

地中構造物の耐震設計

小長井 一 男^D

1. 地中構造物の地震被害

現在の都心部の風景は一地方都市に住んでいた著者の幼時の町の情景とはほどおおい。電信柱がない。洗濯物の下がる民家の軒や商店街をかすめて通る電車もない。これらの生活臭の強い物の多くは効外に放逐されるか、あるいは近代的な地下埋設管、地下街、地下鉄等に形を変えて地中構造物のバリエーションを増やしている。都市機能を維持する上で重要なこれらの構造の耐震性を検

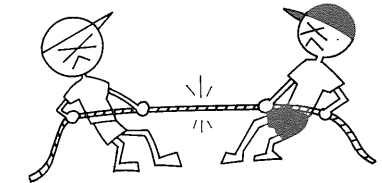
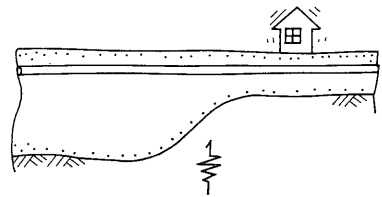
討することは我々の重要な課題である。そして合理的な耐震設計のヒントは過去の地震の被害例に求め得る。

地中の構造物には埋設管路やトンネルなどの管状構造物に加えて地上の建造物を支える杭などの支持構造物、地下のタンクなど様々の形態、機能があり、被害の形態もそれに応じて異なっている。これらの構造物は地中に隠れていて、その被害の調査も困難なことが多い。しかし、電気、ガス、上下水道といった都市の神経、血管に相当する埋設管路のネットワークが寸断され機能しなくなることがいかに深刻なものは、昨年10月17日サンフランシスコ湾岸地域を襲ったロムプリータ地震、日本海中部地震(1983)、宮城県沖地震(1978)、新潟地震(1964)などであきらかである。

埋設管路の被害の大半はネジ接合の鋼管のネジ部に生じたものである(写真1)。ネジ部分の被害の多くは破断、抜け出しによるものであるが、一度離れた部分が繰り返しぶつかりあった痕跡を残すものも見られる。これらの破損状況は管が主としてその軸方向に強く引張られたり、押し付けられたりした様子を示している。こうした被害は、柔らかい地盤が比較的硬い基盤の上に堆積してその堆積層の厚さが急変するような箇所(第1図)などに集中して起こっている。この場所を挟んだ両側で



写真1 埋設管の被害例(文献1)



第1図 埋設管の被害の多い所

1) 東京大学 生産技術研究所: 〒106 東京都港区六本木7-22-1



写真2 昭和大橋の被害(文献1)

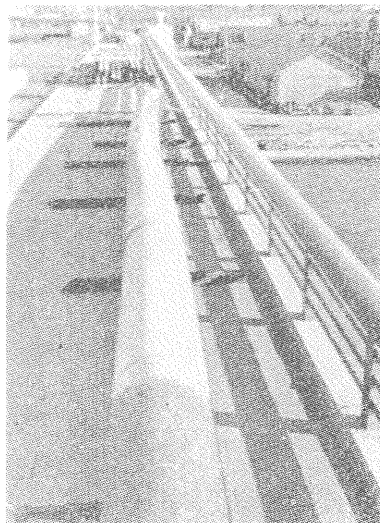
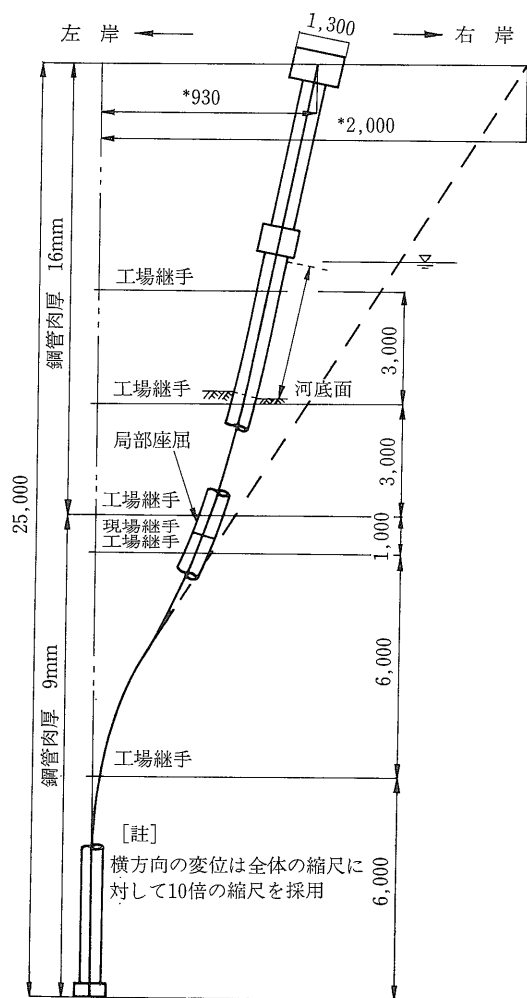


写真3
引き抜かれた鋼
杭(文献2)



第2図 昭和大橋基礎鋼管杭の変状(文献2)

は地盤の揺れ方は大きく異なっていて、埋設管は周辺地盤によって綱ひきの綱のように引っ張られる。

1964年の新潟地震で新聞紙上や週刊誌上に賑わしたのが昭和大橋の落橋である(写真2)。地震の僅か1週間まえ華やかに緑り広げられた国体を前に完成したばかりの橋であった。橋は地中構造物ではないが、これを支える杭に落橋の原因を検討する上で重要な痕跡があった。第2図と写真3は左岸側から4番目の橋脚を支える鋼管杭を引き抜いたものである。これによると杭先端からやく4mの部分は変形しておらず、このやや上部で杭は大きな角度で折れ曲がっている。その後の調査からこの曲がった箇所よりやや上部までが堅固な地盤に入っており、その上の約10m程の厚さの砂層が大きく信濃川の中心部に向かって押し出されたものと推測されている。この信濃川の護岸(左岸側)も3m程度は川に向かって押し出されており表面の砂層全体が大きく川に向かって動いたことが、橋脚間の大きな開き、ひいては橋の落下につながったものと思われる。

写真4は“かつて地中にあった”新潟ホテルの浄化槽である。周辺の砂地盤が液状化し、空洞を持つ地下の箱が比重の大きい砂の海に浮かぶ船のように浮かび上がってきたものである。液状化は地下構造の耐震性を検討する上で忘れてならない現象である。

地中構造物といえばトンネルを忘れてはならない。しかしトンネルは元来地震に強い構造といわれており、事実、過去の地震でも坑口部や断層を横切っていた部分(例えば伊豆大島近海地震の時の稲取トンネルなど)の他はあまり大きな被害例は報告されていない。これは、例えば山岳トンネルの場合では、トンネルの位置が地質も良好な地中深くにあり、地盤そのものの動きが地表近くに較

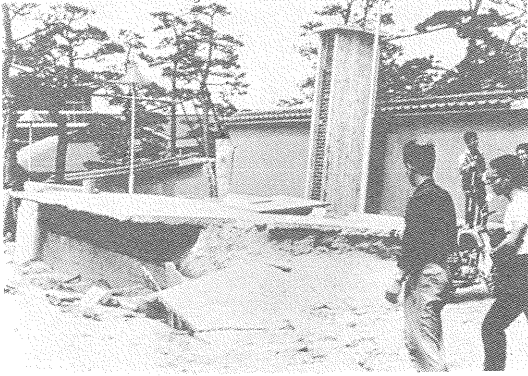


写真4 新潟ホテルの浄化槽の被害(文献1)

べ著しく小さいことによるものと考えられる。1989年のロムプリータ地震ではサンフランシスコ湾を横切って脆弱な地盤内に建設されたBART (Bay Area Rapid Transit) のトンネルは全く被害を受けず、地震後のサンフランシスコの重要な市民の足として機能し、丁寧に設計されたトンネルの耐震性の高さを証明することになった。しかし一般に、都市部の開発に伴って軟弱な沖積層内に建設された多くのトンネルは、歴史が新しいこともありあまり大きな地震で揺すられておらず、今後地震観測を積み上げる努力が必要であろう。トンネルの被害については別の観点から留意すべき問題があり具体例も併せて後半で触れる。

2. 耐震設計の考え方

これらの地中の構造の被害を見ると、著者は毎日の地獄の通勤ラッシュを連想する。写真5は一昨年営団地下鉄の駅構内に貼られていた。通称マナーポスターである。大きなカバンを持ったこのポスターの主人公が地中構造物であり、これを取り巻く人々（ここではデザイン上の配慮か、経費の都合かわからないが、二人しか描いていない。）が柔らかな表層地盤である。そしてときどき急停車、急発進し、突如カーブを曲がる電車が硬い基盤を揺する地震動である。地中構造物である主人公はみんなから迷惑そうな眼でみられているが、本人として自分の動きは意のままにならない。むしろ電車の中全体の人々の動きはこの主人公一人だけのために大きく変化することはなく、主人公が周りの人々に押されて右往左往するのである。ただ近くの人と揺れ方が少しばかり異なるので周りの人に迷惑をかけているといえなくもない。周りの人がしかめ面をする、この“迷惑”に相当する力を専門的には相互作用力と呼んでいる。

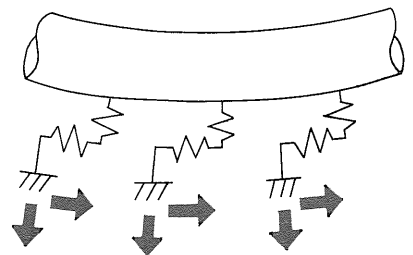
従って地中構造物の耐震設計を行う上で、これを取り



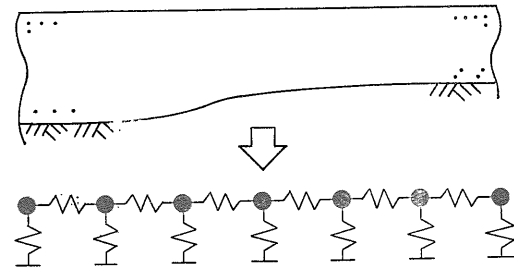
写真5
マナーポスター
(営団地下鉄)

巻く地盤の動きを知ることが重要である。もしこの地盤の動きが合理的に設定できれば、これを相互作用力を表現する地盤のバネを介して、第3図に示すように構造物にかけてやれば構造物の応答を知ることができ、その耐震性を検討できる。この方法を応答変位法と呼んでいる。この応答変位法を実行するためには、(1)“電車”の動きに相当する合理的な地震動を設定すること、(2)“周りの人々”に相当する表層地盤の形状や物性を調査しその揺れ方を推定すること、(3)構造物を支える“相互作用バネ”を正しく評価することが重要となり、どれも現在の耐震工学にとって重要な研究課題である。

(1)は地中構造のみならず全ての構造物の耐震設計に必要な課題でありこの話題の枠を越えると思われるので割愛し、ここでは(2)、(3)について少し詳細に触れてみる。不均質、不整形な表層の軟弱地盤の応答については、波動論、有限要素法、境界要素法、これらを複合した手法など様々な手段で検討されている。このような表層地盤を相手にした研究は、臨床医と患者の関係のようなところがあって、患者(表層地盤)の様子によって、適した



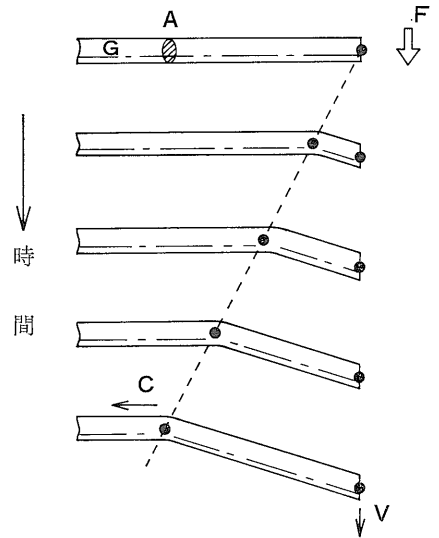
第3図 応答変位法の概念図



第4図 表層の軟弱層のモデル化

処方（解析手段）も異なる．しかし現状では地盤内部の物性に関する情報の量，精度に限度があり，現実の沈埋トンネルなどの耐震設計には例えば第4図の様な地盤モデルが周辺地盤の動きの検討手段としてよく用いられている（文献3）．これは表層地盤を縦割にし，各々の柱を振子に見立ててモデル化してお互いをバネで結ぶといった簡単なものであるが，この大胆な近似でも，さきに触れたような堆積層の厚さが変化するような箇所（第2図）で埋設管の被害が集中して起こるようすをかなりの確に検討することができる．沈埋トンネルなどの管状構造物はこのモデルの上に相互作用バネを介して載せられた梁としてモデル化される．

構造物と地盤の間の相互作用力は，相互作用バネの変形で表現される．この相互作用バネの定め方も構造物の種類，規模で異なるため，事業主体等の定める規準も様々であるが，重要な構造物を対象とする場合には数値解析などにより慎重にその値が検討される．例えばトンネルなどの口径の大きな管状構造物では管軸に直行するような地盤の断面をとりだし，これを有限要素法でモデル化し，構造物に所定の変形（移動）を生じさせる状況での地盤からの反力を計算し，バネ定数を評価する．当然，地盤は無限の広がりを持つことから，解析領域は解にその影響が出ないように広くとる必要がある．しかし相互作用力を検討するうえで厄介な問題に，構造物からの波動の逸散がある．この波動の逸散があるために，相互作用力には，構造物と地盤の相対変位に依存する力だけではなく，相対速度に依存する力も存在する．第5図は構造物に接する地盤から波動の伝播する方向に沿って土の柱を切り出してきたものである．この柱の構造物に接している端に力 F を加え，速度 v で揺すってみると図に示すように，波動が速度 c で伝播していく．したがってこの土の柱の端と波頭部の間には歪が発生するが，この歪は明らかに柱の端を揺する速度 v に比例し，波頭の伝播速度 c に反比例する．この柱の歪にせん断弾性係数 G と断面積 A をかけたものが，柱の端面を加振する力 F となるわけであるから，



第5図 速度に依存する相互作用力

F は G, A, v に比例， F は c に反比例

$$F = G \times A \times v / c$$

となり，さきに述べたバネの反力はこの成分を加えて相互作用力を検討しなければならない．一般に弾性波動論では相互作用ばねのうち変位に依存する反力を示す項が実数で，速度に依存する分が虚数で表現され，従ってバネ定数が複素数で表現される．当然同じ変位振幅でも加振周波数により速度や波動の伝播に変化が起こるため，このバネは周波数の関数として与えられる．周波数が低く（すなわち v が小さく），構造物の規模が小さい場合（伝播する波長に対し，構造物のサイズが小さい場合）には，波動の逸散による相互作用力の寄与は小さく，これを無視して差し支えないが，重要な大規模構造ではこうした点を考慮した動的解析が行われ，その結果が設計段階で検討される．

さらに面倒な問題として構造近傍地盤の非線形性がある．地盤の歪は“マナーポスター”のしかめ面から連想できるように，構造周辺で特に大きくなる．このため相互作用バネの評価はさらに困難になるが，周辺地盤が揉まれてその物性が柔らかく変化することは構造物に生ずる歪を軽減することにもつながる．しかしこうした点を定量的に評価し設計に活かすには，まだ解決しなければならない研究課題が山積している．

地震時に生ずる構造の全ての被害がただ単に地震によるものとは言いきれないこともある．写真6，7，8，第6図はそれぞれ，新潟地震のおり被害を受けた羽越線の寺坂トンネル，鼠ヶ関トンネルである．寺坂トンネルではトンネル坑口部から75mにわたり天端に延長方向の



写真6 羽越線鼠ヶ関—小岩川間，赤坂トンネル坑口と地すべり地形（文献2）



写真7
寺坂トンネル上部地表亀裂（文献2）

亀裂が発生した。また鼠ヶ関トンネルでは起点方から延長50mにわたって天端付近に延長方向の亀裂，剝離が発生し，また坑口付近に多くの亀裂が認められた。これらのトンネルは新潟県に多い地滑り地帯を通り抜けており，常時から大きな偏圧を受けていたと思われる。鼠ヶ関トンネルの坑口付近の亀裂の一部は地震発生前からその存在が認められており，この地震によってさらに亀裂が拡大し剝離を生じたものである。したがって地中構造物の耐震性を論ずるときには，それが地下にあって常時から大きな荷重を支えていることを考えなければならない。ましてその構造物がじわじわと動く地滑り地帯にあったり，あるいは徐々に沈下の進む軟弱な埋立地下にある場合には，長い時間の経過と共に構造物も変形させられていくことに配慮しなければならない。海底に付設される沈埋トンネルの所々に変形を許す継ぎ手が設置され

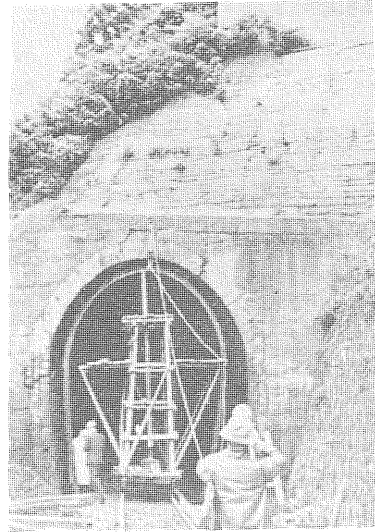
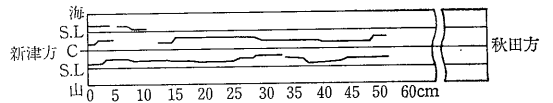


写真8
羽越線鼠ヶ関—小岩川間，鼠ヶ関トンネル起点方坑口亀裂（文献2）



第6図 鼠ヶ関トンネル内の亀裂（文献2）

るものも単に地震時の構造に生じる歪を軽減するだけでなく，こうした沈下などに配慮した結果でもある。

地中構造物は見えない地下にある。したがって構造物のみならず，どのような様子か分かりにくい周辺の地盤も含めて調査し検討していく地味な努力を怠らないことが，耐震設計を向上させるために求められる。朝晩の通勤電車に揺られながらその仕事の“重さ”を考えている。

参 考 文 献

- 1) General Report on the Niigata Earthquake of 1964, Committee of “General Report on the Niigata Earthquake of 1964”, Tokyo Electrical Engineering College Press, March 1968.
- 2) 昭和39年新潟地震被害調査報告：社団法人土木学会編，1966年6月。
- 3) TAMURA C., S. OKAMOTO and M. HAMADA (1975): Dynamic Behavior of a Submerged Tunnel during Earthquakes, 東京大学生産技術研究所報告，第24巻，第5号。

KONAGAI Kazuo (1990): Earthquake resistant design of underground structures.

<受付：1990年5月31日>