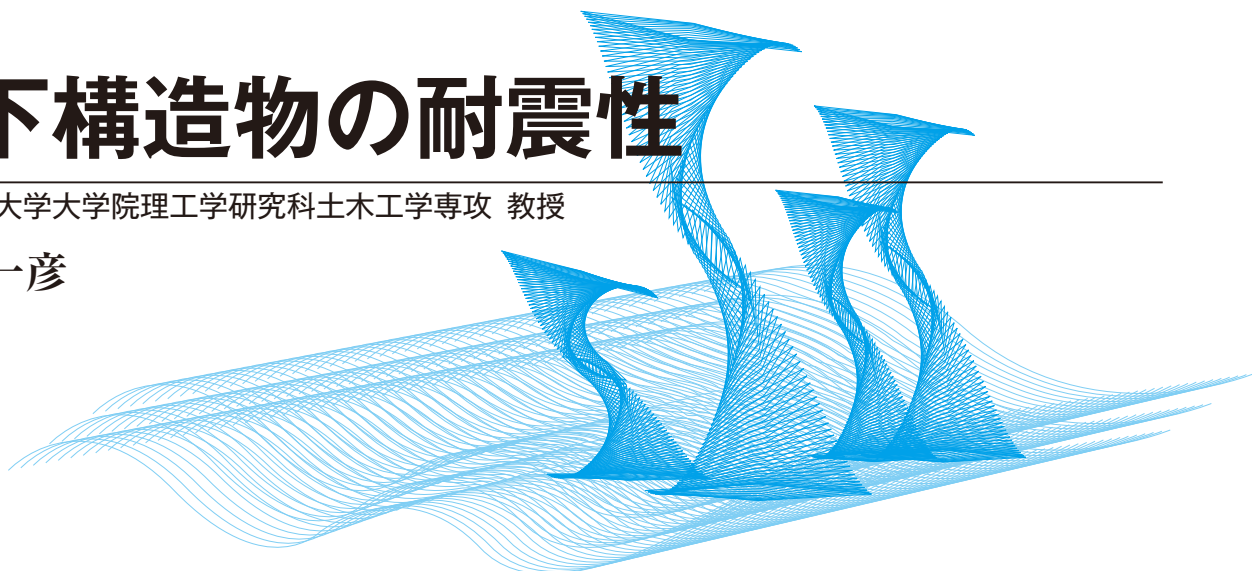


地下構造物の耐震性

東京工業大学大学院理工学研究科土木工学専攻 教授

川島 一彦



1 地上構造物に比較して地下構造物は地震に対して安全か？

地震が発生すると、地震動は地下深部から地上に伝わって来る。表層地盤内の増幅作用によって地下から地上に伝わるにつれて地震動は大きくなるため、同一地点にあると仮定すると、地上構造物に比較して地下構造物に作用する地震動は小さい。このため、地下構造物は、地上構造物に比較して地震に対して安全であると言われていたが、本当だろうか。

図1に示すように、地下構造物にはいろいろな形状、大きさ、用途のものがある。地表面に沿って線状に建設される地下構造物の例としては、上下水道、ガス等の管路があり、さらに規模の大きいものでは地下道路や地下鉄道、地下河川、共同溝などがある。また、地表に沿って幅広く建設される地下街、地下駐車場などの地下構造物もある。さらに、地表から地下に縦方向に建設される

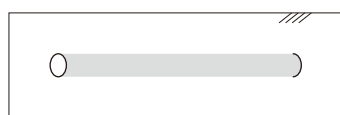
立坑のような地下構造物もある。

ここでは、地下構造物の震動特性や過去の地震被害に基づき、地下構造物の耐震性について考えてみよう。

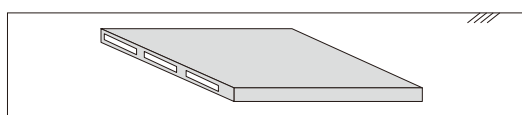
2 地上構造物とは異なる地下構造物の震動メカニズム

地下構造物の耐震性を考えるとき重要な点は、地下構造物は地上構造物と異なったメカニズムで震動するという点である。地上構造物が震動するのは、基礎から地震動が伝えられる結果、構造物に慣性力が作用するためである。構造物が持つ固有周期と地震動に卓越して含まれる周期（卓越周期）が近ければ、共振によって構造物の震動は大きくなり、地上構造物は地盤の震動を超えて大きく震動できる。構造物の減衰が大きければ、構造物の震動は小さくなる。

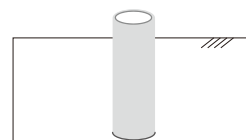
これに対して、地下構造物は地盤の震動を超えて大きく震動しない。この理由は2つある。1番



(a) 地表面に沿って建設される線状の地下構造物



(b) 地表面に沿って幅広く建設される地下構造物



(c) 縦方向に建設される地下構造物

図1 形状、サイズに基づく地下構造物の分類

目は、内空断面を含めた地下構造物の全体の見かけの単位体積重量は周辺地盤の単位体積重量よりも小さい。内空断面をできるだけ有効に活用したいが、静水圧によって浮上がるのはまずいから、見かけの単位体積重量を1.1程度にする場合が多い。地下構造物の見かけの単位体積重量が周辺地盤より小さいということは、地下構造物に作用する慣性力が相対的に小さいということである。言い換えると、地盤中で地下構造物を震動させようとする力が小さいことを意味する。

たとえば、机の上に地盤に見立てて大きな豆腐の層を作り、この中に鉄の棒と発泡スチロールの棒を差し込んで、豆腐の層を水平方向に揺すったとする。共振すると、鉄の棒は豆腐の中で豆腐を押し回して豆腐よりも大きく振動しようとするが、発泡スチロールの棒は豆腐の振動とともに振動する。

2番目は、地下構造物は外周を周辺地盤によって取り巻かれているため、構造物が震動した際に構造物から周辺地盤に逃げ出すエネルギー、すなわち、逸散減衰が非常に大きいという点である。たとえば、机の上にビールビン置き、ビンの口を横に引張って離してやるとビンはロッキング震動する。しかし、ビンの口近くまで土に埋めてビンの口を横に引張ってから離してやっても、ビンは土中で震動しない。ビンから周りの地盤に震動エネルギーがすぐ逃げってしまうためである。逸散減衰を等価減衰定数として評価すると臨界減衰を上回る大きな値となる。逸散減衰が大きいということは、地下構造物が周辺地盤に対して相対的に震動したとしても、すぐ小さくなることを示している。

このように、地下構造物は、もともと地盤中で共振しにくい上に、一度起った震動もすぐに収まってしまふ。このため、地下構造物は、地震時に周辺地盤に変位や変形が生じると、それに従い、周辺地盤に引きずられて震動する。

したがって、地下構造物では、地震時に周辺地盤に生じる変位や変形によって地

下構造物に生じる変位や変形に耐えるだけの耐力と同時に変形性能を持っていれば、地震に耐えられることになる。ただし、これには周辺地盤が地震時に安定していることが前提となる。周辺地盤に液状化が生じれば、浮上がる可能性が出てくるし、液状化に伴う流動化や断層変位が周辺地盤に生じれば、地下構造物には目開きや引張り破断、局部座屈等の被害が生じる。

3 地下構造物の耐震設計

地上構造物では、慣性力が主たる外力であるため、慣性力の作用と塑性化を許容する部材の塑性変形を見込み、地震時保有耐力法等に基づいて耐震設計されるが、地下構造物は地上構造物とは異なるユニークな震動特性を持っていることから、この特徴を取り入れた応答変位法と呼ばれる耐震設計法が用いられる。応答変位法では、慣性力も考慮するが、これ以上に重要な役割を果たすが、地震時に地盤に生じる変位、変形である。

応答変位法では地震時に地下構造物の周辺地盤に生じる変形を正しく想定することが重要である。地震時に地盤に生じる変位は、基盤までの深さ、地層構成、地盤剛性の変化等によって複雑に変化する。このため、図2に示すように、応答変位法による耐震設計においては、地表面に沿う長

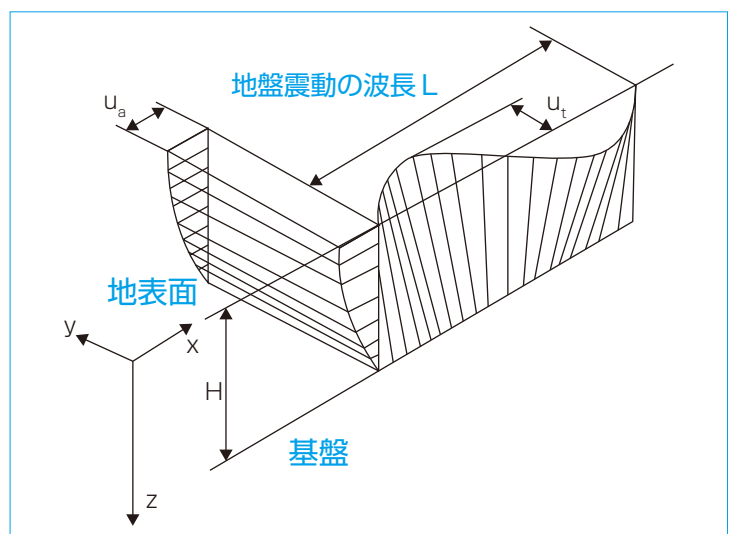


図2 地震時の地盤変形

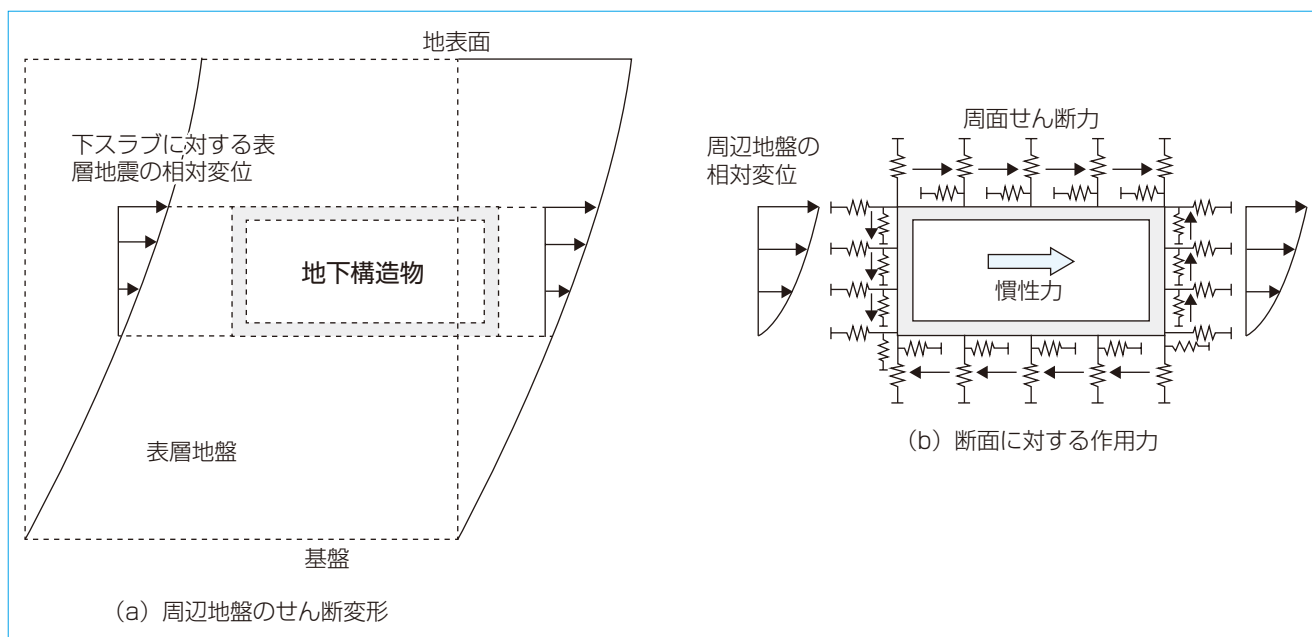


図3 横断面方向の応答変位法

手方向の座標、これと直交方向の座標、地表からの深さに応じて、地下構造物の主軸方向の地盤変位とこれに直角方向の地盤変位を、以下のように仮定する場合が多い。

$$u_a(x,y,z)=u_t(x,y,z)=\frac{2}{\pi}S_vT_s\cos\left(\frac{\pi z}{2H}\right)\sin\left(\frac{2\pi x}{L}\right) \quad (1)$$

ここで、 H は表層地盤の厚さ、 L は地盤震動の波長、 S_v は表層地盤の速度応答スペクトル、 T_s は表層地盤の固有周期である。

式(1)において、地盤震動の波長 L はいろいろな原因によって表層地盤に生じる地震時変位を工学的な判断に基づいて簡単に表現したものであり、表面波など特定の地震波の伝播によって生じる地盤変位を与えたものではない。また、地下構造物に生じる軸力、曲げモーメント、せん断力は、式(1)の x 方向と構造物の軸方向がある角度をなす場合に最大となることがあり、これらを考慮しなければならない。

1 断面方向に対する応答変位法

図1に示した地下構造物において、小口径の管路では断面方向の変形は問題になる例が少ないが、

断面の大きい地下構造物、地表面に沿って幅広く建設される地下構造物、縦方向に建設される地下構造物においては、主軸方向に直角方向(断面方向)に対する耐震設計が重要である。

主軸に沿って変化する地盤変位は式(1)において $x=L/4$ の箇所でも最大となるため、この時の深さ方向の地盤変位の分布を図3に示すようにモデル化し、地震時に周辺地盤が変形した場合に構造物に生じる変位、変形、断面力を求める。構造物の側面には構造物の底面に対する側面高さ位置での地盤変位に比例する地震時土圧が、また、上下面や側面には周面せん断力が作用する。さらに、構造体には慣性力も作用する。

作用させる地震動の速度応答スペクトル S_v は構造物の用途・種別によって異なるが、地震時に構造物に塑性変形を許容できる場合にはこれを考慮し、また、弾性設計とする場合にはこれを考慮せず、耐震計算をすることになる。

2 長手方向に対する応答変位法

図1に示した線状の地下構造物や地表に沿って幅広く建設される地下構造物のうち、長手方向の耐震性が問題になる場合(長手方向に長い場合)には、式(1)による主軸方向とこれに直角方向の地盤

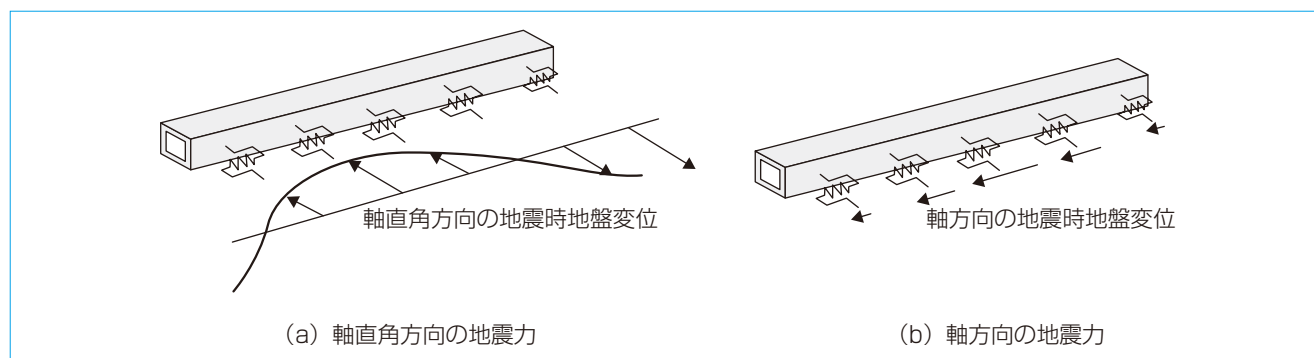


図4 長手方向の応答変位法

変位 u_a 、 u_i を図4に示すように構造物に作用させて耐震解析する。

小口径の管路では軸力が卓越するが、構造物の断面が大きくなるにつれて曲げモーメントも重要になってくる。軸力や曲げモーメントが大きい箇所には、可撓性継手を配置することにより、これらを低下させることができる。可撓性継手を設ける場合には、ここに生じる軸力や曲げによって生じる相対変位を十分吸収できる性能を持った継手を設けることが重要である。

4 形状、サイズで異なる地下構造物の被害

周辺地盤が液状化し、地下構造物が浮上った例は、上下水道管路やそのマンホール、防火水槽、石油ガソリタンク等、多数生じている。管路の埋め戻しに使用した砂が液状化し、管路等が浮き上がった例も多く、埋め戻し方法の改善が求められる。

これに対して、周辺地盤が安定している場合には、地下構造物に生じた地震被害は現在までの所、決して多くはない。このことは、周辺地盤が安定している限りは地下構造物の耐震性は地上構造物に比較して高いことを示しているとみることができる。ただし、近年の我が国では、地下構造物が集中する軟弱地盤上の大都市圏が本格的な強震動に見舞われた例は1995年兵庫県南部地震程度であり、依然として、地下構造物の地震被害経験が浅いことに注意しておく必要がある。さらに、地下利用が促進されるにつれて、複雑な線形や特

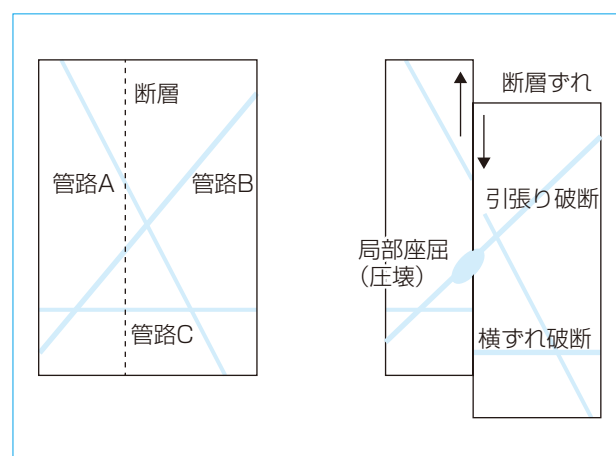


図5 断層線との角度によって異なる地下構造物の破断

殊な構造を用いたり、地上構造物も含めた異種構造から構成された構造系が用いられるようになってきており、地下構造物は耐震性が高いと安易に考えて設計することは危険である。ここではいくつか代表的な被害例を示す。

図5は断層変位が管路を横断した際に管路に生じる被害を示したものである。横ずれ断層が生じた場合には、管路が引き伸ばされる方向に埋設された管路(管路A)は引張り破断したり、継手がある場合には引き抜けが生じる。写真1がこの例である。反対に、圧縮を受ける方向に埋設された管路(管路B)や横断方向に純せん断を受ける方向に埋設された管路(管路C)では、それぞれ、写真2に示すような局部座屈や圧壊、写真3に示すような横ずれが生じる。このような被害形態は、断層変位によるだけでなく、表層地盤の厚さの変化等により地盤の地震時変位が変化する箇所においても生じる。



写真1 引張り破断の例 (1994年米国ノースリッジ地震)



写真2 圧縮により局部座屈した管路 (1999年トルコ・コジャエリ地震)



写真3 ヒューム管が横ずれ破断した例 (1999年トルコ・コジャエリ地震)



写真4 中柱のせん断破壊による地下鉄駅舎の破壊 (1995年兵庫県南部地震)

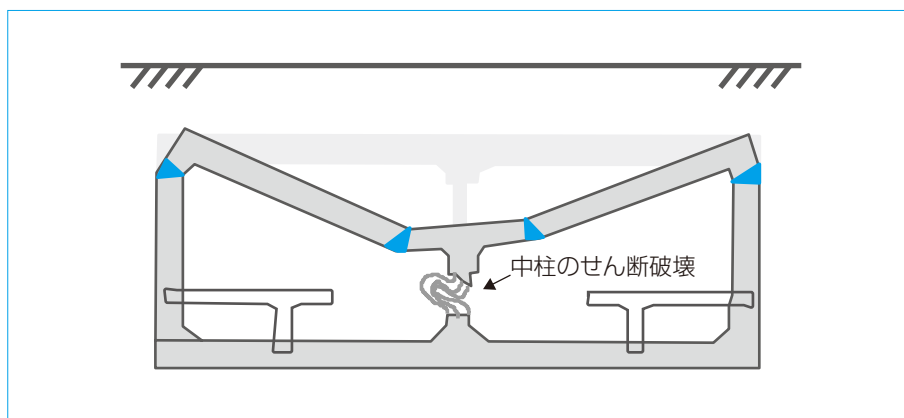


図6 地盤のせん断変形によって中柱がせん断破壊し、天井が沈下した地下鉄駅舎 (1995年兵庫県南部地震)

一方、断面が大きい地下構造物の被害としては、写真4がある。この場合には、図3に示したメカニズムにより地下鉄駅舎に変形が生じた際、中柱のせん断補強鉄筋が不十分であったためにせん断破壊し、図6に示すように天井スラブが垂れ下がったものである。中柱は古い時代の設計基準で設計されており、軸方向鉄筋比が高い割に、せん断補強筋はほとんど配置されていなかった。

この構造体で、もし中柱に十分なせん断補強筋が配置されていれば、中柱のせん断破壊は生じないが、周辺地盤の地震時変形によって構造体に生じる曲げ変形を上回るだけの曲げ変形性能をスラブ、側壁、中柱やこれらの接合部が有していることが重要である。もちろん、構造体の曲げ抵抗能力の強化を図って、必要とされる曲げ変形性能を下げることも可能である。



写真5 軸方向に受けた圧縮力によるジョイント部でのコンクリートの圧壊(1995年兵庫県南部地震)

写真5は共同溝の目地部のコンクリートの損傷である。図4(b)に示した軸方向の地震時地盤変位を受けた際に共同溝に作用した軸方向圧縮力によって生じた損傷と考えられる。共同溝では、1セグメントの長さが短いため、図4(a)に示した軸直角方向の地震時地盤変位によって生じる曲げモーメントは小さいが、軸方向にはある程度の圧縮力が生じることに留意しておく必要がある。



写真6 ジョイント間に生じた相対変位によって生じた地下街の損傷(1995年兵庫県南部地震)

また、写真6は地下街の目地部に生じた引き抜けと段差である。複雑な地下構造となっており、目地部の前後で構造物が異なった震動をしたことによる損傷と考えられる。

図1では地下構造物を形状、サイズによって分類したが、異種の地下構造間では地震時に生じる変位や変形が異なるため、接合部で被害を生じやすい。また、地下構造物が地上構造物と接する箇所でも両者の震動の違いから損傷を受けやすい。こうした箇所では、可撓性継手を設け、構造系間の相対応答変位を吸収できる構造とすることが重要である。

5 まとめ

液状化による浮上がり等、単純な管路等の被害を除くと、地下構造物の地震被害は地上構造物ほどには生じていないのは事実である。しかし、もともと地下構造物が被害を受ける可能性の高かった地震が1995年兵庫県南部地震以外には起っていないのも事実であり、地上構造物に比較して地下構造物は地震に対して安全であるといえる良いか否かはまだ判断できる段階にはない。地下構造物では、地震応答の観測記録がほとんど得られておらず、観測網の整備を図り、実証データの蓄積を図っていくことが重要である。

【参考文献】

川島一彦『地下構造物の耐震設計』鹿島出版会、1994年