

鉄道建設公団 正員 清水 六三郎
大成建設 正員 小寺 秀則
住友金属 正員 山 川 純雄

1. ま え が き

膨張性地山など大土圧を受ける条件下での大断面トンネル掘削においては、従来のH形支保工では強度が低く、鋼管支保工が有力である。¹⁾ 鋼管支保工は、①建込み後モルタルを充填することにより耐力を大にすることができ、更に、②スパイラルフープ筋、H形鋼、鋼管(二重管)などの内挿鋼材により耐力向上が計りうる、③H形支保工に比べ吹付モルタル作業が容易、などの長所が挙げられる。

フープ筋付鋼管支保工は、Maney²⁾の研究にヒントを得て、足立³⁾らが考案したものであるが、強度向上のメカニズムが解明されていない。ここでは、青函トンネル用鋼管支保工の断面決定を目的として、スパイラルフープ筋その他の内挿材を有する鋼管支保工の短柱圧縮強度につき、理論的、実験的に検討した結果を報告する。

2. 実験概要

2.1 供試体の種類：表1に示すとおり、A～Eの5形式、15条件、各3体、計45体を試験に供した。なお供試体 $\#$ ①、②は鋼管実体圧縮試験体で表1から除外した。

表1. 供試体の種類と断面構成

形式	A	B	C	D	E
断面構成					
供試体 $\#$	12"φ③④⑤ (外管なし)	12"φ⑥⑦※ (内挿材なし)	12"φ⑨⑪⑬※⑰ 10"φ⑧⑩⑫⑯	12"φ⑭※ (H形鋼:SS41)	12"φ⑮※ (内管:STK41)

※：外管材質S55(他はすべてSTK41)

2.2 使用鋼材：外管は10"φ×9.3t(STK41)と12"φ×10.3t(STK41&S55)の2条件、フープ筋は、 $d=16\phi$ (SR24)、フープ巻径 $D_f=210\phi(10")\&263\phi(12")$ 、ピッチ $\lambda=2d, 3d\&4d$ である。また形式D、Eの内挿材はH200×204×12×12(SS41)、8"φ×8.2t(STK41)である。各供試体とも長さは $\ell=2D$ (Dは管の外径)とした。

2.3 モルタル：供試体の試験材令(7, 28日)に合せて5回に分けて打設し、その都度シリンダーテストを実施した。配合は1:1の膨張性モルタルで、 $W/C=48\%$ 、 $A/C=0.01\%$ 、ポゾリス $\#$ 10をCに対して1%混入、フロー値 $=20\pm2\text{sec}$ である。供試体は重錘による半拘束養生(約 0.3kg/cm^2)とボルト締めによる拘束養生($\#$ ⑯&⑰)で、いずれも $10\sim15^\circ\text{C}$ の大気中で養生した。

2.4 試験方法：試験は横型2000トン試験機を使用し、外管の軸方向および円周方向ひずみおよびフープ筋の軸方向ひずみなどをWSGで計測した。また軸方向変位も同時に計測し、大変形時の荷重-ひずみ関係を求めた。

3. 結果と考察

3.1 複合断面の強度向上機構： スパイラルフープ筋入りモルタル充填鋼管の圧縮耐力は、断面構成要素個々の耐力の和以上になることが知られている。^{2),3)} これはフープ筋と外管によって中詰モルタルの径方向変形が拘束され、三軸圧縮応力状態になるためである。解析の便宜上フープ筋を等価な内管に置換し、複合断面内の応力状態を図1のようにモデル化する。この場合、フープ筋は軸方向荷重を直接分担するものではないが、理論式の汎用性を考えて図1では σ_{s1} なる圧縮応力が作用している状態を考えた。また、複合断面の降伏荷重は全構成要素が降伏状態に達したときの荷重と定義し、モルタルおよび鋼材の破壊あるいは降伏条件としては表示の簡明な最大せん断応力説を適用しうるものと仮定する。

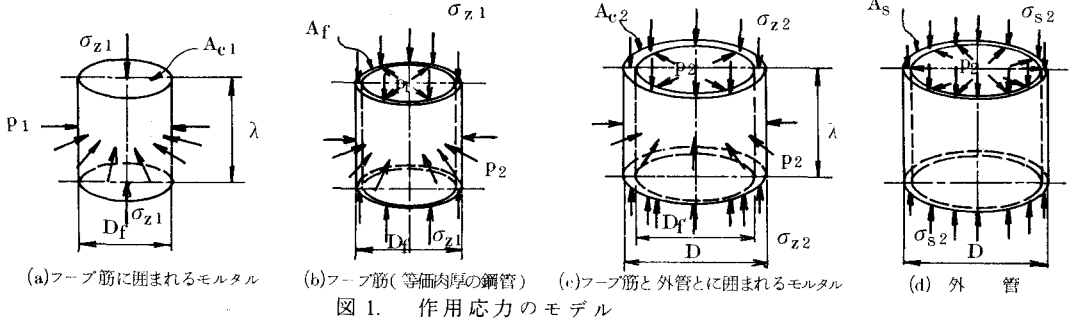


図1. 作用応力のモデル

以上の前提より、複合断面降伏時の中詰モルタルの作用応力 σ_{z1} 、 σ_{z2} および拘束圧力 p_1 、 p_2 （いずれも圧縮応力を正）は次式で与えられる。

$$\sigma_{z1} = \sigma_0 + p_1, \quad \sigma_{z2} = \sigma_0 + p_2 \quad (1)$$

$$p_1 - p_2 = \frac{\pi d}{n D_f} (\sigma_{y1} - \sigma_{s1}), \quad p_2 = \frac{4 t}{n D_f} (\sigma_{y2} - \sigma_{s2}) \quad (2)$$

ここに、 $n = \lambda / d$ 、 λ = フープ筋のピッチ、 d = フープ筋素線径、 D_f = フープ筋の巻径、 σ_{y1} 、 σ_{y2} = フープ筋（内挿材）および外管の一軸引張降伏応力（正の値）、 σ_{s1} 、 σ_{s2} = 内管（内挿材）および外管の一軸圧縮降伏応力（正の値、パウシング効果により σ_{y1} 、 σ_{y2} とは必ずしも一致しない）、 σ_0 = モルタルの一軸圧縮強度、をあらわす。式(1)から明らかなように、スパイラルフープ筋入りモルタル充填鋼管の耐力向上は、拘束圧 p_1 、 p_2 だけモルタル部分の強度上昇によるものである。

式(1)、(2)より複合断面の全断面降伏荷重 P_y は次式で与えられる。

$$P_y = P_{y0} + \Delta P_y, \quad P_{y0} = A_p \sigma_0 + A_f \sigma_{s1} + A_s \sigma_{s2}, \quad \Delta P_y = \frac{A_f}{2} (\sigma_{y1} - \sigma_{s1}) + \frac{A_s}{2} (\sigma_{y2} - \sigma_{s2}) \quad (3)$$

ここで、 P_{y0} = 構成要素個々の一軸圧縮強度から定まる見かけの耐力、 ΔP_y = 内挿材および外管の拘束による付加的耐力向上量、をあらわす。

3.2 実験値と理論値の対比： 実験により得られた荷重-ひずみ線図、図2、より、全断面降伏ひずみ $(\epsilon_L)_y$ （省略）に対応する荷重を読み取り、 P_y の理論値との比較、およびフープ筋と外管のひずみ測定結果より求めた内圧 p_1 、 p_2 と式(2)による理論値との比較をしたのが表2で、理論値と実験値はほぼ一致する。

3.3 フープ効果について： フープ筋が耐力向上に及ぼす効果は、式(3)で $\sigma_{s1} = 0$ であるから、

$$\Delta P_f = \pi d^2 D_f \sigma_{y1} / 2 \lambda \quad (4)$$

すなわち、付加耐力 ΔP_f を大きくするにはフープ筋素線径 d を大にするのが最も効果的である。

モルタルの強度向上率、 $(p_1 - p_2) / \sigma_0$ 、でみると（ D_i は管の内径）、

$$\frac{p_1 - p_2}{\sigma_0} = \frac{\pi d^2}{2 \lambda D_f} \left(\frac{D_i}{D_f} \right)^2 \left(\frac{\sigma_{y1}}{\sigma_0} \right) \quad (5)$$

表 2. 実験値と計算値の対比

区 管 径	材 質	供試体 形式	$(\varepsilon_L)_y$ ($\times 10^{-6}$)	$\Delta P_y(t)$ 計算値	$P_y(t)$			P_1 (kg/cm^2)		P_2 (kg/cm^2)	
					実験値	計算値	(実) / (計)	計算値	(実) / (計)	計算値	(実) / (計)
12"	(外管なし)	A ③	4080	71	235	218	1.07	131	1.01	0	—
		" ④	3920	48	216	195	1.11	88	1.00	0	—
		" ⑤	3840	36	190	183	1.04	66	1.09	0	—
	STK41	B ⑥	6407	67	495	501	0.99	($p_1=p_2$)	—	96	0.98
		C ⑨	4926	138	579	592	0.98	227	0.85	96	1.23
		" ⑭	4319	138	681	651	1.05	227	0.98	96	0.97
		" ⑪	4693	115	549	569	0.96	184	0.99	96	1.01
		B ⑦	8984	90	775	723	1.07	($p_1=p_2$)	—	129	0.98
	S55	C ⑬	4871	138	715	750	0.95	217	—	129	1.01
		D ⑫	9064	90	968	960	1.01	($p_1=p_2$)	—	129	1.00
		E ⑮	9480	138	970	966	1.00	284	—	129	1.08
		C ⑧	5220	115	459	476	0.96	283	0.91	118	0.99
10"	STK41	" ⑫	4754	115	370	468	0.79	283	0.87	118	0.98
		" ⑬	4501	115	490	517	0.95	283	1.03	118	1.08
		" ⑭	4544	96	431	491	0.88	228	1.08	118	1.06

すなわち、フープ筋の巻径 D_f が大（管径が大）きいほど効率は下る。また、フープ筋の降伏応力とモルタルの一軸圧縮強度比、 σ_{y1}/σ_0 、が大きいほどフープ効率が向上する。

他方、外管（または内管）の拘束による複合断面の強度向上量は次式

$$\Delta P_s = \frac{\pi D t}{2} \cdot (\sigma_{y2} - \sigma_{s2}) \quad (6)$$

で与えられ、管厚 t とバウシング効果による鋼管の引張と圧縮の両降伏応力の差に比例する。しかし、一般にバウシング効果の影響は小さいので、 ΔP_s の項は設計に際しては無視すべきものと考えられる。

なお、内挿材の形式と、耐力、および鋼管材質と耐力については講演当日にゆずる。

参考文献：

- 1) 足立：膨張性をもった地盤中のトンネル施工について、土木学会誌，vol. 59, No. A, Annual '74, pp.37-46.
- 2) Maney, G.A.: High strength Reinforced Concrete Column Develop. A.S.C.E, 1944.
- 3) 足立ほか：合成ループ鋼管柱の強度 鉄道技術研究所報告，No. 789，1971，2月

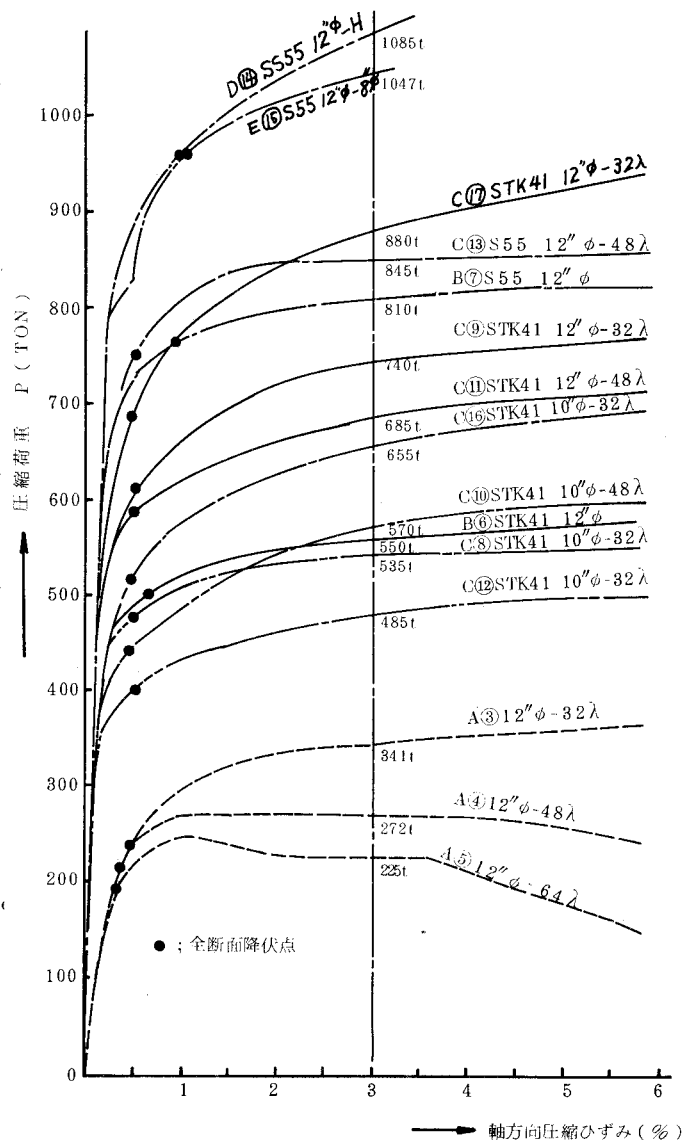


図 2. 荷重—ひずみ線図