# SPEEDY AND STANDARD TEST METHOD AND INSTRUMENTS FOR PERMEABILITY OF PACKING THAT FILLS THE TUNNEL SHAFTS WHERE GAS TRANSMISSION PIPELINE IS INSTALLED.

木原晃司<sup>1</sup>・吉田宣弘<sup>2</sup>・山之内宏安<sup>3</sup>・平原龍<sup>4</sup> Koji KIHARA・Nobuhiro YOSHIDA・Hiroyasu YAMANOUCHI・Ryo HIRAHARA

We planed the construction of a natural gas transmission pipeline that named "Chuo Kansen" transmission pipeline in order for the increase of gas demand at Greater Tokyo (metropolitan) area and the stable supply. In respect to the formation of circular pipeline network, the Chuo Kansen is positioned as a line to introduce gas that is produced in Sodegaura works directly. As for the construction of the Chuo Kansen, employment of non-open-cut tunnel shafts(23km, depth:ave.40m) solved the environmental impact to the local society and the already busy traffic.

The tunnel shafts are filled by packing. Not only easy construction but maintenance, we require packing that satisfying qualities (ex. workability, intensity, permeability). Especially we need control permeability of high quality. Because the case of gas leakage, we must detect it quickly.

We develop speedy and standard test method and instruments for permeability of packing that fills the tunnel shaft where gas transmission pipeline is installed. In this paper, we introduce it.

*Key words* : *Chuo kansen transmission pipeline, long distant and deep tunnel shafts, speedy and standard test method and instruments for permeability* 

## 1. はじめに

#### (1) プロジェクト概要

近年,首都圏では環境対策によるエネルギーの転換を始めとした都市ガス需要の増加のため,東京ガス㈱では2010年には既存の製造・供給施設では対応しきれないことが予測された.ここに,都市ガス需要の増加,安定供給の確保のために新たな都市ガス輸送幹線「中央幹線」の建設が必要となった.

中央幹線は,既存の環状幹線の中央を貫く新たな高圧ガス輸送幹線であり,東京都江戸川区の葛西ガバナステーションから埼玉県草加市の草加ガバナステーションに至るものである.本建設工事は,全路線非開削のシールド工法により23.1 km にわたる地下トンネルを築造し,その中に口径600mmの鋼製ガス管を配管するものである.(図-1参照)

## ①施工場所

始点:江戸川区臨海町(葛西ガバナステーション) 終点:草加市瀬崎町(草加ガバナステーション) 全線泥水加圧式シールド工法によるトンネル内配管, 完成後の断面を図-2に示す.

## ②ガス管仕様

設計圧力:7.0Mpa
口径:600mm
材質:鋼管,全線溶接接合



キーワード:中央幹線,長距離大深度トンネル,透気係数,透気性確認試験方法,透気性確認試験装置 <sup>1</sup>正会員 工修 東京ガス㈱中央幹線建設事務所課長 <sup>2</sup>非会員 東京ガス㈱中央幹線建設事務所副課長 <sup>3</sup>非会員 工修 東京ガス㈱埼東幹線建設事務所副課長 <sup>4</sup>非会員 ㈱セントラル技研 鶴見試験所所長

#### ③配管延長

23.1km

#### ④エ期

土木工事:2003年10月~2007年3月
(立坑、シールド)
配管工事:2007年7月~2008年12月
ガス開通:2009年1月



#### (2) トンネル内充てんによる小径化

**図-2** トンネル断面図

トンネルは内径2000mmであるが、ガス管配管後にエアモルタルで充てんした.従来トンネルは有人での維持管理等のため、充てんせず開放空間となり、温度変化により発生するガス管の伸縮によって応力が発生するが、 充てんによって坑内は土中温度と均一となり温度変化がほとんどなくなるので、応力を低減することができた.したがって、ループ配管、伸縮継ぎ手等の応力低減措置も不要となり、省スペース化、設備投資の軽減が図れた.また、維持管理のために人が入坑する際必要となる二次覆工、換気・照明・排水設備等諸施設を廃すことができた. これにより、小径化を図ることができた.

充てん材として使用したエアモルタルには最長6kmに及ぶ長距離における施工性のみならず,運用開始後のガス管を管理するために必要とする性能を持たせるため,厳格な品質基準を設定し施工管理を行った.

## (3) 中詰め材に要求する品質=透気性

特に,エアモルタル等の中詰め材は、ガス導管からの漏洩ガスを速やかに検知できるように良好な透気性が求め られる.しかしながら、このような中詰め材の透気性を標準的に評価する指標は確立しておらず、各種成分の中詰 め材に対して、適正な透気性を有するか否かを標準的な指標を基にして迅速に確認する試験方法が求められている. 特に、万が一ガスが漏洩した場合に迅速かつ定量的に検知するためにエアモルタルの透気性は規定値以上かつ均 一であることを要求した.今回、簡潔かつ再現性の高い試験方法を考案し採用した.

## 2. 透気性確認試験装置および方法

従来,気泡コンクリートの透気係数を求めるには,直径5cm×高さ10cmの供試体を採取し,20℃,湿度90%以上の恒温槽の中で28日間養生し,この供試体に一定の空気圧を作用させ,流入量と流出量が等しくなったときの流量を測定することによるが,このような従来技術では,供試体の形成寸法誤差によって評価値に差が出てしまい,標準的な評価を行うことができない問題があり,また,流入量と流出量を等しくする調整に手間がかかり,迅速な評価を行うことができない問題があった.

本報では、中詰め材の透気性を標準的に評価する指標を確立し、各種成分の中詰め材に対して、適正な透気性を 有するか否かを標準的な指標を基にして迅速に確認することができる確認試験方法及び確認試験装置を採用し、満 足のいく結果を得たので報告する.

#### (1) 試験方法および装置構成

今回採用した透気性中詰め材の透気性確認試験方法及び透気性確認試験装置は、以下の構成を少なくとも具備 する.

試験対象の中詰め材によって形成され,側面に気密樹脂を塗布した設定高さ及び一定断面積を有する柱状供試体を,内部に支持する外枠と前記柱状供試体の開放された端面の一方に空気を流入させる空気流入パイプの放出端を前記端面の一方に向けて支持すると共に前記外枠を支持する支持台と,前記空気流入パイプを流れる空気の流量を計測する流量センサと,前記空気流入パイプに流入される空気の圧力を計測する圧力センサと,前記空気流入パイプに空気を設定された一定圧力で流入する空気供給装置とを備えることとする.

## ①装置構成

#### 透気性確認試験装置を図-3に示す.

試験対象の中詰め材によって形成される柱状供試体Mは、円形、楕円形、矩形等の一定断面を有する柱状に形成された供試体であり、一対の端面を開放状態にして、側面に気密樹脂G1を塗布したものである.ここで用いられる気密樹脂G1は、供試体内部への含浸が少ない高粘度の樹脂が適し、塗布のし易さや気密性の確保を考慮する

と高粘度のエポキシ系樹脂が適する.

この透気性確認試験装置1は、外枠10、支持台 11, 空気流入パイプ12, 流量センサ20, 圧力 センサ21、空気供給装置30等を備える、外枠 10は、内部に前述した柱状供試体Mを支持する部 材であり,形状や材質は特に限定されないが,ここ では、透明なアクリル樹脂板を用い柱状供試体Mを 囲むように形成することで、柱状供試体Mの状態を 観察しながらの試験を可能とした.外枠10の内部 に柱状供試体Mを支持するには、図示のように、外 枠10の内部に所定高さ気密樹脂G2を充填する. ここでは気密樹脂G2にもエポキシ系樹脂を用いた. 柱状供試体Mの両端面m1,m2が開放されるよう に、柱状供試体Mの外側空間に気密樹脂G2を充填 する.なお、何らかの他の手段で後述する支持台1 1上に柱状供試体Mを支持できれば、外枠10は省 いても良い.



図-3 透気性確認試験装置

支持台11は、柱状供試体Mの開放された端面の一方(m1)に空気を流入させる空気流入パイプ12の放出端 12aを端面の一方(m1)に向けて支持すると共に、外枠10を支持するものである.ここでは、外枠10の内 部に支持された柱状供試体Mの端面m1が支持台11上に面しており、この端面m1に向かって空気流入パイプ1 2の放出端12aが当接されている.空気流入パイプ12は柱状供試体Mの内部に空気を流入させるための流入経 路であって、その流入経路の途中に流量センサ20が配備され、その端部に圧力センサ21が配備されている.ま た、必要に応じて、その途中経路にバルブ22を配備する構成にしても良い.流量センサ20は空気流入パイプ1 2を流れる空気の流量を計測するためのものであり、圧力センサ21は空気流入パイプ12に流入される空気の圧 力を計測するためのものである.

空気供給装置30は、空気流入パイプ12に空気を設定された一定圧力で流入することができるものであり、より標準化された試験結果を得るために、空気供給装置30は設定圧力を可変調整できるものであることが好ましい.

また必要に応じて,外枠10における支持台11に支持される側と逆側の端部に蓋部材13を設けても良い.柱 状供試体Mの端面m2は大気開放する必要があるので,蓋部材13を設ける場合であっても,外枠10の端部を気 密に塞がないことが必要になり所定の通気性が得られるものが用いられる.

#### ②透気性確認試験方法

透気性確認試験方法は、試験対象の中詰め材によって、側面に気密樹脂を塗布した設定高さ(L)及び一定断面 積(A)を有する柱状供試体Mを形成し、柱状供試体Mの開放された端面の一方(m1)から一定圧力の空気を流 入させて、端面の他方(m2)を大気開放させながら、流入される空気の圧力(h)と流量(Q)を設定時間(t) 計測し、下記式(1)によって透気係数Kを求める.

 $K = (L / h) \times \{Q / (A \cdot t)\} \qquad (1)$ 

ここに,

- L:前記柱状供試体の高さ
- A:前記柱状供試体の断面積
- h:流入される空気の圧力
- Q:流入される空気の流量
- t :計測時間

ここで、透気係数Kの単位を c m/s e c とするためには、柱状供試体Mの高さLの単位が c m であり、柱状供

試体Mの断面積Aの単位が c m<sup>2</sup>であり、流入される空気の圧力 h の単位が高さ変換された c m であり、流入される空気の流量Qの単位が 2 0  $\mathbb{C}$ 且つ 1 気圧の体積流量に換算された c m<sup>3</sup>であり、計測時間 t が s e c である.

より具体的には、図-3 に示すように、支持台11上に柱状供試体Mを配置して、柱状供試体Mの端面m1に空気流入パイプ12の放出端12aを当接させ、空気流入パイプ12から放出される空気が全て柱状供試体M内に流入するように、支持台11と端面m1の外周との気密性を確保し、バルブ22を開放して、空気供給装置30を作動させる. そして、圧力センサ21で計測される圧力h(cm)が一定の設定値を定常的に示していることを確認して、所定の計測時間t(sec)の間の流量Q(cm<sup>3</sup>)を流量センサ20で計測する. そして、柱状供試体Mの諸元から得られるL(cm)とA(cm<sup>2</sup>)と計測によって得られたh(cm),Q(cm<sup>3</sup>),t(sec)によって、式(1)から透気係数K(cm/sec)を求める.

式(1)は、本来は圧縮性の流体である空気を非圧縮性流体として扱い、一定圧での透水係数を求めるダルシー 則に基づいて導き出した式である.実際上は、空気は圧縮性流体であるから、全ての条件で式(1)の関係が当て はまることにはならないが、柱状供試体Mの外周を気密樹脂G1で覆うことで柱状供試体M内の空気の流れを一軸 方向に限定させ、流入する空気の圧力を一定にすることで、ダルシー則が適用できる試験条件を得ることができる. すなわち、透気係数にダルシー則を適用したことだけでなく、柱状供試体Mの両端面を開放させ側面に気密樹脂を 塗布すること、更にはこの柱状供試体Mの一端面から一定圧力の空気を流入させ他端面を大気開放することで、ダ ルシー則を適用できる試験条件を得たことが一つの特徴である.

また、ダルシー則を適用して柱状供試体Mの透気特性を求めるには、ダルシー則が適用可能範囲を見極める必要がある. 柱状供試体M内での空気の流速をv(=Q/(A・t))、圧力勾配をi(=h/L)とすると、圧力勾配 iと流速 v との関係は、図-4に示すように、ダルシー則が成り立つと仮定すると原点を通る直線 a の関係になる. しかしながら、圧縮性流体である空気を透過媒体とする場合には、圧力勾配 i が大きくなると、圧力勾配 i と流速 v との関係が直線 a から外れた関係になる. 例えば、空気の圧縮性が影響する条件では、圧力勾配 i と流速 v との関係が図-4 の曲線 b のような曲線関係となり、空気の流れが層流から乱流に遷移する条件では、圧力勾配 i と流速 v との関係が図-4 の曲線 c のような曲線関係になる.

したがって、ダルシー則を適用して柱状供試体Mの透 気特性を求めるには、圧力勾配 i と流速 v との関係が原 点を通る直線関係にあることが前提になり、そのような 関係にある計測値を基に式(1)を用いた透気係数Kを 求めることが必要になる.

また, 圧力hを変えて, 異なる圧力hに対してそれぞ れ計測された流量Qによって, 圧力勾配iと流速vとの 関係を求めることで, 画一性のある透気係数Kを得るこ とができる. すなわち, 異なる圧力hに対してそれぞれ 計測された流量Qによって, 圧力勾配iと流速vとの関 係で原点を通る直線回帰を行い, 有意な直線近似が得ら れる圧力勾配iの範囲で, 圧力勾配iと流速vの直線回 帰式を求め, この直線回帰式における回帰係数によって 柱状供試体Mの透気係数Kを決定する.

圧力勾配 i と流速 v との関係は、ダルシー則が適用で きる範囲であれば、 v = K · i (K:透気係数)の関係 になる.計測値から得られる複数組の(i, v)データ によって、 v = K · i の直線回帰を行い、その決定係数 (相関係数) R<sup>2</sup>がより1に近くなるように計測データを 選択する.前述したように、圧力勾配 i が大きくなると (i, v)の関係が直線から外れる要因が増えるので、 圧力勾配 i の上限を定めて、その圧力勾配 i の範囲で、

(i, v)の直線回帰式における回帰係数を求め、この回帰係数を柱状供試体の透気係数Kとする.



図-4 圧力勾配 i と流速 v の関係

## 3. 実施例

本プロジェクトで使用したエアモルタルを試験対象として、3つの供試体(供試体1,供試体2,供試体3)に 対して、前述した透気性確認試験装置を用いた透気性確認試験を行った.試験条件を表-1に示す.各供試体の寸 法等を表-2に示す.

表-1 試験条件

試験材質	エアモルタル
計測時間	毎分(60s)
透気媒体	空気
設定圧力(kPa)	1~16(16段階の昇圧後計測)

表-2 供試体の寸法等

	直径(cm)	断面積A(cm <sup>2)</sup>	高さL(cm)	質量(g)	湿潤密度(g/cm <sup>2</sup> )
供試体1	4.99	19.56	10.05	93.76	0.477
供試体2	4.99	19.56	10.00	92.99	0.475
供試体3	4.99	19.56	10.00	92.08	0.471

## (1) 試験手順

## ①供試体の整形及び設置

供試体は直径 φ 4 9.9 mmの円柱状に整形し,端面は上下の平行度を保ちつつ,滑らかになるように整形 した(写真-1).整形後,供試体密度を測定した.整形した供試体の側面に高粘度エポキシ接着剤を塗った(写 真-2).高粘度エポキシ接着剤が硬化した後,供試体を図-3に示す透気性確認試験装置1の支持台11に設置し, 気密樹脂G2として低粘度エポキシ接着剤を打設し支持台11に供試体を密着した(写真-3).



写真-1 供試体 整形状況



写真-2 供試体側面加工状況



写真-3 供試体端面加工外枠設置状況

## ②透気量計測

空気供給装置30を作動させて, 圧力センサ21の計測値が任意の圧力になるまで加圧し, 流量センサ20 により毎分流量を測定した. 圧力を数段階変化させて順次流量センサ20により毎分流量を測定した.



写真-4 透気性確認試験状況

## ③透気係数の計算

測定結果を基にして前述した式(1)によって供試体毎に各圧力に対応した透気係数Kを求めた.ここで圧力 センサの計測値をPとすると、式(1)におけるh(cm) = P(kPa)/0.098となった.

## (2) 試験結果

供試体1~3の試験結果を表-3に示す.

		供試体1				供試体2				供試体3							
Р	h	Ø			V	Р	h	Q			V	Р	h	Q			V
(kPa)	(cm)	(cc)	k	i	(cm/s)	(kPa)	(cm)	(cc)	k	i	(cm/s)	(kPa)	(cm)	(cc)	k	i	(cm/s)
1	10	1440	1.233	1	1.233	1	10	1370	1.173	1	1.173	1	10	1740	1.490	1	1.490
2	20	2670	1.143	2	2.287	2	20	2420	1.036	2	2.073	2	20	2440	1.045	2	2.090
3	30	3580	1.022	3	3.066	3	30	3270	0.934	3	2.801	3	30	3920	1.119	3	3.357
4	40	4340	0.929	4	3.717	4	40	4030	0.863	4	3.452	4	40	5530	1.184	4	4.736
5	50	5090	0.872	5	4.360	5	50	4720	0.809	5	4.043	5	50	6200	1.062	5	5.310
6	60	5750	0.821	6	4.925	6	60	5390	0.769	6	4.616	6	60	6780	0.968	6	5.807
7	70	6290	0.770	7	5.387	7	70	5930	0.726	7	5.079	7	70	7400	0.905	7	6.338
8	80	6850	0.733	8	5.867	8	80	6410	0.686	8	5.490	8	80	8000	0.856	8	6.852
9	90	7350	0.699	9	6.295	9	90	6920	0.659	9	5.927	9	90	8570	0.816	9	7.340
10	100	7920	0.678	10	6.783	10	100	7410	0.635	10	6.347	10	100	9060	0.776	10	7.760
11	110	8430	0.656	11	7.220	11	110	7890	0.614	11	6.758	11	110	9600	0.747	11	8.222
12	120	8940	0.638	12	7.657	12	120	8390	0.599	12	7.186	12	120	0	0.000	12	0.000
13	130	9370	0.617	13	8.025	13	130	8830	0.582	13	7.563	13	130	0	0.000	13	0.000
14	140	9800	0.600	14	8.394	14	140	9250	0.566	14	7.923	14	140	0	0.000	14	0.000
15	150	0	0.000	15	0.000	15	150	9640	0.550	15	8.257	15	150	0	0.000	15	0.000
16	160	0	0.000	16	0.000	16	160	9900	0.530	16	8.479	16	160	0	0.000	16	0.000

#### 表-3 3供試体の透気性確認試験結果

## (3) 試験結果の整理

式(1)の関係は、多孔質媒体中の非圧縮性流体の一次元流れに対して成り立つダルシー則が、空気を透過 媒体とする場合にも成り立つことが前提になっている.しかしながら、圧縮性流体である空気を透過媒体とす る場合には、その圧縮性や層流から乱流への遷移等によってダルシー則が適用できる条件は限られたものにな る.

表-3 に示した試験結果では、透気係数kの計算値(計測値0は除く)は、供試体1で0.600~

1. 233 (cm/s), 供試体2で0. 530~1. 173 (cm/s), 供試体3で0. 747~

1. 490 (cm/s) と大きくばらついた値になっており、供試体の透過特性を評価する画一的な値になっていない. これは圧力変化の範囲がダルシー則を適用できる範囲を超えていることを意味している. ダルシー則が適用できる範囲では、圧力勾配 i (= h / L) と流速 v (= Q / (A · t)) との関係は原点を通る直線上になる (v = k · i).

**表-3**の試験結果から得られるi(x)とv(y)の原点を通る回帰直線( $y = k \cdot x$ )のグラフを図-5に示 す.図-5に示した直線回帰式は、供試体1がy = 0.6734 · x( $R^2 = 0$ .8799)、供試体2が y = 0.6023 · x( $R^2 = 0$ .882)、供試体3がy = 0.8486 · x( $R^2 = 0$ .8696)となるが、 決定係数(相関係数)  $R^2$ がそれほど高くない. 圧力勾配 i が高くなるほど圧力勾配 i の上昇に対して流速 v の 上昇率が低くなって直線関係が崩れていることが判るので、これは層流から乱流への遷移の影響を受けている と考えられる.



(全データ使用)



これに対して,層流から乱流への遷移の影響を受けやすい(圧力勾配 i が高い)計測値を取り除いて直線回帰を行った解析結果を図-6に示す.このときの直線回帰式は,

供試体1iy = 0. 9958 · x (R<sup>2</sup>=0. 9357),

供試体2がy=0. 9176 · x (R<sup>2</sup>=0.9402),

供試体3がy=0.1.1563・x(R<sup>2</sup>=0.9701)

となり,決定係数(相関係数) R<sup>2</sup>はいずれも高い値を示す.このように圧力勾配 i と流速 v の計測値を直線回 帰した解析結果,決定係数が十分に高くなり有意な直線近似が得られる圧力勾配 i の範囲を特定し,その範囲 の計測値から求められた圧力勾配 i と流速 v の直線回帰式(v=K・i)における回帰係数によって各供試体 の透気係数Kを決定した.このように求めた供試体1,供試体2,供試体3の透気係数Kを表-4に示す.

表-4	透気係数(cm/s)							
供試体	1	2	3					
透気係数	0.996	0.918	1.156					

## 4. 考察

このように求めた透気係数Kは、供試体の大きさや計測時間の長さに影響されない標準的な値になる.また、単純に柱状供試体Mへ流入する空気の状態を計測するだけでよいから、計測が簡単であり、供試体の透気性に関して迅速な評価を行うことが可能になる.

柱状供試体Mの外周を気密樹脂G1で覆っているので,柱状供試体Mの側面から漏れ出る空気を防ぐことができ,

柱状供試体Mの一軸方向の透気性のみに着目した試験結果が得られる.これによって,柱状供試体Mの形状の違いによる計測結果のばらつきを抑止することが可能になり,より標準化した透気性の評価を行うことができる. 更には,外枠10の内部に所定高さ気密樹脂G2を充填することで柱状供試体Mを支持しているので,柱状供試体Mの端面m1周囲の気密性を確保しやすい構造になり,より精度の高い計測結果を得ることが可能になった.

これにより、中詰め材の透気性を標準的に評価する指標を確立し、各種成分の中詰め材に対して、適正な透気 性を有するか否かを標準的な指標を基にして迅速に確認することができた.

なお,前述の説明では,図示の透気性確認試験装置1を用いた試験方法の例を説明したが,今回の実施形態に 係る透気性確認試験方法は,図示のような透気性確認試験装置1を用いた場合と同等の圧力(h)と流量(Q) が計測できれば,このような装置を用いなくても実施することができる.

#### 5. 終わりに

今回実施した形態に係る透気性確認試験方法を採用することで、ガス導管をトンネル内に配管する際に使用する 中詰め材について、各種の成分の中詰め材に対して通気性を精度良く且つ高い再現性で評価することができた.こ れによって、中詰め材の品質を均一化することができ、その結果、配管後の気密試験において、保持時間を正確に 且つ低コストで確定することができ、万が一配管からガス漏洩が発生した場合でも、ガスの検知を効率的に行うこ とが可能になった.これにより、トンネル内配管の中詰め工法における標準化した性能評価方法を確立することが できた.

**謝辞:本プロジェクト**においては、当社として経験の無い長距離・大深度トンネルであるがために、厳格な仕様設 定・施工品質管理をおこなったが、中詰め材の開発・選定から今回取り上げた品質・性能評価試験、施工にいたる まで、ご指導ご協力いただいた関係者諸氏に御礼申しあげる.

## 参考文献

1) 木原晃司, 矢口岳彦, 木田博光, 上原啓史:都市部における長距離大深度高圧ガス輸送幹線の建設, 地下空間シンポジウム 論文・報告集, Vol. 13, pp. 271-276, 2008.1

2) 木原晃司,木田博光,大野俊夫,坂本真,渡邊有寿:エアモルタルによる最長 6.3km のガス幹線シールド中詰め材料の開発 と施工,トンネル工学会報告集, Vol. 18, pp. 205-209, 2008.11