

吹付けコンクリートにおける等価弾性係数の見直し

金沢工業大学 正会員 土屋 敬*)
 金沢工業大学大学院 学生会員 高橋範明*)
 第一建設工業 稲葉潤也***)

1. はじめに

これまで NATMFEM を用いた解析において吹付けコンクリートの等価弾性係数は、土屋の行ったクリープ・乾燥収縮試験¹⁾に基づき 28 日材令における等価弾性係数 3420N/mm² を用いてきた。しかし今回ある現場を解析した結果、吹付けコンクリートの応力値が実測値をはるかに下回るというものになった。そのためこの現場を解析するにあたっては、等価弾性係数の見直しをおこなう必要性に迫られた。この現場は現在建設中の長大トンネルであり、天端沈下 281mm、水平内空変位 669mm と非常に大きな変形が生じ、この対策として二重支保工が採用されている。私たちは、この二重支保工において二次支保（二度目の吹付けコンクリート・鋼製支保工）を施工するにあたり、最適な施工時間間隔を解析的に検討している。上述の等価弾性係数は、吹付けコンクリート打設後 28 日の変位・応力を算出するものとしては妥当である。しかし 28 日より早期の材令においては、クリープ・乾燥収縮がまだ進行していないためこれにより算出される応力値は過小なものとなる。これは、この等価弾性係数による応力がいわゆるリラクゼーション後の応力になっているためである。今回の解析のように早期材令での応力値を求めようとする場合において、28 日までのクリープ・乾燥収縮を見込んだ等価弾性係数を用いるのは、過小な応力値を算出することとなり非安全側の値となる。当該材令までのクリープ・乾燥収縮を考慮した等価弾性係数を用いるべきであると考え再検討をおこなった。

2. クリープ、乾燥収縮試験より得られる吹付けコンクリートの等価弾性係数

土屋が行った吹付けコンクリートのクリープ・乾燥収縮試験の結果は、表 2-1 に要約される。

表 2-1 実験による等価弾性係数

載荷材令 (日)	弾性係数 E (N/mm ²)	等価弾性係数 E _t ' (N/mm ²)					
		1日	2	3	7	14	28
2	18000	11000	8980	7750	5420	4000	3030
3	15000	9430	8020	7190	5500	4370	3500
7	13900	8780	7660	6960	5550	4530	3700
平均	15600	9740	8220	7300	5500	4300	3420

(1) クリープ・乾燥収縮を考慮しない弾性係数

クリープ・乾燥収縮を考慮しない瞬間的な弾性係数は、載荷材令 2 日、3 日、7 日に対し、18000N/mm²、15000N/mm²、13900N/mm² である。一般に材令が上がるに従い弾性係数は上がるが、このように弾性係数が減少しているのは本試験における載荷荷重を材令圧縮強度の 1/3、すなわち表 2-2 のように載荷材令 2 日、3 日、7 日に対し 54kN、98kN、118kN と大きくしたためである。

表 2-2 載荷材令と載荷荷重

載荷材令(日)	荷重(kN)	応力度(N/mm ²)
2	54	3.24
3	98	5.88
7	118	7.06

※材令強度の30%程度を載荷荷重とする

(2) 材令 28 日における等価弾性係数

これまで覆工への載荷は主として 2 日～7 日の間で行われるとして、28 日材令における等価弾性係数は表 2-1 の平均値 3420N/mm² を用いてきた。

(3) 早期材令（クリープ・乾燥収縮 1 日）における等価弾性係数

1 日分だけのクリープ・乾燥収縮を考慮すると 11000N/mm²、9430N/mm²、8780N/mm² となる。材令と共に弾性係数が下がっているのは上述の理由による。

3. 早期材令における応力算出のための等価弾性係数

(1) 材令を考慮した等価弾性係数

表 3-1 は 10×20 cm の供試体の一軸圧縮強度を示す。前節 2.(1) では載荷荷重を材令とともに増加させたために、等価弾性係数は材令とともに低下するという結果になった。しかし、一般に弾性係数は強度と比例するといわれているので、ここでは 2 日材令での等価弾性係数 11000N/mm² を基準とし、他の材令における等価弾性係数 E_c(t) は一軸圧縮強度に比例させて定めた。さらにこれを最小二乗法により線形化させ材令 (t) の等価弾性係数 E_c(t) として定めた。結果は図 3-1 である。ここでの等価弾性係数は上述のように 1 日分のクリープ・乾燥収縮を見た場合のものであり、これまで用いてきた載荷 28 日後の 3420N/mm² としたのものより大きな等価弾性係数が得られた。また 1 日分のクリープ・

キーワード : NATM 吹付けコンクリート 等価弾性係数

連絡先 : *) 〒921-8501 石川郡野々市町扇が丘 7-1 TEL 076-248-1100 (代) FAX 076-294-6713
 **) 〒950-8582 新潟市八千代 1-4-34 TEL 025-241-8111

乾燥収縮を考慮しているの、考慮していないものに比べれば小さいものとなる。解析において吹付けコンクリートに発生する応力を正しく求めることは極めて困難な問題であると考えられる。しかし、ここで算出したものは考慮しないものと載荷 28 日後のものとの中間的な値であり、解析に用いる値としては比較的妥当なものではないかと考える。

(2) 応力レベルにより変化する等価弾性係数

コンクリートの弾性係数は載荷応力の増加とともに漸減する非線形性を有する。そこで、この特性を考慮しコンクリートの破壊強度 21.0N/mm² の 1/2 の <10.5N/mm² までは吹付けコンクリートの弾性係数を $E_{c1}=11000\text{N/mm}^2$ とし、それ以降の 10.5N/mm² では $E_{c2}=5500\text{N/mm}^2$ とするものとし Bi-linear の形を用いて表現した。

4. 現場計測値に適合するための解析

(1) 解析ケース

ここでは実際に現場で計測された値に適合させるため一連の解析を行なった。その流れを表 4-1 に記す。解析を行っている現場での吹付けコンクリート応力の計測値は、約 30.0N/mm² である。表 4-1 において、解析ケース I は載荷 28 日後の等価弾性係数 3420N/mm² を用いたものである。ケース II は 3.1 で算出した式を用いて、吹付けコンクリートの弾性係数 $E_c(t)$ を材令の関数として扱ったものである。次にケース III は 3.2 で述べたように吹付けコンクリートの弾性係数に対し Bi-linear 特性を用いることでコンクリートの弾性係数の非線形性を考慮したものである。なお、パターン I、II を同時に考慮したものが理想ではあるが、プログラムの特性上これらを同時に行なうことは不可能であるため、これら 3 つの解析ケースとした。

(2) 解析結果

表 4-1 に記したそれぞれの解析ケースにおける解析結果は、解析ケース I では吹付けコンクリート応力 9.0N/mm² となり、現場計測値 30.0N/mm² に比べ極めて小さい値となった。解析ケース II においては、吹付けコンクリート応力 28.0N/mm² と非常に大きな値であり、現場計測値にかなり近いものとなった。解析ケース III では吹付けコンクリート応力 21.5N/mm² となり、ケース II に比べると小さい値ではあるが、これは吹付けコンクリート応力 10.5N/mm² で弾性係数を減少させているため当然の結果である。

5. まとめ

これまで吹付けコンクリートの等価弾性係数は 28 日材令を対象として 3420N/mm² というので一律に扱ってきた。しかし今回のように、非常に早期の材令における応力等が必要な場合もある。今回の解析の中で、クリープ・乾燥収縮を 1 日だけ考慮した解析ケース II の解析結果は、現場計測値とよく一致している。また解析ケース III では、等価弾性係数を Bi-linear で扱い応力レベルにより弾性係数を変化させている。これをさらに曲線形であらわすことが出来ればより理想的であると考えられる。

参考文献

- 1) 土屋敬：ロックボルト・吹付けコンクリートトンネル工法の設計に関する研究（1986 年 5 月）

表 3-1 材令強度による推定等価弾性係数

材令 (日)	番号	比重	最大ひずみ (10 ⁻⁶)	一軸圧縮強度 (N/mm ²)	E_t/E_{28}	E_t (N/mm ²)
1	1	2.25	3974	16.4	0.69	11200
	2	2.24	4200	14.6		
	3	2.22	3148	14.3		
	4	2.25	6710	12.8		
	平均	2.24	4521	19.0		
2	1	2.20	2730	19.1	0.68	11000
	2	2.22	4505	19.5		
	3	2.22	6000	18.3		
	4	2.23	6696	17.4		
	平均	2.22	4871	18.6		
3	1	2.22	6068	20.9	0.75	12200
	2	2.21	4880	19.9		
	3	2.23	4252	20.9		
	4	2.21	5456	20.3		
	平均	2.21	5166	20.5		
7	1	2.18	6387	20.2	0.89	14400
	2	2.19	5408	25.4		
	3	2.21	4873	25.7		
	4	2.20	5454	26.1		
	平均	2.20	5531	24.4		
28	1	2.20	5193	28.9	1.00	16200
	2	2.20	5355	29.8		
	3	2.18	5644	25.7		
	4	2.13	5451	25.8		
	平均	2.18	5443	27.5		

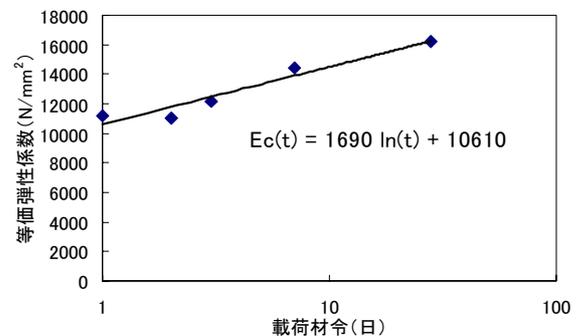


図 3-1 1 日分のクリープ乾燥収縮を見た等価弾性係数

表 4-1 解析ケース

解析ケース	吹付けコンクリートの弾性係数 (N/mm ²)	地山の初期変形係数 (N/mm ²)	解析結果 (吹付けコンクリート応力) (N/mm ²)
I	$E_c=3420$	$D_0=140$	9.0
II	$E_c(t)=1690\ln(t)+10610$	$D_0=115$	28.0
III	$\sigma < 10.5\text{N/mm}^2$ $E_{c1}=11000$	$D_0=120$	21.5
	$\sigma \geq 10.5\text{N/mm}^2$ $E_{c2}=5500$		

※地山の初期変形係数は解析における変位量を現場実測値と一致させるため逆解析を行い決定しているため各パターンで異なる値となっている。