

V-42 BART耐震設計方法を我国の沈埋トンネルに適用した場合の解析例

首都高速道路公団 正員 ○村上良丸

(株)福山コンサルタント 正員 福山俊郎

” 正員 佐藤 進

はじめに

沈埋トンネルの地震時応答について、最近、種々の研究調査が行なわれてきたが、米国サンフランシスコ湾のBART(San Francisco Trans Bay Tube)の予備設計に応じて研究された、Earthquake Design Criteria for Subways, By Thomas R. Kuesel: 地下道の耐震設計規準:(以下BART規準と略称する)が、1969年6月、ASCE誌に発表された。

著者らは、これを日本の沈埋トンネルに応用することを試み、サンフランシスコ湾と東京湾との地盤の地震に対する相異点を考慮に入れた上、基本式を誘導し、鉄筋コンクリート沈埋面の仮定断面について、試算を行なった。

I BART規準の紹介

1) 概説 地下構造物に対する地震活動は、断層運動と振動の2つに大別されるが、断層運動は、大きな土の移動であるので、これを拘束するような構造物を設計することは不可能である。その対策としては、充分な地質や地震調査によって、こうした地帯を確認して避けるが、又は、もし、そのような変位をうけても、その被害を局部的に限定して、容易に補修できる手段を講じるかである。

ここでは、土は地震中にも、その完全性を失わないと仮定し、振動問題の分野に限定して論を進める。

一つの地震は数十cmから数mの範囲のせん断波集団からなり、長い波長のものは振幅が大きく、小さな振幅のものは波長の曲率が大きく加速度も大きくなっている。

次にBARTの調査では、非常に軟弱な粘性土でも、沈埋トンネルの剛性は土の自由変形を15%へすにとどまっていることから、地中構造物はいくら強化されても、それを囲み、かつ、これを支持する地盤の移動につれて動くより外はないとしている。

そこで、土の横せん断波についての既往地震の測定記録から、予期される振幅と波長のスペクトルを作って、地中構造物の地震時応答を求めている。以下、その大要の説明を試みよう。図-1は地盤の波長-変位スペクトルである。

2) 屈曲変形 構造物を斜めに入ってくる地震波は、曲げ変形をおこす横方向分力と、圧縮、または、伸びをおこす縦方向分力に2分される。横方向としては、水平面と鉛直面との両方が考えられるが、ここでは水平面について考える。その合成最大歪は式(1)のようになる。

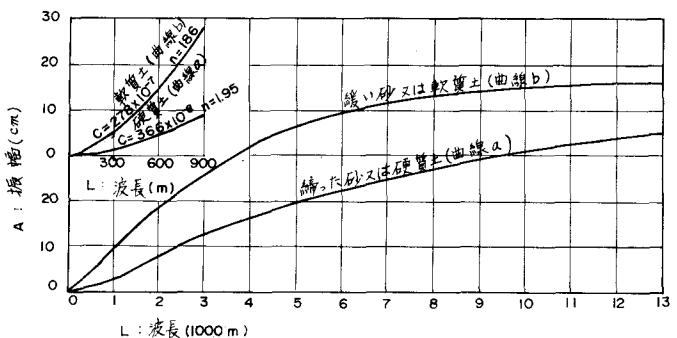


図-1 地盤の波長-変位スペクトル

$$\varepsilon = 5.2 A/L \quad \text{----- (1)}$$

ここに、 L = 危険波長で、曲げ平面での構造物の最大幅の6倍にとる (cm)。

A = 図-1 からとった波長 L に対応する振幅 (cm)。

(図-1 は水平振幅を与えるものである。鉛直振幅にはこの値の $\frac{2}{3}$ を使う。)

ε が 0.0001 cm/cm 以下ならば、変形は弾性的であると仮定でき、構造物には何も特別な用意はいらない。 ε が 0.0001 cm/cm を越えれば、その構造物には、横断継手に関節構造を設けて、継手間隔に歪率を乗じて、算出された歪量を吸収するように設計する。

3) セン断変形 (Shearing Distortion) と外側隅角部の回転容量 地中構造物は、中心軸に対して直角面内で、土のセン断変形に順応して隅角部が角変化せねばならない。

まず、土のセン断変形の大きさを次式から求める。

$$Y_s/h = 0.8H/V^2 \text{ ----- (2)}$$

ここに、 Y_s/h = セン断変形角度 (ラジアン)

H = 堆積土の厚さ (m)

V = 堆積土中を通る設計地震波の平均伝播速度 (m/sec)

図-2 は上式による図表である。

ついで、隅角継手の弾性回転容量を次式で算出する。

$$\alpha = (1/1000)(L_f/5t_f + L_w/5t_w) \text{ ----- (3)}$$

ここに、 α = 継手の弾性回転容量 (ラジアン)

L_f = 曲げ拘束点間のスラブの有効長 (m)

L_w = 曲げ拘束点間の壁の有効幅 (m)

t_f = スラブ厚 (m)

t_w = 壁厚 (m)

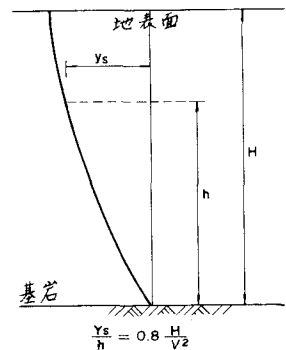
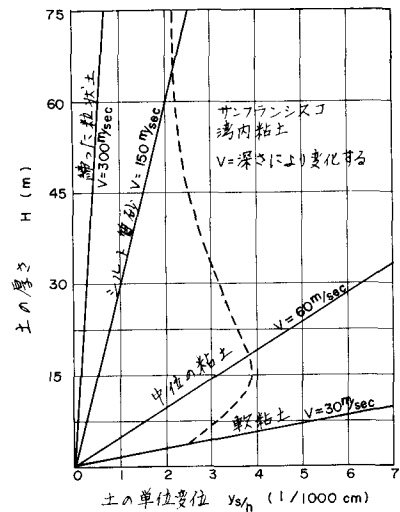
この弾性回転容量が強制されるセン断変形 Y_s/h 以上ならば、セン断弾性変形条件は満足される。加わるセン断変形が、最も剛な隅角継手の弾性回転容量以上のときは、その継手の剛性の低い部材に塑性変形が加わることになる。合計端回転 (弾性+塑性) の許容限度は、つぎの式によってよい。

$$\theta = 0.001(1.4 + L/5t) \text{ ----- (4)}$$

4) その他

その他、地震土圧の考え方、剛な隔壁の影響、土の不連続性の影響、内部部材、付属構造物、継手の詳細設計やその他の細部考慮事項に言及している。

これらにより、地下構造物の設計者は、カリフォルニアで起こりうる最大の地震強度に等しい地震時の地盤振動の影響を速やかに求めることができる。詳しくは文献 No.1 によられてい。



H = 基岩上の土の厚さ
 V = 土中のセン断波の伝播速度

図-2 地盤のセン断変形

II BART規準によるRC矩形断面の沈埋トンネルの検討

一例として、図-3に示すRC矩形断面沈埋トンネルについて、BARTの規準に従って検討する。

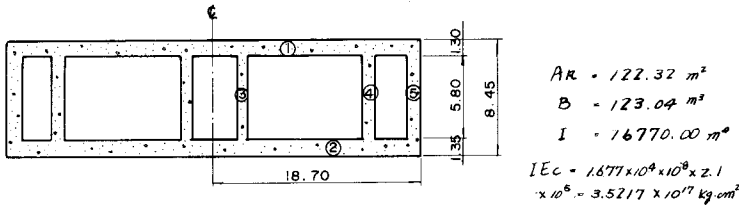


図-3. RC 矩形断面沈埋トンネルの設計諸元

1) 合成最大のひずみ

合成最大ひずみの計算は式(1)による。

$$L \leq 6 \times (\text{曲げ平面での構造物の最大幅}) = 6 \times 37.4 \\ = 224.4 \text{ m}$$

A; 図-1において

$$\text{軟質土のとき, } A = 0.65 \text{ cm, } \varepsilon = 1.51 \times 10^{-4} > 1/10000$$

$$\text{硬質土のとき, } A = 0.10 \text{ cm, } \varepsilon = 0.24 \times 10^{-4} < 1/10000$$

規定によれば、弾性範囲の許容ひずみ量は $1/10000$ であるので、軟質土の場合には、トンネルエレメント間にこの変化を吸収するだけのジョイントを準備しなければならない。ただし、東京湾の地盤では、この例よりもいくらか良質のようなので、この考え方からすれば、図-3の断面で許容されるのではないかと判断される。

2) セン断変形と外側隅角部の回転容量

せん断変形は式(2)によって計算される。

ここで、 $H = 50 \text{ m}$, $V = 100 \text{ m/sec}$ とすれば、 $Y_s/h = 4.0 \times 10^{-4}$ となる。

ついで、沈埋トンネルの弾性許容回転角度を式(3)によって計算する。

いま、 $t_w = 1.0 \text{ m}$, $t_f = 1.325 \text{ m}$, $L_w = 5.80 \text{ m}$, および $L_f = 35.40 \text{ m}$ とすれば、

$$\alpha = (1/1000)(35.4/1.0 \times 5 + 5.80/1.325 \times 5) \\ = 79.6 \times 10^{-4}$$

となり、この値は、 Y_s/h の値より大きいので、隅角部の回転変形条件を満足するといえる。

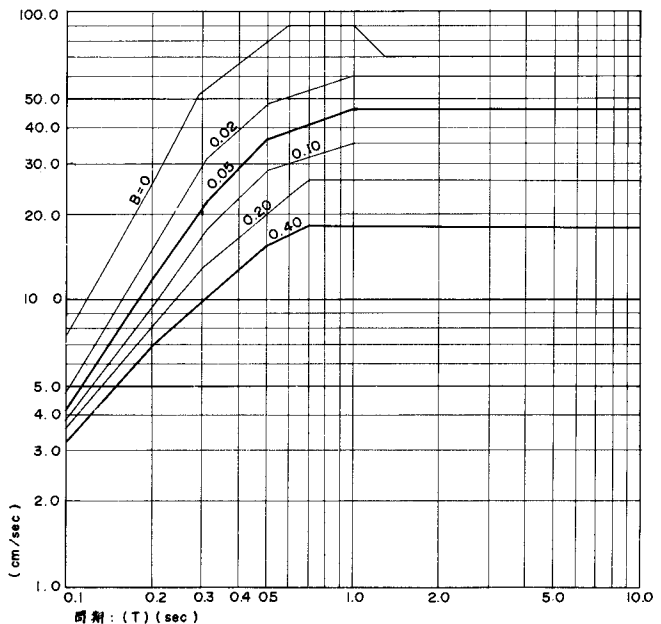


図-4 土研作成応答変位スペクトル

Ⅲ 東京湾土質についての変位-波長スペクトルの作成

表-1 伝播速度と減衰定数 β の値 振動便覧(土木学会:文献No.2)には、地上構造物に対しての応答

Case	土質条件	
1	$V=60\text{m/sec}$	$\beta=0.05$
2	$V=60\text{m/sec}$	$\beta=0.40$
3	$V=180\text{m/sec}$	$\beta=0.05$
4	$V=180\text{m/sec}$	$\beta=0.40$
5	$V=100\text{m/sec}$	$\beta=0.05$
6	$V=100\text{m/sec}$	$\beta=0.40$

表-2 伝播速度と弾性ひずみ量

Case	速度 V	β	Acm	ϵ
1	60	0.05	27.4	63.3×10^{-4}
2	60	0.40	10.7	$24.7 \times "$
3	180	0.05	9.1	$21.0 \times "$
4	180	0.40	3.5	$8.1 \times "$
5	100	0.05	16.4	$37.9 \times "$
6	100	0.40	6.4	$14.8 \times "$

速度スペクトル曲線が、図-4に示すように、減衰定数をパラメータとして求められている。この関係をもとにして、東京湾の地質での測定結果を参考にし、表-1に示すように地震波の伝播速度を仮定して、BART規準と比較するため、変位-波長のスペクトルを求めた。ついで、このスペクトルを用いて東京湾におけるRC沈埋トンネルについて断面検討を行なった。

1) 応答変位スペクトル 地震波の伝播速度、波長と周期の関係、 $L/V=T$ を利用して、この周期に対する応答速度スペクトル(図-4)より、応答変位スペクトルを、式的により計算する。

$$S_a(T \cdot \beta) = (T/2\pi) \cdot S_v(T \cdot \beta) \quad \text{----- (5)}$$

$S_a(T \cdot \beta)$; 減衰定数 β をパラメータとする周期 T に関する変位スペクトル

$S_v(T \cdot \beta)$; 減衰定数 β をパラメータとする周期 T に関する速度スペクトル

減衰定数、0.05、および、0.4について、上の計算をして、BARTの方法と同様な、変位と波長の関係を示す図をえがくと、図-5のようになる。この表に東京湾土質における振動調査で得られた速度100m/secについての値をcase 5、および、6として記入しておく。

2) 計算例 第Ⅱ章で考えた断面をそのまま使うことにすると、波長 $L=224.4\text{m}$ に対して、次のような変位、および、変形が表-2に示すように計算される。

計算の結果、考慮された全部の場合について、弾性ひずみが許容ひずみ量を超えている。このことから考えて、地上構造物を対象として作成されたスペクトルを、沈埋トンネルのような地中に埋め

られた構造物に適用するのは少々無理のようで、このような構造物についての応答スペクトルを、改めて作成することが必要と思われる。

むすび

以上が、東京湾の地質に対する沈埋トンネルの耐震設計方法の一例である。BARTでは実用に供されているが、このような応答変位-波長スペクトルを、我国の地震、および、土質に適応するように作成することは、沈埋トンネルの耐震設計を進める上に、是非やっておかねばならぬ問題と思う。

参考文献

No.1 地下道の耐震設計規準: Earthquake Design Criteria for Subways By Thomas R. Kuesel, June 1969, Journal of the Structural Division Proceeding of ASCE.

No.2 振動便覧: 土木学会編

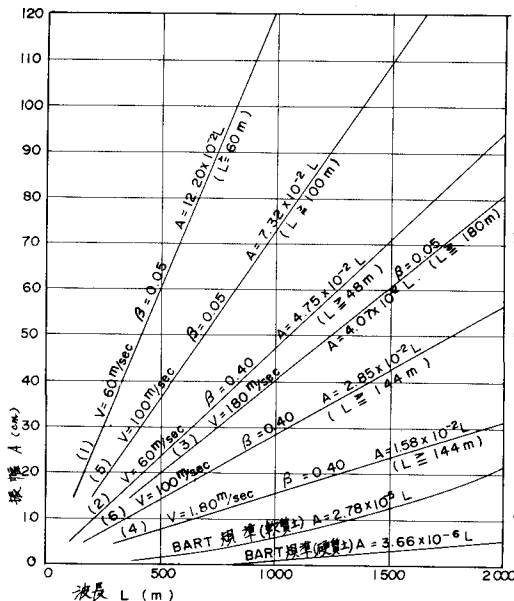


図-5 波長と振幅の関係 ($\ddot{x}_{\max}=200\text{gal}$)