

Ⅲ-B 86

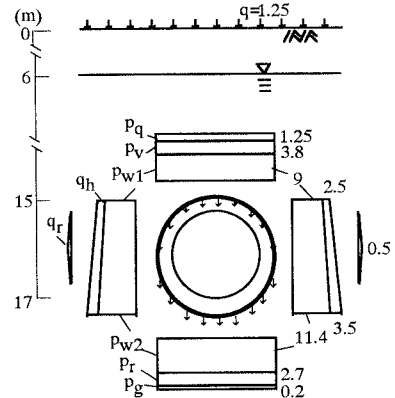
内挿管工法を適用する場合の鋼製シールドセグメントの設計法

積水化学工業 矢野博彦・大阪市立大学 東田 淳

まえがき 兵庫県南部地震では、下水道用シールドトンネルの無筋コンクリート製二次覆工に漏水を伴うX形のクラックが20kmにわたって発生したため、シールドトンネル覆工の耐震化が課題となった。その一つの方法として、完成した鋼製セグメントによる一次覆工内に薄いFRPM管を挿入し、エアーマルタルで両者の隙間を充填する工法(内挿管工法)が開発され、施工実績も増えつつある。著者らは、この内挿管工法を適用したシールドトンネル覆工(F覆工と呼ぶ)の耐震性が通常の無筋コンクリート製二次覆工を施したシールドトンネル覆工(R覆工と呼ぶ)に比べて極めて高いことを、動的遠心模型実験によって確かめた¹⁾。ところで、この工法に使用されるFRPM管は、将来、鋼製セグメントが腐食によって消滅しても外力(土圧と外水圧)に耐える強度を持つように設計される。一方、R覆工の現行設計では無筋コンクリート製二次覆工は外力を分担せず、一次覆工が全ての外力を支えるとして設計がなされる。その結果、現行の内挿管工法では、FRPM管と鋼製セグメントが両者とも本設構造物として設計されており、不経済である。よって、永久構造物としての信頼性に欠ける鋼製セグメントを仮設として設計することを提案したい。本報告では、F覆工で用いられる鋼製セグメントをそれぞれ本設、仮設構造物とした場合の設計例を示し、経済性の指標であるシールドトンネルのサイジングダウンの程度を比べる。

設計条件 地盤は均質な砂質地盤(平均 $N=25$ 、 $c_d=0$ 、 $\phi_d=35^\circ$ 、 $\gamma_t=\gamma_{sat}=1.8\text{tf/m}^3$)で、地下水位はGL.-6mとする。シールドトンネルは二次覆工のインパートの深度をGL.-16m、曲線部の最小半径 R を70mとする。地表面には 1.25tf/m^2 の载荷重を与える。

R覆工の設計 下水道用標準鋼製セグメント²⁾に示された設計法(JSWASの設計法)に基づいて、仕上がり内径 d が1.65mのR覆工の鋼製セグメントに生じる応力を計算した。 $d=1.65\text{m}$ のR覆工に適用される標準鋼製セグメントは外径 D_s が2.35mのM9(内径 $d_s=2.144\text{m}$ 、長さ $L_s=90\text{cm}$ 、主桁高さ $h_s=10\text{cm}$ 、主桁厚さ $t_s=0.9\text{cm}$ 、重量 $W_s=549\text{kgf/m}$ 、材質SM490A、許容応力 $\sigma_a=\pm 1900\text{kgf/cm}^2$)である。図-1に設計荷重を示す。 p_v は $H_0=2D_s$ をゆるみ高さとして $p_v=\gamma' H_0$ によって、また q_h と q_r は $\lambda=0.5$ 、 $k=2\text{kgf/cm}^3$ を用いて計算した。この荷重条件でセグメントに生じる最大応力はクラウンから $\pm 80^\circ$ 離れた位置で -1303kgf/cm^2 (圧縮側)となった。

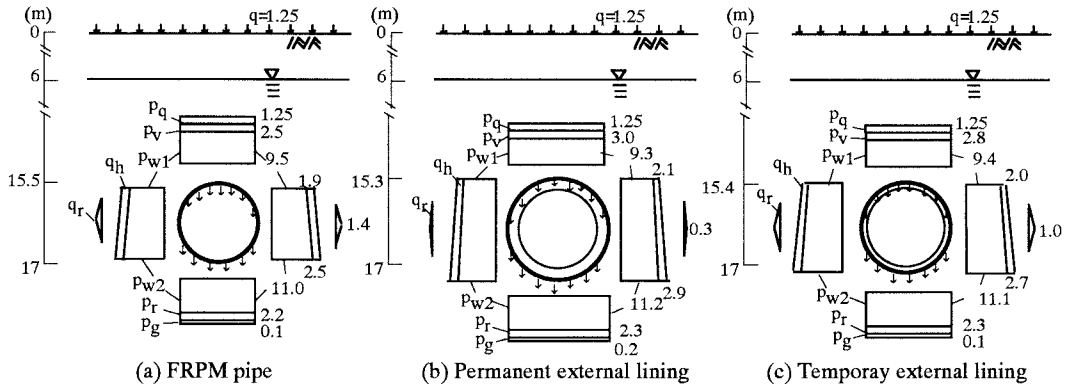
Figure 1. Design loads for the R-lining (tf/m²).

F覆工の設計 まず、FRPM管を設計する。FRPMはコンクリートよりも粗度係数が小さいため、 $d=1.65\text{m}$ のR覆工と等量の下水を流すためのFRPM管の内径は1.5mに縮小できる。内径1.5mのFRPM管の外径 D 、管厚 t 、管長 L はそれぞれ1.536m、1.8cm、4mである。図-2(a)はJSWASの設計法に基づいて求めたFRPM管に働く荷重で、この荷重条件では管の最大縁応力は -174kgf/cm^2 となり、この値は管の $\sigma_d(\pm 730\text{kgf/cm}^2)$ よりもかなり小さい。また、管がバックリングする時の外水圧は 76tf/m^2 で、この値は図-2(a)に示した $p_{w1}=9.5\text{tf/m}^2$ よりも小さく、管は安全である。

つぎに、鋼製セグメントを永久構造物として設計する。今回の設計条件($L=4\text{m}$ 、 $R=70\text{m}$)で $D=1.536\text{m}$ のFRPM管

キーワード: シールドトンネル、鋼製セグメント、内挿管工法、設計、サイジングダウン

連絡先: 大阪市住吉区杉本3-3-138、大阪市立大学工学部土木工学科、東田 淳 (Tel & Fax 06-6605-2725)

Figure 2. Design loads for the F-lining (dimensions are in tf/m²).

を挿入できるセグメントの最小内径は、配管等に必要な5cmのクリアランスを含めて1.696mである。内径がこの最小内径に最も近く、かつ最小の外径を持つ標準セグメントとして、M2($D_s=1.90\text{m}$, $d_s=1.744\text{m}$, $L_s=75\text{cm}$, $h_s=7.5\text{cm}$, $t_s=0.8\text{cm}$, $W_s=380\text{kgf/m}$, 材質SM490A, $\sigma_a=\pm 1900\text{kgf/cm}^2$)を選び、図-2(b)に示す設計荷重を与えて最大応力を計算すると-1200kgf/cm²となり、安全である。

最後に、鋼製セグメントを仮設構造物として設計する。この場合、SM490Aの許容応力は50%増しの $\pm 2850\text{kgf/cm}^2$ にとることができる。セグメントに発生する応力がこの σ_a を超えず、また最小内径 $d_s=1.696\text{m}$ を持つセグメントの寸法をトライアル計算で求めると、図-2(c)に示す設計荷重に対して、 $D_s=1.762\text{m}$, $L_s=75\text{cm}$, $h_s=3.0\text{cm}$, $t_s=0.7\text{cm}$ であれば、発生応力は-2603kgf/cm²となり、安全という結果となった。このセグメントの重量 W_s は220kgf/mとなる。

サイジングダウンの比較 2通りの設計で得られたF覆工のサイジングダウンの程度を、R覆工の場合と比較して表-1に示す。表中の α は掘削土量($=\pi D_s^2/4$)の比、 β はセグメント重量($=W_s$)の比をそれぞれ表す。表-1から、セグメントを仮設構造物と考えることによって、 α 、 β とも大幅に減少することが分かる。

今後の課題 表-1に示したように、提案する設計法によれば、シールドトンネルの大幅なサイジングダウンを達成できるが、実際の下水道用標準セグメントの寸法は、今回示した断面応力のみによっては決定されず、むしろジャッキ推力から縦リブ寸法が決まり、これと合わせる形で主桁の寸法が決定されているのが実情である。このことは、今後、以下の2点の検討が必要であることを示す。

(1)セグメントの現行設計土圧は、土と構造物の相互作用を考慮していないため、実態と著しく乖離していると想定される。それに関わらず、実施工でこれまでそれほど問題が生じていないのは、上述のようにセグメントの寸法が断面の挙動で決定されていないためと思われる。実態に近い設計土圧と提案設計法を組み合わせれば、F覆工のサイジングダウンをさらに図れる可能性が強い。

(2)現状で提案設計法を採用するためには、ジャッキ推力を減少させるシールド施工法の開発が必要である。具体的には、後方台車付近で裏込め注入が済んだセグメントにジャッキ推力を持たせる方法、または潤滑剤等によってシールド掘進時のジャッキ推力そのものを減少させる方法が考えられる。

表-1 サイジングダウンの程度

	R覆工	F覆工		
		本設	仮設	仮設/ 本設
D_s (m)	2.35	1.90	1.762	0.93
α	1	0.65	0.56	0.86
β	1	0.69	0.40	0.58

参考文献: 1) J. Tohda, H. Yano and J. Tomita, Response of shield tunnel lining under seismic loading, 11th Asian Regional Conf., ISSMGE, 1999. 2) 日本下水道協会(JSWAS), シールド工用標準セグメント, 1990.