

## 水路トンネル裏込充填材としての硬質ウレタンフォームの材料力学挙動 Mechanical behavior of rigid polyurethane foam for a back-fill material of canal tunnels

○ 青山 咸康<sup>1</sup>, 大川 栄二<sup>2</sup>, 吉岡 敦<sup>3</sup>, 小浪 岳治<sup>4</sup>, 菊池 信夫<sup>5</sup>

Shigeyasu Aoyama, Eiji Ookawa, Atsushi Yoshioka, Takeharu Konami and Nobuo Kikuchi

### I はじめに

農業水利施設のストックマネジメント事業はここ数年拡大し、土地改良事業の中核をなすに至っている。そのなかで、使用歴が30年以上の水路トンネルの長寿命化対策はとりわけ重要な課題である。古い時代の施工が原因でトンネルクラウン部に生じた空洞部を充填することによるトンネル断面の健全な応力伝播機構の回復は効果的と考える。このような裏込充填には従来エアモルタルなどの流動性の高いセメント系材料が用いられていたが、仮設設備が膨大であり労力も大きい。これに対して近年使用されることの多くなった現場発泡硬質ウレタンは、1)発泡反応時間が約1分と短く地盤内へのリークを最小にすることができる、2)原材料は発泡後体積の1/40程度の液体であるので、現場への資材搬入保管が容易である、3)発泡した材料が軽量であり、自重による躯体への荷重増を考慮する必要がない、等の点で注目を集めている。しかしこの材料の力学挙動は必ずしも明確ではない。充填材としての使用を前提とした本材の基本力学試験を行った結果を報告する。

### II 硬質ウレタンの物理特性

**2-1 原材料と施工方法：**後述のJIS：A9526及びアキレス社の仕様によれば以下の通りである。I液：ポリイソシアネート（-NCOをイソシアネート基と呼ぶがそれを2個以上有する化学物質：常温では比重1.24程度の液体）R液：ポリオール（-OHつまり水酸基を2個以上有する化学物質：常温では比重1.1程度の液体）の2主材を反応させて所要の目的の物質を生成する。反応の過程では、触媒（アミン化合物等）、発泡剤（物理発泡剤及び化学発泡剤、現在フロンの使用はない）、整泡剤（シリコン）、難燃剤（リン酸エステル）の4種を用いる。2種類が商品化されており、第一は主材配合割合がI：R=100：74であり第二は100：63である。前者は30倍発泡と呼ばれ製品の密度は約40 kg/m<sup>3</sup>、後者は40倍発泡と呼ばれ製品の密度は約30 kg/m<sup>3</sup>である。従って、本材料を現場で生成するのに必要なのは主材の2液と若干の触媒、発泡剤等、そして電力で稼働する重量200kgの発泡機及びミクシングヘッドである。2液の混合比、反応時温度は微妙であって、上記配合が狂えば所定の物性は得られないという。

**2-2 既存の物性試験値及び試験規格：**1)基本物性：2液混合により形成されるフォームはそのスキン層とそれに覆われるフォーム(内部)に分かれる。フォームとスキン層では物性が大きく異なるのでフォーム部分を扱う（フォーム密度等）：代表的物性は以下の通りである。（アキレス社・社内試験）

単位体積重量 kN/m <sup>3</sup>	圧縮強さ MPa	*吸水量 g/100cm <sup>2</sup>	透水係数 cm/s	高温高湿試験 70℃, 95%RHで1月放置	対候性試験 屋外暴露1月間
0.34	0.24~0.21	1月後2.4	10 <sup>-7</sup> 以下	質量0.4%, 体積-0.9%	圧縮強度5%増

\*10×10×3 cmの直方体を水浸1カ月放置

<sup>1</sup> 石川県立大学 生物環境資源学部,

<sup>2</sup> アキレス(株)フォームシステム企画課

<sup>3</sup> アップコン(株)技術部,

<sup>4</sup> 岡三リビック(株)ジオテクノ本部,

<sup>5</sup> ジオデザイン(株)技術部

2) JIS 規格：○A9526 (2006)：建築物断熱用吹き付けウレタンフォーム＝フォームの原料や発泡法，熱伝導率，接着強さその他適用範囲全般について規定したもの．○K7220 (1999)：発泡プラスチック－硬質材料の圧縮試験＝供試体寸法，载荷速度，荷重～変形曲線から降伏・圧縮強さ等の定義法を定めている．

### Ⅲ 硬質ウレタンの動弾性係数及び曲げ・圧縮強さ試験結果

今回行った試験は JIS：K7220 に準拠せず，JIS：R5201；セメントの強さ試験に準拠した．理由は土木系材料として硬質ウレタンを見たとき，セメント／モルタルに対応する材料とみなしたからである．2種類の発泡硬化体から 4×4×16 cm の直方体を切り出し，動弾性試験（非破壊検査）及び曲げ，圧縮破壊強さを求めた結果を下表に示す．強さ試験の方法は JIS：R5201 に従っている．これらは 10 本の供試体の平均値である．

10 本の供試体の動弾性／強さ試験結果

硬化体種類	単位体積重量 $\rho$ kN/m <sup>3</sup>	①:直接法 $V_p$ km/s	②:①による動弾性係数 $E_D$ MPa	③:共振法 $V_p$ km/s	④:③による動弾性係数 $E_D$ MPa	⑤:共振法 $V_s$ km/s	⑥:⑤による剛性率 $G_D$ MPa	⑦:動ポアソン比 $\nu_D$
29kg 発泡体	0.0332	0.757	19.2	0.815	22.1	0.502	8.39	0.33
40kg 発泡体	0.0414	0.754	23.6	0.796	26.3	0.505	10.5	0.25

①：16cm を伝播する時間の直接計測からの速度，③縦波振動共振を生じる振動数からの推定値  
⑤：横波振動共振を生じる振動数からの推定値．②，④では一般に相違が生ずる．

$$\text{②, ④} : E_D = \rho V_p^2, \quad \text{⑥} : G_D = \rho V_s^2 \quad \text{⑦} : \nu_D = E_D / 2G_D - 1$$

硬化体種類	⑧：曲げ強さ $\sigma_b$ MPa	⑨：曲げ破壊時 $\delta/\ell$	⑩：圧縮強さ $\sigma_c$ MPa	⑪：静弾性係数 MPa
29kg 発泡体	0.33	0.17	0.14	2.6
40kg 発泡体	0.66	0.09	0.22	5.5

⑧：JIS：R5201 に準拠． $\sigma_b = 0.00234 \times P_{\max}$  (MPa) ここに  $P_{\max}$  は曲げ破壊時の鉛直荷重 (N)

⑨：载荷点のたわみを  $\delta$ ，梁のスパンを  $\ell$  としている．⑩：応力～ひずみ曲線の最初の折れ曲がり点の応力を  $\sigma_c$  で定義，⑪：先の  $\sigma_c$  と原点を結ぶ直線の勾配で定義

マクロなこの供試体の圧縮過程を示すと図 1 のようになる．すなわち変形性が大であり，通常みられる降伏が生じるひずみは 0.05 程度であるが，降伏後の一定応力保持期間が長く，およそ 50%ひずみまで達する．この時点ではほぼ内包されている気泡が全て潰れて個体部部の圧縮が始まる．

上の実験結果から，材料密度 (kg/m<sup>3</sup>) の違いにより，強度は全体的に変化し 40kg 発泡体は 30kg のそれと比べ，圧縮強さにおいて 1.6 倍，曲げ強さにおいて 2 倍大きい．また発泡体密度は材料密度に比例する，等の興味ある多くの特色が示された．

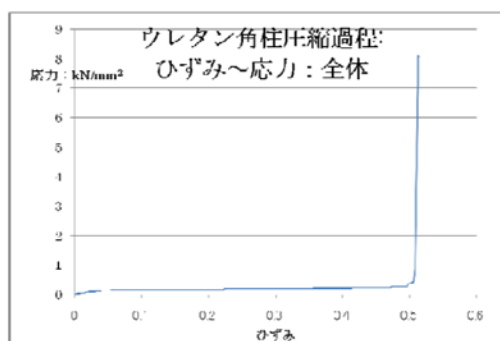


図 1 個体部分の圧縮に至る応力～ひずみ