

セグメントのレベル2地震時耐震設計について

VERIFICATION OF EARTHQUAKE RESISTANCE AT LEVEL2 FOR SEGMENTAL LINING

高島 久典¹⁾ 平野 正雄²⁾

Hisanori TAKASHIMA, Masao HIRANO

At present, there aren't any clear regulations about verifying the earthquake resistance of the shield segment. Especially in case of earthquake at level2, we're supposed to examine the cross section plan with some criterions, but we have'nt so far. That's why we tried to examine in this report the earthquake resistance of tenoned segment and the ductile cast iron one, which have been adopted as the plan, by using the allowable stress design method at level1 earthquake and limit state one at level2. As a result, we could find out some problems about these methods.

In this report, we'll make these problems clear and bring forward the coming study in the shield segment, especially girder type one.

Keywords: shield tunnel, design of tunnel lining, earthquake motion at level2, limit state design method

1. はじめに

シールドセグメントの耐震検討については、現時点では明確な規定がなく、特にレベル2地震時の横断方向断面力については「下水道施設の耐震対策指針と解説-1997年度版」(以下、下水耐震指針と呼ぶ)で検討することとされているが、これまでほとんどなされていない。そこで、本件では設計に採用したほぞ付セグメント(コンクリート系)とダクタイルセグメント(鉄鋼製)についてレベル1地震動を許容応力度法、レベル2地震動を限界状態設計法で耐震設計を行い、この結果、現在の許容応力度設計法の限界状態設計法に対する問題点に関する知見を得た。

本報告はシールドセグメントのうち、特に鉄鋼製主桁型セグメントについて終局限界耐力算定に関する現行設計法との整合、あるいは現行設計法の改訂に関する今後の研究を提起するものである。

2. 設計の概要

(1)概要

愛知県下の国道302号共同溝事業においてセグメント外径5.6m、延長1975.1mの泥水シールドトンネルの設計を行った。設計区間は主要幹線道路であり、将来高架あるいは地下構造の高速自動車道が並走する計画がある。

(2)地形

1) 建設省愛知国道工事事務所 設計課

2) 正会員 中日本建設コンサルタント㈱ 建設技術本部

地形的には、本路線は名古屋市東部丘陵上にあり、丘陵は区間内のほぼ中央の天白川によって南北に分断されている。また、この川に流入する小河川が板状に発達したため、起状に富んだ地形を呈している。

地質状況としては東部丘陵は主に新第3紀鮮新世の矢田川累層により構成され、砂礫層、砂層、固結シルトの互層を主体として亜炭層を部分的に挟んでいる。シールド通過部については、河川で2分される設計区間前半1km区間は砂層、固結シルト層ともN値が50以上を示す堅固な地盤である。しかし後半は固結シルトがN値20~40、砂層がN値30前後を示すが、15程度を示す部分も見受けられる。なお、検討箇所付近の簡略化した地質断面図を図-1に示す。

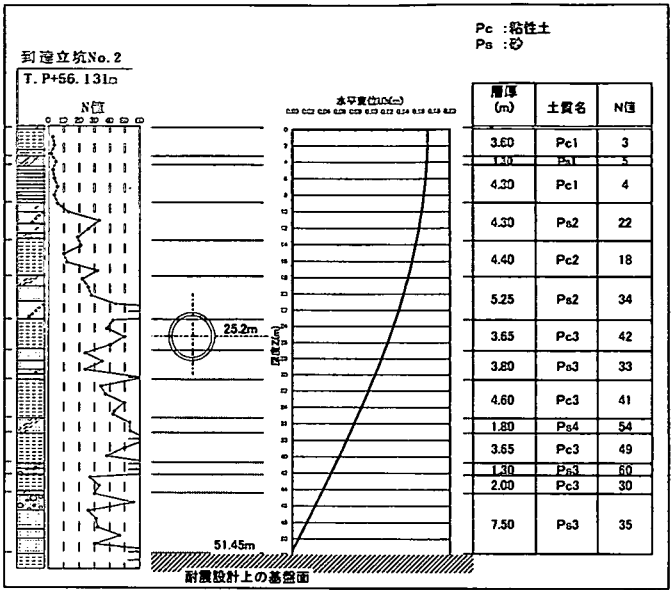


図-1 地質断面図

3. セグメントの耐震計算

(1) はりばねモデルの概要

セグメントの設計計算法は、ほぞ付セグメントの設計においては標準的に用いられる2リングはりばねモデルを用いた。概要を図-2に示す。はりばねモデルではセグメントピースをはり部材、セグメント継手を回転ばねで評価する。また、セグメントリングを千鳥組みした場合にリング継手をせん断ばねで評価する。地盤反力の評価は、セグメントリングの半径方向変位に対応してwinklerの仮定に従うばねでモデル化している。

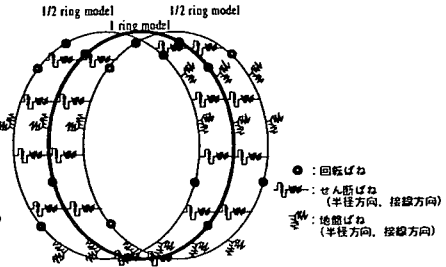


図-2 はりばねモデル

(2) トンネルの概要と解析条件

検討対象としたシールドトンネルの概要を図-3に示す。また構造解析諸条件、常時荷重条件を表-1、表-2に示す。なお、ほぞ付セグメント（コンクリート系）の引張鉄筋比は「シールド工事用標準セグメント」（以下、標準セグメントと呼ぶ）に示される最大鉄筋比程度（1.11%）とした。耐震計算は応答変位法により行うこととし、地震時の増加荷重として地震時地盤応答変位を算出し、これから①地盤応答変位による荷重、②地震時周面せん断力、③躯体慣性力の計算を行った。

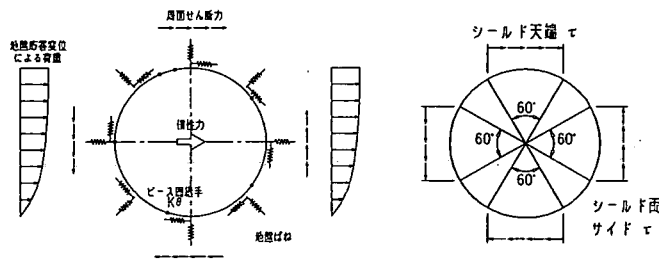


図-3 シールドトンネルの概要

$$\text{地盤ばね: } K = \frac{3G_s}{D}$$

$$D: \text{シールド外径} \quad G_s: \text{周辺地盤のせん断変形係数}$$

$$\text{応答変位による荷重: } P$$

$$P = \delta \times K$$

$$\delta: \text{シールド下端の変位に対する相対変位}$$

$$\text{周面せん断力: } \tau$$

$$\tau = \frac{G_s}{\pi H} \times S_v \times T_s \times \sin \frac{\pi}{2H} Z$$

$$H: \text{表層地盤の厚さ} \quad S_v: \text{応答速度} \quad T_s: \text{固有周期} \quad Z: \text{深さ}$$

$$\text{慣性力: } S = k \times g$$

$$k: \text{水平刚度} \quad g: \text{セグメント自重}$$

$$\text{接線方向の地盤ばね} \quad K_c = \frac{1}{3} K$$

断面力は上記常時の断面力と地震時増分断面力を重ね合わせ算出する。部材照査はレベル1地震動に対して長期許容応力度の1.5倍、レベル2地震動に対しては終局限界耐力以内として行った。地震時地盤応答変位は共同溝指針に準拠して算出した。ただし、レベル2の設計応答速度は「下水耐震指針」によった。これらの概要を図-3、図-4に示す。なお、解析にはシールドトンネル解析プログラム moleman を用いた。

表-1 構造解析条件

セグメントの種類	コクリート系平板形	鉄鋼製3主桁型
セグメントの分割数	6	
リングの組み方	2リング 千鳥組	
セグメント外径(mm)	5600	
セグメント幅(mm)	1200	
セグメント高さ(mm)	250	
主断面の面積(m ²)	0.300	0.02065
主断面の断面二次モーメント(km ⁴)	0.0015625	0.00012329
セグメント継手の回転ばね(kN・m/rad)	27000	正曲 4600 負曲 1800
リング継手のせん断ばね(kN/m)	34500(半径方向) (接線方向は0)	136000(半径方向) 1010000(接線方向)
リング当りの節点数	180	180

4. 設計結果及び考察

本件では、ほぞ付セグメント（コンクリート系）とダクトイルセグメント（鉄鋼製）について、同一地盤条件で比較検討を行った。計算結果として表-3に断面力を、表-4に応力度及び照査結果を常時、レベル1地震動、レベル2地震動別に示す。セグメントの断面形状はコンクリート系が平板形、鉄鋼製が3主桁タイプである。

表-2 地盤および荷重条件

土 質	第三紀層固結シルト砂互層	
土と水の考え方	土水分離	
土被り(m)	19.4	
ト林天端からの水位(m)	3.3	
N値	20~40	
土の単位重量(kN/m ³)	砂 19	固結シルト 18.5
側圧係数λ	0.50	
地盤ばね定数常時(N/cm ²)	20 (接線方向は1/3)	
地盤ばね定数地震時(N/cm ²)	図-3参照	

照査結果については、レベル1地震動はコンクリート系、鉄鋼製とも常時の延長上の傾向にあるがレベル2地震動では曲げ耐力が照査結果コンクリート系 1.055 に対し、鉄鋼製 2.048 を示し、鉄鋼製では大きく耐力を上回る結果となった。常時の曲げについては、応力度が照査結果コンクリート系 0.974、鉄鋼製 0.821 で、ほぼ同水準である。常時の同水準の結果に対して、レベル2地震動では鉄鋼製の負曲げ終局限界耐力が落ちている。この原因としては従来の許容応力度法（以下従来設計法という）と限界状態設計法でセグメントの

表-3 断面力

		コンクリート系			鉄 鋼 製		
		常 時	レベル1	レベル2	常 時	レベル1	レベル2
正曲げ	M(kN・m/R)	140.1	150.0	238.7	125.9	136.0	166.3
	N(kN・m/R)	862.2	871.5	570.9	981.0	979.7	971.5
負曲げ	M(kN・m/R)	122.9	159.6	253.4	80.0	116.0	186.4
	N(kN/R)	1307.3	1381.3	1639.3	1271.0	1371.1	1761.8
せん断力	S(kN/R)	120.8	163.4	291.3	201.3	249.5	424.9

表-4 応力度・照査結果 () 内は照査値

		コンクリート系			鉄 鋼 製		
		常 時	レベル1	レベル2	常 時	レベル1	レベル2
正曲げ	σ_c (N/mm ²)	13.82 (0.864)	14.8 (0.616)	(1.055)	σ_c (N/mm ²)	-115.5 (0.525)	-120.8 (0.366)
	σ_t (N/mm ²)	155.81 (0.974)	175.1 (0.584)		σ_t (N/mm ²)	139.8 (0.736)	154.9 (0.544)
負曲げ	σ_c (N/mm ²)	12.38 (0.774)	15.9 (0.663)	(0.824)	σ_c (N/mm ²)	-18.4 (0.084)	-3.8 (0.012)
	σ_t (N/mm ²)	60.95 (0.381)	119.0 (0.397)		σ_t (N/mm ²)	-180.6 (0.821)	-239.0 (0.724)
せん断力	τ (N/mm ²)	0.50 (0.684)	0.71 (0.648)	(0.687)	τ (N/mm ²)	9.7 (0.050)	12.1 (0.062)

常時・レベル1照査値=実応力度/許容応力度（許容応力度法）
レベル2照査値=設計断面力/設計耐力（限界状態設計法）

主桁T断面（鉄鋼製3主桁型はT形断面として扱う）自由突出縁の局部座屈の設計法に差異があることがあげられる。

今回の終局限界耐力算出は「鋼構造物設計指針」（土木学会、以下鋼構造指針という）によったが、「道路橋示方書」鋼橋編第3章に示されている従来設計法は、断面縁端の材料降伏と部材の全体座屈、および断面の局部座屈はそれぞれ別の限界状態としており、これらの限界状態に対し独立した照査となっている。この結果として、圧縮応力を受ける自由突出板の座屈理論値と実験値から求められる幅厚比パラメータで直接、局部座屈の影響を受けない幅厚比を規定している。これに対し、「鋼構造指針」では局部座屈の効果はそれによる有効断面積の消失という形で考慮され、断面の局部座屈や縁端の降伏があるとしてもそれらの連成としての最終的な部材耐力を評価する方式となっている。「鋼構造指針」に示される限界状態設計法では、局部座屈に対し、このような有効断面法を採ったことがコンクリート系・平板形と鉄鋼製主桁形の終局限界耐力に差を生じさせることとなったと考えられる。

表－4では、鉄鋼製のレベル2地震動の正曲げはコンクリート系および鉄鋼製の常時とほぼ同水準となっている。正曲げはT形主桁断面フランジ部が圧縮領域となり、局部座屈の影響を殆ど受けていない。これに対し負曲げでは自由突出縁となるウェブ部が圧縮領域となることから、局部座屈による耐力低下が著しい結果となった。

表－5は表－4と構造解析条件、荷重条件は異なるが本設計区間の別位置で検討したスチールセグメント（鉄鋼製、4主桁型でセグメント外径・主桁高さはダクタイル3主桁型と同じ）の結果であって、表－4と同一傾向を示している。

なお、今回は「鋼構造指針」に従い、座屈係数に0.425を用いたが「標準セグメント」では縦リブによる補剛効果を考慮し座屈係数0.698を用いている。この場合の表－4、表－5のダクタイル、スチールセグメントのレベル2地震動負曲げ照査値は、それぞれ1.476、0.839となる。

5. まとめ

本件では、コンクリート系と鉄鋼製セグメントの双方を同一地盤で比較検討し次の知見が得られた。

- (1) 現在の許容応力度設計法において鉄鋼製セグメントでは、その形状によっては同一の地震の影響に対し、限界状態設計法で算定されるレベル2地震動での終局限界耐力に大きな差を生じる場合がある。
- (2) 順当な結果ではあるが、地震に対しては正負、負曲げに異方性のないコンクリート系平板形や鉄鋼製内フランジ付主桁形、コルゲート形が適している。

なお、現在のセグメント設計法についてはさらに研究がなされる必要があると思われる。

参考文献

- 先端建設技術センター：先端建設技術・技術審査証明報告書「ほぞ付きセグメント工法」,1997.3
土木学会・日本下水道協会：シールド工事前標準セグメント、1990.4
日本道路協会：道路橋示方書・同解説－鋼橋編、1996.12
土木学会：鋼構造物設計指針－PART A－一般構造物、1997.4

表－5 応力度・照査結果 () 内は照査値

		鉄 鋼 製		
		常 時	レベル1	レベル2
正曲げ	$\sigma_o(N/mm^2)$	-103.9 (0.483)	-76.1 (0.234)	(0.387)
	$\sigma_i(N/mm^2)$	10.0 (0.047)	17.3 (0.053)	
負曲げ	$\sigma_o(N/mm^2)$	-18.4 (0.086)	12.6 (0.039)	(0.999)
	$\sigma_i(N/mm^2)$	-79.4 (0.369)	-126.8 (0.390)	
せん断力	$\tau(N/mm^2)$	2.2 (0.020)	6.2 (0.038)	(0.081)