラが提供すべきサービスは修復のためにある程度の期間ストップすることは已むを得ないかもしれない。しかし、大脱線、車両転覆あるいは多重衝突など多数の死傷者が出るような壊滅的な事故は防止する手立てをとる必要がある（注：若干名の死傷者が出るのが許容されるかどうかは、なお議論の余地があると思われる）。

そこで、地表地震断層が現れる虞がある地点においても、基礎地盤の数メートル程度のずれ変形を吸収して横断構造物の壊滅的な被害を低減・防止する対策が必要である。具体的には、立地場所の選択が制限されるため地表地震断層の位置を横断する道路や鉄道において、地盤のせん断変位による走行レーンや軌道の損傷を、地震直後に自動車や列車が多数の死傷者を出さずに通過・停止することができ程度にまで低減する何らかの対策を施さなくてはならない。

2. 表層地盤の影響

（1）岩盤の功罪

地震断層が存在する地形は平野と山地の境界部であることが多く、これを横断ないし沿って立地する線状の構造物には、トンネルや橋梁など岩盤の内部や表面に立地するものも少なくはない。岩盤は土質地盤に比べて強度や剛性が高い（コンピーテント（competent）な）ので、直接基礎や簡易な支保工で常時に対しては安全性が十分に確保できるだけでなく、地震動に対する耐震設計でも加速度は大きい変位は小さく、液化化などの問題も生じないので有利である。

しかし、地表地震断層のように変形が外力作用として働く場合には、岩盤は 2 つの点で不利な地盤材料と言える。1 つは強度や剛性が高いため、構造物に作用する荷重や応力が高くなるからである。もう 1 つは、脆性的な破壊をするために破壊後の変形の局所化が著しく（せん断帯または破断面に変形が集中するので）、構造物の一部分に作用（ずれ）が集中するからである。

逆に強度や剛性が低い（インコンピーテント（incompetent）な）土質地盤は、構造物に作用する荷重や応力を低減し、作用（ずれ）を分散する性能が高く、この問題に関しては有利な地盤材料と言える。

（2）未固結被服層の効果

1990 年より、活断層調査で行うトレンチ調査を高度化することを目的として、基盤の断層を覆う第四紀の堆積層（未固結被服層）の変形構造を検討してきた。その手法は地表地質踏査（谷ほか、1997）、トレンチ調査（上田・谷、2000）、模型実験（上田・谷、1999；小山、2001）、数値解析（谷、1994）など多岐にわたり、断層変位によって未固結被服層が受ける変形のメカニズムの概略が明らかになった。

震源断層より地表に向かって発達する断層変位（地盤のずれ）は、硬い基盤が地表に露出していない限り、集中したせん断変位がそのままの形態で地表面にまで到達（シャープな段差が出現）することはほとんどない。未固結な表層地盤が存在する（地表が土質地盤で覆われている）場合には、地表面付近では顕著な不連続変形（シャープな段差）が見られずに撓曲が支配的な変形モードになる。このような未固結被服層の影響は、コンピーテントな基盤中を被覆するインコンピーテントな表層地盤中で、下部境界より入力される剛体的なずれ変位（断層破砕帯に集中したせん断変位）が、どのようにその形態を変化させるのかという問題に単純化される（Mandl、1988）。以下に示す 2 点が形態上の変化の特徴である。

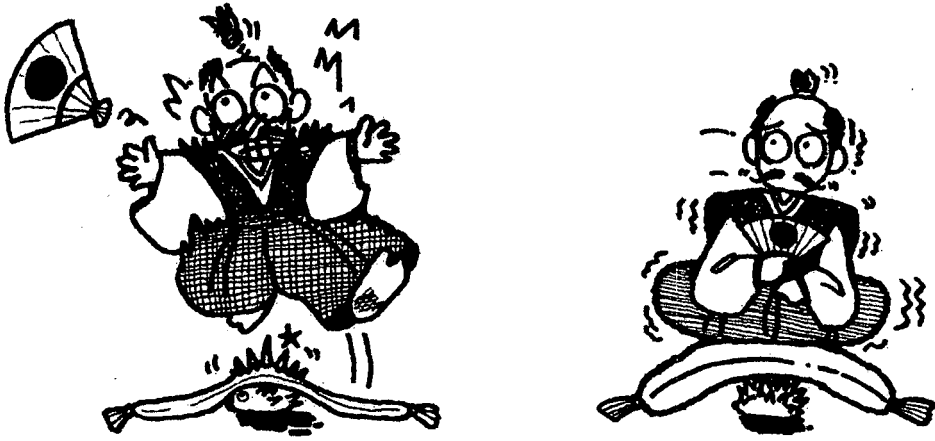


図-1 座布団効果

注釈：未固結被覆層（座布団）の厚さが断層変位（ハリネズミの棘）に比べて相対的に薄い場合（左）と厚い場合（右）で、基盤面に与えられる外的作用（断層変位）が地表面に与える影響（段差・亀裂や撓曲）の度合いが異なる。

① ずれ変位の分散作用：単一のせん断帯が、複数のせん断帯に分化・分岐する

② ずれ変位の平滑化作用：せん断帯が尖滅し、集中していた不連続な変形が、連続な変形（撓曲）に転化する

このように、未固結被覆層が基盤の断層変位（一箇所に集中した地盤のずれ）を広い範囲に分散し、なだらかな撓みに変化させる緩和作用を、未固結被覆層の“座布団効果”と呼んでいる（図-1）。1995年の阪神大震災では、淡路島側と神戸市側でこの“座布団効果”の違いにより顕著な差が見られた。淡路島側の野島断層に沿っては明瞭な地表地震断層が確認されたが、神戸市側では軟らかい完新統が基盤上に厚く堆積していたので活断層に沿う段差・亀裂や撓曲などの変状はほとんど確認されなかった。

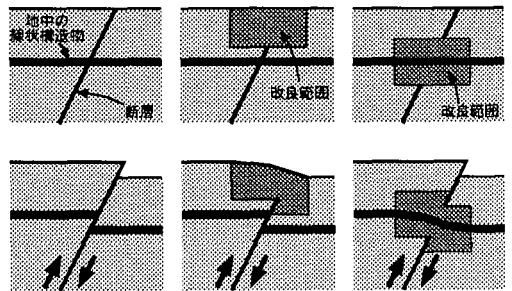
3. 被害低減方策のアイデア（地盤改良工法）

（1）地表のせん断変形を緩和する方法の原理（表層地盤の“座布団効果”を活用した地盤改良）

土木構造物に対する被害を低減する方策として、構造物と岩盤の接する部分にせん断変形の吸収、分散、平滑化性能に優れた材料を適切に配置することを特徴とする地盤改良工法を考案した（谷・小山、2001）。提案する地盤改良工法のアイデアは、2章に記した表層地盤の“座布団効果”を積極的に活用しようとするものである。地盤材料はせん断に伴って体積変化する特性（ダイレイタンスー特性）を有するが、地盤材料より体積変化による変形吸収性能が高い材料に置き換える置換工法も含めた提案である。

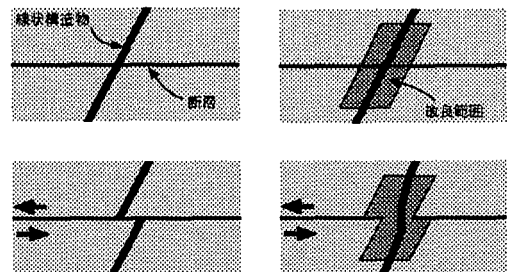
具体的には、岩盤の表面ないし内部の一箇所に集中して発達するせん断変形（地盤のずれ）を覆い隠すようにインコンピートな地盤を造成する（図-2）。地表に立地する建築物および土木構造物の場合には、基礎岩盤と構造物の底面の間に文字通り座布団を敷くように基礎地盤を改良する。一方、地盤の内部に建設される地中構造物（トン

地盤を改良しない場合 表層地盤を改良する場合 深部地盤を改良する場合



縦ずれ断層の縦断面図(上段:変位前、下段:変位後)

表層または深部の地盤を改良しない場合 表層または深部の地盤を改良する場合



横ずれ断層の平面図(上段:変位前、下段:変位後)

図-2 地盤改良工法概念

ネルなど)の場合には、構造物を座布団で包んで岩盤中に設置するようにライニングの周辺地盤を改良する。そして、改良地盤の吸収、分散、平滑化作用(“座布団効果”)を最大限に利用して局所的な変形(段差・亀裂や撓曲など)を緩和するのである。その結果、地盤内部の集中したせん断変形が分散され、地表の変形性状が緩やかになり、地表に立地する建築物および土木構造物または地盤の内部に建設される地中構造物が被る構造的な損傷が低減できると期待される。ただし、インコンピーテントな被覆地盤であっても、最低限の支持力や剛性は確保する必要がある。

このような地盤改良を必要とする範囲は、断層の変位量、構造物の特性、改良地盤の性能などに依存するが、対象とする活断層の周辺にごく限られた狭い範囲に限定される。ほとんどの場合、延長が100mから数百メートル程度、幅が数メートルから20メートル程度になると想定している。

(2) 従来の地盤改良工法との相違

ここに提案する地表地震断層によって土木構造物が受ける被害を低減するために地盤を改良する工法は、従来の地盤改良工法とは根本的に発想が異なっている(谷, 2001)。

まず、地盤を改良する目的が異なる。従来の地盤改良は、地盤の強度や剛性を増加させて地耐力を高めたり土圧を低下させたりすること、圧密を促進させて沈下を早期に終了させる(さらなる沈下を抑制する)こと、液状化を防止すること、透水性を低下させて止水効果を高めることなどを目的としていた。一方、“座布団効果”を活用した地盤改良工法の目的は、逆に地盤の強度や剛性を低下させる(弱体・軟弱化する、あるいは圧縮し易くする)ことによって、地表面や地盤内部の局所的なずれ変形を緩和することである。

さらに、地盤改良の原理も異なる。従来は、除去・置換、圧密・排水、締め固め、固化が改良の主な原理であった。しかし、“座布団効果”を活用した地盤改良工法では、せん断変形を分散させることが改良の原理である。断層を挟み離れた地点間の相対的なずれ変位は断層変位そのものであり、これ自体を低下させることは現実的ではないからである。

4. 具体的な4つの方策

表層地盤の改良方法の具体的な形態としては、以下に示す4つの方法が挙げられる。①剛体ブロックを配置する方法と②大粒径の地盤材料に置き換える方法はトレンチで観察したせん断帯が礫や礫層で遮断されることから、③地盤材料の袋詰め(土嚢)に置き換える方法はジオテキスタイルや土嚢を用いた補強土工法から、④軽量地盤材料などに置き換える方法はロック・シェットの3層緩衝構造より着想した。

(1) 剛体ブロックを配置する方法(図-3)

表層地盤中のせん断変形(地盤のずれ)が生じる部分に剛体ブロックを配置して、集中したせん断変形を周辺の地盤に分散する方法である。せん断帯が上位層へ連続的に発達することを剛体ブロックが阻害して、ブロックの両端にせん断変形(地盤のずれ)を分散させる。効果的に配置された複数のブロックによって、より多くのせん断帯に分散されると個々のせん断変形(地盤のずれ)は小さくなり、結果的に地表近傍の傾斜が緩くなることが期待できる。

しかし、試行的に実施した模型実験では、剛体ブロックの配置

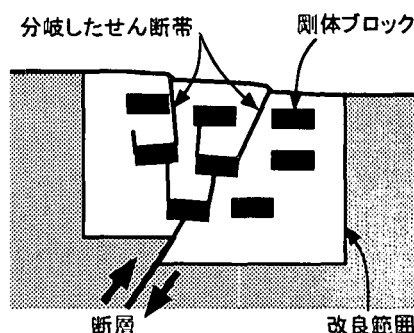


図-3 剛体ブロックを配置する方法

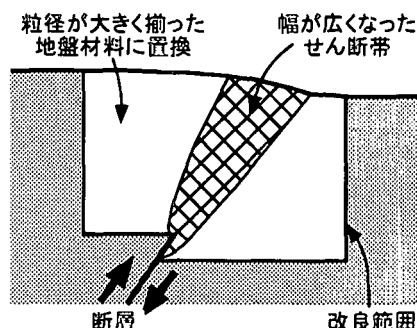


図-4 大粒径の地盤材料に置き換える方法

と分散性能の関係が複雑で、その分散作用も限定的なので現実的な対策にはなり得ないことが分かった（宮坂、2003）。

（２）大粒径の地盤材料に置き換える方法（図－４）

表層地盤を粒径が大きくて揃った地盤材料に置き換えて、表層地盤中に帯状にせん断変形（地盤のずれ）が集中するゾーン（せん断帯）の幅を大きくして、その内部のせん断ひずみを低下させる方法である。粒径が揃った（均等係数が小さい、淘汰された）粒状体に発達するせん断帯の幅は平均粒径の 10～20 倍程度であるという利用している。

しかし、試行的に実施した模型実験やFEMによる数値解析では、その分散作用も限定的なので現実的な対策にはなり得ないことが分かった（宮坂 他、2002 年）。

（３）地盤材料の袋詰め（土嚢）などに置き換える方法（図－５）

表層地盤のせん断変形（地盤のずれ）が生じる部分を横断するように地盤材料を筒状またはマット状の袋に詰めたものを配置して、上位層に集中したせん断変形（地盤のずれ）が伝達することを防止（マスク）する方法である。袋に地盤材料を詰めたものとしては、大型の土嚢のようなものを考えられる。筒状またはマット状の袋は連続的な変形態様によってせん断帯を被覆する形態となるため、地表の傾斜が緩くなることが期待できる。

（４）軽量地盤材料などに置き換える方法（図－６）

表層地盤を、圧縮性が高い軽量地盤材料などよりなる吸収層と剛な平滑化層に置き換える方法である。断層が変位する際に、平滑化層が吸収層を押しつぶし、局所的なせん断変形（地盤のずれ）を緩やかな傾斜に変換することを期待している。よって、平滑層は十分に曲げ剛性が高く、反力を基盤などにとることができる構造でなければならず、線状の構造物自体が平滑化層として機能することが一般的であろう。

４．設計の考え方と多層モデル

（１）要求性能と作用

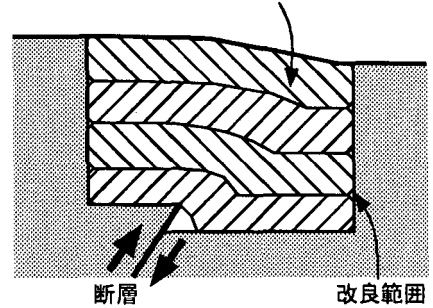
対策工法の目的は、地表面にはせん断帯を出さず（到達させず）、地表面ないし地盤内部の基礎部分の傾斜または線形の曲がり具合をある一定値以下に抑えることである。この照査条件は、設計で対象とする構造物の目的と機能によって要求性能として定められる。

一方、構造物に働く作用は断層の変位であり、その方向・センスや大きさは活断層調査と設計で対象とする構造物の重要度によって決定される。

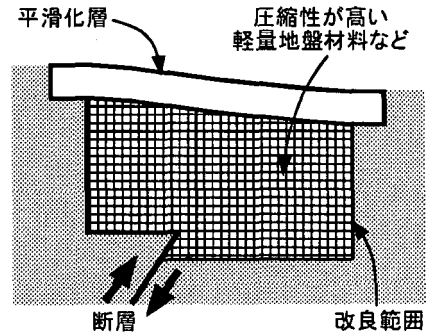
（２）多層モデル

構造物と岩盤の接する部分に設ける改良地盤の構成は、ロック・シェッドの３層緩衝構造に倣い、多層モデルが相応しいと考えている。断層に接する部分から、局所的なせん断変形（地盤のずれ）を吸収する吸収層、不連続的な変形を連続的な変形（せん断帯を撓曲）に変換する分散・変換層、変形の一様化を図る平滑化層の３つ異なる性能を有

地盤材料を詰めたマット状または袋状のもの



図－５ 袋詰め（土嚢）などに置き換える方法



図－６ 軽量地盤材料などに置き換える方法

する3層構造を基本とする。場合によっては、分散・変換層は独立した層とはせず、他の2層にせん断変形（地盤のずれ）を分散・変換する機能を持たせることも可能である。

吸収層の材料は圧縮性が非常に高く、せん断帯が発達しにくく、盛土材料としても実績がある発砲スチロール（EPS）が最適であると期待している。分散・変換層の材料は、マット状の土嚢やジオテキスタイルなどの利用が考えられる。また、平滑化層は、構造物の基礎自体を曲げ剛性が高いRC構造のスラブとすることで対応することが可能だろう。

（3）設計計算（照査）の考え方

水平荷重をうける杭の設計計算モデルが参考になる。平滑層を弾性支床梁としてモデル化し、改良地盤の各層が有するせん断変形の吸収性能および分散・変換性能を考慮して、平滑化層（梁）に作用する地盤反力を適切に評価する。平滑層に作用する曲げモーメントや曲率などが照査項目となり、要求性能を満足するように各層の性能と寸法や配置が決定される。

5. まとめ

地表地震断層による土木構造物の被害を低減する方策として、インコンピーテントな地盤の“座布団効果”を積極的に活用する地盤改良工法を提案した。大規模な構造物によって活断層を跨ぐように横断する代替方法と比較して、大変位量の吸収・対応性、維持管理の容易性（基本的にメンテナンス・フリー）、景観や環境上の親和性、経済性などに関して優れていると考えている。さらに、活断層が山間部や平野と山地の境界部に沿って分布することが多いことを考慮すると、トンネルなど地中構造物にも適用することが可能な提案手法は、実効的な対策工法としてより期待度が高いのではないだろうか。

また、提案する方法は、地表地震断層に限らず、空洞陥没などによって地盤の内部に発達したせん断変形（地盤のずれ）に対する対応策としても応用することが可能である。

今後は、多層構造の改良地盤を構成する各層のせん断変形の吸収性能、分散・変換性能および平滑化性能を検討する必要がある。特に、吸収層の材料である発砲スチロール（EPS）の吸収性能（大変形時の変形・強度特性）は重要である。さらに、設計の考え方や具体的な計算手法を確立するために、模型実験などによる詳細な検討も行わなければならない。

参考文献

- （1）谷 和夫：断層変位 — どのくらい動くのか、その対処法は —（日本 地震 あれから これから（「1995年兵庫県南部地震」5周年特別企画））、土木学会、pp.31-34、2000。 （2）谷 和夫、上田圭一、阿部信太郎、仲田洋文、林 康幸：野島地震断層で観察された未固結な表層地盤の変形構造、土木学会論文集、No.568/III-39、pp.21-39、1997。
- （3）上田圭一、谷 和夫：基盤の断層変位に伴う第四紀層及び地表の変形状況の検討（その3）、電力中央研究所報告、U98049、1999。 （4）小山良浩：横ずれ・斜めずれ断層実験で観察された砂地盤に発達するせん断層の構造分析、横浜国立大学卒業論文、2001。 （5）谷 和夫：ジョイント要素を用いたFEMによる逆断層の模型実験のシミュレーション、地盤の破壊とひずみの局所化に関するシンポジウム、土質工学会、pp.215-222、1994。
- （6）Mandl, G.: Mechanics of Tectonic Faulting, Elsevier, 407p。 （7）谷 和夫、小山良浩：横ずれの地表地震断層における未固結被覆層のせん断層の構造分析と土木構造物に対する被害低減方策の提案、日本応用地質学会平成13年度研究発表会、pp.47-50、2001。 （8）谷 和夫：地盤改良工法、特願2001-316161、2001。 （9）宮坂 淳：地表地震断層による被害を低減する地盤改良工法の数値解析と模型実験による検討、横浜国立大学修士論文、2003（準備中）。 （10）宮坂 淳、大波正行、谷 和夫：基盤の縦ずれ断層運動による砂層表面の変形に及ぼす粒径の影響に関するFEM解析による検討、第47回地盤工学シンポジウム、地盤工学会、pp.193-200、2002。