

北海道北見市ガス漏れ事故原因技術調査

最終報告書

平成19年6月

高圧ガス保安協会

「北海道北見市ガス漏れ事故原因技術調査 最終報告書」

目 次

1 . 序	1
1.1 はじめに	1
1.2 委員会等の構成	1
1.3 委員会等の経緯	2
2 . 事故概要等	3
2.1 発生日時	3
2.2 発生場所	3
2.3 被害状況	3
2.4 事故概要	3
3 . ガス導管の破壊に関する調査	5
3.1 ガス導管の破壊状態	5
3.2 破面の概略の観察	6
3.3 破面の SEM 観察	8
3.4 春光町においてガス漏れがあったその他のガス導管（鋼管）の損傷状態	10
4 . 地盤に関する調査	11
4.1 北見市全体の地盤状況	11
4.2 事故現場周辺の地盤状況	12
4.3 北見市春光町における地盤の特殊性	18
4.4 北見市春光町の地盤状況とガス導管の埋設状況の調査	22
5 . ガス導管破断のメカニズム	29
5.1 春光町の地盤の挙動	29
5.2 春光町管の変形と応力	32
5.3 推定される春光町管の破断の経過と要因	33
5.4 幸町管及び常盤町管の破損の経過と要因の推定	34
6 . 漏えいガスの挙動に関する調査	37
6.1 地盤中の漏えいガスの透過特性の測定	37
6.2 推定漏えい量	37
6.3 推定される漏えいガスの住宅への侵入経路	38
6.4 ガスの到達時間の推定	40
7 . 付臭剤の土中吸着に関する調査	42
7.1 北見市における付臭剤	42
7.2 文献による付臭剤の土壌吸着性	42
7.3 北見市春光町における付臭剤の吸着検討	43
8 . まとめ	44
8.1 まとめ	44
8.2 おわりに	46

1 . 序

1.1 はじめに

平成 19 年 1 月 19 日（金）午後 12 時 45 分ごろ北海道北見市春光町 7 丁目付近で埋設してあったガス導管（材料：ねずみ鋳鉄）の破断に起因するガス漏れ事故が確認された。当該ガスは、液化石油ガスを改質したもので一酸化炭素（CO）を含んでいたため、近隣の住宅に漏れたガスが侵入したことにより居住者 3 名が死亡に至り、11 名が一酸化炭素中毒で病院に搬送された。

また、これを契機に北見市内のガス漏れ点検を実施したところ、同じ材料のガス導管に亀裂が発生しているものが 2 箇所、さらに、鋼管継手の亀裂、管の腐食等を起因とするガス漏れ箇所も確認された。

このガス漏れ事故は、埋設されているガス導管が突然破断しており、現存する他地域における同じ材料（ねずみ鋳鉄）のガス導管に対する保安管理に影響を及ぼす可能性があるため、経済産業省原子力安全・保安院は、高圧ガス保安協会（KHK）に「北海道北見市ガス漏れ事故原因技術調査委員会」を設置し、当該ガス漏れ事故の原因究明等を要請した。

同委員会は、人的被害をもたらした北見市春光町付近におけるガス漏れ事故を中心にガス導管が亀裂及び破断に至った原因を検討し、本年 4 月に中間報告をまとめ、経済産業省に報告したところである。同報告書では、今後の課題として、地盤沈下の要因特定、ガス流入メカニズムの特定及び付臭剤の土壌吸着が取り上げられている。また、同じ材料で亀裂のあったガス導管の原因の更なる調査も必要となっていた。

本最終報告は、これら課題及び追加調査に対する検討を行い、その結果を取りまとめたものである。

1.2 委員会等の構成

(1) 委員会

KHK に設置した「北海道北見市ガス漏れ事故原因技術調査委員会」（以下「委員会」という。）の委員構成は次のとおりである。

	名 前	所 属 ・ 役 職	(五十音順)
委員長	片山 恒雄	東京電機大学 未来科学部建築学科 教授	
委 員	木村 克己	独立行政法人産業技術総合研究所 地質情報研究部門	主幹研究員
〃	小池 武	武蔵工業大学 工学部都市基礎工学科 教授	
〃	小林 英男	横浜国立大学 安心・安全の科学研究教育センター 教授	
〃	鈴木 輝之	北見工業大学 工学部土木開発工学科 教授	
〃	鈴木 隆之	独立行政法人産業技術総合研究所 先進製造プロセス研究部門 機能・構造診断研究グループ長	
〃	鈴木 信久	J F E 技研株式会社 主席研究員	

- ” 中島 耀二 株式会社セテック 技術部長
- ” 野口 徹 北海道大学 工学研究科機械宇宙工学専攻 教授
- ” 森本 巖 基礎地盤コンサルタンツ株式会社 地震防災センター 部長
- ” 安田 進 東京電機大学 理工学部理工学科創造工学系 教授

主管官庁 経済産業省 原子力安全・保安院 ガス安全課

事務局 高圧ガス保安協会

(2) 分科会

亀裂メカニズム検証分科会

ガス導管の破断原因を検証することを目的に設け、委員構成は次のとおりである。

- | | 名 前 | 所 属 | ・ 役 職 | (五十音順) |
|-----|-------|--------------|---------------|--------|
| 主 査 | 野口 徹 | 北海道大学 | 工学研究科機械宇宙工学専攻 | 教授 |
| 委 員 | 鈴木 輝之 | 北見工業大学 | 工学部土木開発工学科 | 教授 |
| ” | 鈴木 信久 | J F E 技研株式会社 | 主席研究員 | |

ガス流入メカニズム検証分科会

破断したガス導管から土中のガス拡散状態を検証することを目的に設け、委員構成は次のとおりである。

- | | 名 前 | 所 属 | ・ 役 職 | (五十音順) |
|-----|-------|-----------------|---------------|--------|
| 委 員 | 鈴木 輝之 | 北見工業大学 | 工学部土木開発工学科 | 教授 |
| ” | 中島 耀二 | 株式会社セテック | 技術部長 | |
| ” | 森本 巖 | 基礎地盤コンサルタンツ株式会社 | 地震防災センター | 部長 |
| ” | 安田 進 | 東京電機大学 | 理工学部理工学科創造工学系 | 教授 |

1.3 委員会等の経緯

(1) 委員会

- 第1回 平成19年2月17日 事故内容確認、原因調査の進め方
- 第2回 平成19年3月10日 亀裂及び流入に関するメカニズムの検討
- 第3回 平成19年3月24日 事故原因の中間まとめ
- 第4回 平成19年6月27日 事故原因の最終まとめ

(2) 分科会(合同)

- 第1回 平成19年3月3日・4日 現地調査、亀裂及び流入に関するメカニズムの検討
- 第2回 平成19年6月9日 亀裂及び流入に関するメカニズムの追加検討

2. 事故概要等

2.1 発生日時

平成 19 年 1 月 19 日（金） 12 時 45 分ごろ
（当該発生日時は、警察への通報日時をいう。）

2.2 発生場所

北海道北見市春光町 7 丁目付近

2.3 被害状況

（1）人的被害等

死者 3 名（男性 2 名、女性 1 名）

死者の死亡推定時刻は、北海道警察からの情報によると 1 月 18 日未明ごろ

負傷者 11 名（CO 中毒による症状）

なお、現場周辺の住民に対し、北見市から 1 月 19 日に避難勧告が出され、最大 77 世帯、178 名が近くの小学校に避難した。（2 月 7 日の避難解除段階では、13 世帯、27 名が避難をしていた。）

（2）物的被害

なし

2.4 事故概要

（1）北見市春光町のガス漏れ

平成 19 年 1 月 19 日（金）午後 12 時 45 分ごろ、D 宅の住民から警察に「ガス臭く頭が痛い」との通報があり、警察から北海道ガス(株)に対し連絡を行った。

連絡を受けた北海道ガス(株)は、現地を調査したところ、D 宅の他に周辺の 2 戸（B 宅、C 宅）の住宅内からもガスを検知し、かつ当該宅から応答がなかったため、同社は消防当局へ警戒出動を要請し、当局が調査した結果、周辺の住宅も含め、室内で倒れている被害者を発見した。（最終的には、3 戸で死者 3 名、11 名が中毒により病院へ搬送さ



図 2.4.1 北見市春光町付近の人的被害の状況

れた。)(図 2.4.1 参照)

また、消防当局が二次災害を防止するために交通規制及び近隣住民への避難勧告を実施した。

ガス漏れ箇所を調査したところ、被害者宅の前面道路に埋設されているガス導管(ねずみ鉄管、口径 150mm、昭和 42 年埋設)が全周にわたり破断しており、ここからガスが漏れていることを確認した。

(2) 他の場所におけるガス漏れ

北見市春光町におけるガス漏れ事故を受け、経済産業省は、1 月 19 日に北海道ガス(株)に対し、他のガス導管にガス漏れ箇所がないか測定し、徹底的に確認すること等を指示したところ、1 月 31 日までに 34 地点、37 箇所(北見市春光町のガス漏れ箇所を含む。)が確認された。この内訳は、ねずみ鉄管の破壊(破断と亀裂)による漏えい箇所が 4 箇所、ねずみ鉄管の継手部の緩み等による漏えい箇所が 2 箇所、ダクタイル鉄管の継手部の緩み、腐食等による漏えい箇所が 7 箇所、白管等の継手の緩み、腐食、割れ等による漏えい箇所が 22 箇所、その他の接続部分で 2 箇所であった。

(3) 北見市春光町以外でガス漏れのあったガス導管(ねずみ鉄管)の埋設時期

北見市幸町 昭和 31 年(1956 年)

北見市常盤町 昭和 36 年(1961 年)

3 . ガス導管の破壊に関する調査

本章では、春光町7丁目にて破断したガス導管（口径 150mm のねずみ鋳鉄管、以下「春光町管」という。）幸町にて亀裂状態で採取されたガス導管（口径 150mm のねずみ鋳鉄管、以下「幸町管」という。）及び常盤町にて亀裂状態で採取されたガス導管（口径 100mm のねずみ鋳鉄管、以下「常盤町管」という。）の3本について、破壊（破断と亀裂）状態の調査結果を述べる。

なお、ガス導管の金属組織と機械的性質の調査も実施したが、調査結果で特に異常は認められなかった。

3.1 ガス導管の破壊状態

(1) 春光町管

春光町管の事故発生場所における発掘後の破断状態を写真 3.1.1 に示す。



(a) 外観

(b) 側面

写真 3.1.1 春光町管の破断状態

管の破断状態の特徴は、次のとおりである。

- ・管は、上側を引張りとする曲げモーメントによって、脆性的に破断している。
- ・破面は、ほぼ一様な鈍灰色で、顕著な腐食の形跡はなく、目視で確認できる材料欠陥もない。
- ・検分時には、破断箇所の南側（写真 3.1.1 の右側）の管を下から支持しながら発掘した状態であったが、南側の管が下がり、相対的に 23mm の食い違いがあった。支持を取り除いた状態では、南側の管がさらに下がり、食い違いは 46mm となった。
- ・この食い違いは、発掘で管が露出した時点では顕著でなかったが、管の周囲の発掘に伴い進行した。

(2) 幸町管

幸町管の発掘後の亀裂状態を写真 3.1.2 に示す。



(a) 外観



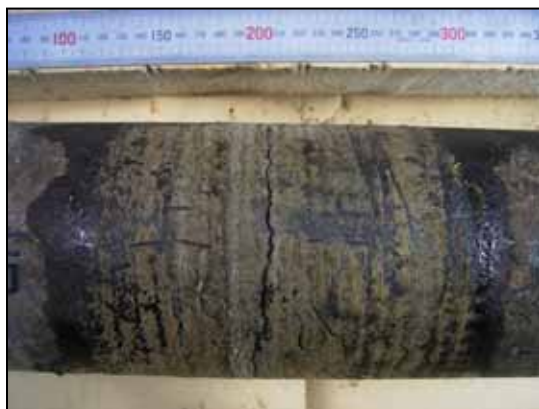
(b) 上面

写真 3.1.2 幸町管の亀裂状態

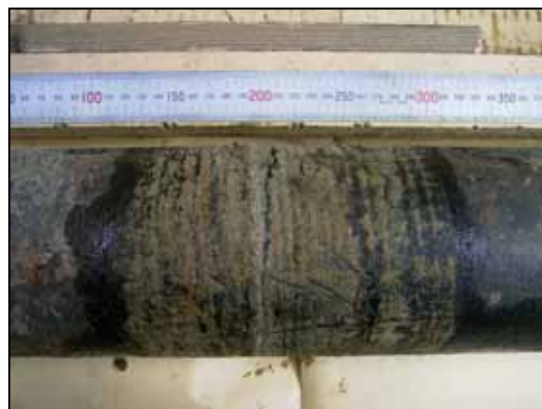
管は、下側の一部を残してほぼ全周に亀裂が伝播している。管の上側では亀裂は開口しており、亀裂は上側から下側へ周方向に伝播した。亀裂の一部はジグザグの経路で伝播しているが、一部は直線状である。

(3) 常盤町管

常盤町管の発掘後の亀裂状態を写真 3.1.3 に示す。



(a) 側面



(b) 上面

写真 3.1.3 常盤町管の亀裂状態

管は、下側の一部を残してほぼ全周に亀裂が伝播している。管の上側では亀裂が開口している。亀裂はジグザグの経路で伝播している。

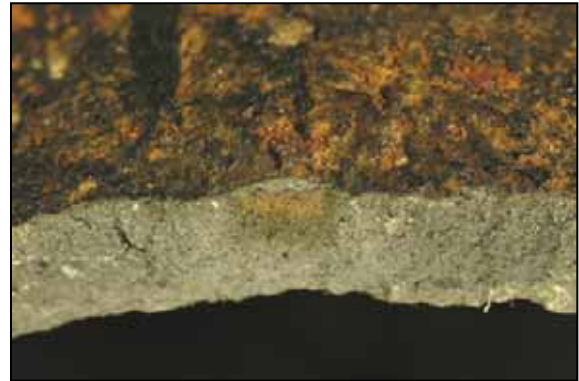
3.2 破面の概略の観察

(1) 春光町管

春光町管の巨視破面を写真 3.2.1 に示す。



(a) 全体



(b) 上側酸化着色部

写真 3.2.1 春光町管の巨視破面

破面の上側に、長さ約 7 mm、深さ約 5 mm の半楕円形状の薄い酸化着色の部分がある。酸化着色部は管外面の錆肌、酸化物層の縁に沿って生じている。したがって、酸化着色部は、破断前に発生していた疲労亀裂であると判断される。

(2) 幸町管

幸町管は破断状態でなかったことから、強制的に切り離し、その後の破面の巨視破面を写真 3.2.2 に示す。



(a) 全体



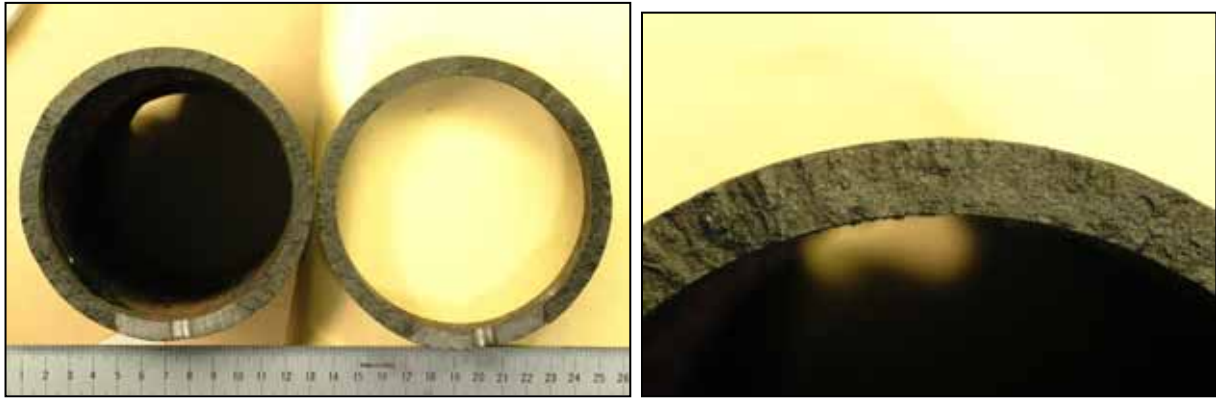
(b) 上側酸化着色部

写真 3.2.2 幸町管の巨視破面

強制破断前の亀裂は下側約 70mm を残してほぼ全周に伝播している。破面の上側に管外面を起点として複数の酸化着色部分があり、一部は管内面に達している。酸化着色部は、強制破断前に発生していた疲労亀裂と判断される。疲労亀裂は、破面の下側にも発生している。疲労亀裂部分の合計は、周方向長さ 100 mm 以上である。亀裂の一部は分岐している。

(3) 常盤町管

常盤町管の巨視破面を写真 3.2.3 に示す。



(a) 全体

(b) 上側

写真 3.2.3 常盤町管の巨視破面

管は、下側約 40mm を残し、ほぼ全周に亀裂が伝播した状態である。破面は全面が黒色を呈し、亀裂が発生してから相当の期間が経過したことがわかる。したがって、疲労破面と判断される。

3.3 破面の SEM 観察

破面上側（亀裂の起点部）及び横側（9 時側、亀裂の伝播部）から幅約 40mm の試料を採取し、SEM（走査型電子顕微鏡）観察を行った。

観察のポイントは、（1）疲労の特徴の有無、（2）脆性破壊への移行、（3）亀裂伝播部の破壊メカニズムである。

（1）春光町管

春光町管の SEM 観察例を写真 3.3.1 及び写真 3.3.2 に示す。観察結果をまとめると、次のようになる。

- （a）破面上側の外周に沿って長さ約 25 mm、深さ約 1mm に疲労の特徴を示す小破面（疲労ファセット）が多く見られた。特に、酸化着色部では深さ約 3 mm においても疲労小破面が見られた。すなわち、巨視破面の調査で示した薄い酸化着色部（長さ約 7mm、深さ約 5mm）が疲労亀裂であり、破断の起点となったことが特定できた。
- （b）上記の疲労亀裂の部分の外側では、へき開の小破面（へき開ファセット）が多く見られた。これは、疲労亀裂の伝播速度が急増して、管が脆性的に破断したことを示している。
- （c）破面の横側では、ディンプル模様を示す延性破面に多くのへき開小破面が混在し、亀裂伝播が急速であったことを示している。

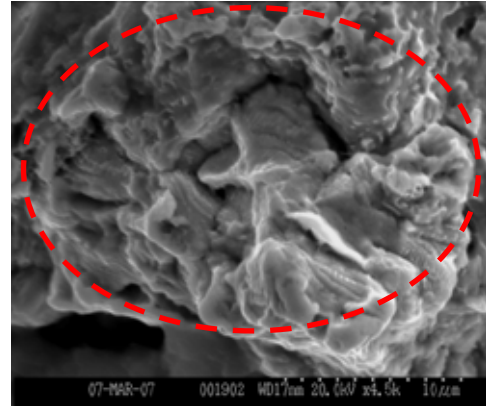
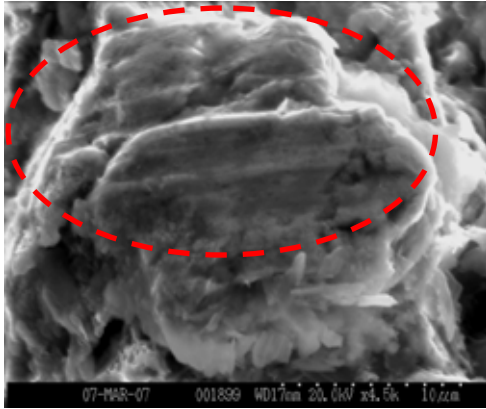
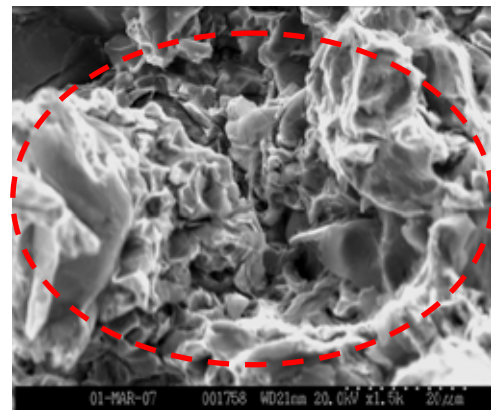
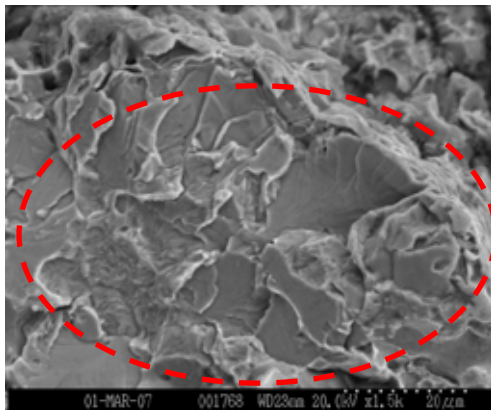


写真 3.3.1 春光町管上側で観察された疲労小破面



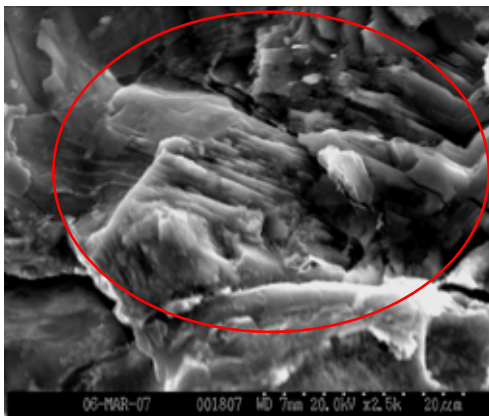
(a) へき開小破面

(b) 延性破面

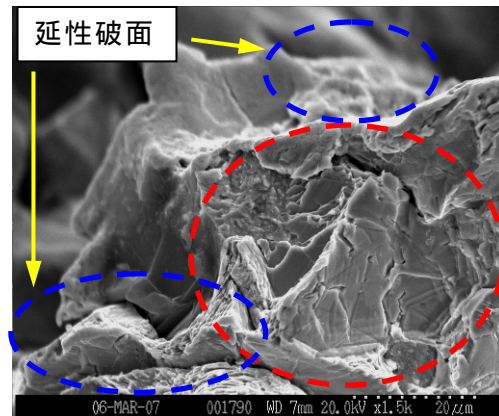
写真 3.3.2 春光町管横側で観察された (a) へき開小破面と (b) 延性破面

(2) 幸町管

幸町管のSEM観察例を写真3.3.3に示す。破面全体に多くの疲労小破面が見られた。亀裂伝播部は、延性破面と一部にへき開小破面が混在している。



(a) 疲労小破面

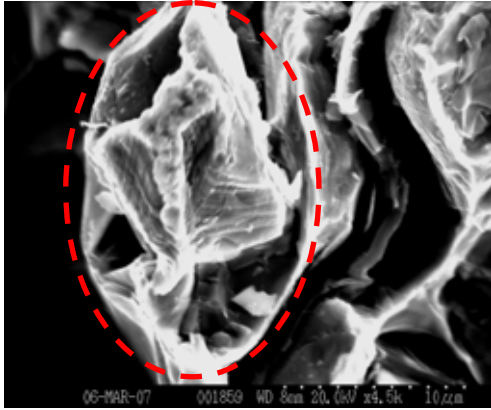


(b) 延性破面とへき開小破面

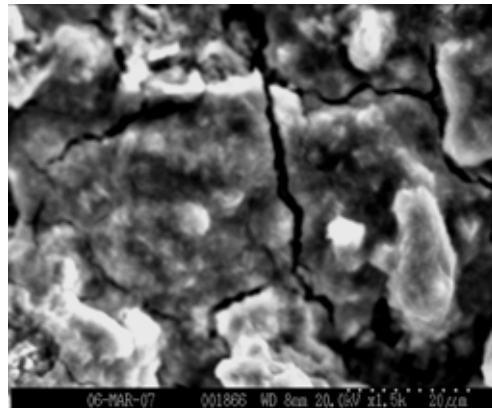
写真 3.3.3 幸町管の SEM 観察例

(3) 常盤町管

常盤町管のSEM観察例を写真3.3.4に示す。破面は、全体にわたって酸化物で覆われた部分がある。また、多くの疲労小破面が見られた。亀裂伝播部は主として延性破面で、へき開小破面が混在している。



(a) 疲労小破面



(b) 酸化物の付着

写真 3.3.4 常盤町管のSEM観察例

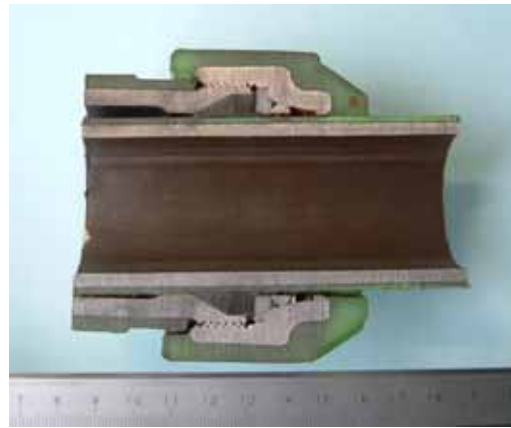
3.4 春光町においてガス漏れがあったその他のガス導管（鋼管）の損傷状態

北見市内では、鋳鉄管以外に鋼製の枝管及び供給管の継手の部分でもガス漏れが検出された。したがって、春光町の事故発生場所付近の住宅の鋼管について、損傷の有無を調査した。

ガス漏れが認められた例を写真3.4.1に示す。写真の(a)がエルボの断面、(b)が継手の断面である。



(a) エルボの断面



(b) 継手の断面

写真 3.4.1 ガス漏れが認められた鋼管の継手の例

(a)のエルボでは、テーパねじ部の塑性変形は見られるが、亀裂は生じていない。(b)の継手では、鋼管及び継手本体に亀裂、孔などの損傷はない。ガス漏れはいずれも樹脂製のパッキンとシール部の密着不良によるものと判断できる。

以上のとおり、鋼管の損傷状態は、大量のガス漏れにつながるものではなく、春光町における事故は、ねずみ鋳鉄管の破断によるガス漏れで発生したものと判断できる。

4 . 地盤に関する調査

本章では、北見市全体と北見市春光町における地盤状況の調査結果について述べる。

4.1 北見市全体の地盤状況

北見市中心部の地形区分を図 4.1.1 に示す。北見市中心部は、南側を流れる常呂川とそれに合流する無加川の後背低地に沿って、4 つの段丘と最上段の丘陵斜面で構成されている。図中に、ガス導管の破壊が発生した春光町、幸町及び常盤町の現場を示す。また、以下に各々の場所の地形的な特徴を示す。

春光町：常呂川の氾濫域である後背低地に位置しており、厚さ 3～5m の緩い砂れき層の下に凝灰岩（シルト岩）の基層が形成されている。

幸町：北見市内では最上段の丘陵斜面に位置し、厚さ 7m 程度の火山灰（N 値 = 10 程度）の下に締まった砂れき層が基層を形成している。

常盤町：良く締まった砂れき層からなる段丘面に位置している。

以上のように、ガス導管の破壊が発生した 3 箇所は、地形的にはそれぞれ異なる場所である。

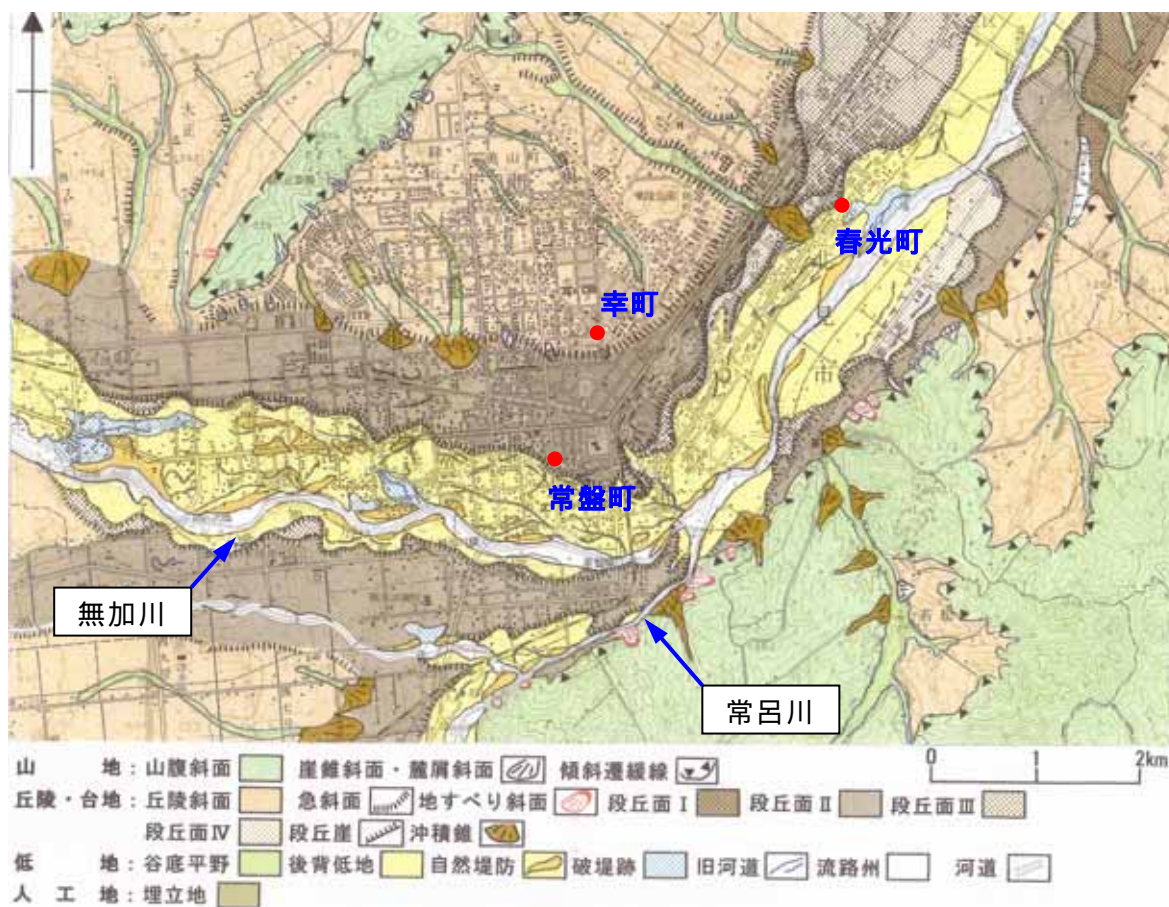


図 4.1.1 北見市中心部の地形区分

4.2 事故現場周辺の地盤状況

(1) 北見市春光町

地表面積雪及び結氷状況

北見市春光町で事故が発生した場所に沿った道路（南大通り）は、過去の同時期であれば車道及び歩道ともに常に除雪している。（今冬は、昨年12月末及び1月上旬の2回除雪作業を実施している。）しかしながら、事故発生当時は、1月7日から8日にかけて気温が上昇し、この時期には珍しく降雨があり、その後に雪に変わっている。さらに気温の低下に伴って水分を多く含んだ雪が氷の層を形成し、歩道、車道を含め路面上は不陸の大きい厚い氷の層に覆われた状態になった(写真4.2.1)。

当時のように一時的に雨が降りそれが凍結した場合には、表面の通気性が悪くなることと、除排雪作業時に氷の層を強制的に排除する際、地面の振動が大きくなることの2点が指摘される。



(a) ガス導管破断現場付近（北方向）



(b) 事故発生当時のガス導管破断現場
写真 4.2.1 事故発生当時の現場

雪氷の融解時及び地盤の融解時の状況

2月18日における南大通ガス管破断現場付近の路面状態の写真 4.2.2 に示す。事故当時、路面上は圧雪状態であったが、この時期になると日中の気温の上昇によって雪は融解し、夜間の気温の低下で凍結することが繰り返され、路面にはこぶ状の氷が現れる。このような路面上を排雪のための大型車両が通過すると非常に大きな振動が発生する。

次に、地盤内凍結が融解した時期の事故現場付近の状況を写真 4.2.3 に示す。同写真は降雨後のもので、歩道面上にいくつかの水溜まりが確認でき、ガス管破断位置の近くに複数の凹凸が観察される。



写真 4.2.2 雪氷融解時に南大通で見られたこぶ状氷



写真 4.2.3 地盤融解時における春光町管破損現場

備考)上写真中、破断位置付近の舗装面において新しい補修跡は、事故調査のために掘削した跡である。

地表面の地盤変状の観察

破断箇所近傍における路面の変状を確認するため、路面上の雪氷が融解する3月から地中の凍土が完全に融解する5月下旬にかけて、管破断位置周辺の路面変状観察を行った。

平成19年6月におけるガス道管の破断位置付近の状況を写真4.2.4に示す。歩道、車道ともにその表面には、ガス導管のガス漏れ調査に係る工事、雨水柵の取り付け工事等による切断跡が見られる。一方で、工事跡とは別に路面上にクラック（割れ目）が2本確認された。これらのクラックは、中圧のガス導管が歩道下に埋設された1982年の工事後の路面に現れていること、及び下水管が車道下に埋設された2005年の部分（道路センター付近）に現れていないことから、1982年から2005年の間に形成されたものであると推定される。（写真4.2.5）

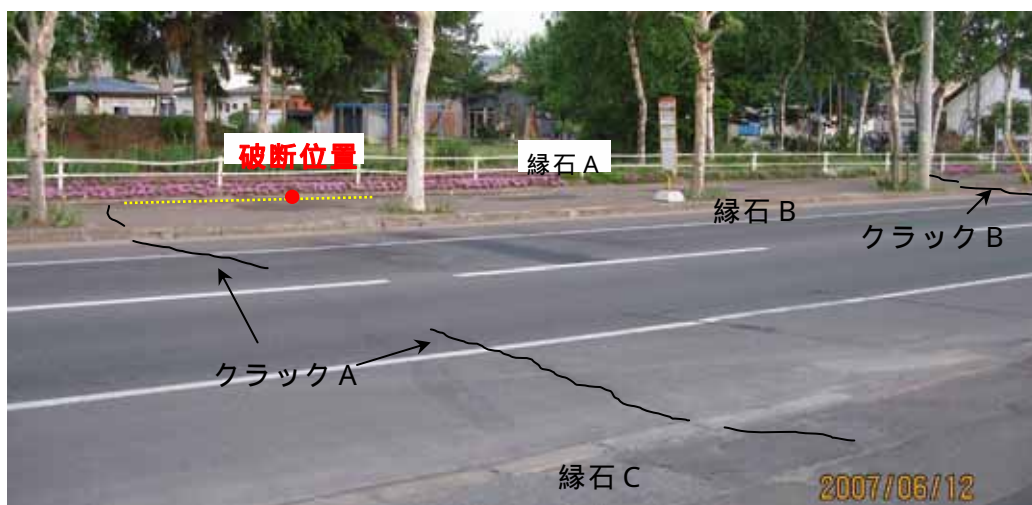


写真 4.2.4 破損現場周辺



(a) クラック A



(b) クラック B

写真 4.2.5 路面クラック

(2) 北見市幸町

北見市幸町のガス導管に破損が確認された現場付近の状況を写真4.2.6に示す。同写真のうち、(a)は発生当時で、(b)は路面上の雪の融解時である。破損したガス導管の

位置は、北見駅前に通じる中央通りと学園通りの交差点付近であるが、ガス導管は分岐によって学園通りに沿ったり、中央通りを直交したりするなど、複数敷設されている。写真 4.2.6(b)に示したが、左右方向に延びる学園通りの横断歩道中にクラックが発生し、それに沿う沈下が認められる。このクラックと沈下は、下り坂になっている左方向への路面のわずかな移動及びガス導管への軸力の発生を示唆している。



(a) 冬期

(b) 融解期

写真 4.2.6 幸町管破損現場

(3) 北見市常盤町

北見市常盤町のガス導管に破損が確認された現場付近の状況を写真 4.2.7 に示す。同写真のうち、(a)は発生当時で、(b)は路面上の雪の融解時である。破損したガス導管は、北見市の幹線道路の1つである緑園通りを横断する形で敷設されている。写真 4.2.7(b)から、ガス道管が通る道路と横断する緑園通りの交差点付近（同写真中の X と記した付近）は、水溜まりがあることから沈下していることが確認できる。また、現地調査によって路面上にクラックの発生も確認した。



(a) 冬期

(b) 融解期

写真 4.2.7 常盤町管破損現場

(4) 地盤の凍結状況

地盤の凍結深度は、寒さ(積算寒度)、積雪状況、土の含水比などによって変化する。参考のため、事故発生場所から約 1km 離れた北見工業大学構内で行われている地盤凍

結・凍上観測のデータを図 4.2.1 に示す。

同図から 1 月 20 日頃の凍結深度は、土の種類によって 40～60cm であった。これは、高含水比のシルト - 粘土質地盤で、地表面を常に除雪した状態で得られた測定結果である。一般的に春光町のような低含水比の砂れき地盤では、高含水比の粘性土地盤に比べて、凍結深度は 1.5 倍程度になる。

事故発生場所における凍結深度は、1 月 19 日から行われたガス漏れ調査のために掘削した土層断面（砂れき層）を直接測定した結果、常時除雪されている車道路面下で約 90cm、除雪している歩道と除雪していない春光めぐみ公園との境界縁石下（管破断位置）で約 50cm であった。

一時的に高い気温となった 1 月 7 日以後、事故が発生した時期を含めた 2 週間程度は、比較的寒い日が続いていた。この間、図 4.2.1 では凍結深度の急増と大きな凍上力が連続的に現れている。

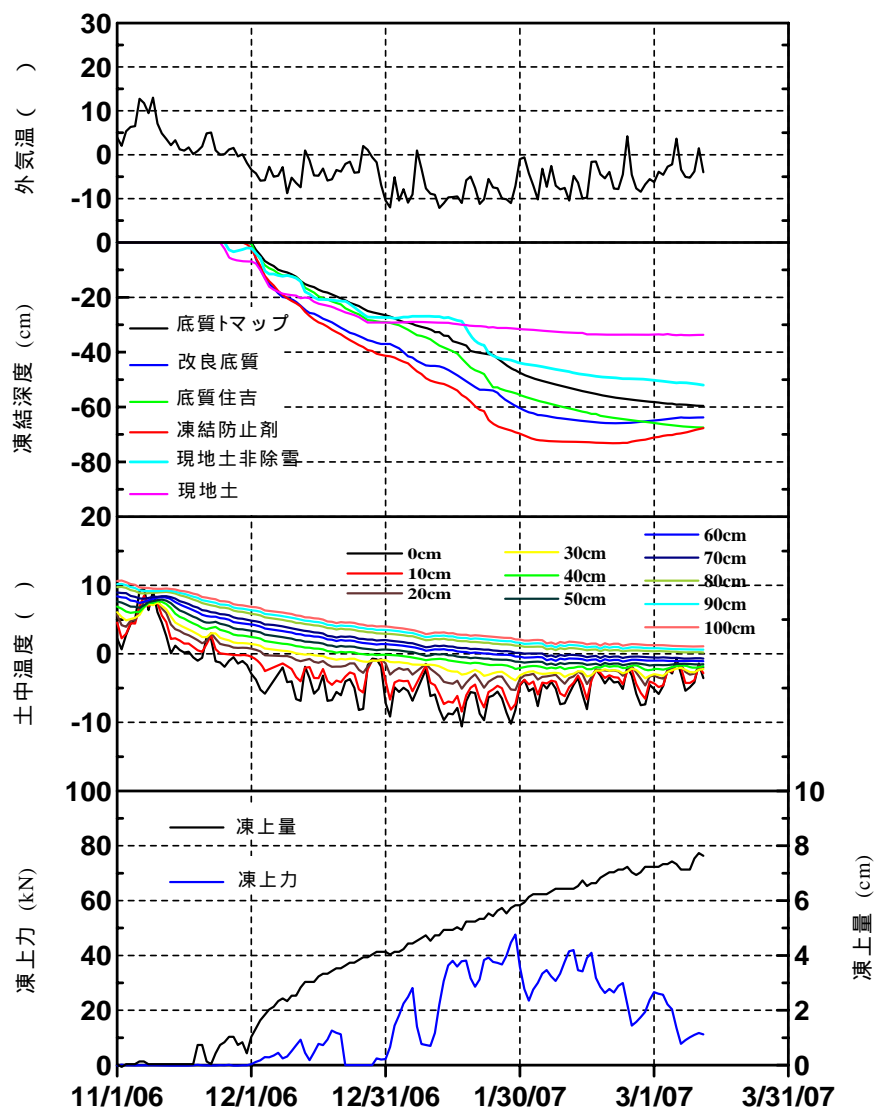


図 4.2.1 北見工業大学構内における事故発生前後の地盤凍結・凍上観測

(5) 地盤の含水比

1 月 20 日から 2 月 1 日にかけて事故発生場所近傍で採取された土（主として砂れ

き)の含水比測定結果を表 4.2.1 に示す。一般に地盤が凍結すると、地盤中の水分は凍土側に強く引きつけられる。その結果、凍土の含水(氷)比は凍結前より高くなり、未凍土側の含水比は低くなる。この傾向は、例えば砂れき層について、表中の試料番号 C と D 又は R と S の比較に現れている。

砂れき層の含水比は、10%以下であるのに対して、砂れき層に少量ながら含まれるシルト質土、及び個人の住宅前の歩道下等に敷かれた火山灰の含水比は 40%を超えるものもあった。

表 4.2.1 事故発生場所付近地盤の含水比(事故発生当時)

採集場所	採取月日	試験日	番号	採取位置	持込重量 (kg)	含水比 (%)	備考
公園前	2007/01/20	2007/01/22	A	公園側	3.07	2.60	採取深さ不詳
			B	住宅側	4.42	4.24	同上
	2007/1/21		C	公園側上	8.30	12.67	管切断箇所上部
			D	公園側下	5.20	5.86	管切断箇所下部
A宅前	2007/01/20		E	上	3.60	3.63	舗装下 10cm 付近
			F	中	10.50	5.14	舗装下 40cm 付近
	2007/01/20		G	下	7.86	7.57	埋め戻し土砂(推定)
			H	上	5.10	5.59	舗装下 10cm 砕石
幸町路上	2007/01/20		I	中	6.20	14.71	舗装下 40cm 付近、凍土
			J	下	4.80	28.14	管埋設位置、地山粘土
A宅着所 (配管屋内側)	2007/01/22	K	上	2.10	8.65	掘削土砂(位置不詳)	
		L	下	1.36	15.60	同上	
春光町 (道路下)	2007/01/22	M	下	3.50	7.30	ガス導管付近下層	
		N	上	2.60	5.24	ガス導管付近上層	
常盤町 緑園通車道下	2007/01/25	O	地表 90cm	1.15	26.45	シルト質土	
		P		1.47	4.31	ガス導管付近	
		Q		0.75	1.53	ガス漏れ管周辺	
		R		0.68	9.48	ガス漏れ箇所上層部	
		S		0.28	4.42	ガス漏れ箇所下層部 1	
		T		0.59	5.90	ガス漏れ箇所アスファルト直下	
B宅前 歩道上	2007/01/25	U		0.90	4.12	ガス漏れ箇所下層部 2	
		1		1.15	41.22	歩道部上層火山灰	
		2		1.85	6.05	歩道部中層(下水管上)	
		3		7.02	10.25	歩道部下層(下水管下)	
春光町 (公園北側)	2007/02/01	4		5.64	6.89	歩道部掘削溝底部	
		5		1.83	4.82	公園側	
		6		1.55	4.58	道路側	
		7		1.31	13.62	公園側(ガス付き)	

(備考) 上表において、採取場所の「A宅」及び「B宅」は、図 2.4.1 で示す住宅位置をいう。

4.3 北見市春光町における地盤の特殊性

(1) 春光町の地盤履歴

1957年(昭和32年)に撮影された春光町の航空写真を写真4.3.1に示す。写真中に示す事故発生場所は、旧河道の縁とガス導管が交差している付近である。

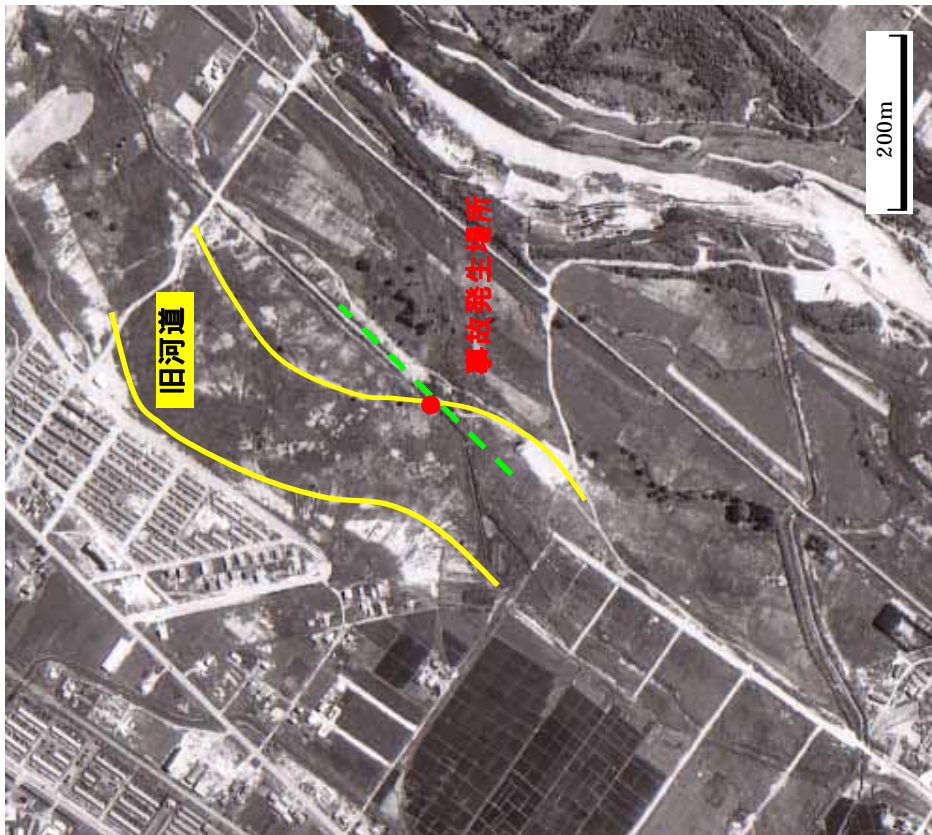
また、写真4.3.2に1965年(昭和40年)と1971年(昭和46年)の春光町の航空写真を示す。事故発生場所付近の南大通りは人工的に開削された農業用排水路であり、現在の春光めぐみ公園が当時は池であった。

さらに、同写真中の南大通りの南西側の住宅地は常呂川の旧河道に相当し、そこでは建設材料とする砂利の採取が盛んに行われていた位置で、当時の砂利採取は目的の粒径のものを掘削し終わった場合、場所を移動しながら実施していると言われている。

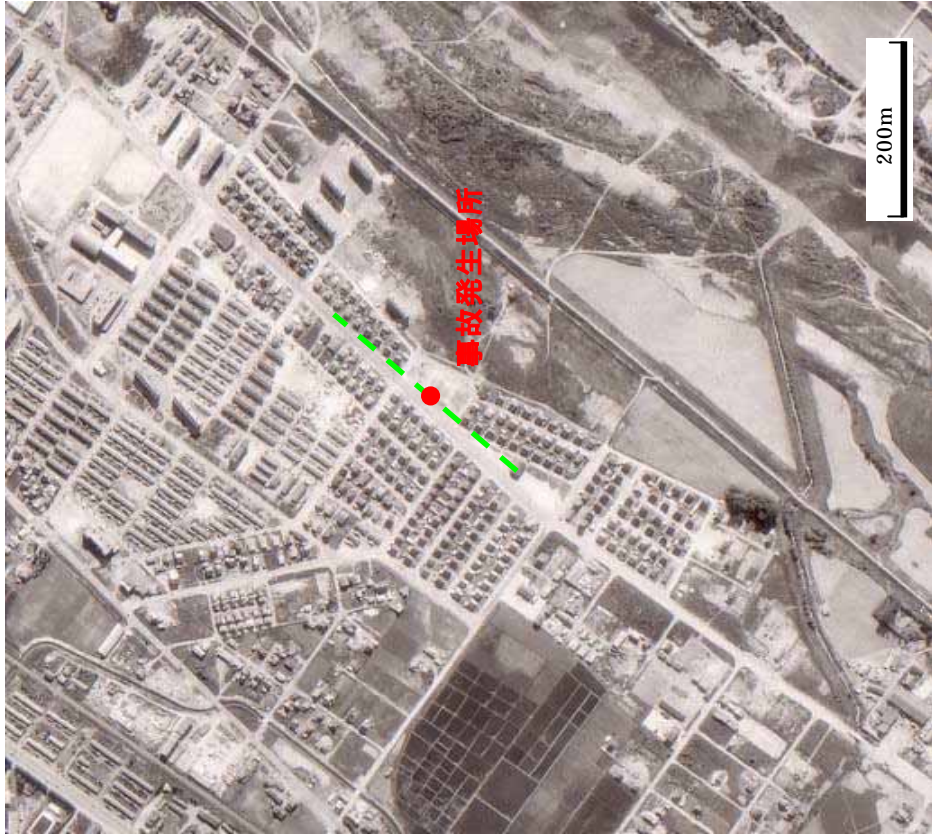
以上のように、春光町の砂れき層は河床堆積物からなる沖積層であり、さらに水路の開削と砂利採取によって乱されており、緩くてかつ不均一になっていたと判断される。



写真 4.3.1 1957年(昭和32年)撮影の航空写真



1965年撮影の航空写真



1971年撮影の航空写真

写真 4.3.2 春光町地区の変移

(2) ガス漏れ調査掘削時の所見

春光町の事故発生場所は、常呂川の旧河道であった後背低地に造成された住宅地である。造成時に施工されたと考えられる厚さ 1m 前後の盛土層と、河床堆積物からなる砂れき層が 3～5m の厚さで堆積し、その下にシルト岩が基層を形成している。

1月19日に事故発生場所において、ガス漏れ位置を特定する春光町管の調査が行われ、掘削工事が実施された。その掘削断面の公園側壁面では、ガス導管破断箇所に向かう斜めの地盤クラックが認められた(写真 4.3.3 参照)。

事故発生場所付近では、他のガス漏れ箇所の補修とガス導管切り替えのための掘削(深さ 1.5m)が 10 箇所以上行われたが、それらの掘削断面では同写真のような地盤クラックは認められなかった。



(a) 地盤クラック全体



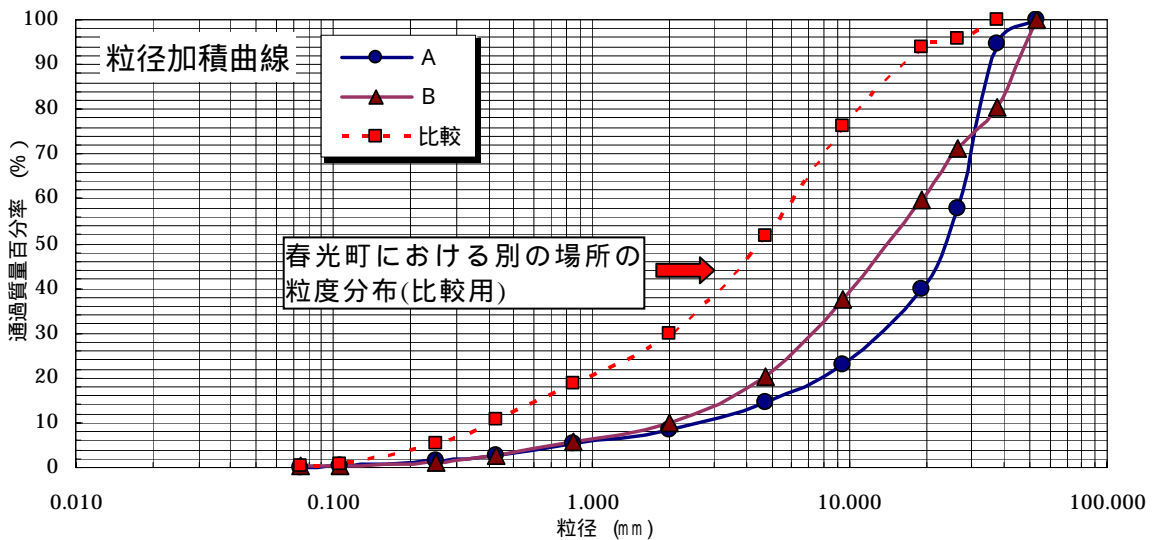
(b) 地盤クラック上部

写真 4.3.3 春光町の事故発生場所の掘削断面に認められた地盤クラック

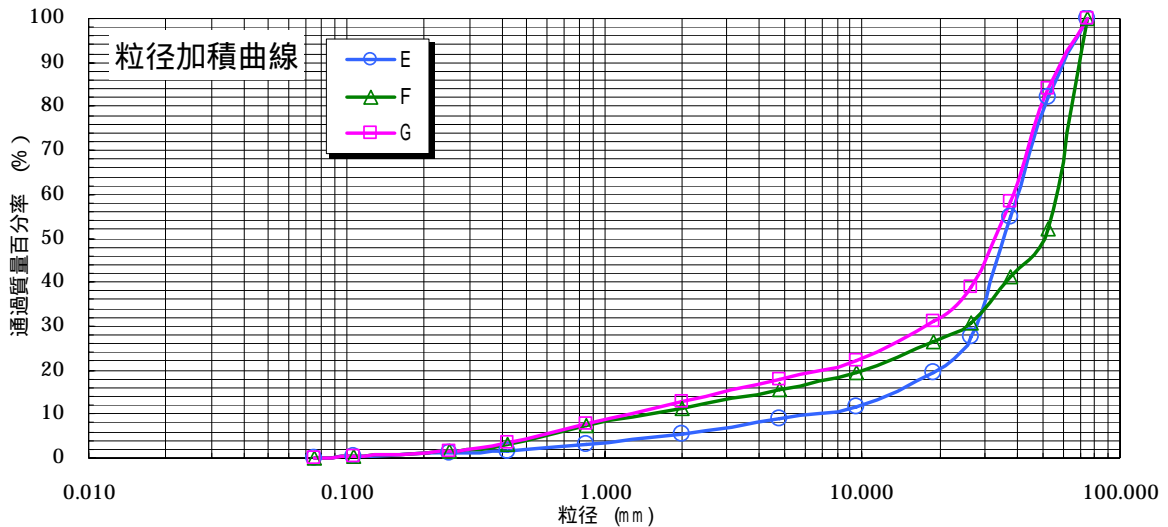
(3) 地山砂れきの粒度

北見市春光町付近の地山砂れき（もともと当地にある砂れきの意）の粒度試験の結果のうち、代表的な例である管破損付近と住宅側の舗装下について図 4.3.1 に示す。写真 4.3.1 のとおり、春光町付近は旧河道に位置しており、そこではコンクリート骨材となる砂利採取が行われていた。この砂利採取において、骨材に適さない粒径の玉石、及びシルト又は粘土に相当する成分は、採取されずに残されたそうである。一般的には粒度は、ほぼ均一に分布されるものであるが、同図に示すとおり当地の粒度は 1~20mm の粒径ものも少なく、連続的な粒度分布になっていない点にも現れている。

このように粒度分布が極端な砂れきは、締まりが悪く、浸透水による細粒分の流失あるいは大きな間隙の形成などをもたらす傾向があり、振動等の条件によっては圧縮沈下をきたす可能性がある。また、圧縮沈下が発生しない状態では、大きな粒子間空隙が現れ、通気性が高くなっている可能性がある。



(a) 破損箇所地山砂れき



(b) 住宅側舗装下地山砂れき

図 4.3.1 地山砂れきの粒度

4.4 北見市春光町の地盤状況とガス導管の埋設状況の調査

春光町におけるガス導管破断の原因とガス拡散過程を検討するために、ガス導管の破断箇所周辺の地盤状況と破断箇所以外のガス導管の埋設状況を詳細に調べる必要がある。

このため、破断箇所近傍の地盤を掘削してガス導管の埋設状況と近傍の地盤を詳細に観察する調査、地表面の地盤変状の観察、破断箇所周辺の詳細な地盤調査を行った。

(1) 破断箇所近傍の地盤掘削調査

破断箇所近傍の地盤掘削調査は委員立会いのもとで、3月3日～4日にかけて行った。写真 4.4.1 に事故発生場所を掘削した状況を示す。掘削した範囲は、ガス導管に沿って破断箇所から南側へ約 7m、北側に約 5m の区間である。この区間を約 1.5m の幅でガス導管の埋設深度まで掘削し、破断箇所以外のガス導管の埋設状況を観察するとともに、ガス導管の埋設深度を測定した。

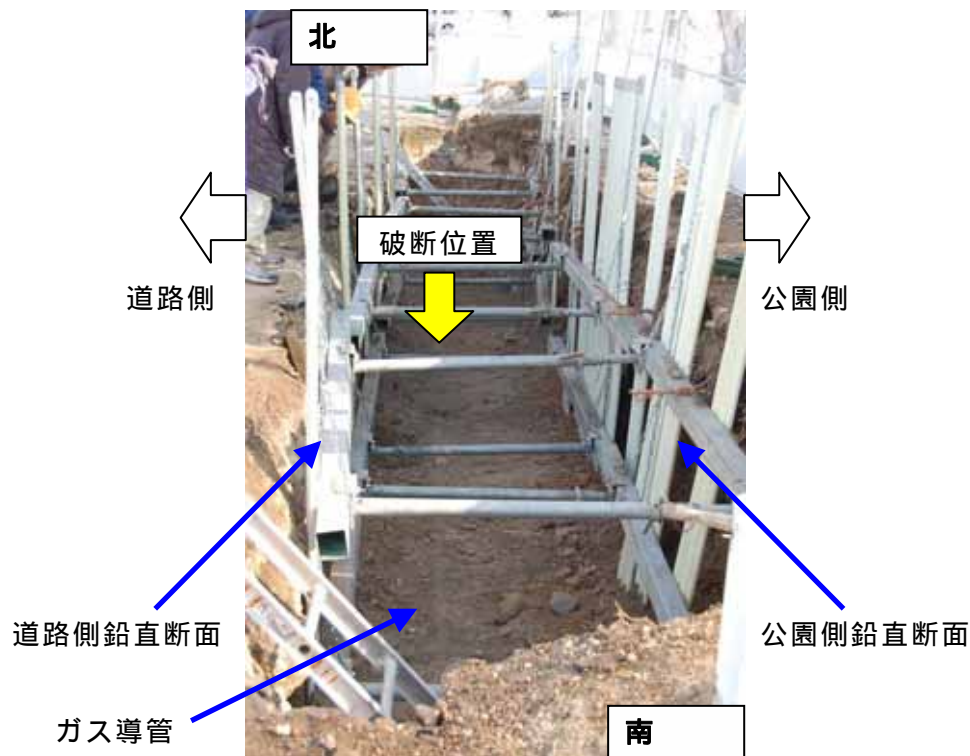
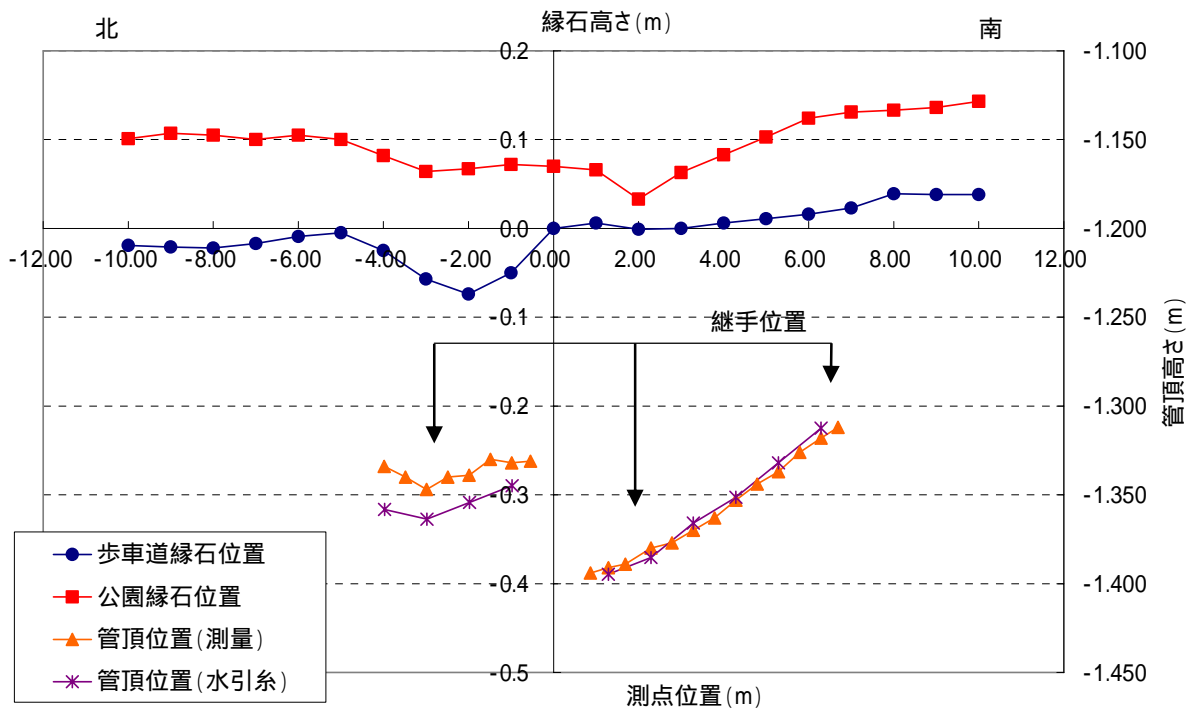


写真 4.4.1 事故発生場所の調査に係る掘削状況

図 4.4.1 に道路側から公園側を見たガス導管の管頂深度等の測定結果を示す。図に示すように、破断箇所では深度に段差があり、北側に比べて南側では 65mm ほど低くなっているが、さらに南側に行くにつれて、北側と同一レベルに戻っている。このように、ガス導管は、破断箇所から南側に約 5m の範囲にわたって本来の埋設深度より相対的に沈下していた。



(備考1) 測点位置及び高さの基準点は、ガス導管破断点の直上点を歩車道縁石に平行移動した位置とした。

2) グラフ中、「管頂位置・水引糸」は、掘削後、公園縁石の両端に水引糸を張り、管頂高さを測定したデータを示す。

図 4.4.1 ガス導管の管頂深度及び縁石の沈下状況

一方、掘削面の地盤として公園側鉛直断面を詳細に観察したところ、表土の下にある小石を多く含む砂れき層がガス導管の埋設深度まで続いていた。また、3月ではあるが地表面から約30cmは凍結していた。そして、破断箇所南側では、写真4.4.2に示すように南から北へ向かって下がる地盤クラックが、不明瞭ではあるが観察された。この方向の地盤クラックは、

4.3項で示したように事故発生直後の掘削時にも破断箇所付近で観察されている。また、その南側でも北から南へ下がる地盤クラックが観察された。さらに、道路側鉛直断面でも同様な地盤クラックが観察された。ただし、公園側鉛直断面に比べて明瞭ではなかった。その他、破断箇所から北側に約3mの位置に下水道管が埋設されており、その近傍の地盤には、約2mの幅で下水道管埋設時の埋戻し部が観察された。埋戻し部の土は搬入土と考えられ、原地盤は小石と細粒土が分離している状態であるのに対し、埋戻し部分は小石と細粒土が均一に混じった状態の土であり、破断箇所よりも締まった状態であった。



写真 4.4.2 掘削調査時に公園側鉛直断面で観察された地盤クラック

(2) 歩車道境界の縁石の凍上量

縁石 B (写真 4.2.4) のレベルと凍上量を図 4.4.2 に示す。同図から、最大凍上量は約 7mm である。一方、縁石 A 及び C でも同程度の凍上が平均的に発生し、局所的には 20～30mm の凍上量も認められる。しかしながら、北見市内では、条件によって道路や歩道において最大凍上量が 50～100mm になることもあり、事故発生場所付近の凍上量は大きいものとはいえない。

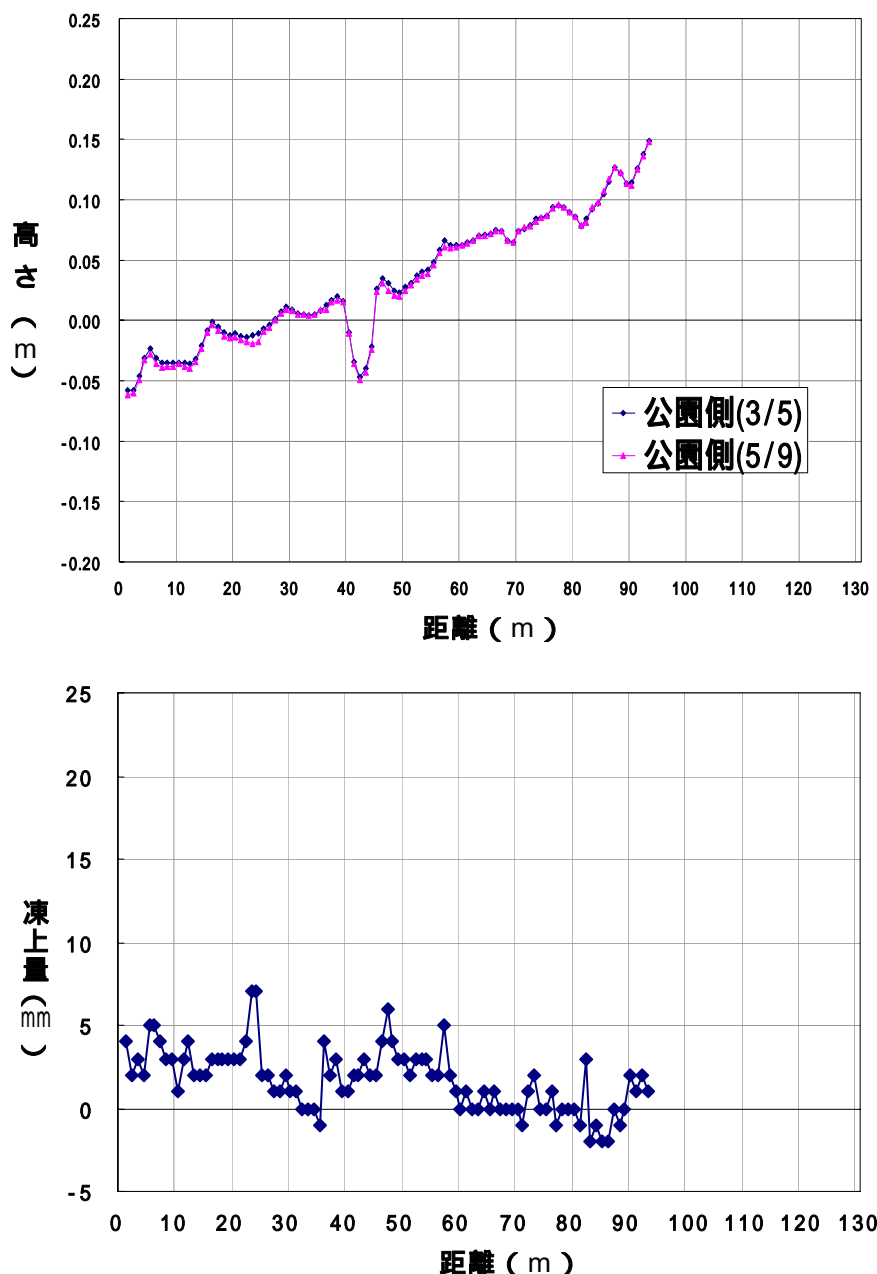


図 4.4.2 縁石 B のレベルと凍上量

(3) 破断箇所周辺の地盤調査

破断箇所周辺の地盤調査として、深さ方向の地層構成などを詳細に調べるためのボーリング、標準貫入試験、孔内载荷試験、密度検層、PS 検層及び路線下の地盤構成

の概略を調べる表面波探査を行った。調査を行った位置を図4.4.3及び図4.4.4に示す。

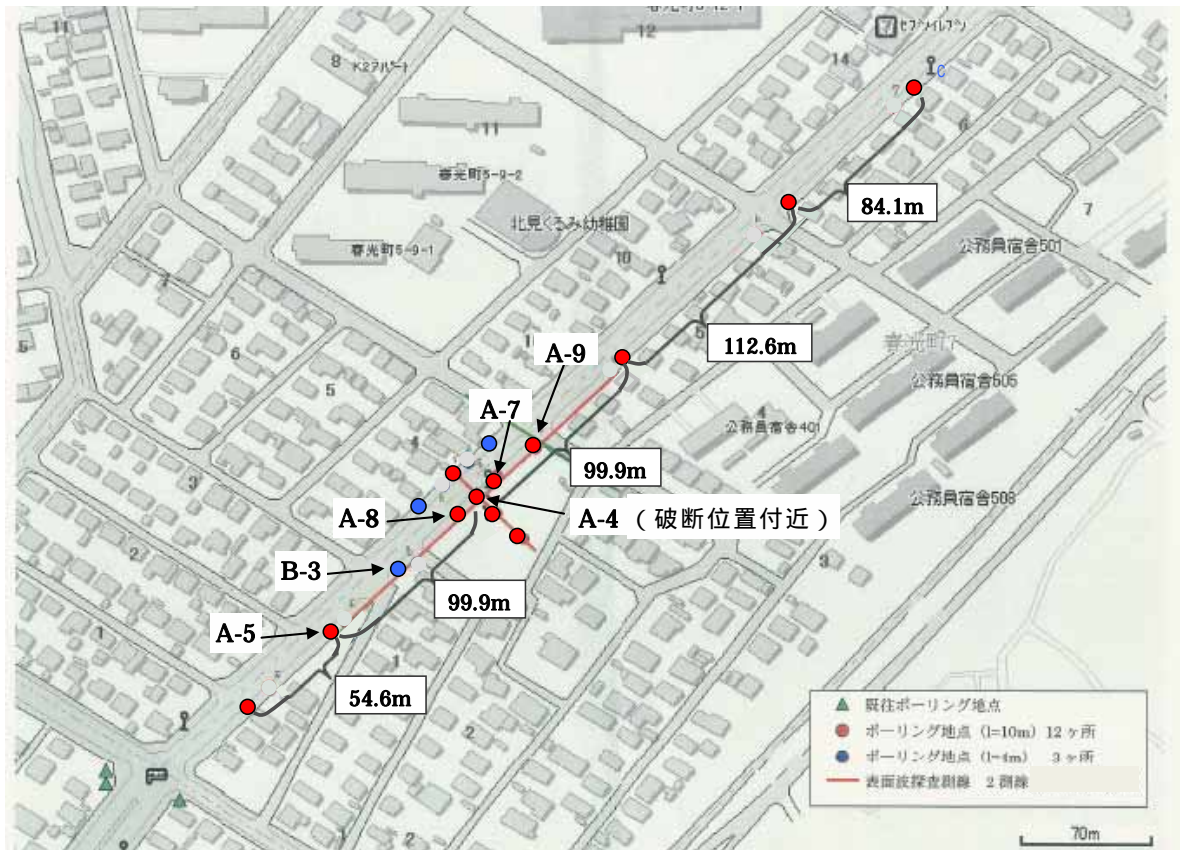


図 4.4.3 地盤調査実施位置

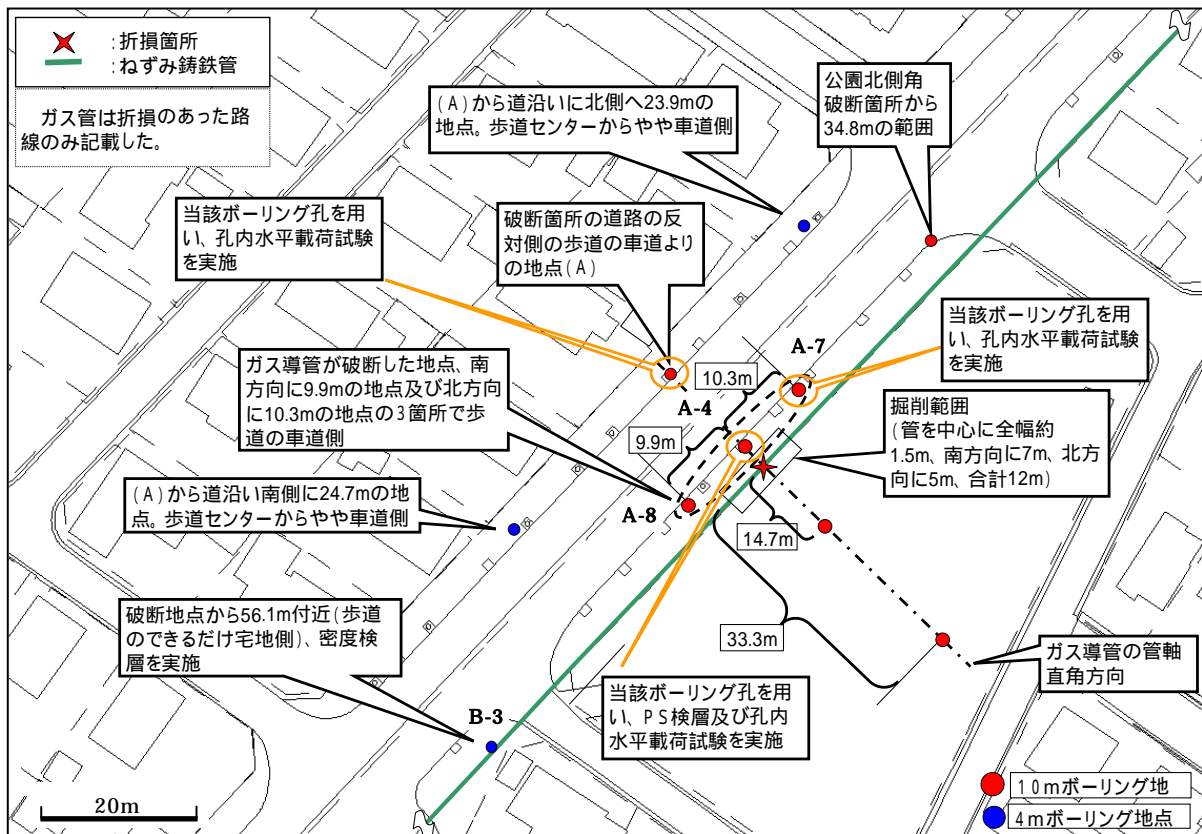


図 4.4.4 地盤調査実施位置 (詳細)

まず、ガス導管に沿って行ったボーリングをもとに描いた推定地層断面図を図 4.4.5 に示す。破断箇所 A-4 地点では地表から 1m が造成地の砂れきによる盛土で、その下 2m が在来の砂れき層で合計 3m の深さまで砂れきが堆積し、その下部は凝灰岩となっている。地下水位は 2.9m の深さにある。これは砂れき層と凝灰岩のほぼ境界にあたる。

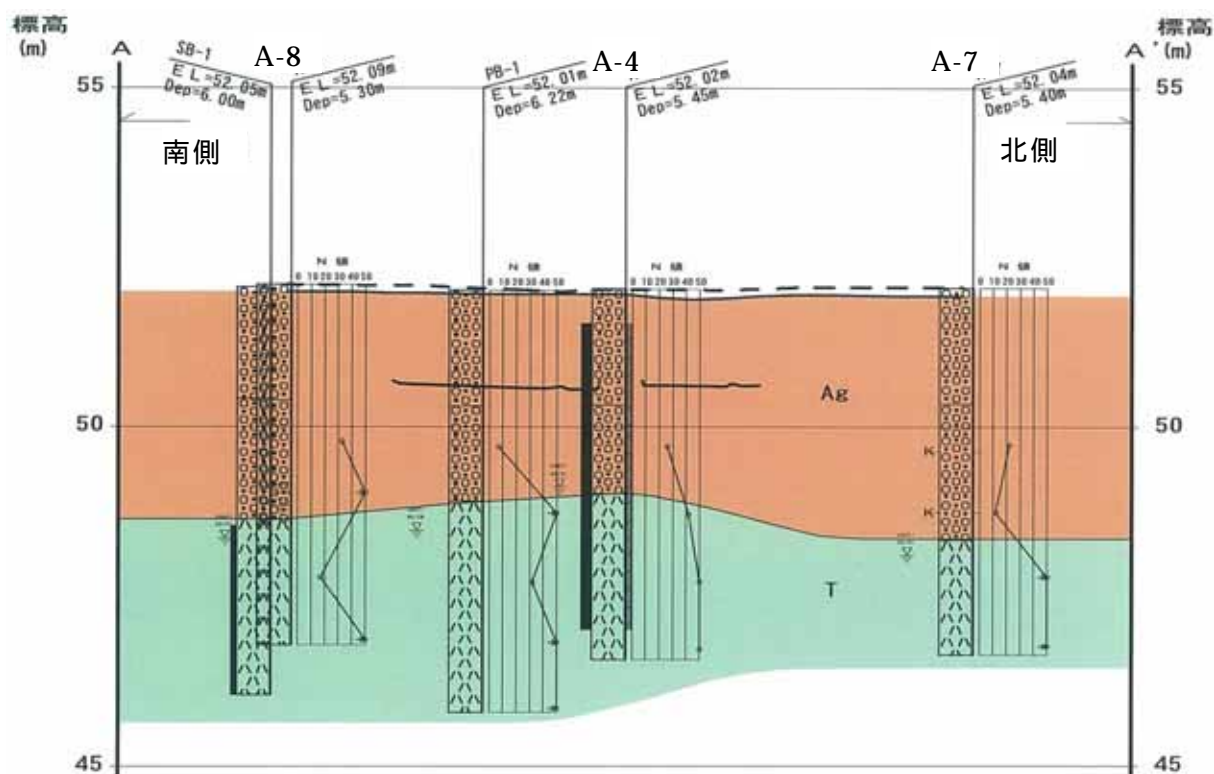


図 4.4.5 破断箇所を通るガス導管方向の地層断面図

図 4.4.5 に示すように、破断箇所以外の南側、北側近傍でも同様の地層構成となっている。また、ガス導管方向の南北約 450m 間の調査結果とガス導管直角方向の調査結果でも、同様に表層に砂れき層があり、その下部に凝灰岩が存在している。地下水位はほぼその境界の深度にあるが、砂れき層の厚さは北側と東側で少し厚くなっている。

次に、標準貫入試験で求めた N 値は、砂れき層では約 10～50、凝灰岩では約 20 以上となっていた。ただし、図 4.4.5 に示すように凝灰岩における N 値を破断箇所の南北で比較すると、北側では約 50 以上であるのに対して、南側の凝灰岩の表層では約 20 の小さい値である。

また、孔内水平載荷試験の結果から得られた変形係数と N 値の関係は、地盤材料に関係なく一定の傾向の値を示すが、砂れき層における測定結果では、変形係数から見た N 値が通常約 1/2 に該当していた。このため、砂れき層はあまり締まっていなと考えられる。

ガス導管に沿って行った表面波探査の結果を図 4.4.6 に示す。表面波探査では大まかな S 波の速度分布しか推定できないが、S 波速度の相違から地盤の固さの目安には

なる。一般的には、S 波速度が速いほど地盤は固い傾向である。同図において、上側の分布図は地盤が凍結していた時期（冬季：2月下旬）に測定したもので、下側の分布図は地盤の凍結がなくなった時期（春季：5月下旬）のものである。両図の共通点は、破断箇所の南北で表層（地盤面から約 5m 以深）の S 波速度が約 50m/s の差異があること、また、表層の S 波速度は北側よりも南側の方が約 50m/s 小さくなっていることである。これらから、北側よりも南側の方が緩い地盤であることがわかる。

なお、冬季と春季による差異として、砂れき層が分布する深度の速度値が冬季よりも春季の方が 1 割程度低下している。これは、融解後の砂れき層の方が伝播速度は遅くなっていることを示している。

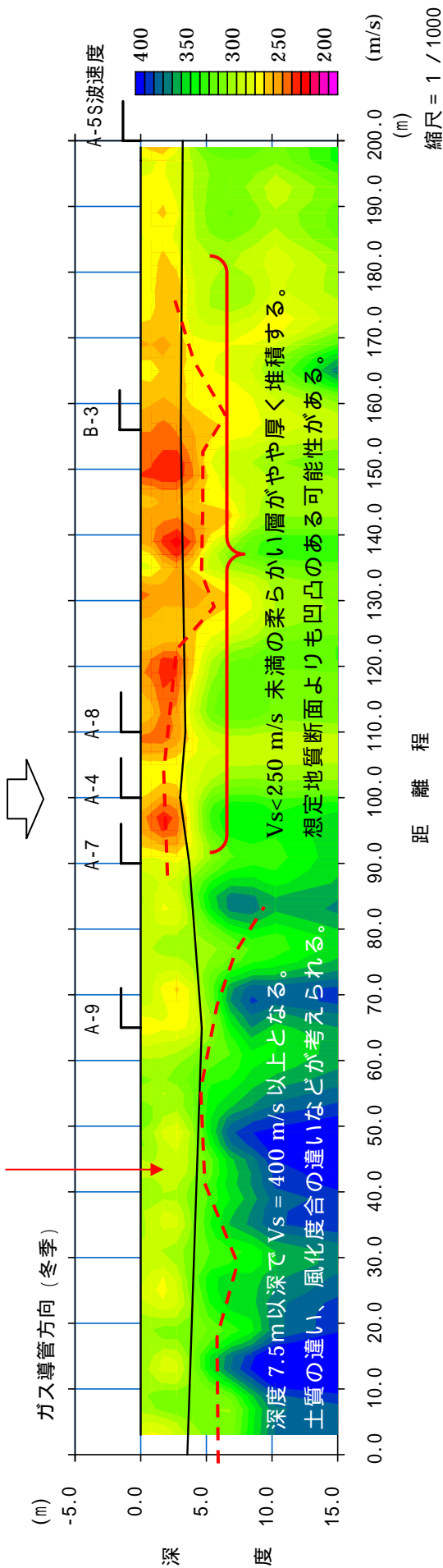
（4）風化した凝灰岩の圧密特性に関する試験

上述したように、地盤調査の結果から南側の凝灰岩の表層には N 値が約 20 と小さく風化したと思われる部分が凝灰岩上面から約 1.5m の深さに存在していることが分かった。そこで、この風化部分が地下水位の変化などで長期の圧密沈下をした可能性を調べるため追加の地盤調査を行い、不攪乱試料を採取して圧密試験を行った。調査地点は破断箇所より少し南側の地点である。圧密試験の結果、圧縮指数 C_c は 0.027 ~ 0.033 であった。なお、土に加わる圧力が増加すると土が圧縮し沈下が生じるが、圧縮指数とはその圧縮のし易さを示す指標である。

ボーリングによる地質境界。

$V_s = 300$ m/s 程度の境界と良く対応している。

破断位置



ガス導管方向 (春季)

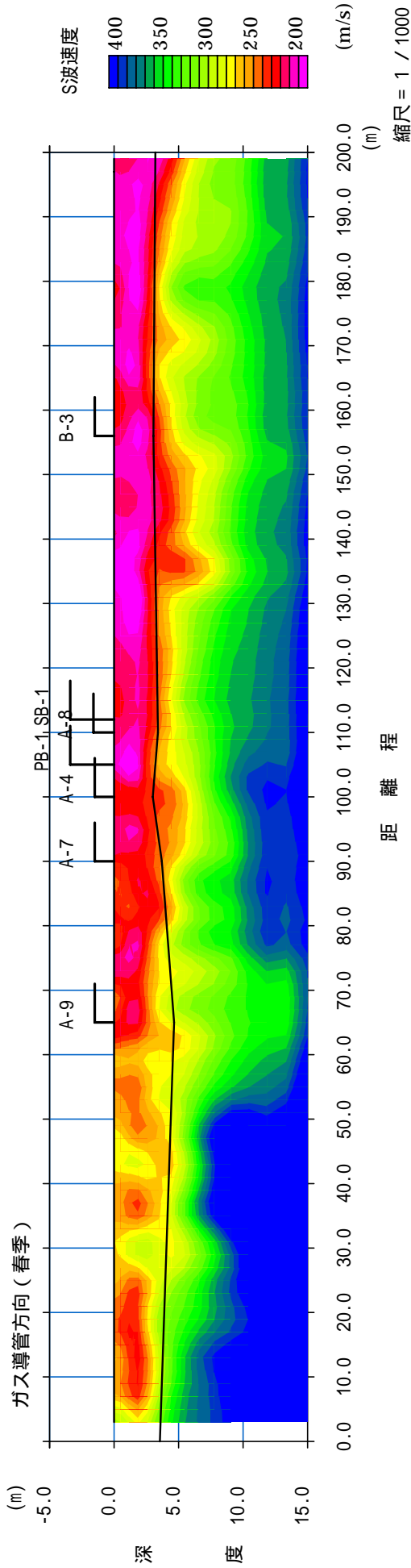


図 4.4.6 表面波探査から推定されるガス導管方向の断面の S 波速度分布

5 . ガス導管破断のメカニズム

この章では、北見市春光町におけるガス導管が破断に至ったメカニズムについて、地盤の挙動、ガス導管の変形と応力及び破断原因を考察する。また、常盤町管及び幸町管で発生した亀裂のメカニズムについても考察する。

5.1 春光町の地盤の挙動

(1) 地盤掘削調査などで明らかになった地盤の変状

3.1 項で示したように、ガス導管破断の検分時に破断箇所を南北で 46mm のガス導管の鉛直方向の食い違いが生じていた。また、4.4 項で示したように、地盤掘削調査時の測量によると破断箇所を南側のガス導管が 65mm 程度沈下し、約 5m 離れると北側とほとんど同じ深度となっていた。これらのことから、破断箇所から南側に約 5m の範囲の地盤が周囲の地盤に比べて約 50mm 沈下していたと判断できる。

一方、写真 4.3.1 に示した昭和 32 年の航空写真を見ると、破断箇所を境界として、西側が旧河道であったと推定される。そこで、地盤をこの西側(ガス導管軸方向では南側)の旧河道部と、それ以外の一般部(ガス導管軸方向では北側)とに分けて比較してみる。まず、標準貫入試験の結果を比較してみると、砂れき層の N 値は両地盤とも約 10 から 50 の間に分布し、旧河道部も一般部もあまり差がない。ただし、図 4.4.6 に示した表面波探査の結果をみると、旧河道部の方が一般部に比べて砂れき層の S 波速度が小さい。これに対し、凝灰岩では旧河道部の N 値は表面が風化して 20~30 を示しており、一般部が 40~50 に分布しているのに対して、明らかに旧河道部の方が小さい。したがって、旧河道部の方が砂れき層は緩く、凝灰岩の表層は軟らかかったと判断できる。

また、写真 4.2.4 及び写真 4.2.5 から、破断箇所付近で確認されたクラックは、1982 年から 2005 年の間で発生しており、これは地盤の長期的な不同沈下を反映したものと判断できる。

その上で、旧河道部が一般部より多く沈下した理由を、春光町の地盤の特殊性と地盤調査の結果をもとに以下に考察する。ただし、このような沈下は、長期にわたって生じ、又は短期に加速したと考えられる。そこで、長期にわたって沈下したと仮定した場合と、短期に沈下が加速したと仮定した場合のそれぞれに、考えられる理由を検討する。また、砂れき層と凝灰岩はもともと沈下し難い土質であるため、一般部の沈下量は無視でき、旧河道部だけ約 50mm 沈下したと仮定して考察する。

なお、地盤掘削時に地盤内に斜め方向の地盤クラックが見られたが、水平方向の圧縮力が増加した場合や、鉛直方向の力が減少した場合に、このような斜め方向の地盤クラックが地盤内で生じる可能性がある。

(2) 長期にわたって沈下したと仮定した場合

長期にわたって沈下したと仮定した場合、荷重として次の 3 点が考えられる。

車両交通による繰返し荷重(交通振動)

一般に、約 1.5m のガス導管埋設深度では交通振動の影響が少ないため、それよ

り下の地盤が交通振動によって沈下することはない。しかし、北見市では毎年冬期に路面が凍結するという特殊な条件がある。凍結すると特に振動が大きくなり、ガス導管の下の砂れき層と凝灰岩層に大きな繰返し荷重が加わって徐々に沈下したことが考えられる。ただし、これによる沈下量の定量的な推定は困難である。

1967年の造成に伴う地盤内の有効上載圧の増加

造成前の旧河道では地下水位は地表面にあったのに対し、その後、河道の付け替えで凝灰岩上面まで地下水位が下がり、さらに盛土したため、地盤内の有効上載圧が増加したことが考えられる。盛土の厚さは不明であるが、仮に層厚 1m と仮定すると、ガス導管埋設深度 (1.5m) で 24.5kPa、凝灰岩上面深度 (3.0m) で 36.7kPa 程の有効上載圧が増加することになる。

この増加荷重により砂れき層の圧縮と軟らかい凝灰岩の圧密が生じた可能性がある。孔内水平載荷試験結果によると砂れき層の変形係数は $2,000 \sim 20,000 \text{ kN/m}^2$ であり、ガス導管の下の砂れき層厚さが 1.5m であるため、単純に計算すると有効上載圧の増加で砂れき層が圧縮沈下した量は 2.3mm ~ 23mm となる。

一方、凝灰岩の風化層で採取した不攪乱試料による圧密試験結果によると、圧縮指数 C_c は 0.027 ~ 0.033 であった。凝灰岩の風化部の中間深度における造成前の有効上載圧が 39.5kPa 程度で、盛土と地下水位低下によりさらに 36.7kPa ほど有効上載圧が増加したと仮定すると、そのための体積ひずみは 0.33 ~ 0.38% となる。したがって、風化層の厚さが 3m と考えると 9.8 ~ 11.4mm の圧密沈下量となる。この値は通常の軟弱粘性土地盤の圧密沈下に比べるとはるかに小さい値である。

なお、有効上載圧とは対象としている深度より上にある土の重量によってその深さに加わっている鉛直方向の圧力である。したがって、土の単位体積重量に上部の層圧を乗じた値となる。ただし、地下水位以下の土粒子は浮力を受けるため、その浮力を考慮した水中単位体積重量を用いる必要がある。砂礫層や凝灰岩の風化した部分の飽和単位体積重量はそれぞれ 21.9 kN/m^3 、 20.0 kN/m^3 、水中単位体積重量はそれから 9.8 kN/m^3 を差し引いた 12.1 kN/m^3 、 10.2 kN/m^3 と考えられるので、前述したように造成前は地表面が 1m 程度低く (1m 程度造成により盛土した) また、地下水位は旧地表面にあったものが、造成後に凝灰岩上面まで下がったと仮定すると、凝灰岩上面から 1.5m (上記のように風化層を 3m と考えた場合) の中間深度の有効上載圧は以下のように推定される。

a) 造成前の有効上載圧 : 39.5kPa

b) 造成に伴う有効上載圧の増加分 : 36.7kPa

そこで、1967年の造成に伴う沈下量は砂れき層の圧縮と風化した凝灰岩の圧密とを併せて 12.1mm ~ 34.4mm 程度の値であったのではないかと推測される。

2003年十勝沖地震の震動

この地震で北見の K-NET* における地表最大加速度は、54gal が記録されている。北見市の隣の端野町では、造成した緩い地盤の農地で液状化も発生した。したがって、地震時に砂れき層が沈下したことが考えられる。ただし、砂れきの場合、液状化の有無で沈下量は大幅に異なる。液状化すると層厚の約 3 ~ 5% も圧縮するため、ガス導管の下の層厚を 1.5m と仮定すると、約 50mm の沈下が発生する。しかし、

地下水位が現在と同じように砂れき層の下端付近にあった場合には、砂れき層は液状化しない。実際に、十勝沖地震の際にこの地区で液状化が発生した変状は観察されていない。したがって、十勝沖地震で 50mm も沈下したとは考えられない。液状化しない場合の沈下量の推定は難しいが、液状化した場合の 1 割以下 (5mm) と考えられる。

* K-NET とは、独立行政法人防災科学技術研究所が全国約 1000 ヶ所の地表に設置した強震計で構成される観測網をいう。

(3) 短期に沈下が加速したと仮定した場合

1 ヶ月程度の短期内に沈下が加速したと仮定した場合、加速をもたらす付加的な荷重として次の 2 点が考えられる。

除排雪作業による大きな振動荷重

4.2 項に示したように、本年 1 月 8 日以降は歩道と車道の両方の路面上は厚い氷の層で覆われていた。このような場合には、除排雪作業の際の振動荷重が大きくなる。この除排雪作業による大きな振動荷重によって沈下が短期的に加速したことが考えられる。

不均質に凍結が進行したことによる地盤内の水平応力の増加

気温の低下により凍結が進んでいく場合、地盤内で地表面から同じ深さで均質に凍結していくとは限らない。つまり、地盤内で凍結深度が異なる。図 4.4.1 に示した破断箇所近傍の管軸方向の断面内で考えた場合、破断箇所の北側約 2m の位置に存在する下水道管の埋戻し部の土は、周囲の地盤に比べて均一なため、周囲より凍結深度が深かったと考えられる。一方、破断箇所の南側約 2m の位置にはバスの停留所がある。ここは歩道といえども除雪が丁寧に行われ、そのため路面の温度も周囲の歩道より下がり、凍結深度が局部的に深くなっていたと考えられる。そして、1 月 8 日以降の急激な気温の低下によって凍結が進んだ際に、破断箇所を挟んだ両側の凍結深度が深くなり、その凍結膨張力のために破断箇所の地盤内の水平応力が増加した可能性が考えられる。

5.2 春光町管の変形と応力

地盤の沈下によってガス導管には変形と応力が生ずる。ガス導管の残留変形と地盤の変位が一致すると仮定して、ガス導管の変形を計算した。計算結果を図 5.2.1 に示す。

図からわかるように、破断位置の南側の継手 3 の沈下が顕著である。なお、計算結果では、地盤ばね特性を変化させても、ガス導管の変形に顕著な差は認められない。

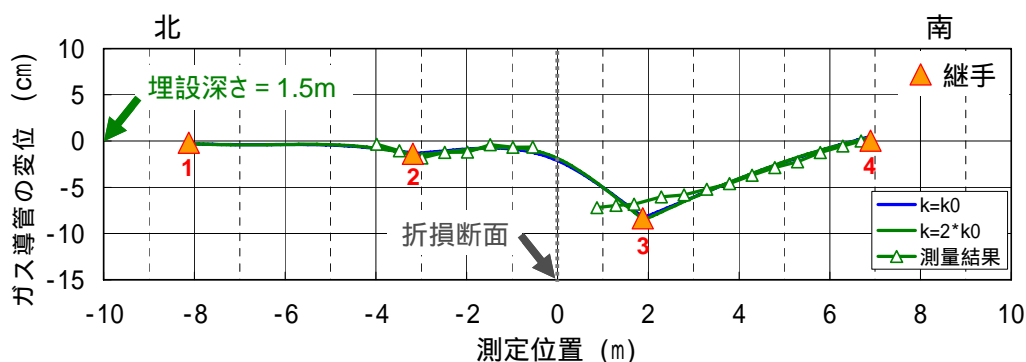


図 5.2.1 想定地盤変位によるガス導管の変形

ガス導管に発生する曲げモーメント分布を図 5.2.2 に示す。ガス導管には、管頂が引張応力となる曲げモーメントが発生しており、最大曲げモーメントの位置は破断位置の直近である。最大曲げモーメントは、「高圧ガス導管耐震設計指針」(平成 14 年 3 月、社団法人日本ガス協会発行)の地盤ばね係数と仮定した場合に 26.9kN-m、2 倍の地盤ばねの場合に 31.7kN-m となる。

次に、応力分布を図 5.2.3 に示す。破断位置直近の管頂に最大引張応力が発生しており、前出の地盤ばねの場合に 146MPa、2 倍の地盤ばねの場合に 172MPa となる。

以上のことから、ガス導管周辺の地盤が局部的に沈下すると、ガス導管には管頂が引張応力となる曲げモーメントが発生し、破断の原因となることが判明した。また、破断位置の直近における最大引張応力は 140~170MPa で、材料の降伏応力 110MPa を超えると推定される。

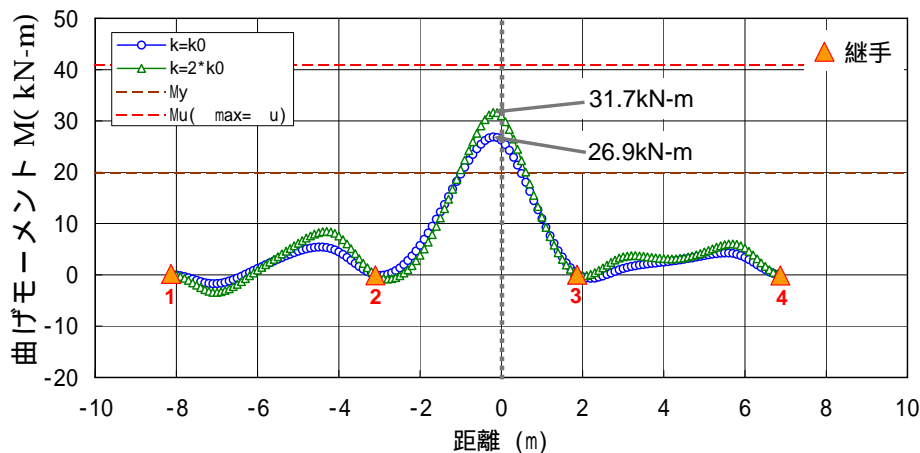


図 5.2.2 想定地盤変位によるガス導管の曲げモーメント

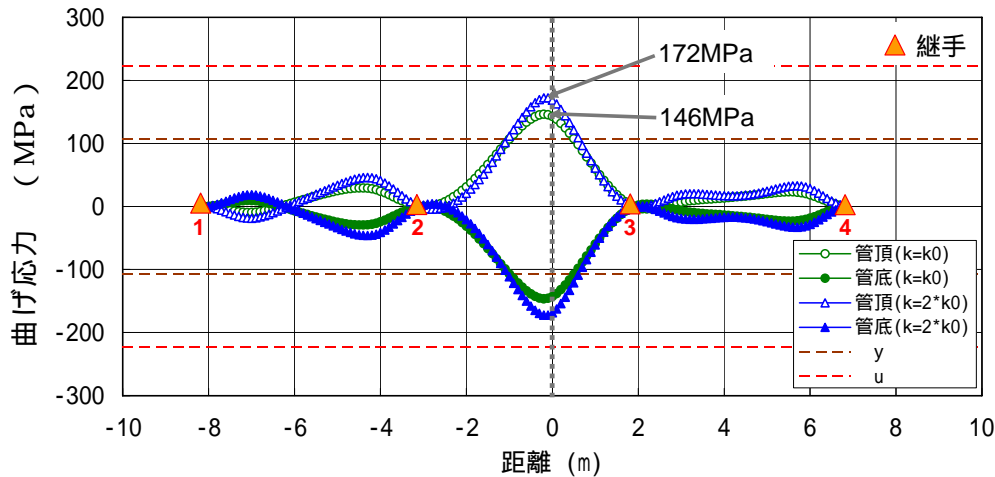


図 5.2.3 想定地盤変位によるガス導管の曲げ応力

また、春光町管は、疲労亀裂を起点として、脆性破壊に移行していることから、この条件で、疲労亀裂の寸法、引張試験により得られた引張強さ、鋳鉄の破壊靱性を用いて疲労破壊を生じた最大引張応力 \max を計算した。その結果、 $\max = 160\text{MPa}$ となり、上述の地盤変位量から計算した配管の最大引張応力 ($140\text{MPa} \sim 170\text{MPa}$) と比較しても矛盾のない範囲であることが確認された。

5.3 推定される春光町管の破断の経過と要因

第 3 章におけるガス導管の破壊状況、破面の調査並びに 5.1 項及び 5.2 項の地盤及び管の力学的検討から、春光町管の破断の経過を次のように推定する。

- (a) 管の破断部付近は、旧河道部と一般部の境界付近であるとともに、砂利採取場の跡地等であったことから、地盤が緩い部分と硬い部分が混在する特殊な状況であった。
- (b) 車両荷重による土圧変動と地盤内の有効上載圧の増加によって、地盤の不同沈下が経年的に生じた。
- (c) 冬期間、地盤の表面部約 1m まで凍結したことが、車両荷重による土圧変動に起因する地盤の不同沈下を加速した。
- (d) 地盤の不同沈下により、管の破断部近傍には、管の上側が凸になるような静負荷の曲げモーメントが生じた。曲げモーメントは経年的に増加し、事故直前に増加が加速した。
- (e) 地盤の不同沈下に伴う静負荷の曲げモーメント（平均応力）に加えて、車両荷重による土圧変動及び不均質凍結による水平応力の増加が繰り返し負荷（応力振幅）となり、管の上側表面に微小な疲労亀裂が生じた。
- (f) 管は、微小な疲労亀裂を起点とし、地盤の不同沈下の増大に伴い脆性破壊に移行し、最終的に塑性崩壊で破断した。

以上のとおり、春光町管の破断は、局所的に緩い地盤で不同沈下が発生したことが

大きく影響したこと、車両荷重による土圧変動が凍結地盤を通じて不同沈下を加速させたことにより生じ、結果として破断部分から大量のガスが土中に漏れ、凍結地盤が漏れたガスの移動に寄与した。

5.4 幸町管及び常盤町管の破損の経過と要因の推定

幸町管及び常盤町管が破損に至った経過と要因を、ガス導管の埋設状態から検討し、次のように推定する。

(1) 幸町管の破損の経過と要因

地盤の状態

幸町管の周辺地盤は、水道、下水道等の他工事による埋設工事及びガス導管の新設・入れ換え工事が複雑かつ多く実施されていることから、不均一な地盤状態であった。

また、凍結地盤が融解した後の管の破損部付近の路面状態を確認したところ、路面にクラックが発生していた。このクラックは、交差点付近であるが下り勾配となる道路の進行方向に対して直角方向であった。下り坂における凍上は路面に対し垂直方向に生ずるが、融解時は重力によって下がるため、元の位置に戻ることなく、坂下に向かってわずかに移動する。クラックは、この凍結・融解の繰り返しで発生した。

地盤の沈下と移動

幸町管は、北見市の中心付近の主要道路で、かつ、車両の往来が激しい交差点内に埋設されている。このため、車両通行量が多く、その都度、車両荷重により土圧変動が生じている。

また、上記のとおり埋設工事が複雑に実施され、地盤が不均一であったことから、緩い地盤では車両荷重による土圧変動でわずかな沈下があったと推定される。

さらに、幸町管は歩車道境界付近で破損したことから、歩車道の凍結深度の差異による水平応力の発生と、上記のような凍結・融解の繰り返しによる地盤の移動に伴い分岐管を介して管に水平方向の軸力も作用したと考えられる。

管の破損の経過と要因

上記及び から、幸町管が破損に至った経過と要因を次のように推定する。

- (a) 管の破損部付近は、管の分岐・交換、下水管及び水道管の工事に係る掘削・埋め戻しにより地盤が不均一となり、また、主要道路ゆえ交通量も多いことから、車両荷重による土圧変動で沈下が生じ、管に曲げモーメントが負荷された。
- (b) 管は交差点に埋設され、複雑に分岐している。この交差点の道路のうち一方は交差点から下り坂となっており、分岐管のうちの1本はこの道路直下に埋設されている。この下り坂では、凍結・融解により地盤が坂の下の方面へ僅かに移動した。このため、管の水平方向にも軸力が負荷された。
- (c) 管の破損部は、車道と歩道の境界に位置するが、冬期は車道と歩道で凍結深度が異なるため(車道>歩道)、不均質凍結による水平応力が生じた。
- (d) (a) ~ (c) の要因により、破損部には軸力引張りに近い力、又は複数方向への

曲げが繰り返し負荷され、さらに車両荷重による土圧変動が繰り返し負荷となった。
(e)(d) の状況に加え、管の材料組織に引け巣もあったことから、微小な疲労亀裂が管の表面に複数生じた。

(f) 発生した複数の疲労亀裂が成長、合体し、ほぼ全周に伝播した。

(g) 幸町管は、疲労亀裂が長期間経過して進展していたにもかかわらず、開口に至らない状態であったため大量のガス漏れが発生せず、点検によって確認された。

以上のとおり、幸町管は複数の要因が絡み合っただ疲労亀裂が発生し、長い期間をかけ成長したものである。

(2) 常盤町管の破損の経過と要因

地盤の状態

常盤町管は、車両の往来が多い主要道路を横断する状態で埋設され、かつ、破損箇所の下側約 1.7m の位置に下水管がある。この下水管は、常盤町管に対し直角方向に埋設されている。この下水管は、ガス導管の埋設時期（1961 年（昭和 36 年））から 26 年経過した 1987 年（昭和 62 年）に埋設されたものである。一般的に下水管の埋設工事では、埋設する管の直径分に作業スペースを確保した範囲を開削して行われ、下水管の埋設した後は、適切な転圧を負荷して土砂の埋め戻しが施される。

常盤町の場合、ガス導管が下水管上にあることから、土砂の埋め戻しが周辺地盤と同等レベルではなく、下水管埋設工事を行った地点とそれ以外でガス導管の周辺地盤は不均一になった可能性がある。

地盤の沈下

常盤町管は、上記 のとおり主要道路を横断して埋設されていることから、交通量の多い位置で、車両荷重による土圧変動が生じた。

常盤町管の周囲の地盤が不均一であったことから、この土圧変動によって埋め戻し部分で地盤沈下（春光町のようなレベルよりも小さなもの）が生じた。このとき、破面の状態から長期間にわたって疲労亀裂が成長しており、地盤の凍結が車両荷重による土圧変動に影響を及ぼした可能性がある。

管の破損の経過と要因

上記 及び から、常盤町管が破損に至った経過と要因を次のように推定する。

(a) 下水管工事の掘削 - 埋め戻し部と旧路盤部の間で地盤の不均一が生じた。

(b) その境界部に位置する管の破損部近傍には、管の上側が凸になるような静負荷の曲げモーメントが生じた。

(c)(b) の状態において、車両荷重による土圧変動が管に繰り返し負荷（応力振幅）となり、管の上側表面に微小な疲労亀裂が生じた。

(d) 疲労亀裂は、この土圧変動に伴いゆっくりと成長し、長い年月をかけてほぼ全周に伝播した。

(e) 常盤町管は、疲労亀裂が長期間経過して進展し、開口しない状態であったため大量のガス漏れが発生せず、点検によって確認された。

以上のとおり、常盤町管は、他工事により地盤が不均一となり、地盤沈下と車両荷重による土圧変動で疲労亀裂が発生し、長い期間をかけ成長したものである。

6 . 漏えいガスの挙動に関する調査

この章では北見市春光町におけるガス漏れ事故に関し、管破断後のガス漏れ量、被害者宅へのガス流入量、推定されるCOの屋内平均濃度の経時変化などを述べる。

6.1 地盤中の漏えいガスの透過特性の測定

春光町の事故発生場所周辺の地盤は、地表から3～4mまでが写真4.3.3に示すような砂れき層であったが、ガスの漏えい流量や透過経路を推定するためには、当該砂れき層のうちの砂粒部に係るガスの透過特性を測定する必要がある。

測定にあたり、砂粒部だけの条件とするため、現地でサンプルした砂れきを完全乾燥してから、粒子径9.5mm以上の大粒子分を除くとともに、事故発生場所と同じような充てん状態とした。その後、空気の透過に係る測定を実施し、ガス換算することで砂粒部のガスの透過係数を求めた。その結果、 $0.94 \times 10^{-3} \text{ m}^2/(\text{hPa}\cdot\text{s})$ となった。

次に、当該砂粒分の透過性に対する含水比（固体重量に対する水分の重量百分率）の影響を測定したところ、図6.1.1のとおり5%から8%の範囲でガスが最も透過しやすくなり、12%を超えると急に透過性がなくなることが判明した。なお、事故発生直後に測定した現場付近の砂れき層における含水比は、平均で5.3%であった。

また、この砂粒に大きな石が混じるとガスの流れる部分が減るため透過性は小さくなり、砂粒だけの場合の50%くらいまで減じることも確認した。

このような水分の効果や大粒子の混入の効果に関する実験値に間隙率の補正を加え、現地砂れき層の代表的な状態に対するガス透過係数 $1.14 \times 10^{-3} \text{ m}^2/(\text{hPa}\cdot\text{s})$ が得られた。

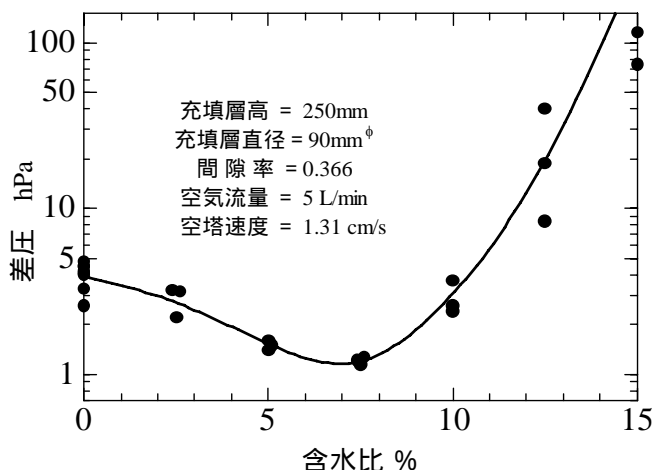


図 6.1.1 通気抵抗に及ぼす含水比の効果
(砂粒部の間隙率 = 0.366 の場合)

6.2 推定漏えい量

ガス漏えい量を推定するには、管の亀裂幅を設定しなければならない。

ガス漏れ確認時に掘削した際、管には著しいズレ（食い違い）が見られなかったと報告されたが、材料力学的な解析結果から管頂部で3～5mmの開口が生じることが計算により推定された。破面の状態から管頂側に開口幅は広く、管底に向かって狭くなるものと考えられるため、平均開口幅は2～3mmと想定される。

管の周りがある砂れき層の影響があることから破断部からの漏えい量を計算するにあたっては、まず一様な幅で全周にわたる亀裂をもった管（内径150mm、外径170mm、肉厚10mm）が大気中に置かれていると仮定した。その中に漏れたガスと同じ成分と

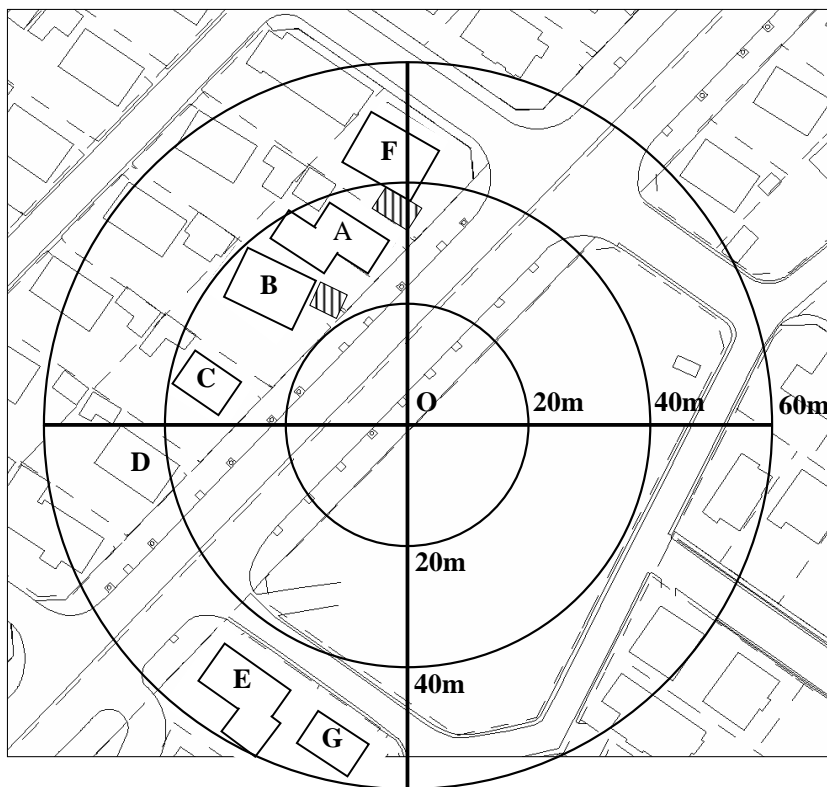
なるガス（密度 1.04 kg/m^3 、粘度 $14.4 \text{ } \mu\text{Pa}\cdot\text{s}$ ）を同じ圧力（ 2kPa ）で送入した場合のガス噴出量を計算した。その結果、亀裂幅が 2 mm のとき 42.9 L/s 、 3 mm のとき 64.1 L/s となった。

これを地中に噴出する場合は、管の亀裂のすぐ外側の圧力が高く亀裂内外の圧力差が小さければ噴出流量は少ない。一方、地中を透過して大気に開放されるガス量は、亀裂のすぐ外側の圧力が高いほど大きくなる。これらがバランスする状態を正確に求めることは、容易ではない。今回の計算では、ガス導管の亀裂部の周りにガスのきわめて透過しやすい直径 20 cm 程度の球に相当する空間ができると仮定し、ガスの透過係数の代表値（ $1.14 \times 10^{-3} \text{ m}^2/(\text{hPa}\cdot\text{s})$ ）を用いて計算を行うと、平均亀裂幅が 2 mm の場合で 21.4 L/s 、 3 mm の場合で 24.4 L/s となり、亀裂幅に係る依存性が少なくなり、漏えい量としては、 $20 \sim 25 \text{ L/s}$ の範囲であると推定された。

なお、春光町 5 丁目の事故現場付近で別の漏えい（口径 100A のねずみ鋳鉄管継手部の損傷部分）が発見されたが、その漏えい量を気泡テストで確認したところ数 mL/s 以下と微量であったので、漏えいガスのシミュレーションでは無視している。

6.3 推定される漏えいガスの住宅への侵入経路

事故現場付近の地図を図 6.3.1 に示す。深度 1.5m で漏えいしたガスは、凍結層と深度 2.5m の高含水層の間を移動する。移動したガスが、比較的乾燥していて温度が高く凍結していない住宅の床下に達すると、その地点から大気に放散される。凍結層の深度は、車道下で 90cm 、それ以外の場所で 50cm と仮定した。



地図の原点は管破断箇所の鉛直方向地表面である。

図 6.3.1 春光町事故発生場所付近の地図

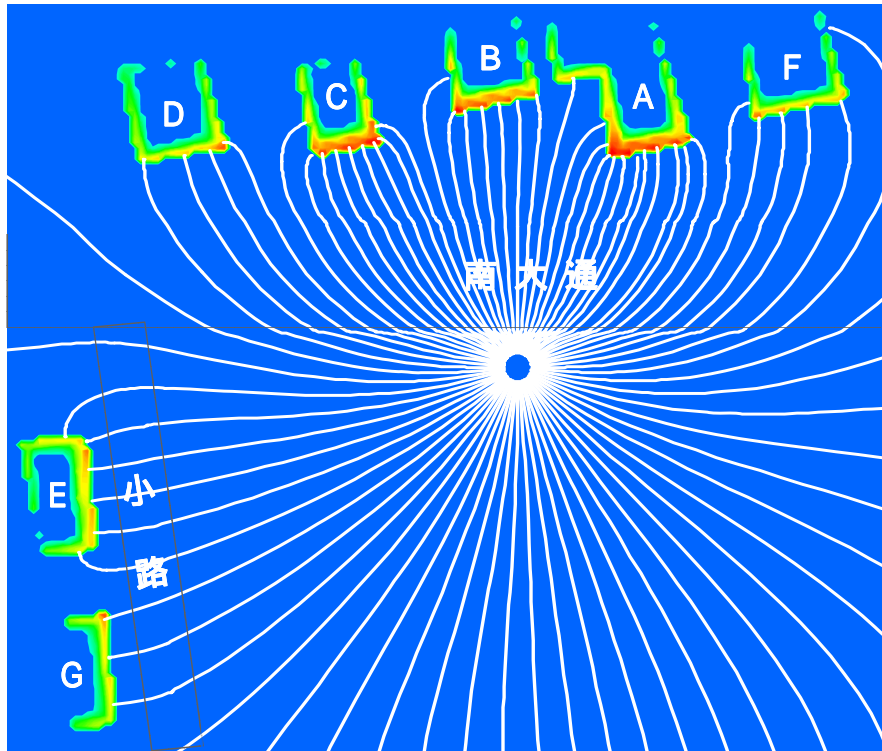


図 6.3.2 住宅へのガス侵入経路（シミュレーション結果）

このような状況のシミュレーションを実行したところ、図 6.3.2 のようなガス経路（流線）が求められた。上図から、破断部から遠ざかるにつれてガスは拡散するが、住宅の床下に近づくとき、前述のガスが大気に放散されるための条件がそこで満足され、床下に専ら集中し住宅に流入する様子がわかる。一軒の住宅に流入すると、それ以遠に流れるガス量は少ない。

次に、各住宅の床下に分配されるガス流量を計算した結果を表 6.3.1 に示す。

表 6.3.1 住宅の床下に流入されるガス流量の分配率

（総漏えい流量：100%）

住 戸	A 宅	B 宅	C 宅	D 宅	E 宅	F 宅	G 宅	合 計
分配率 f_i	16.7 %	9.0 %	10.9 %	5.2 %	8.1 %	4.8 %	4.5 %	59.2 %

（参考）ガス漏えい箇所周辺住宅の人的被害

A 宅：死者 1 名 負傷者 3 名

B 宅：死者 1 名

C 宅：死者 1 名 負傷者 2 名（入院 2 名）

D 宅：負傷者 3 名（入院 1 名）同居人 5 名中 2 名は被害なし

E 宅：負傷者 3 名（入院 3 名） F、G 宅：人的被害なし

図 6.3.1 から漏えい箇所からの住宅までの距離が短い順序は、次のとおり。

A 宅 < B 宅 < C 宅 < F 宅 < D 宅 < E 宅 < G 宅

また、表 6.3.1 からガス流入量の分配率が多い順序は、次のとおり。

A 宅 > C 宅 > B 宅 > E 宅 > D 宅 > F 宅 > G 宅

図 6.3.2 及び表 6.3.1 が示すように、F 宅に移動していたガスが A 宅で吸収される状況が生まれ、F 宅にはガスの流入が少なくなっている。このことは、人的被害の状況を加味すると、両宅の被害となって現れている。

また、D 宅と E 宅の人的被害を見ると、E 宅の居住者は 3 名が負傷し 3 名とも入院を要したが、D 宅では居住者 5 名のうち 3 名が負傷したものの、入院を要した者は 1 名であった。これは D 宅の方向に移動していたガスが C 宅で吸収されたため、D 宅へのガスの流入が少なくなったためである。

こうした観点から、シミュレーション結果と実際の被害状況の対応が整合している。

6.4 ガスの到達時間の推定

図 6.3.2 に掲げるシミュレーションをさらに詳細に計算し、ガスが漏れ始めてから各住宅に流入するまでの時間の算定をしたものを表 6.4.1 に、A 宅の CO 平均濃度の経時変化のうち漏れ流量 20L/s における結果を図 6.4.1 に示す。

表 6.4.1 ガスが漏れ始めてから住宅に到達するまでの時間

(単位 時間：分)

漏れ流量	A 宅	B 宅	C 宅	D 宅	E 宅	F 宅	G 宅
15 L/s	3 : 49	5 : 19	5 : 39	15 : 45	20 : 16	13 : 55	25 : 50
20 L/s	2 : 52	3 : 59	4 : 15	11 : 49	15 : 12	10 : 26	19 : 22
25 L/s	2 : 18	3 : 11	3 : 24	9 : 27	12 : 09	8 : 21	15 : 30
30 L/s	1 : 55	2 : 39	2 : 50	7 : 52	10 : 08	6 : 58	12 : 55

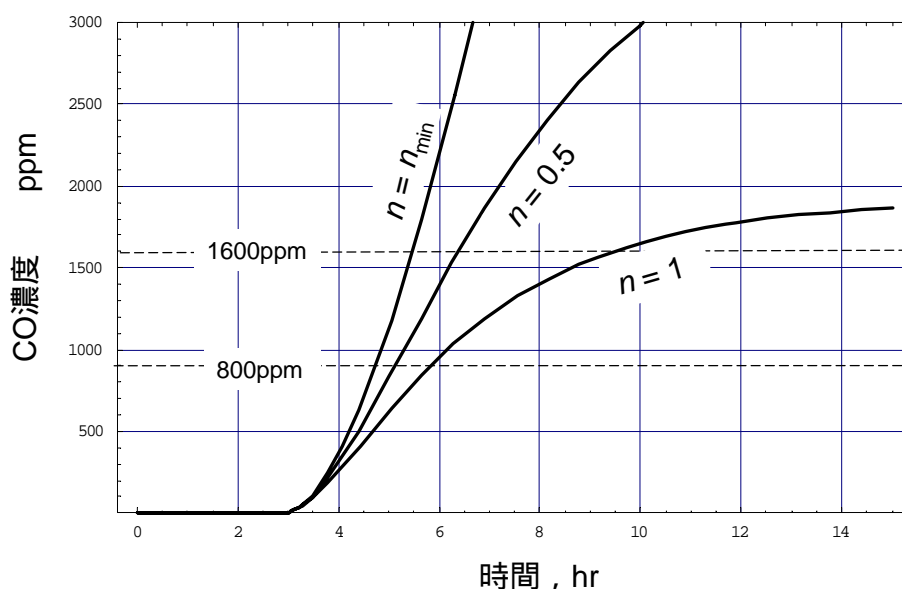


図 6.4.1 A 宅における侵入した CO の平均濃度の経時変化

表 6.4.1 は砂れき層のうち、ガスが透過できる深度領域、そこでの間隙率や含水比、れきの大粒子の割合など、いくつかの推定値に基づいて計算した結果である。

図 6.4.1 は、表 6.4.1 の結果の他に A 宅の内容積を 300m³ と仮定し、換気回数 n をゼロの場合 ($n = n_{\min}$)、1 時間に 1 回 ($1.0h^{-1}$) の場合及び 2 時間に 1 回 ($0.5h^{-1}$) の場合で算定したものである。

また、CO の平均濃度が 800ppm に達すると中毒症状が現れ、1600ppm に達すると数時間で死に至る可能性があることから、同濃度での状態を指標にする。

同図から A 宅では、CO の平均濃度が 1600ppm に達した時間に着目すると、 $n = n_{\min}$ で約 5.5 時間、 $n = 0.5$ で約 6.4 時間、 $n = 1.0$ で約 9.5 時間である。ただし、この時間は、宅内の容量を仮定した上で、当該宅内における CO 濃度を平均化した計算結果であるので、宅内の濃度分布の状態を把握するためには詳細な実験と計算を行う必要がある。

このような仮定もあるが、換気回数 n を 1 時間に 1 回 ($1.0h^{-1}$) の場合及び 2 時間に 1 回 ($0.5h^{-1}$) に限定し、CO の平均濃度が 800ppm 及び 1600ppm に達する時間を算定し、まとめたものを表 6.4.2 に示す。

表 6.4.2 各住宅の屋内における CO 濃度 800ppm 及び 1600ppm に達する時間

(単位 時間：分)

漏れ流量	換気回数	CO 濃度	A 宅	B 宅	C 宅	D 宅	E 宅	F 宅	G 宅
15 L/s 54 m ³ /hr	$n = 0.5$ hr ⁻¹	800 ppm	6:49	8:22	9:05	32:48	25:41	51:26	-
		1600ppm	9:17	-	13:43	-	-	-	-
	$n = 1.0$ hr ⁻¹	800 ppm	8:10	-	12:08	-	-	-	-
		1600ppm	-	-	-	-	-	-	-
20 L/s 72 m ³ /hr	$n = 0.5$ hr ⁻¹	800 ppm	4:57	6:13	6:35	19:37	18:41	22:39	30:55
		1600ppm	6:23	8:44	8:39	-	23:32	-	-
	$n = 1.0$ hr ⁻¹	800 ppm	5:32	7:20	7:31	-	21:56	-	-
		1600ppm	9:28	-	-	-	-	-	-
25 L/s 90 m ³ /hr	$n = 0.5$ hr ⁻¹	800 ppm	3:54	4:52	5:10	14:40	14:44	15:56	22:11
		1600ppm	4:54	6:23	6:31	-	17:13	-	-
	$n = 1.0$ hr ⁻¹	800 ppm	4:13	5:22	5:38	-	15:58	-	-
		1600ppm	6:07	-	-	-	-	-	-
30 L/s 108m ³ /hr	$n = 0.5$ hr ⁻¹	800 ppm	3:13	4:01	4:16	11:49	12:11	12:29	17:49
		1600ppm	3:59	5:06	5:15	18:01	13:51	27:08	-
	$n = 1.0$ hr ⁻¹	800 ppm	3:25	4:18	4:32	16:24	12:51	25:43	-
		1600ppm	4:39	-	6:52	-	-	-	-

備考) 表中、「-」はガス濃度が達しないことを意味する。

7 . 付臭剤の土中吸着に関する調査

この章では、北見市春光町付近で発生したガス漏れ事故で周辺住民からガス臭がしなかったとの報告から、ガスが土中に漏れ、移動している際の土壌吸着の可能性について述べる。

7.1 北見市における付臭剤

ガス事業法（ガス工作物の技術上の基準を定める省令第 22 条）の規定では、容易に臭気によるガスの関知ができるように供給するガスに付臭しなければならず、その程度はガス工作物技術基準の解釈例において、ガスの空気中の混合容積比率が容量で 1 / 1000 でおおいが確認できることとしている。

北見市で供給していたガスは、液化石油ガスを改質して製造されたものであり、当該ガスの付臭には有機硫黄化合物の一つであるテトラヒドロチオフェン（THT）が主に使用されている。

7.2 文献による付臭剤の土壌吸着性

付臭剤の土壌吸着については、土中にガス導管を埋設する関係からその影響を把握するため、過去に実験 を実施している。付臭剤の土壌透過性に係る実験データの一部を図 7.2.1 に示す。

社団法人日本ガス協会「付臭剤の土壌透過性に関する検討報告書」、1989 年

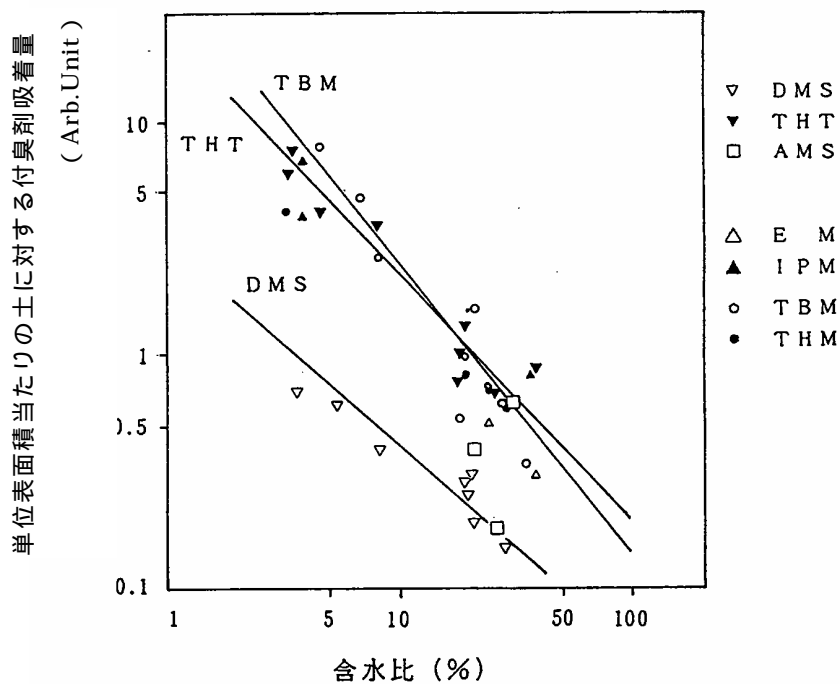


図 7.2.1 砂質土壌における含水比と付臭剤吸着量の関係

同図から、付臭剤の土壌の吸着量は、土壌の含水比が少ないほど多くなることがわかる。また、T H T は、D M S（ジメチルサルファイド）よりも吸着量が多いが、T B M（ターシャリーブチルメルカプタン）と同じ傾向にある。

この他、当該実験の結果のまとめとして、以下のことが述べられている。

イ．砂質土壌よりも粘土質土壌の方が吸着量が多い。

ロ．酸化鉄を多く含む土壌、酸性土壌等の特殊土壌では、付臭剤の分解が起こることがある。

7.3 北見市春光町における付臭剤の吸着検討

上記 7.2 に記した文献等によると、北見市春光町の事故発生場所において、ガス中の付臭剤が土壌に吸着されたために、においが感知されなかった可能性があると考えられる。

なお、詳細の検証を行う場合は、実際の土壌の T H T 吸着特性、粒径、密度、空隙率、含水比、気温（地中温度）、付臭剤濃度（分圧）、埋設深さ等を考慮する必要がある。

8 . まとめ

8.1 まとめ

北海道北見市で発生したガス漏れ事故の調査の結果、以下のことが明らかとなった。

(1) 春光町のガス導管の破断のメカニズム

春光町のガス導管の破断のメカニズムは次のように推定される。

- (a) 管の破断部付近は、旧河道部と一般部の境界付近であるとともに、砂利採取場の跡地等であったことから、地盤が緩い部分と硬い部分が混在する特殊な状況であった。
- (b) 車両荷重による土圧変動と地盤内の有効上載圧の増加によって、地盤の不同沈下が経年的に生じた。
- (c) 冬期間、地盤の表面部約 1m まで凍結したことが、車両荷重による土圧変動に起因する地盤の不同沈下を加速した。
- (d) 地盤の不同沈下により、管の破断部近傍には、管の上側が凸になるような静負荷の曲げモーメントが生じた。曲げモーメントは経年的に増加し、事故直前に増加が加速した。
- (e) 地盤の不同沈下に伴う静負荷の曲げモーメント(平均応力)に加えて、車両荷重による土圧変動及び不均質凍結による水平応力の増加が繰り返し負荷(応力振幅)となり、管の上側表面に微小な疲労亀裂が生じた。
- (f) 管は、微小な疲労亀裂を起点とし、地盤の不同沈下の増大に伴い脆性破壊に移行し、最終的に塑性崩壊で破断した。

以上のことを示すフォールトツリー図を図 8.1.1 に示す。

春光町管は、局所的に緩い地盤で不同沈下が発生したことが大きく影響したこと、車両荷重による土圧変動が凍結地盤を通じて不同沈下を加速させたこと、破断部分から大量のガスが土中に漏れ、凍結地盤が漏れたガスの移動に寄与したことから、事故に至ったものと推定される。

(2) 幸町及び常盤町のガス導管の亀裂のメカニズム

幸町及び常盤町のガス導管は、双方とも春光町のガス導管と異なり、主要道路の交通量の多い位置に埋設されており、ガス導管周囲は他工事により掘削され、地盤が不均一(緩い部分と硬い部分の混在)の状態であった。

幸町及び常盤町のガス導管の亀裂のメカニズムは、次のように推定される。

- (a) 地盤が緩い位置では、車両荷重による土圧変動で地盤の沈下が発生し、これに伴いガス導管には曲げモーメントが負荷された。
- (b) 幸町のガス導管は、複数の要因により軸力引張りに近い力、又は複数方向への曲げが繰り返し負荷され、また、幸町及び常盤町のガス導管は、ともに車両荷重による土圧変動が地盤の凍結の影響もあって繰り返し負荷され、管の表面に疲労亀裂

が発生した。

(c) 幸町及び常盤町のガス導管には、春光町のガス導管のような大きな地盤の変位が生じなかったため、脆性破壊に至らず、時間をかけて疲労亀裂が成長した。したがって、大量のガス漏れには至らなかった。

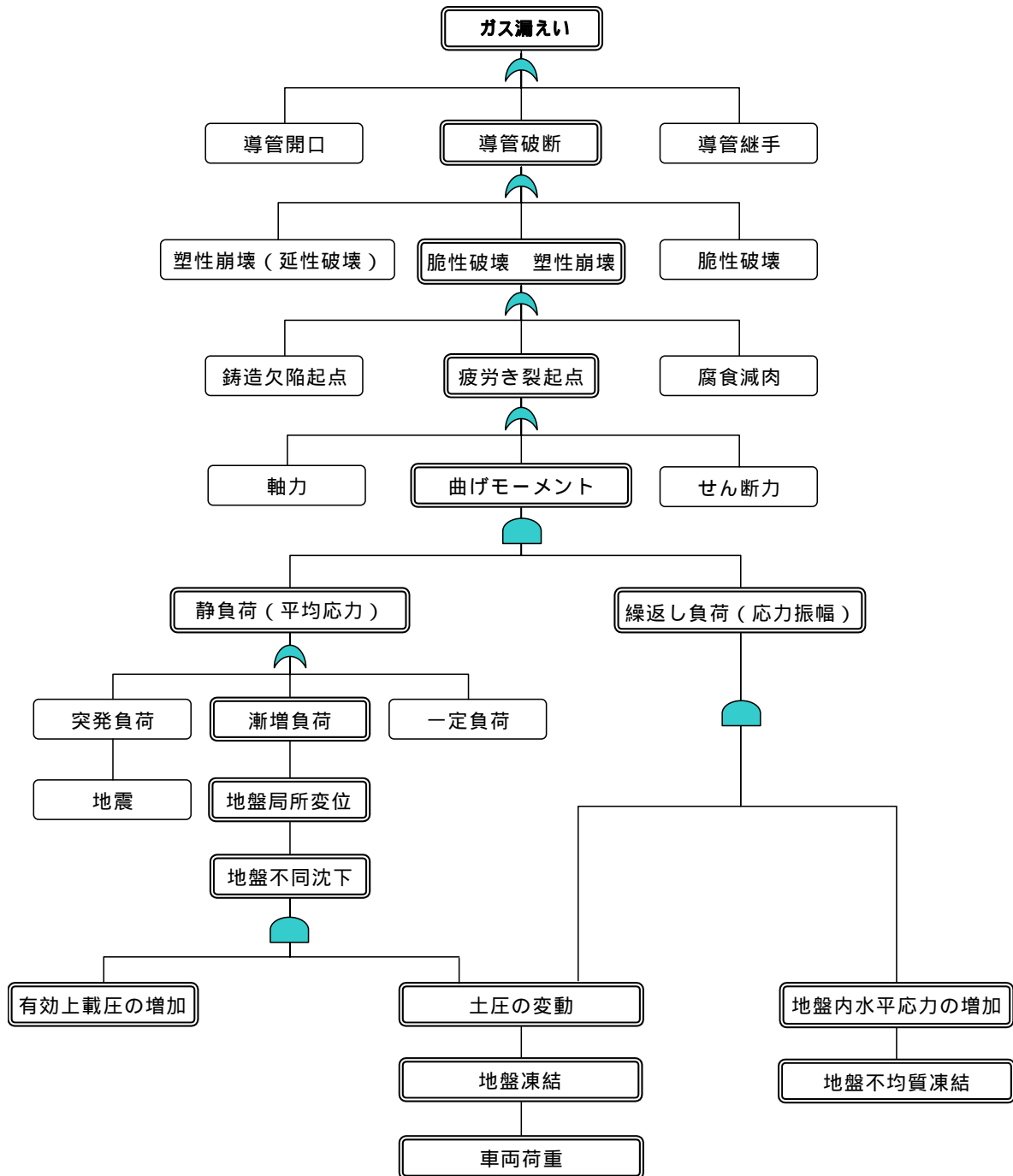


図8.1.1 ガス漏えいのフォールトツリー図
(北見市春光町におけるガス導管関連)

(3) ガス流入メカニズム

北見市春光町におけるガス流入メカニズムについて、シミュレーションの結果から破断点を中心に半径 50m 以内の住宅に被害が集中すること及び破断した時期と被害が発生した時期に大きな時間的な間隔はなかったものと推定された。

また、今回の事故の特徴として、土中に漏れた大量のガスが地盤の凍結によって大気放散することなく被害者宅まで移動し、人的被害を拡大させたことが挙げられる。

(4) 付臭剤の土壌吸着

ガスに添加している付臭剤は、漏れたガスが凍結地盤の下の乾燥状態の砂れき層を移動している間に、土壌で吸着される可能性があることを確認した。

8.2 おわりに

本技術調査で困難を感じたのは、地盤の性質が事故にどのように関わっているかという点であった。走査型電子顕微鏡が破損した管の劣化状況を明瞭に示しているのに比べて、管を取り巻く土の性質に関しては、定量的に取り扱えない部分が多い。車両が凍結した路面を走行するときの土圧変化、交通量の多寡が沈下に及ぼす影響、凍結・融解を繰り返す坂道の全体的な下方への移動、車道と歩道の不均質な凍結の可能性、埋設された管の周辺における他工事の影響、旧河川など改変された地盤が管に及ぼす影響などは、どれをとっても難しい問題ばかりであった。最終的にも、個々の要因を定量的に評価することはできなかったが、それぞれの要因が事故に影響を及ぼした蓋然性は明らかと思われ、これらの要因を総合的に解釈せざるを得なかった。

将来的にも、土や地盤に関する知識が完璧になることはないと思われるが、今回のような事故を契機にして、知識を集積するためのいっそうの努力が必要とされる。特に、当該事故の調査報告をまとめるにあたり、車両荷重による土圧変動が凍結した地盤を介して埋設したガス導管に与えた影響については、十分な解明に至っていないため、今後、この分野の技術的知見を深め、情報を蓄積することが望まれる。

また、交通量の多い主要な道路に埋設されるねずみ鑄鉄管にあっては、車両荷重による疲労亀裂の発生の可能性があることから、今後とも対策の優先順位を高めていくことが重要である。加えて、ガス事業者は、ガス導管周辺の他工事に対し、ガス導管への対処を提示する等の対策を講じているところであるが、今後とも、他工事の保安措置の徹底等の事故防止対策を継続していくことが重要である。

添付資料

北海道北見市ガス漏れ事故原因技術調査

最終報告書

添付資料

目 次

1 . 北海道北見市内におけるガス漏れ箇所の位置関係.....	1
2 . ガス導管の金属組織及び機械的性質	5
2.1 ガス導管の金属組織	5
2.2 ガス導管の機械的性質	6
3 . 北見市春光町の事故発生場所付近で行った地盤調査	10
3.1 目 的	10
3.2 調査内容.....	10
3.3 調査結果.....	13
4 . 1967 年の造成に伴う地盤内の有効上載圧の影響の検討	29
4.1 造成前後の有効上載圧	29
4.2 増加した有効上載圧によるガス導管以深の砂れき層の圧縮沈下量.....	30
4.3 増加した有効上載圧による凝灰岩の風化部の圧密沈下.....	30
5 . 春光町鑄鉄管の変形計算	32
5.1 変形計算の前提条件	32
5.2 検討 1 : 地表面の地盤変位を鑄鉄管変形計算の入力変位とした場合	33
5.3 検討 2 : 鑄鉄管の残留変形を考慮して鑄鉄管変形計算の入力変位を修正した場合	35
5.4 まとめ	37
6 . ガス導管の疲労破壊の検討	39
7 . 漏えいガスの挙動に関する調査	40
7.1 採取試料.....	40
7.2 土質関係調査分析	40
7.3 漏えいガスの住宅への侵入経路 (推定)	47
7.4 ガスの到達時間の推定	52
8 . 幸町管及び常盤町管のガス漏えいのフォールトツリー	58
9 . 用語説明 (五十音順)	60

1. 北海道北見市内におけるガス漏れ箇所の位置関係

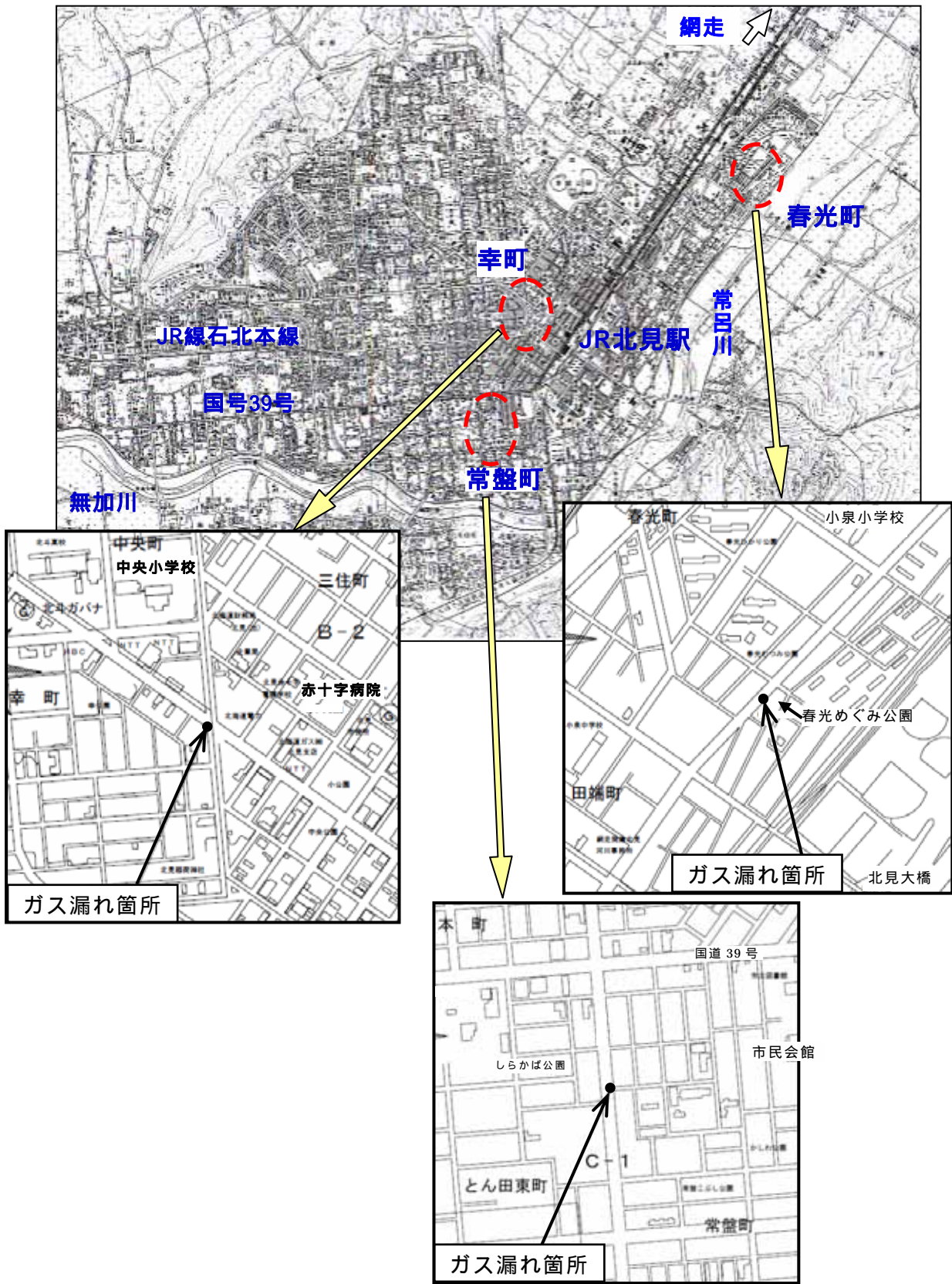


図 1.1.1 北見市におけるガス漏れ箇所の位置関係図



図 1.1.2 春光町付近で破断したガス導管及び周辺埋設物（下水管）に係る平面図

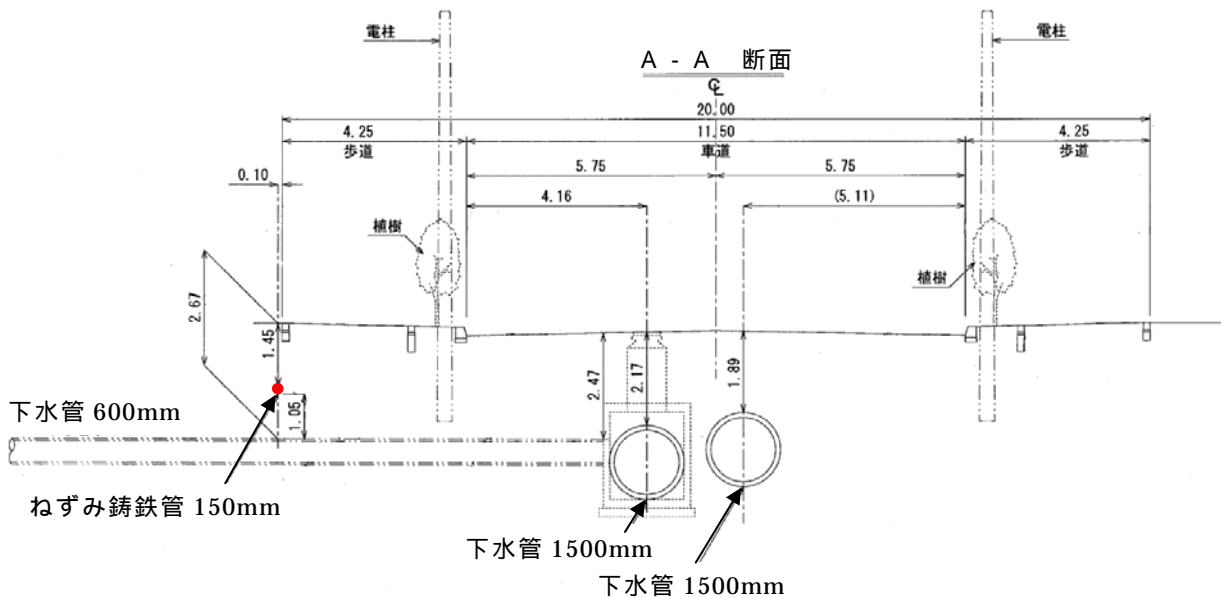


図 1.1.3 春光町付近で破断したガス導管及び周辺埋設物（下水管）に係る断面図

（備考）上図は、周辺埋設物のうち、事故原因に関係する管類のみを示したものである。

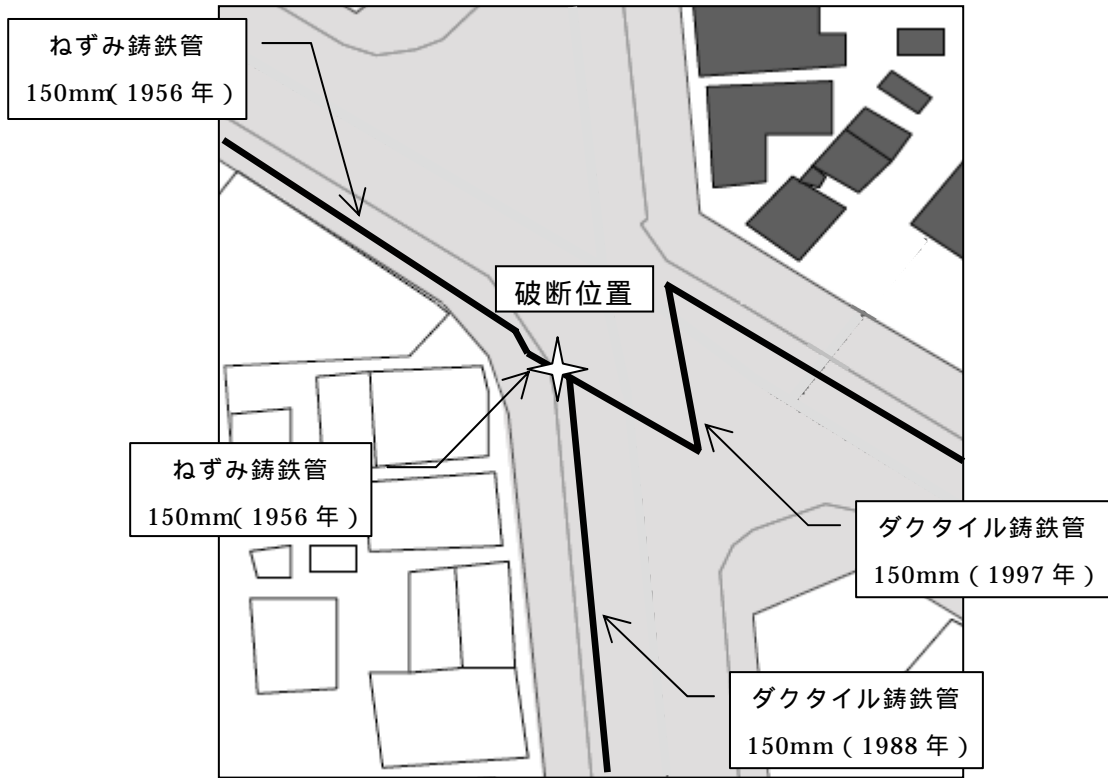
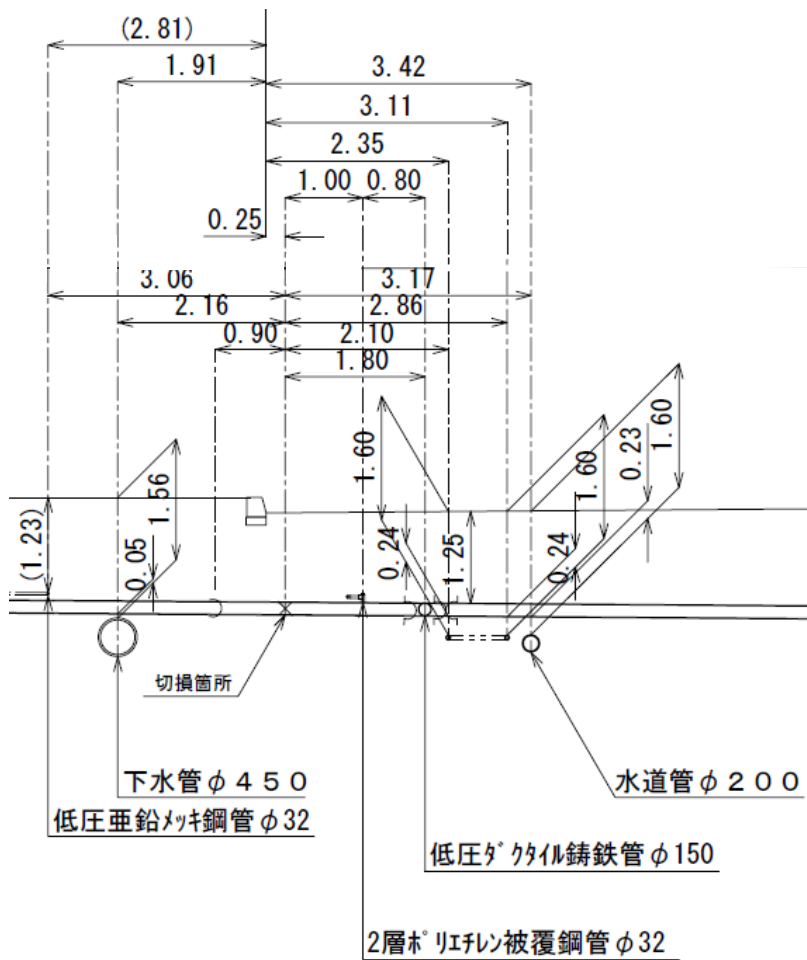


図 1.1.4 幸町付近で破断したガス導管及び周辺埋設物（下水管）に係る平面図



(備考)
これらの図は、周辺埋設物のうち、事故原因に関係する管類のみを示したものである。

図 1.1.5 幸町付近で破断したガス導管及び周辺埋設物（下水管）に係る断面図

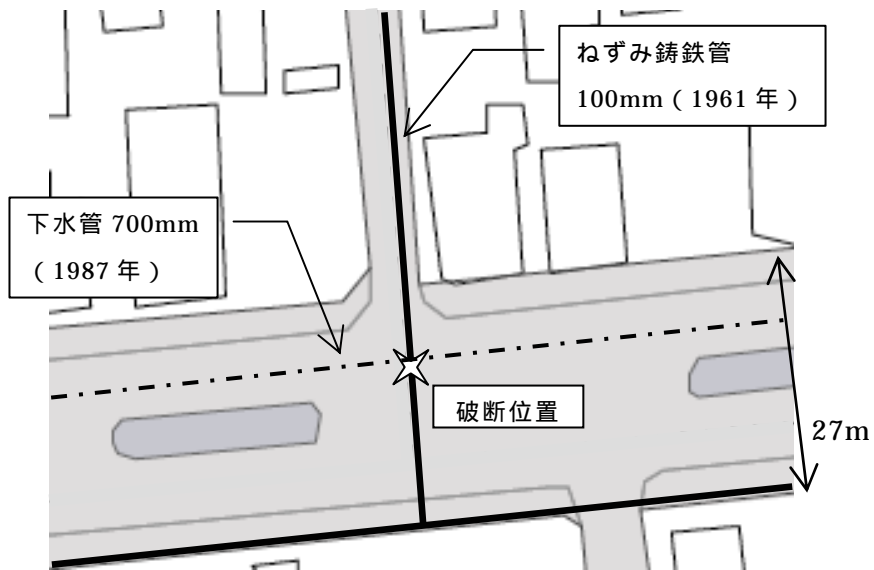


図 1.1.6 常盤町付近で破断したガス導管及び周辺埋設物（下水管）に係る平面図

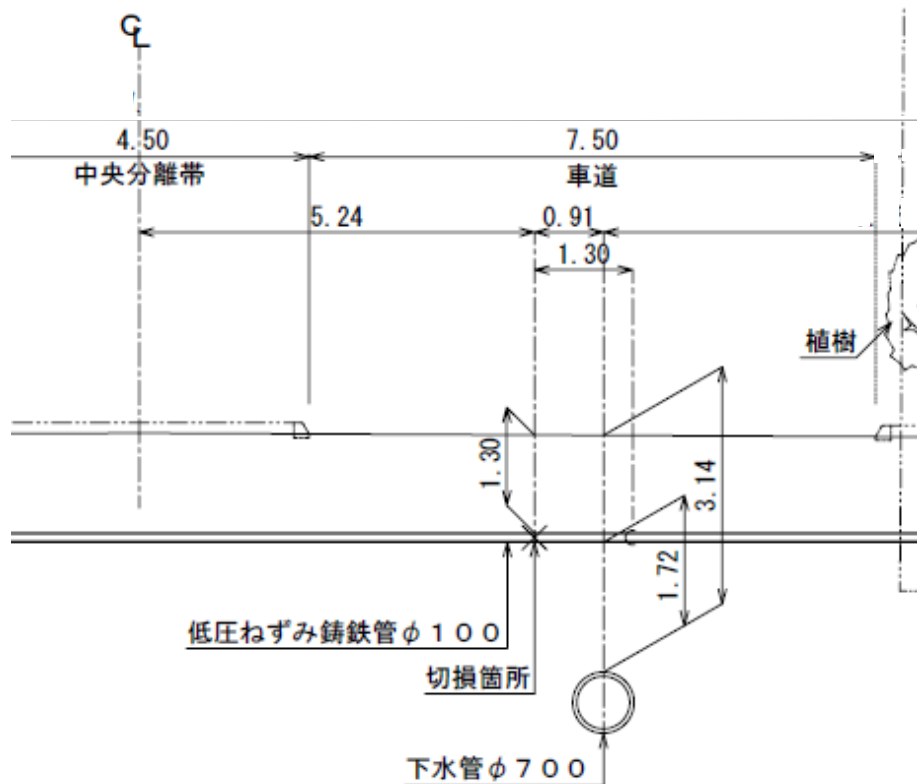


図 1.1.7 常盤町付近で破断したガス導管及び周辺埋設物（下水管）に係る断面図

（備考）上図は、周辺埋設物のうち、事故原因に関係する管類のみを示したものである。

2. ガス導管の金属組織及び機械的性質

本章では、春光町管、幸町管及び常盤町管の3本について、金属組織及び機械的性質の結果を述べる。

2.1 ガス導管の金属組織

春光町管、幸町管及び常盤町管の顕微鏡組織を写真 2.1.1、写真 2.1.2 及び写真 2.1.3 に示す。

観察のポイントは、(1) 製造法の確認、(2) 強度の推定、(3) 組織異常、欠陥の有無、(4) 経年変化の有無である。



(a) 外周部 1.5-2 mm (b) 内側中心部 3-3.5 mm (c) 内周部 4-4.5 mm

写真 2.1.1 春光町管の顕微鏡組織

イ．春光町管は、遠心金型鑄造した後、これを焼鈍した組織である。外周部はフェライト基地に塊状黒鉛の組織、肉厚中心部から内周部は樹枝状晶が発達し、共晶状 D 型黒鉛が分布する組織である。鑄鉄管として正常な組織である。問題になるような鑄造欠陥はない。また、組織に腐食と経年劣化の痕跡はない。



(a) 外周部 (b) 肉厚中心部の引巢の例 (c) 内周部

写真 2.1.2 幸町管の顕微鏡組織

ロ．幸町管は、砂型立型鑄造管の組織である。パーライト基地にばら状、共晶状、粗い A 型等の片状黒鉛が分布する。肉厚中心部に引巢、ピンホール等の鑄造欠陥がある。



(a) 外周部 1.5 mm (b) 肉厚中央部 2mm (c) 内周部 4-5 mm

写真 2.1.3 常盤町管の顕微鏡組織

ハ .常盤町管は、遠心金型鑄造組織を焼鈍した組織である。基地はフェライト約 70%、パーライトが約 30%である。内外の表面に異常黒鉛の部分がある。また、表面層に腐食の痕跡がある。

2.2 ガス導管の機械的性質

(1) 引張強さ

ガス導管の引張試験結果を表 2.2.1 に示す。鑄肌まま試験片の引張強さは、春光町管で 229MPa、幸町管で 132MPa、常盤町管で 192MPa である。春光町管と常盤町管は遠心鑄造管であり、幸町管は立型鑄造管であり、製造方法の差が引張強度に表れている。また、鑄肌を削除した試験片の引張強度は、鑄肌ままよりも 11~16MPa 大きくなっており、鑄肌の影響によって引張強さが低下することがわかる。

破断伸びは、鑄肌を削除した試験片と鑄肌まま試験片では、破断伸びの絶対値が小さいことと、計測値のばらつきが大きいこともあり、優位な差は認められない。

表 2.2.1 引張試験結果

供試材	管寸法	試験片 (表面仕上げ)	引張強さ (N/mm ²)	破断伸び (%)
春光町	150A	鑄肌のまま	229	0.55
		鑄肌削除	240	0.40
幸町	150A	鑄肌のまま	132	0.48
		鑄肌削除	155	0.39
常盤町	100A	鑄肌のまま	192	0.52
		鑄肌削除	208	0.83

(2) 硬さ

3つの鑄鉄管の硬さ試験 (HRB 硬さ) 結果を表 2.2.2 に示す。いずれも顕微鏡組織と良く対応しており、特に異常はない。

表 2.2.2 鋳鉄管の硬さ試験（HRB 硬さ）結果

		HRB 硬さ（HB 換算）								
		外周部			肉厚中心			内周部		
春光町管	測定値	83.5	86.3	86.1	83.8	83.3	84.1	78.8	79.1	76.5
	平均	85 (HB 162)			84 (HB 159)			78 (HB 141)		
	(破壊部より遠方)	85 (HB 162)			82 (HB 153)			77 (HB 138)		
幸町管	測定値	91.6	91.5	90.7	89.7	88.4	89.3	89.2	87.6	89.7
	平均	91 (HB 188)			89 (HB 179)			89 (HB 179)		
	90度位置 測定値	89.0	88.5	88.1	85.9	88.3	87.5	88.0	88.1	87.3
	" 平均	89 (HB 179)			87 (HB 170)			88 (HB 175)		
常盤町管	測定値	76.2	78.9	77.3	75.1	75.1	76.2	72.0	69.5	74.7
	平均	77 (HB 138)			75 (HB 133)			74 (HB 131)		

(3) 吸収エネルギー

ガス導管のシャルピー衝撃試験結果を図 2.2.1 に示す。各試験温度における吸収エネルギーに優位な差はない。

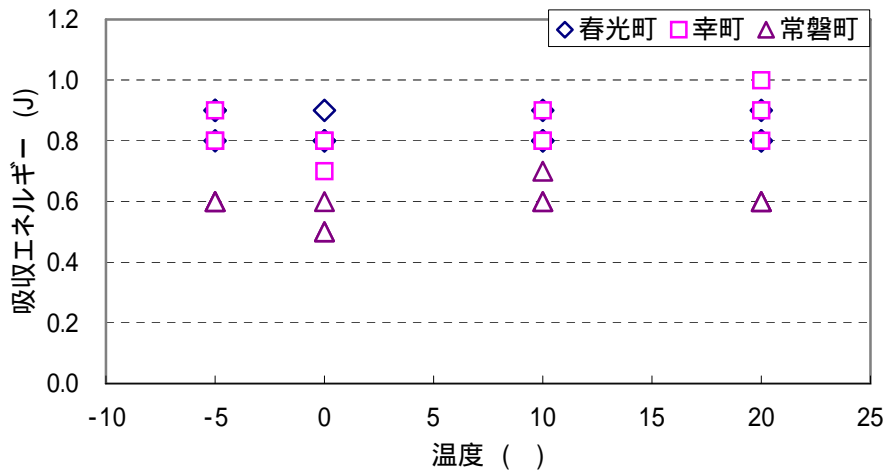


図 2.2.1 各温度におけるシャルピー吸収エネルギー

(4) 管体曲げ及び圧壊試験

3月3日の掘削調査によって得られたガス導管を用いて、管体曲げ及び圧壊試験を実施した。

管体曲げ

管体曲げ試験の状況を写真 2.2.1 に、試験結果を図 2.2.2 に示す。

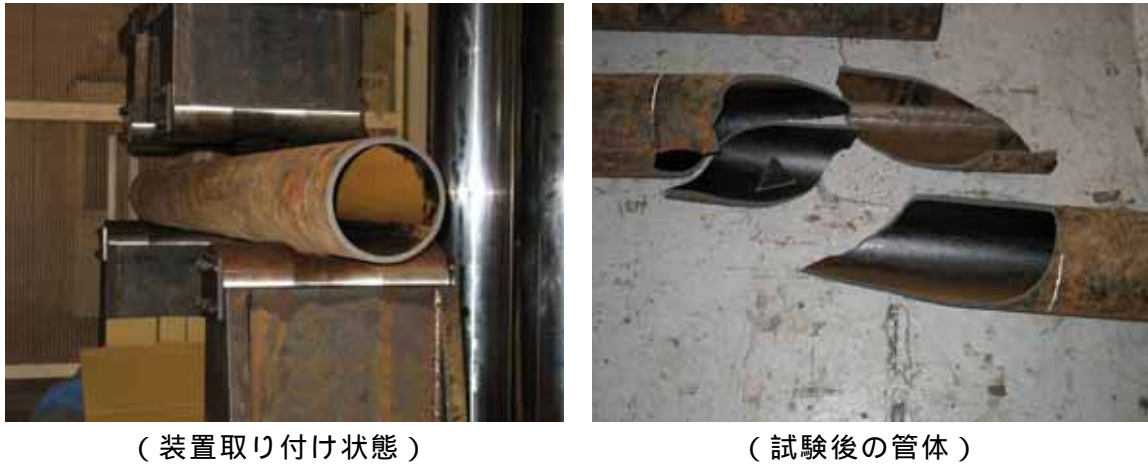


写真 2.2.1 管体曲げ試験の状況

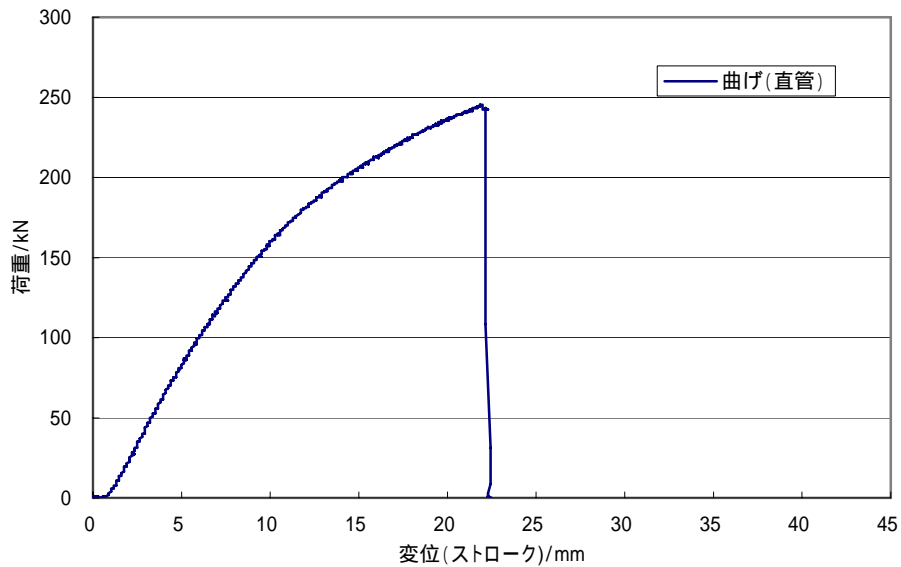


図 2.2.2 管体曲げ試験における荷重と変位の関係

継手部を含んだ管体曲げ試験

継手部を含んだ管体曲げ試験の状況を写真 2.2.2 に、結果を図 2.2.3 に示す。

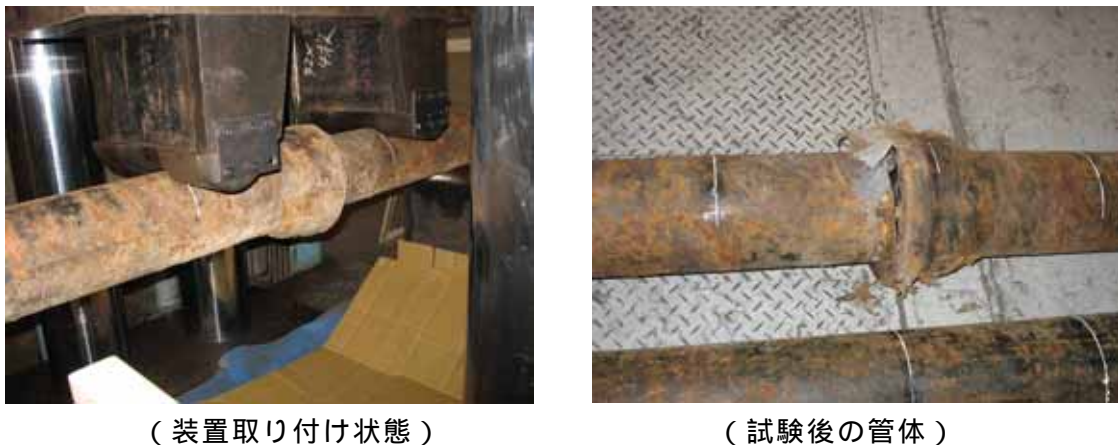


写真 2.2.2 継手部を含んだ管体曲げ試験

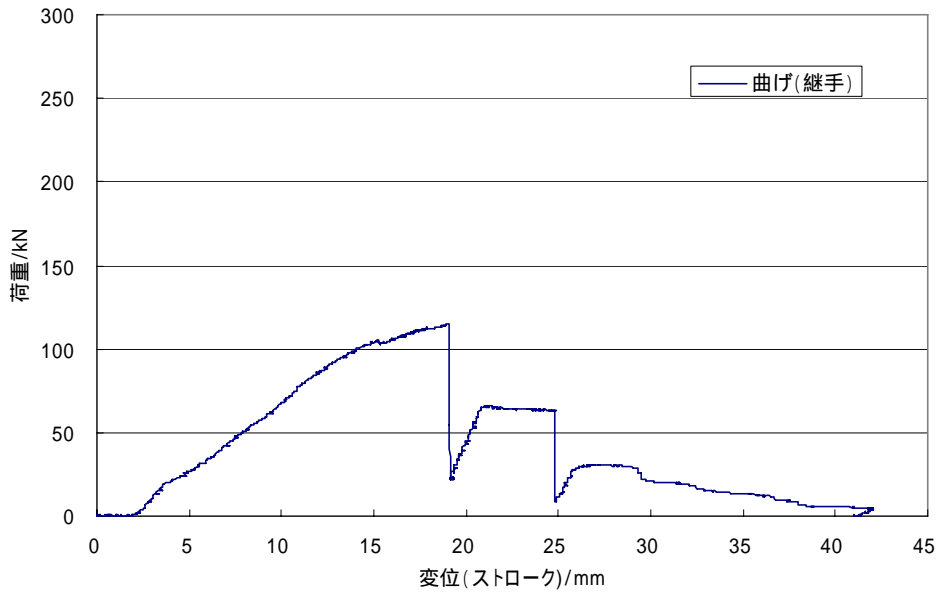


図 2.2.3 継手部を含んだ管体曲げ試験における荷重と変位の関係

圧壊試験

圧壊試験実施後のガス導管の状況を写真 2.2.3 に、実施結果を図 2.2.4 及び図 2.2.5 に示す。



写真 2.2.3 試験実施後のガス導管の状

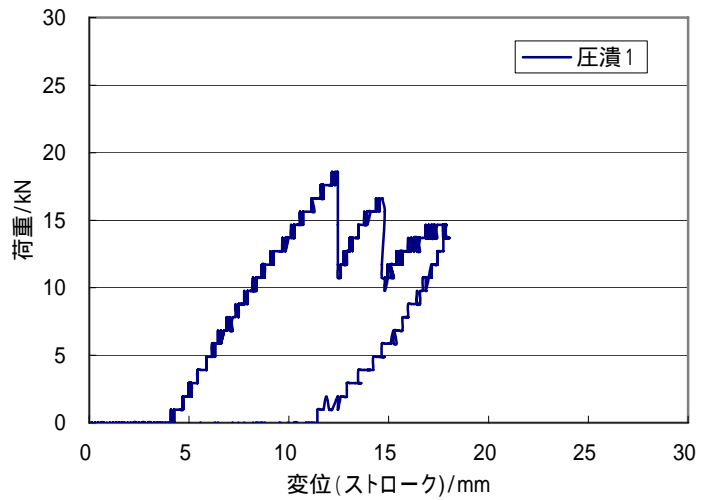


図 2.2.4 圧壊試験の結果 1

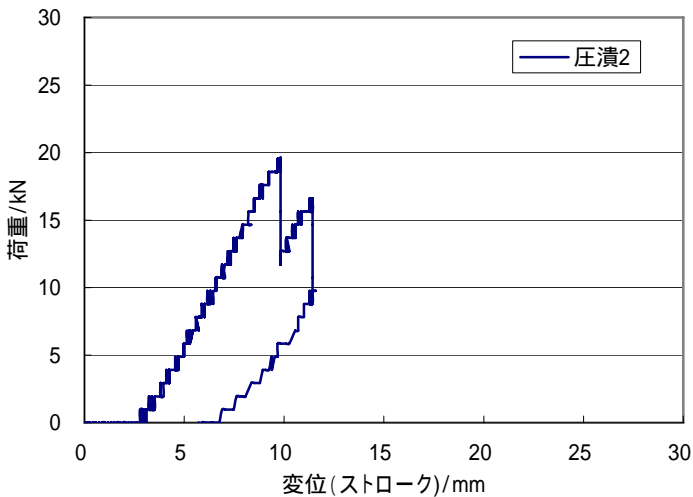


図 2.2.5 圧壊試験の結果 2

3. 北見市春光町の事故発生場所付近で行った地盤調査

3.1 目的

北海道北見市におけるガス漏えい事故の原因究明にあたり、春光町におけるガス導管の周辺地盤の状態を確認するため、各種地盤調査を行うことを目的とする。

3.2 調査内容

(1) ボーリング調査 A (地層断面の把握)

仕様

- ・ ボーリング長：10m
- ・ ボーリング口径：66 mm
- ・ 標準貫入試験：1m ピッチ (合計 120 回)
- ・ ボーリング本数：12 本
- ・ ボーリング延長：10m × 12 本 = 120m

ボーリング位置

図 3.2.1 及び図 3.2.2 に示すとおり。

実施時期

平成 19 年 3 月 1 日、2 日、5～7 日

(2) ボーリング調査 B (透過試験試料採取)

仕様

- ・ ボーリング長：4m (地下水位まで)
- ・ ボーリング口径：116 mm
- ・ オールコアボーリング

ボーリング位置

図 3.2.1 及び図 3.2.2 に示すとおり。

実施時期

平成 19 年 3 月 8 日

(3) 物理試験

仕様

ボーリング調査 B において、砂れきについて物理試験(粒度及び比重)を実施する。

試料の採取位置

図 3.2.1 及び図 3.2.2 のうち、B-1、B-2 及び B-3 のボーリング位置で採取

実施時期

ボーリング調査 B で採取後に実施

(4) 表面波探査

仕様

調査延長 (管軸方向：破断地点を中心として各 100m、管軸直交方向：破断地点を

中心として公園側 50m、民家側道路端まで、合計 300m 弱)

管軸方向の調査位置は、車道側の公園側歩道寄りで実施

実施時期

- ・(冬期)平成 19 年 2 月 28 日、3 月 1 日
- ・(春期)平成 19 年 5 月 28 日～30 日

(5) P S 検層 (速度検層)

仕様

- ・ボーリング調査の孔を利用して P S 検層を実施。これにより地盤の伝搬速度を確認
- ・実施箇所：1 箇所 (0.5m ピッチで 10m まで実施)

実施位置

図 3.2.2 に示すとおり。

実施時期

平成 19 年 3 月 2 日

(6) 孔内水平載荷試験

仕様

- ・ボーリング調査の孔を利用した水平載荷試験を実施。これにより地盤特性を把握する。

実施位置

図 3.2.2 に示すとおり。

実施時期

- ・ガス導管の破断地点近傍 平成 19 年 3 月 2 日
- ・ガス導管の破断地点近傍と道路を挟んだ反対側 (被害者宅前)

平成 19 年 3 月 5 日

(7) 密度検層

- ・ボーリング B で採取した試料に対し、土層中の密度を確認するため、密度検層についてボーリング孔を利用して実施

(8) 凝灰岩のサンプリング調査等

仕様

- ・凝灰岩層からのサンプリングとボーリング調査を兼ねて実施し、当該凝灰岩の圧密沈下の可能性を確認するため、圧縮試験等の土質試験を行う。
- ・実施箇所：ボーリング 2 箇所 (パイロットボーリングを含む。)

実施位置

図 3.2.2 に示す A-8 付近及び A-4 と A-8 の中間位置

実施時期

平成 19 年 5 月 28 日～30 日

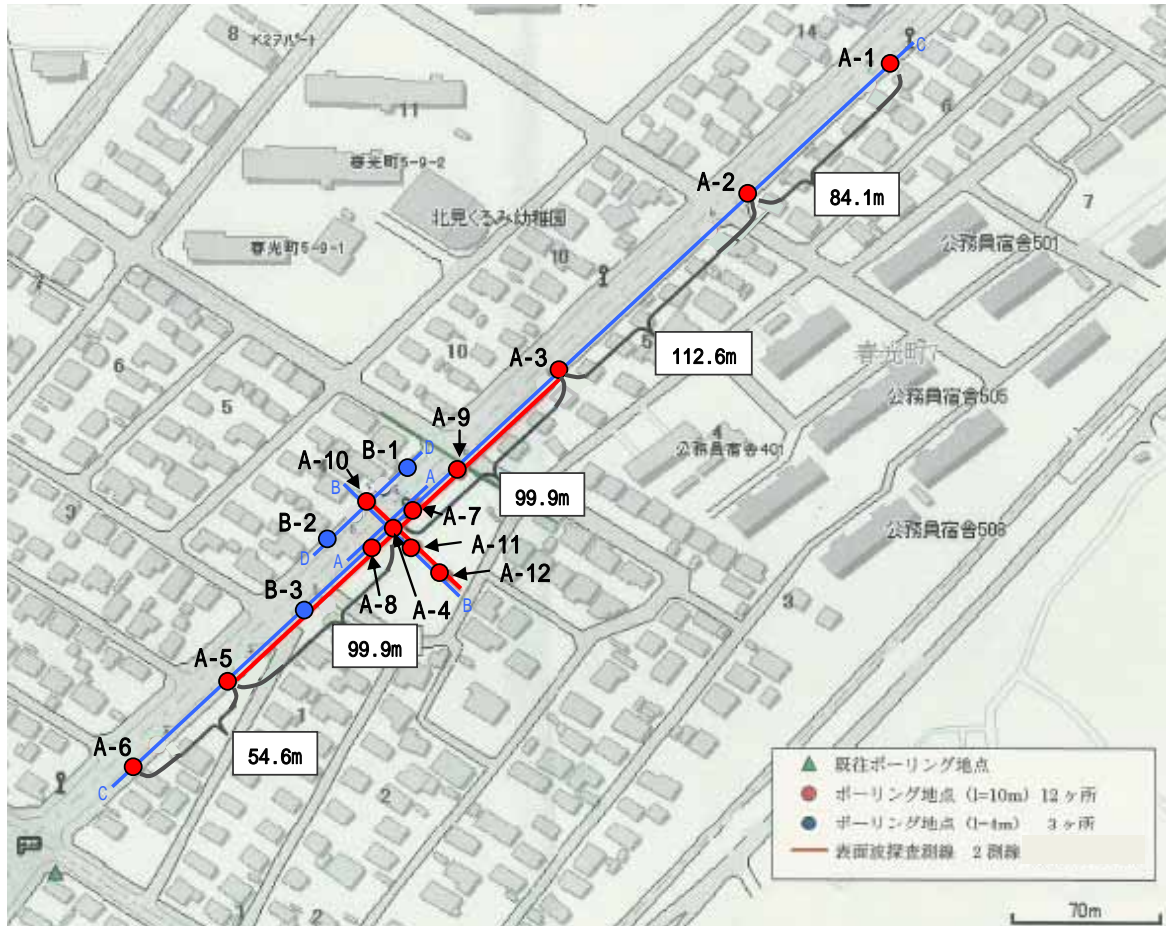


図 3.2.1 地盤調査実施位置

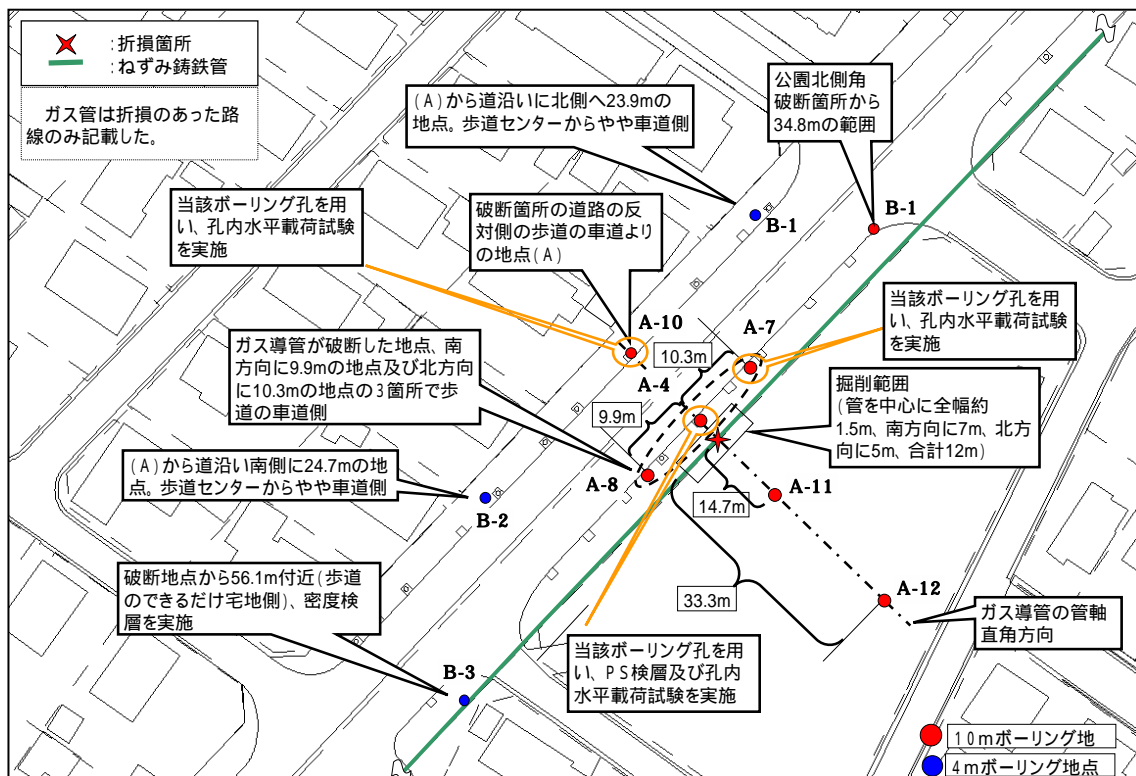
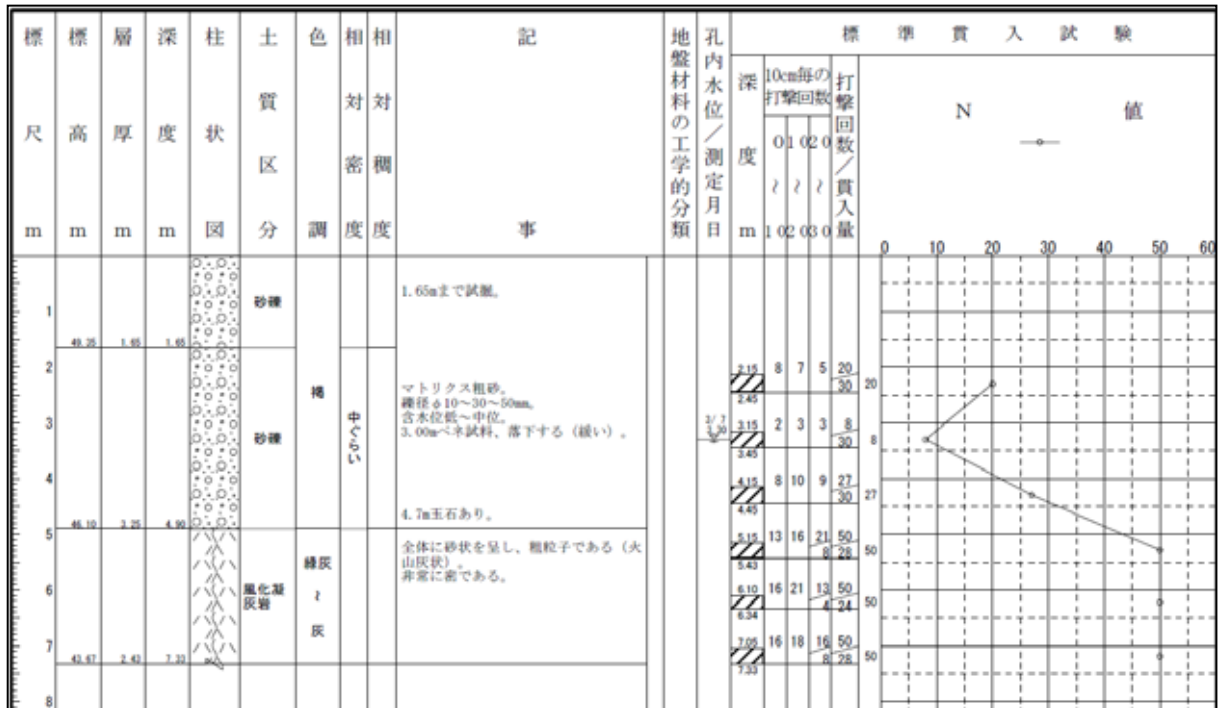


図 3.2.2 地盤調査実施位置（詳細）

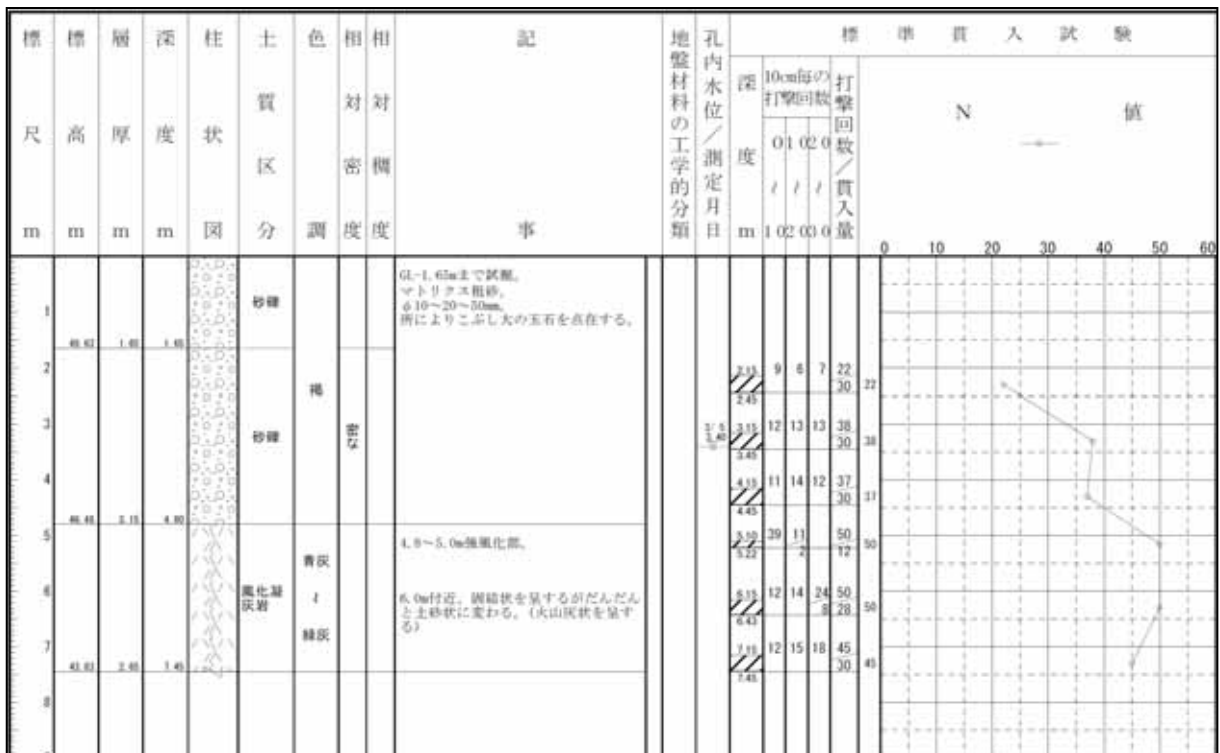
3.3 調査結果

(1) ボーリング調査A (地層断面の把握)

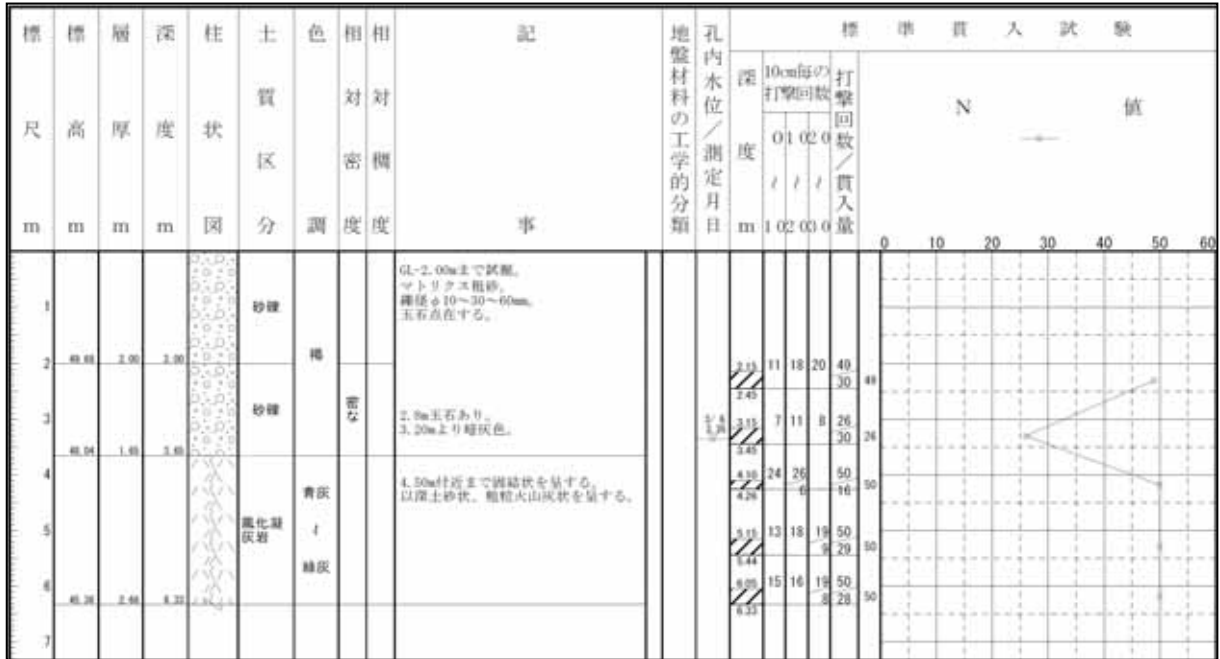
A-1 (南大通り、ガス導管破断点から北側)



A-2 (南大通り、ガス導管破断点から北側)



A-3 (南大通り、ガス導管破断点から北側)



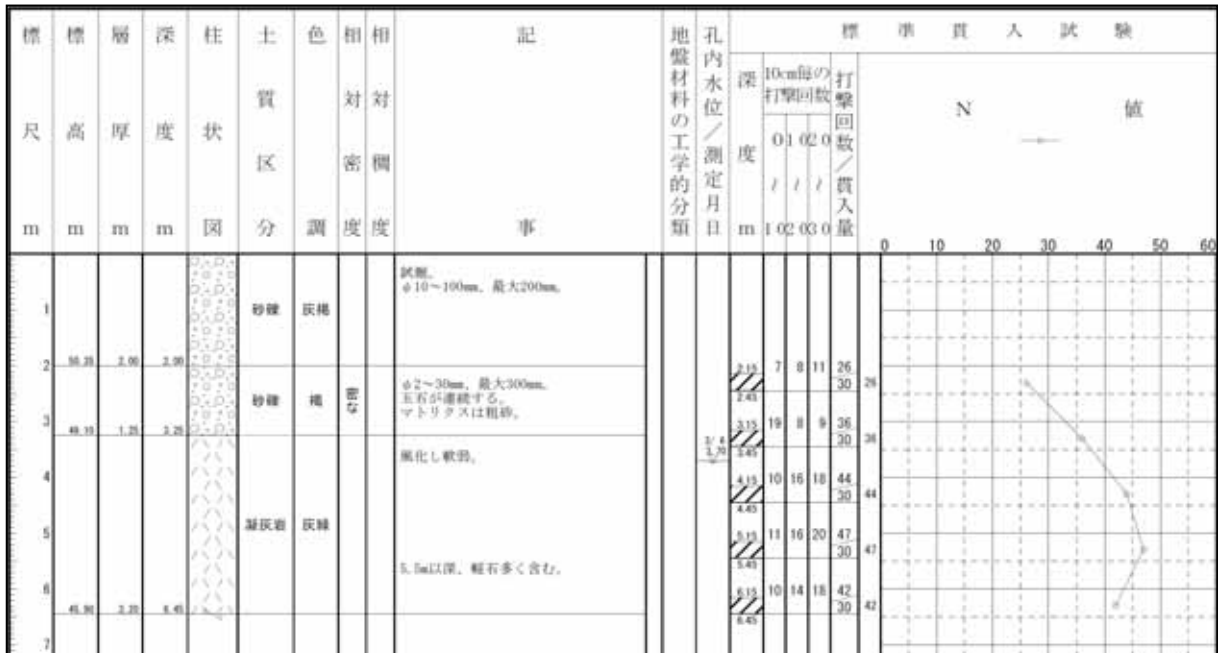
A-4 (南大通り、ガス導管破断点付近)



A-5 (南大通り、ガス導管破断点から南側)



A-6 (南大通り、ガス導管破断点から南側)



A-7 (南大通り、ガス導管破断点から北側)



A-8 (南大通り、ガス導管破断点から南側)



A-9 (南大通り、ガス導管破断点から北側)



A-10 (南大通り、ガス導管破断点の反対側歩道)



A-11 (南大通り、ガス導管破断点から公園側敷地内)



A-12 (南大通り、ガス導管破断点から公園側敷地内)



(2) ボーリング調査 B

B-1 (南大通り、ガス導管破断点から反対側歩道の北側)

標尺	標高	層厚	深	柱状	土質	色	相対	相対	記	地盤材料の工学的分類	孔内水位/測定月日
m	m	m	m	図	区分	調	密	稠	事		
1					玉石混り砂礫				1.45mまで試験。		
2	50.28	1.85	1.85		玉石混り砂礫				マトリクス粗砂、 礫径φ10~30~60mm、 MAXφ120mm。 裏目、断角礫を主体。		
3	48.76	1.50	3.15		風化凝灰岩	黄褐色			土砂状コアを呈する。		1/4 1/20
4	47.31	0.85	4.00								

B-2 (南大通り、ガス導管破断点から反対側歩道の南側)

標尺	標高	層厚	深	柱状	土質	色	相対	相対	記	地盤材料の工学的分類	孔内水位/測定月日
m	m	m	m	図	区分	調	密	稠	事		
1					砂礫	灰褐色			試験。 φ10~100mm、最大200mm。		
2	49.21	1.20	2.90		砂礫	褐色			φ2~30mm、最大100mm、 マトリクスは細~中砂。		
3					凝灰岩	灰緑			風化し軟弱。		1/4 1/20
4	48.07	1.20	4.00								

B-3 (南大通り、ガス導管破断点から反対側歩道の南側)

標尺	標高	層厚	深	柱状	土質	色	相対	相対	記	地盤材料の工学的分類	孔内水位/測定月日
m	m	m	m	図	区分	調	密	稠	事		
1	52.32	0.95	0.95		アスファルト	黒			1.5mまで試験。 舗装。		
2	50.57	1.45	1.90		砂礫				礫φ5~80mm、最大φ80mm~250mm、 マトリクスは凝灰質砂。 細かい、崩れやすい。		
3	48.92	1.65	3.15		砂礫	茶褐色			礫φ5~80mm、 玉石φ80~150mm多く混入。 マトリクスは凝灰質砂。 崩れやすい。		
4	48.07	0.85	4.00		凝灰岩	黄灰 緑灰			軟岩、含水高い。		

(3) 物理試験

砂れきの物性試験をボーリング調査Bの孔内から採取したもので実施した。その結果を表 3.3.1 に示す。

表 3.3.1 砂れきの物理試験結果

試料番号	B-1-1	B-2-1	B-3-1
深度 (GL-m)	2.20~2.40	2.10~2.40	2.60~3.00
土粒子の密度試験	2.623	2.663	2.701
粒度試験			
礫分 (2~75mm)	83.8	70.7	63.1
砂分 (0.075~2mm)	12	23.1	28.6
シルト分 (0.005~0.075mm)	4.2	6.2	8.3
粘土分 (0.005mm未満)			
最大粒径(mm)	37.5	53	53
均等係数	76.3	109.5	86.9
曲率係数	22	1.3	0.9
50%粒径 (mm)	17.4978	14.814	5.6987
20%粒径 (mm)	5.9005	0.6415	0.5091
10%粒径 (mm)	0.2636	0.1819	0.1296
地盤材料の分類名	粒径幅の広い砂混じり礫 (GW-S)	細粒分混じり砂質礫 (GS-F)	細粒分混じり砂質礫 (GS-F)

(4) 表面波探査

ガス導管軸方向

ガス導管軸方向の表面波探査について、冬期のものと春期のものを併せた結果を図 3.3.1 に示す。

ガス導管直交方向

ガス導管直交方向の表面波探査の冬期の結果を図 3.3.2 に、また、春期の結果を図 3.3.3 に示す。

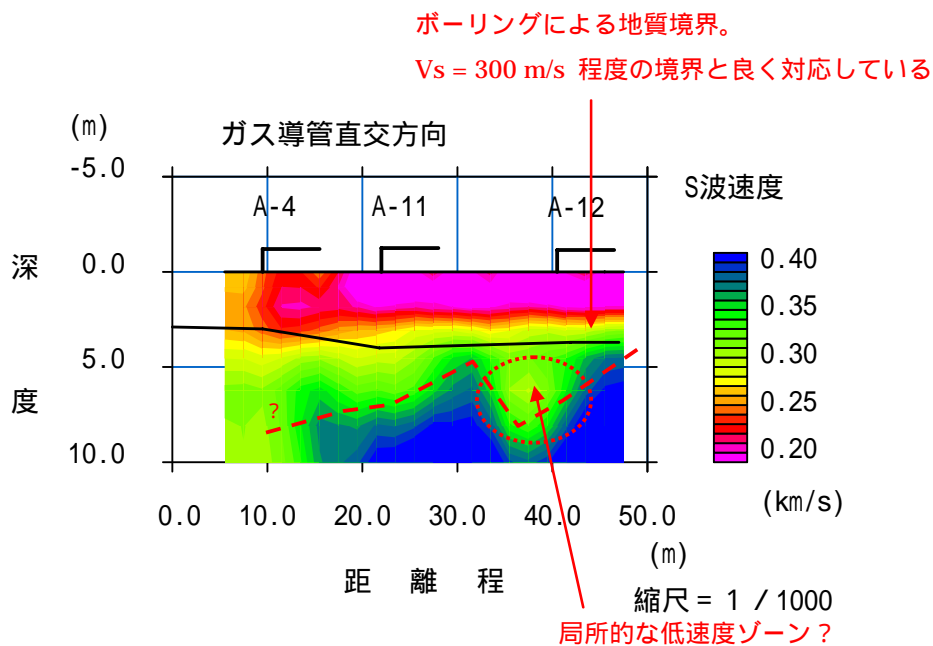


図 3.3.2 ガス導管直交方向の表面波探査結果 (冬期)

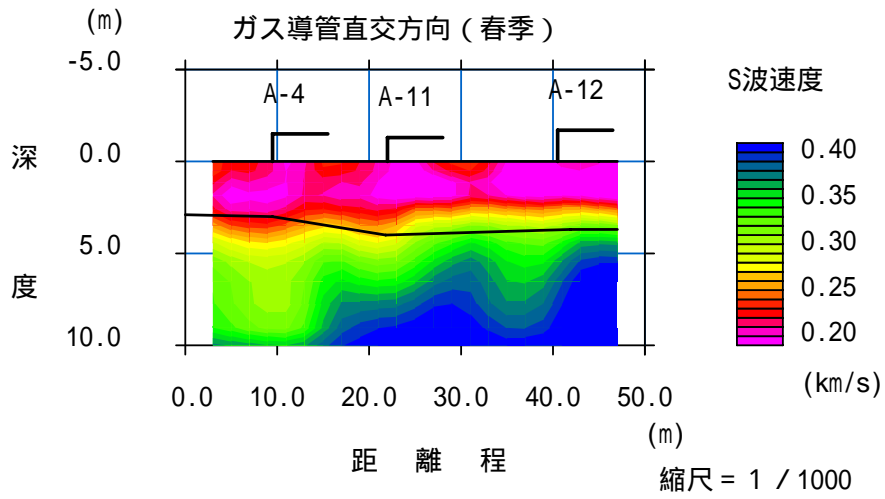


図 3.3.3 ガス導管直交方向の表面波探査結果 (春季)

ボーリングによる地質境界。
 $V_s = 300$ m/s 程度の境界と良く対応している。

破断位置

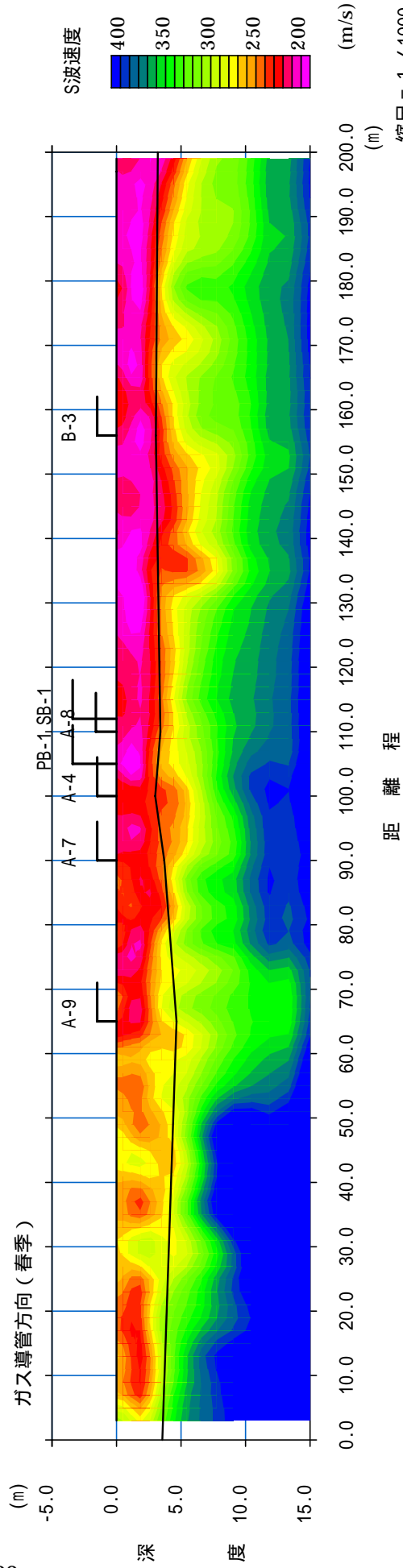
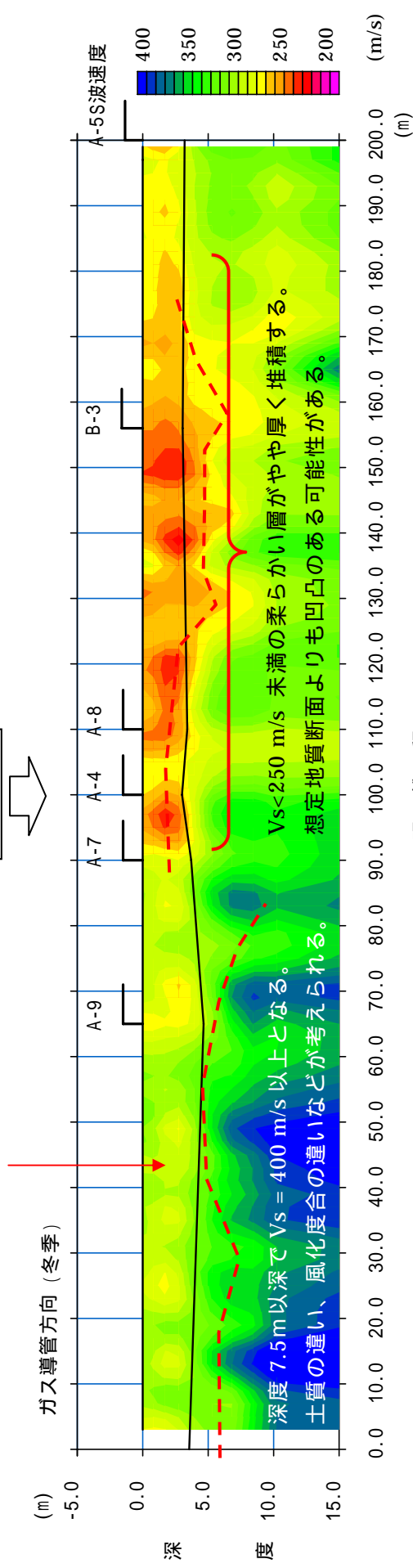


図 3.3.1 表面波探査から推定されるガス導管方向の断面の S 波速度分布

(5) P S 検層 (速度検層)

実施場所

実施した地点は、A-4 のボーリング孔で実施し、実施位置等を表 3.3.2 に示す。

表 3.3.2 PS 検層数量表

地点	P S 検層 実施深度	受振 間隔
A-4	0.5m-5m	0.5m

実施結果

図 3.3.4 及び表 3.3.3 に解析結果を示す。

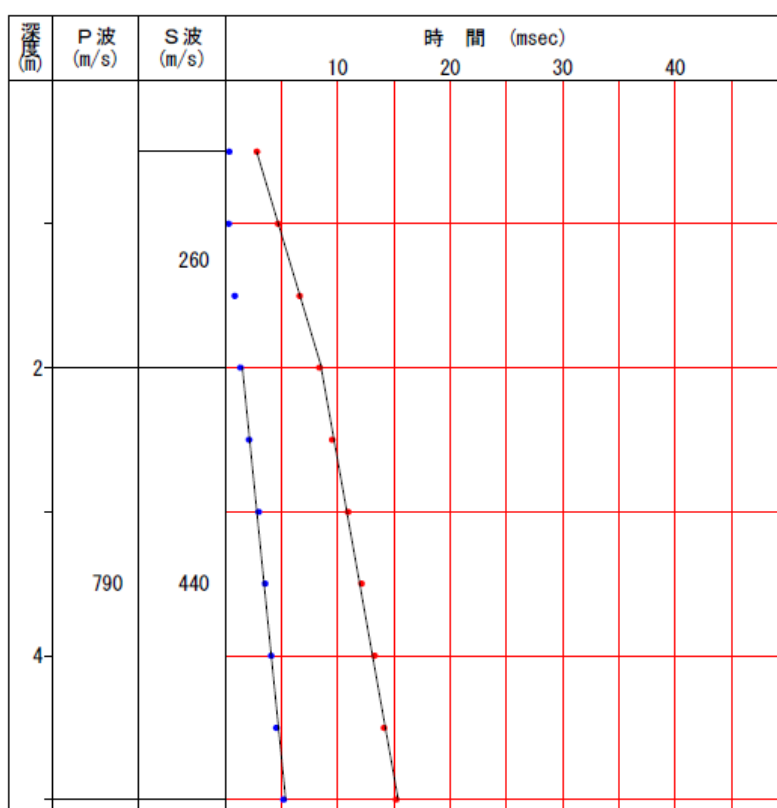


図 3.3.4 PS 検層解析結果 (A-4)

表 3.3.3 速度検層結果一覧表

地層	深度 GL-m	P 波(m/s)	S 波(m/s)
砂・砂礫(試掘箇所)	0.5 ~ 2.0	---*	260
砂礫	2.0 ~ 3.0	790	440
凝灰岩	3.0 ~ 5.0	790	440

* ケーシングが挿入されているため、測定できず。

(6) 孔内水平載荷試験

試験結果の一覧を表 3.3.4、変形係数 E と N 値の関係を図 3.3.5 に示す。

表 3.3.4 孔内水平載荷試験結果

地点	土質	深度 GL-m	N値	試験結果			
				静止土圧 P0 (kN/m ²)	降伏圧 Py (kN/m ²)	地盤係数 km (kN/m ³)	変形係数 Es (kN/m ²)
A-5	砂礫	2.6	33	220.9	754.6	3.17E+05	1.90E+04
A-7	砂礫	2.4	22	323.9	362	6.65E+04	5.05E+03
		3.3	12	78.5	343.6	3.48E+04	2.31E+03
A-10	砂礫	2.3	41	174.8	742.3	2.84E+05	1.71E+04

表 3.3.4 より、砂れき層の変形係数は N 値によって異なり、 $E = 2.31 \times 10^3 \sim 1.90 \times 10^4 \text{ kN/m}^2$ である。

なお、A-7 孔にて実施した試験は、試験実施中にゾンデが破裂したものの、降伏を確認した後にゾンデが破裂した経緯がある。

よって、A-7 の試験結果はあくまでも参考値として表記している。

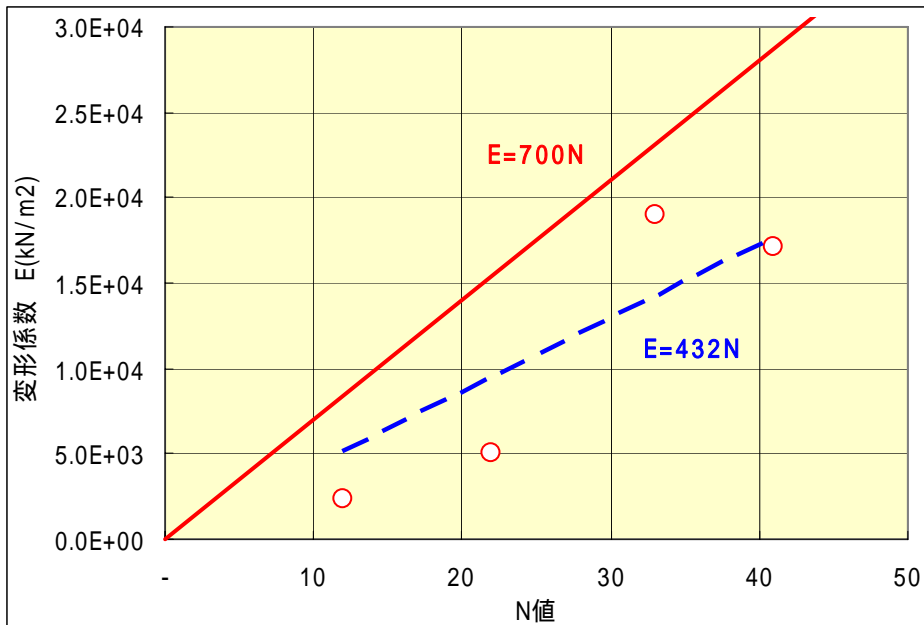


図 3.3.5 N 値と変形係数 E の関係

(7) 密度検層

図 3.3.6 に密度検層結果と B-3 孔にて確認した土質区分を示す。地表付近の影響を考慮して、GL-1.5m 付近までの砂れき層に係るデータは評価しないこととした。これは、試掘の対象深度を示しているため、不確かな値であると判断できることからである。

表 3.3.5 に各深度における平均密度値を示す。

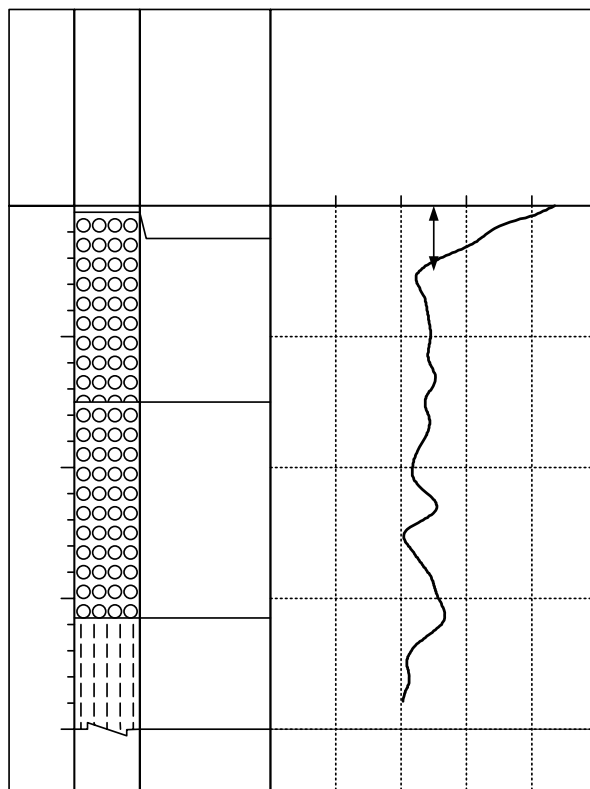


図 3.3.6 密度検層結果図

表 3.3.5 各層の平均密度

土質	対象深度 (GL-m)	密度 (g/cm ³)	備考
試掘箇所(砂・砂礫)	0.0 ~ 1.5	2.08	地表の数値は省いている。
砂礫	1.5 ~ 3.2	2.07	
凝灰岩	3.2 ~ 4.0	2.04	

(8) 凝灰岩のサンプリング調査等

追加ボーリング調査

追加ボーリング調査は、A-4 と A-8 の中間地点でパイロットボーリング(PB-1)を、A-8 の近傍でサンプリングボーリング(SB-1)を実施した。

基本的な地層構成は、冬期調査と同様で地表より砂れきが分布し、その下位に凝灰岩の分布が確認された。

なお、冬期の調査結果では、A-4 の凝灰岩上端深度が浅い位置にて確認され、凸状を呈していると考えられたが、PB-1 の凝灰岩上端深度を考慮すると、なだらかな凸状であることが推測された。

室内土質試験結果

凝灰岩の室内土質試験の結果を表 3.3.6 に示す。

同表において、試料番号はサンプリングした深度別に付しており、試料 No.1 は 3.5 ~ 3.9m の範囲で、試料 No. 2 及び No. 3 は 3.9 ~ 4.2m の範囲で、試料 No.4 は 4.2 ~ 4.8m の範囲でサンプリングしたものである。

表 3.3.6 サンプリングした凝灰岩の土質試験結果

		試料番号		No1	No2,3	No4	
		試験深度 (GL-m)		3.50 ~ 3.90	3.90 ~ 4.22	4.22 ~ 4.80	
土質試験	一般項目	土粒子の密度 s (g/cm ³)		2.451	2.462	2.473	
		含水比 w_n (%)		42.7	51.2	51.1	
		粒度	礫分 (2 ~ 75mm) (%)		0.3	0.0	0.0
			砂分 (0.075 ~ 2mm) (%)		36.3	25.7	57.1
			シルト分 (0.005 ~ 0.075mm) (%)		53.6	57.5	34.2
			粘土分 (0.005mm 未満) (%)		9.8	16.8	8.7
	特性	液性限界 W_L (%)		65.8	73.1	59.2	
		塑性限界 W_p (%)		45.7	44.3	NP	
		塑性指数 I_p (%)		20.1	28.8	---	
岩石試験	見掛け比重及び吸水率	密度 (g/cm ³)	自然状態	1.65	1.53	1.46	
			強制湿潤	1.66	1.59	1.60	
		比重 (g/cm ³)	自然状態	2.425	2.426	2.491	
			強制湿潤	2.425	2.426	2.491	
		吸水率 (%)		46.90	57.58	58.86	
	有効間隙率		53.22	58.28	59.45		
	膨張吸水	測定時間 t (day)		7.1	---	7.1	
		最大吸水膨張率 L_{max} (%)		0.1	---	0.0	
圧密特性	正規圧密領域における圧縮指数 C_c		---	0.32	0.33		
	正規圧密領域における圧密降伏応力 P_c (kN/m ²)		---	788	910		

(備考1) コンシステンシー：変形又は流動に対する抵抗性のこと

2) 吸水膨張のうち、試料番号 No2 及び 3 がブランクとなっている理由は、試験に必要な試料長を確保できなかったためである。

3) 圧密特性のうち、試料番号 No.1 がブランクとなっている理由は、次図のとおり明確に変化しなかったためである。

圧密試験結果の評価について

圧密試験 3 試料分の結果を重ね合わせたものを図 3.3.7 に示す。

同図から、当初硬い試料と判断した試料番号 No1 は、他の 2 試料と比較し間隙比が小さく締まった試料であるといえる。

また、圧密降伏応力が得られていないことより、大きな荷重を与えない限り沈下が発生しないことを示している。

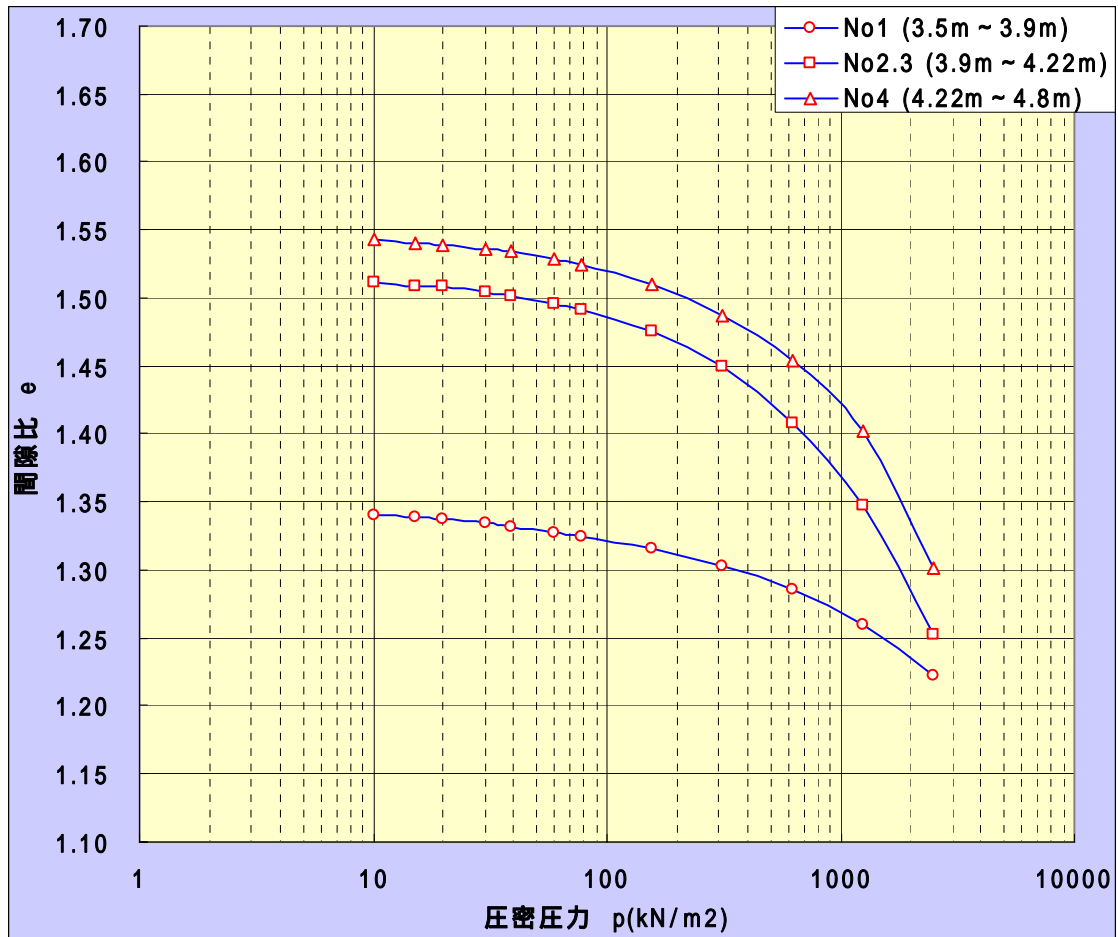


図 3.3.7 凝灰岩サンプリング 3 試料の間隙比 - 圧密圧力

事故発生場所付近地盤の含水比（事故発生当時）の試料採取位置
 報告書本文表 4.2.1 に係る北見市春光町付近の試料採取位置（抜粋）を以下に示す。



図 3.3.8 北見市春光町付近における地盤の含水比の試料採取位置（平面）

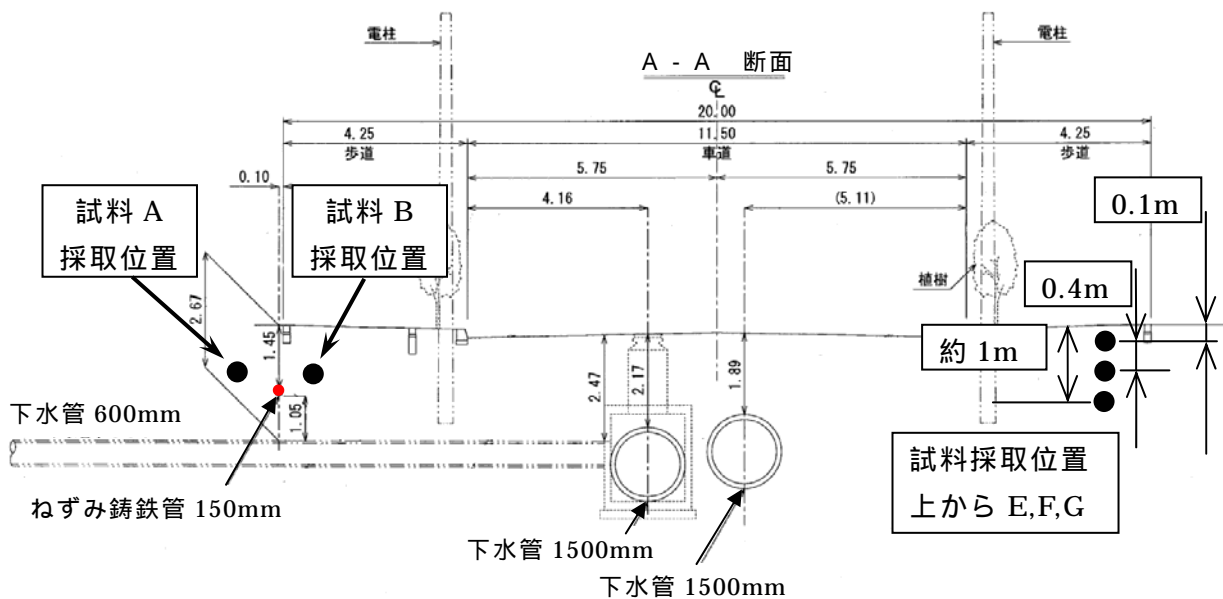


図 3.3.9 北見市春光町付近における地盤の含水比の試料採取位置（断面）

4 . 1967 年の造成に伴う地盤内の有効上載圧の影響の検討

4.1 造成前後の有効上載圧

北見市春光町付近は造成によって在来地盤から 1m 程度盛土されていることから、地盤全体の有効上載圧が増加する。

また、造成前の旧河道では地下水位は地表面付近であったが、その後の河道の付け替え等で凝灰岩上面まで地下水位が下がっており、これによっても有効上載圧は増加する。

ここで、密度検層の結果によると、砂れき層、凝灰岩の表層における密度はそれぞれ $2.07 \sim 2.08 \text{g/cm}^3$ 、 2.04g/cm^3 となっている。したがって、砂れき層の不飽和状態における単位体積重量 γ_t は 20.3kN/m^3 、凝灰岩の表層の飽和状態における単位体積重量 γ_{sat} は 20.0kN/m^3 、水中単位体積重量 γ_w はこれらの値から水の単位体積重量 9.8kN/m^3 を差し引いた 10.2kN/m^3 となる。一方、漏洩ガスの挙動に関する調査で砂れき層の含水比が測定されているが、それによると 5.3%の値が得られている。したがって、乾燥密度 ρ_d は 1.97g/cm^3 となり、もし地下水位が上がっていて砂れき層が飽和されていたとすると、砂れきの土粒子密度は平均的に $\rho_s = 2.662 \text{g/cm}^3$ なので、飽和密度は $\rho_{sat} = 2.23 \text{g/cm}^3$ 、飽和単位体積重量 $\gamma_{sat} = 21.9 \text{kN/m}^3$ 、水中単位体積重量 $\gamma_w = 12.1 \text{kN/m}^3$ となる。そこで、ガス導管埋設深度 (1.5m) と凝灰岩上面深度 (3.0m) の有効上載圧の増加分を計算すると、次のとおりである。(図 4.1.1 参照)

なお、地下水位以下の土粒子は浮力を受けるため、その浮力を考慮した水中単位体積重量を用いる必要がある。

ガス導管埋設深度

「現在のガス導管に作用する有効上載圧」から「盛土前の状態でガス導管位置に作用する有効上載圧」を差し引くことで、増加分の有効上載圧が求まる。

$$\begin{aligned} & (20.3 \times 1.5) - (12.1 \times 0.5) \\ & = 30.5 - 6.05 = 24.5 \text{kPa} \end{aligned}$$

凝灰岩上面深度

「現在の凝灰岩上面に作用する有効上載圧」から「盛土前の状態で凝灰岩上面に作用する有効上載圧」を差し引くことで、増加分の有効上載圧が求まる。

$$\begin{aligned} & (20.3 \times 3) - (12.1 \times 2) \\ & = 60.9 - 24.2 = 36.7 \text{kPa} \end{aligned}$$

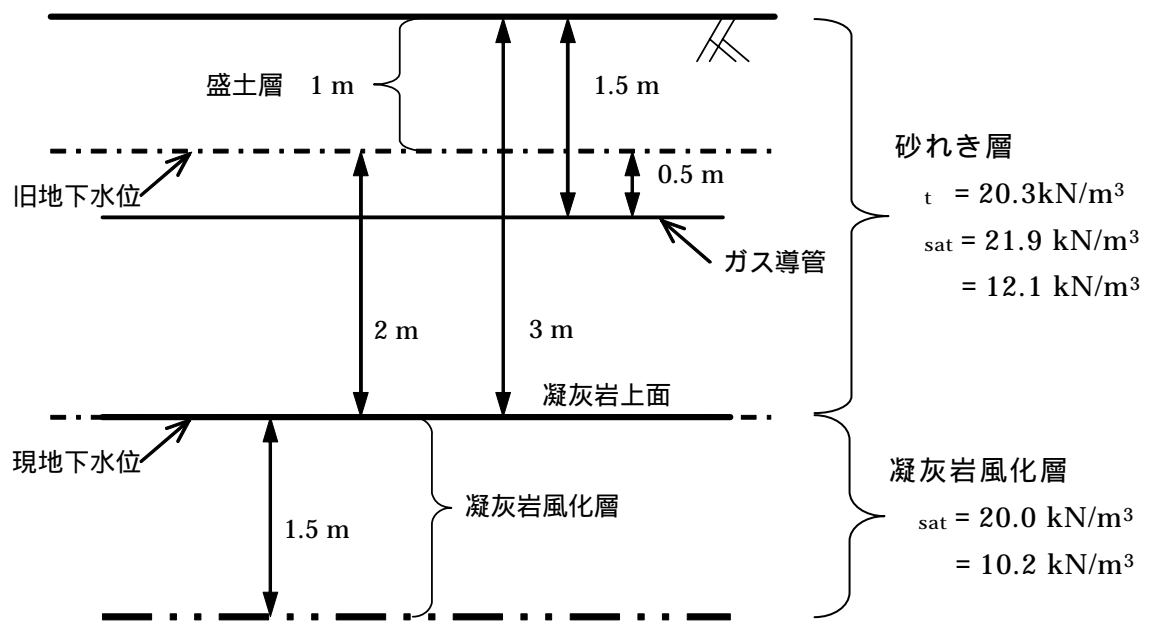


図 4.1.1 北見市春光町付近の地盤層厚さ

4.2 増加した有効上載圧によるガス導管以深の砂れき層の圧縮沈下量

孔内水平載荷試験結果から砂れき層の変形係数は $2,000 \sim 20,000 \text{ kN/m}^2$ であることから、図 4.1 のとおりガス導管の下の砂れき層厚さが 1.5 m であることを踏まえ、単純に次のとおり計算すると有効上載圧の増加及びガス導管以深の砂れき層の浮力がなくなったことにより砂れき層が圧縮沈下した量は $2.3 \text{ mm} \sim 23 \text{ mm}$ となる。

ガス導管以深の砂れきの圧縮沈下量

$$\begin{aligned}
 &= (\text{ガス導管上に増加した有効上載圧による沈下}) + (\text{ガス導管以深の砂れき層が不飽和になって浮力がなくなったため見かけ上重くなったことによる沈下}) \\
 &= (1 / \text{変形係数}) \times (\text{ガス導管深度での増加有効上載圧}) \times (\text{ガス導管以深の砂れき層厚}) + (t - \text{sat}) / (2 \times \text{変形係数}) \times (\text{ガス導管以深の砂れき層厚})^2 \\
 &= \{1 / (2000 \sim 20000)\} \times 24.5 \times 1.5 + (20.3 - 12.1) / \{2 \times (2000 \sim 20000)\} \times 1.5^2 \quad (\text{mm}) \\
 &= (1.84 \sim 18.4) + (0.461 \sim 4.61) \quad (\text{mm}) \\
 &= 2.3 \sim 23.0 \quad (\text{mm})
 \end{aligned}$$

4.3 増加した有効上載圧による凝灰岩の風化部の圧密沈下

報告書本文図 4.4.5 の破断箇所を通るガス導管方向の地層断面図に見られるように、破断箇所の南側では凝灰岩の表層に N 値が小さい部分がある。この部分は風化しており、比較的柔らかい層となっている。この部分が造成により増加した有効上載圧により圧密沈下を生じた可能性があるため、この部分から不攪乱試料を採取し、圧密試験を行ってその値を用いて沈下量を推定した。なお、この部分は地層断面図にも見られるように 3 m 程度の厚さのため、以下の推定では、風化層厚を 3 m と仮定した。

前述したように造成前は地表面が 1 m 程度低く (1 m 程度造成により盛土した) また、

地下水位は旧地表面にあったものが、造成後に凝灰岩上面まで下がったと仮定すると、凝灰岩上面から 1.5m(上記のように風化層を 3m と考えた場合)の中間深度の有効上載圧は以下のとおりである。

$$\begin{aligned} & \text{造成前の有効上載圧} \\ & 12.1 \times 2 + 10.2 \times 1.5 \\ & = 39.5\text{kPa} \end{aligned}$$

造成に伴う有効上載圧の増加分

凝灰岩上面深度における有効上載圧の増加分と同じなので、36.7kPa

ここで、圧密試験におけるこの範囲の圧力である 39kPa から 78kPa における圧縮指数 C_c を求めると次のとおりである。

試料番号 No.1	: $C_c = 0.0266$
No.2、3	: $C_c = 0.0332$
No.4	: $C_c = 0.0299$

そして、これらの値を用いて上記 の値から の値だけ有効上載圧が増加したときの圧縮ひずみは、

試料番号 No.1	: = 0.325%
No.2、3	: = 0.379%
No.4	: = 0.337%

となり、沈下量は 9.8 ~ 11.4mm となる。

5 . 春光町 鑄鉄管の変形計算

5.1 変形計算の前提条件

(1) 鑄鉄管の材料特性

鑄鉄管の変形計算には、引張試験で得られた平均的な応力歪曲線を採用した。有限要素解析のために多直線近似したデータを図 5.1.1 に示す。降伏応力は 108MPa、引張強度は 223MPa である。降伏歪は 0.11%、破断歪は 0.54% である。

(2) 地盤ばね特性

呼び径 150mm のパイプが 1.5m の深さに埋設されている条件を考慮し、「高圧ガス導管耐震設計指針」(平成 14 年 3 月、社団法人日本ガス協会発行、以下「ガス耐震」という。)に記述されている地盤ばね特性を図 5.1.2 のように設定した。また、鑄鉄管が緩詰め砂れき層に埋設されていることを考慮し、ガス耐震で規定する値の 2 倍に相当する地盤ばね特性も考慮する。

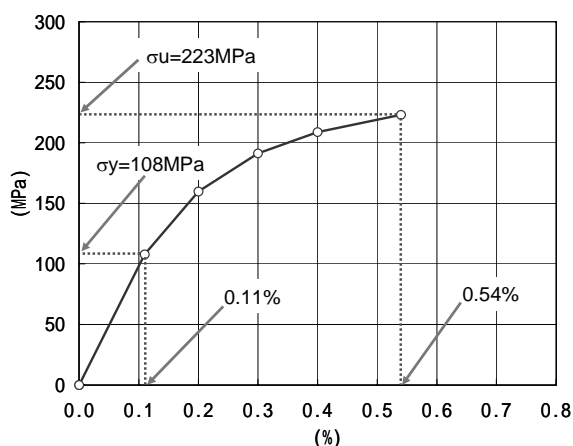


図 5.1.1 鑄鉄管の材料特性

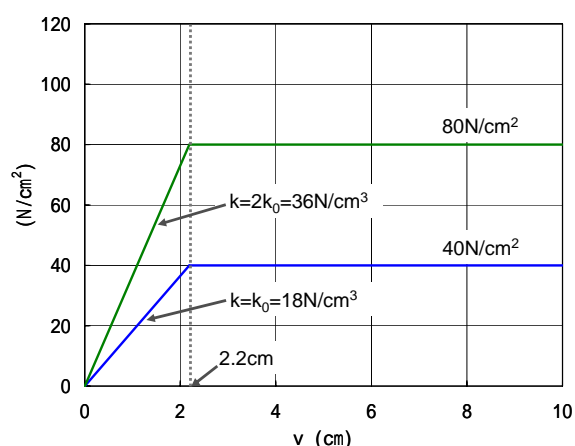


図 5.1.2 地盤ばね特性

(3) 鑄鉄管の形状と継手の変形特性

鑄鉄管の形状は、外径が 170.0mm、管厚が 9.6mm であり、単管長さ 5m である。継手の変形特性は不明であるが、ここでは、曲げモーメントを伝達しないピン構造としてモデル化する。

(4) 地表面の地盤変位及び鑄鉄管の残留変形

地表面における地盤変位を図 5.1.3 に示す。この図において、地表面における地盤変位とは、鑄鉄管の直上(歩道と公園の境界)における縁石の鉛直変位を測定した値である。

次に折損部近傍を撤去した後の鑄鉄管の残留変形を図 5.1.4 に示す。鑄鉄管の残留変形は、継手 4 の埋設深さを 1.5m としてプロットしてある。図中、1~4 は鑄鉄管の継手位置を表しており、継手間隔は 5m である。

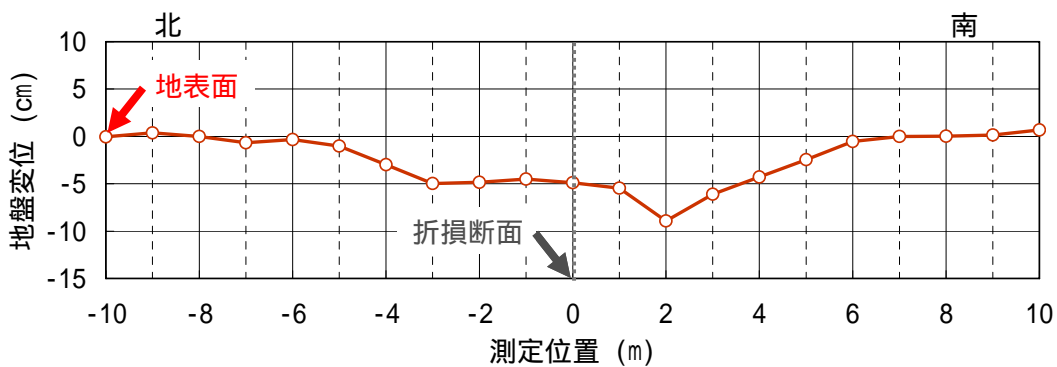


図 5.1.3 地表面の地盤変位（铸铁管直上の縁石の変形計測結果）

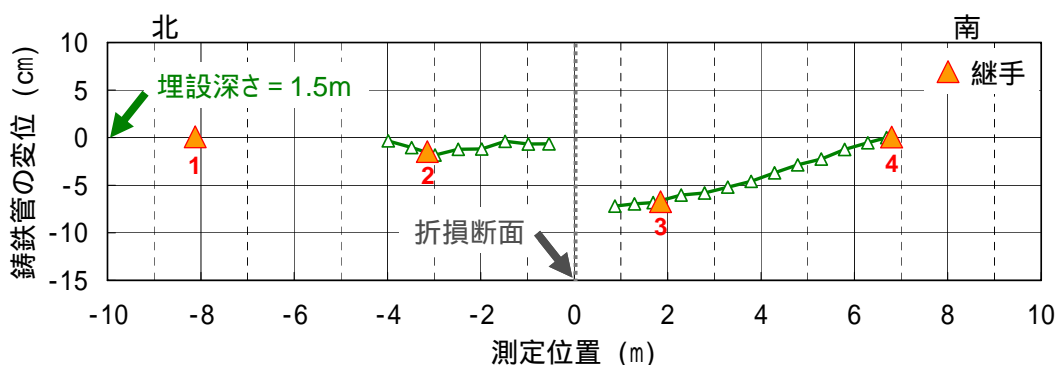


図 5.1.4 铸铁管の変形（折損部近傍を撤去した後）

5.2 検討 1：地表面の地盤変位を铸铁管変形計算の入力変位とした場合

(1) 入力地盤変位と铸铁管の変形

第一段階の検討として、図 5.1.3 に示す地表面の地盤変位分布が、铸铁管の埋設位置でも同様に発生しているものと仮定し、铸铁管の変形を計算した。铸铁管の埋設深さにおける想定地盤変位を図 5.2.1 に示す。

铸铁管の変形計算の結果を図 5.2.2 に示す。継手 1、4 は埋設深さ 1.5m のまま鉛直方向に移動していないが、継手 2、3 は地盤変位にしたがって沈下している。ガス耐震の地盤ばね及び 2 倍の地盤ばねを考慮した場合のパイプの変形はほぼ同一であり、図には両者の差が明確に現れていない。継手 3 と継手 4 の間では、铸铁管の残留変形と計算結果が一致しているが、継手 2 の左右では、両者が一致していないことである。この相違点については、次節の検討 2 で铸铁管埋設深さにおける入力地盤変位を修正して再検討する。

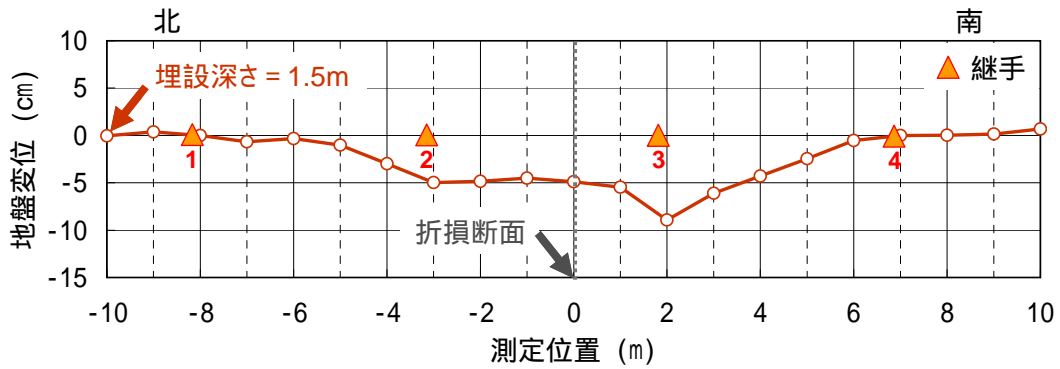


図 5.2.1 地表面の地盤変位を入力変位とした場合

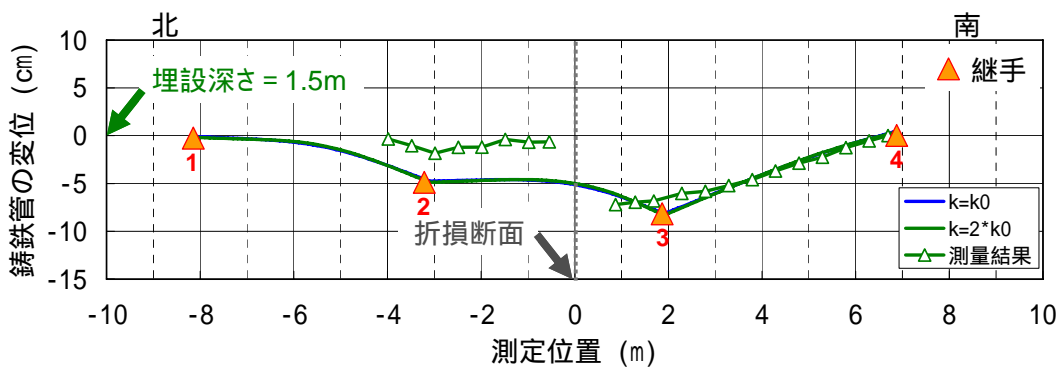


図 5.2.2 地表面の地盤変位を入力変位とした計算結果（铸铁管の変形）

(2) 铸铁管の曲げモーメントと曲げ応力

铸铁管の曲げモーメント分布を図 5.2.3 に示す。曲げモーメントの分布を見ると、折損した铸铁管（継手 2 と 3 の間）が上向きに曲げられるように変形している。最大曲げモーメントは折損断面のやや右側に発生しており、ガス耐震の地盤ばねを考慮した場合に 13.7kN-m、2 倍の地盤ばねを考慮した場合に 17.7kN-m である。

この計算結果によると、最大曲げモーメントは地盤ばね特性に比例せず、地盤ばね係数の 4 乗根に比例していることが分かる。これは、入力地盤変位と铸铁管の相対変位が小さく、地盤ばねが線形域にあるためである。

铸铁管の曲げ応力分布を図 5.2.4 に示す。曲げ応力（引張応力）の最大値は、ガス耐震の地盤ばねを考慮した場合に 74MPa で、2 倍のばねを考慮した場合に 96MPa である。曲げ応力の分布は曲げモーメントと同様に分布しており、折損した铸铁管の上縁に引張応力、下縁に圧縮応力が発生している。

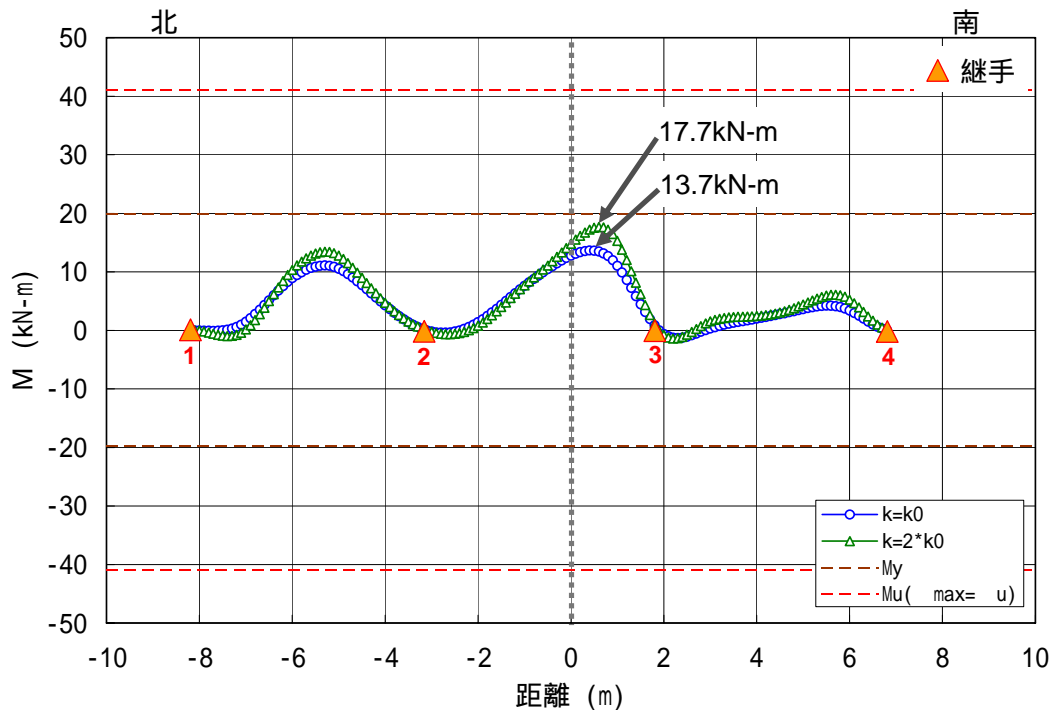


図 5.2.3 地表面の地盤変位を入力変位とした計算結果（鋳鉄管の曲げモーメント）

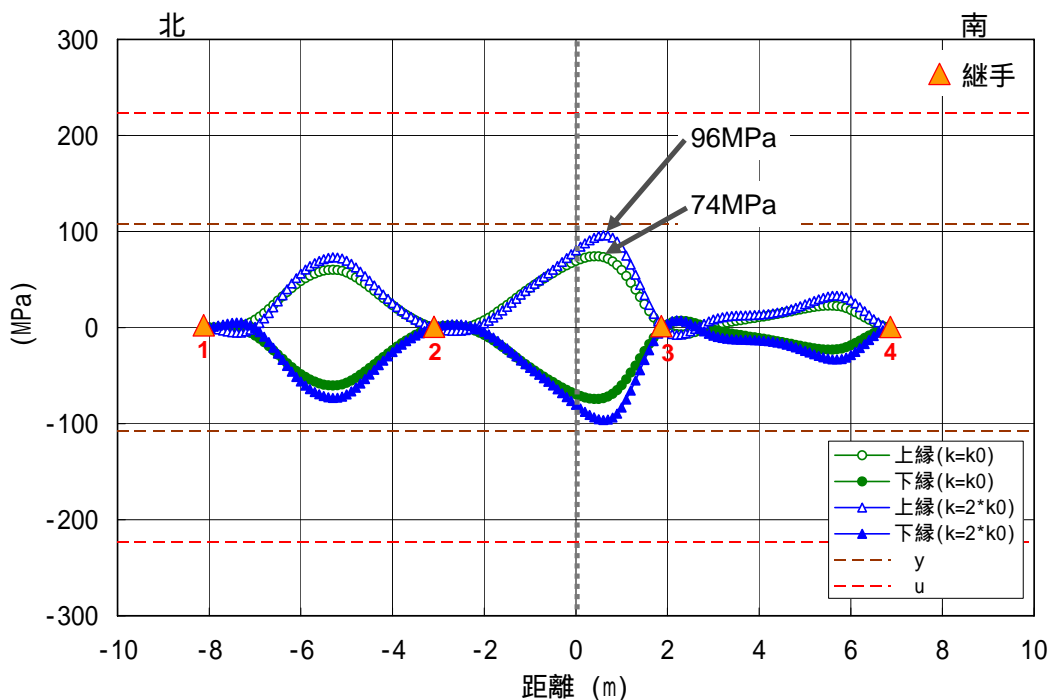


図 5.2.4 地表面の地盤変位を入力変位とした計算結果（鋳鉄管の曲げ応力）

5.3 検討 2：鋳鉄管の残留変形を考慮して鋳鉄管変形計算の入力変位を修正した場合

(1) 修正入力地盤変位と鋳鉄管の変形

鋳鉄管の埋設深さにおいて、入力地盤変位が鋳鉄管の残留変位に漸近するように修正した結果を図 5.3.1 に示す。修正した入力地盤変位は、折損断面から継手 3 にかけて地盤変位が発生している。修正入力地盤変位を考慮して求めた鋳鉄管の変形を図

5.3.2 に示す。この計算結果によると、継手 3 の沈下が顕著である。また、地盤ばね特性を変化させても、铸铁管の変形に顕著な差は認められない。

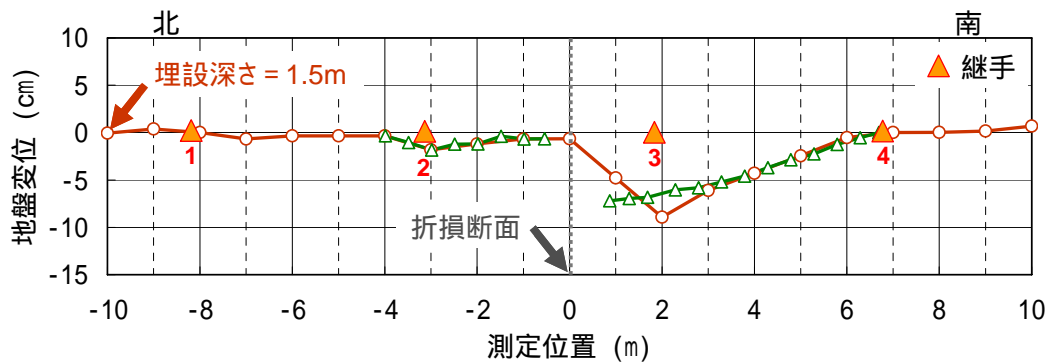


図 5.3.1 铸铁管の残留変形を考慮して修正した入力変位

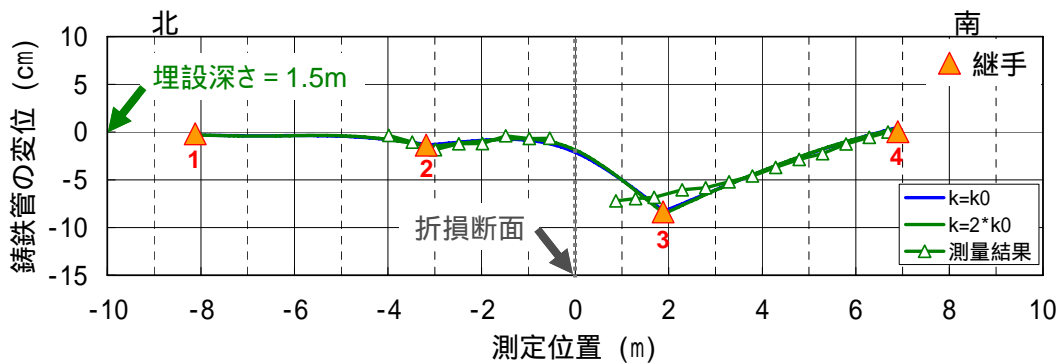


図 5.3.2 修正入力変位による計算結果（铸铁管の変形）

(2) 铸铁管の曲げモーメントと曲げ応力

铸铁管に発生する曲げモーメント分布を図 5.3.3 に示す。铸铁管には、上縁に引張応力が発生する曲げモーメントが発生しており、最大曲げモーメントは折損断面の直近に発生している。最大曲げモーメントは、ガス耐震地盤ばねの場合に 26.9kN-m、2 倍の地盤ばねの場合に 31.7kN-m となっている。

曲げ応力分布を図 5.3.4 に示す。折損断面直近の上縁に最大引張応力が発生しており、ガス耐震地盤ばねの場合に 146MPa、2 倍の地盤ばねの場合に 172MPa が発生している。

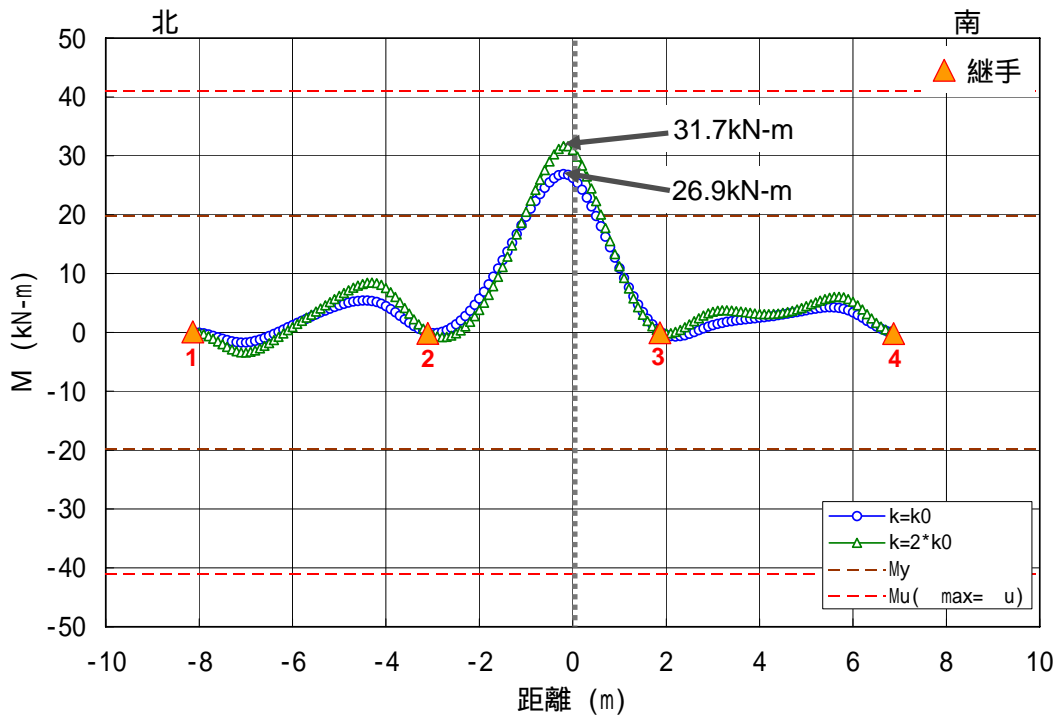


図 5.3.3 修正入力地盤変位による計算結果（铸铁管の曲げモーメント）

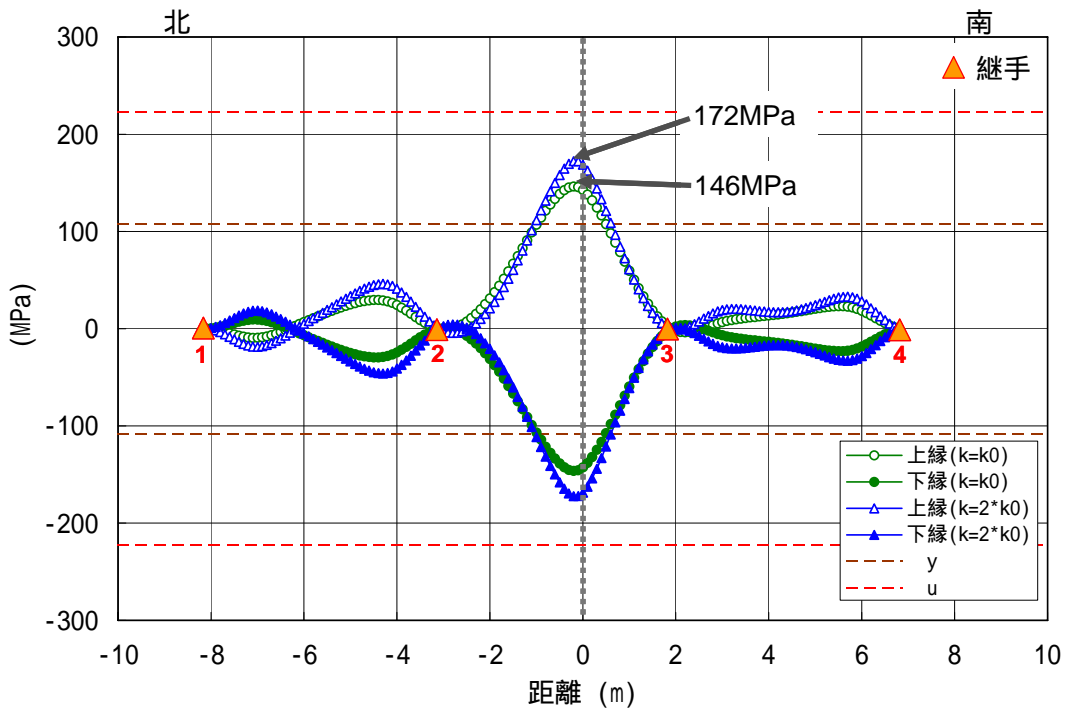


図 5.3.4 修正入力地盤変位による計算結果（铸铁管の曲げ応力）

5.4 まとめ

地表面の地盤変位を铸铁管の入力変位とした検討 1 と、铸铁管の残留変形に基づいて修正した入力地盤変位を考慮した検討 2 の計算結果を示した。

その結果、検討 1 及び検討 2 とともに、折損した铸铁管には、上縁が引張応力となる曲げ

モーメントが発生することがわかった。しかし、検討 1 では、計算で得られた鑄鉄管の変位と実測残留変位が一致しないことがわかった。検討 2 では、計算で得られた鑄鉄管の変位と実測残留変位が一致し、最大曲げモーメントも折損断面の直近に発生することがわかった。

6 . ガス導管の疲労破壊の検討

春光町管は、疲労亀裂を起点とし、脆性破壊に移行し、塑性崩壊で破断した。以下では、疲労破壊を生ずる可能性について検討する。

(1) 最大応力の検討

疲労亀裂を起点として、脆性破壊に移行する条件から、疲労破壊を生じた最大応力を検討する。移行条件は、次式で与えられる。

$$K = M \sigma_{\max} \sqrt{\pi a} = Kc$$

ここで、 K は疲労亀裂の応力拡大係数、 σ_{\max} は最大応力、 M は形状係数、 a は疲労亀裂の深さ、 Kc は鋳鉄の破壊靱性である。

破面の酸化着色部の深さ約 5mm を疲労亀裂深さとする。春光町管の引張強さ($\sigma_B = 230\text{MPa}$) と金属組織 (脆い共晶状 D 型黒鉛の組織) から、破壊靱性を $Kc = 20\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ と見積もる。形状係数は $M = 1$ とみなす。最大応力として下記が得られる。

$$\sigma_{\max} = 160\text{MPa}$$

上記の値は、5.2 項で示したガス導管の最大引張応力 140~170MPa の範ちゅうにある。

(2) 応力振幅と平均応力の検討

応力振幅 σ_a と平均応力 σ_m が一定の条件で疲労亀裂が発生し、脆性破壊に移行したと仮定すれば、最大応力は次式となる。

$$\sigma_{\max} = \sigma_a + \sigma_m = 160\text{MPa}$$

以下では、平均応力と応力振幅を検討する。

鋳鉄の疲労限度 (10^7 回時間強度) は、引張強さから推定できる。春光町管の疲労限度は、 $\sigma_m = 0$ の両振りの場合に $\sigma_a = 70 \sim 90\text{MPa}$ 、 $\sigma_m = \sigma_a$ の片振りの場合に $\sigma_a = 60 \sim 70\text{MPa}$ である。実際には、さらに高い平均応力が負荷され ($\sigma_m > \sigma_a$)、疲労限度は低下したと判断される。

疲労破壊を生ずる応力振幅 σ_a と平均応力 σ_m の関係は、耐久限度線図で与えられる。 $\sigma_m = 0$ の疲労限度を最小値の $\sigma_a = 70\text{MPa}$ 、引張強さを $\sigma_B = 230\text{MPa}$ 、平均応力を降伏応力に等しい $\sigma_m = 110\text{MPa}$ と仮定すれば、耐久限度線図上の応力振幅は $\sigma_a = 33\text{MPa}$ となる。

したがって、応力振幅が 33MPa 以上では、春光町管は高サイクル (高繰返し回数) で疲労破壊が生ずる。実際の応力振幅を 33MPa 以上の $\sigma_a = 50\text{MPa}$ 、平均応力を $\sigma_m = 110\text{MPa}$ 、最大応力を $\sigma_{\max} = 160\text{MPa}$ の組み合わせと仮定すれば、春光町管は低サイクル (低繰返し回数) でも疲労破壊を生ずることになる。

7. 漏えいガスの挙動に関する調査

7.1 採取試料

- (1) 春光町ガス管破損部付近の掘削土砂 約 30 kg 採取日 3月3日
- (2) オールコアボーリング3地点 (B-1~B-3) 総量約 63 kg 採取日 3月8日

各地点5サンプル

地表からの深さ

- a. 60~90cm
- b. 120~150cm
- c. 180~210cm
- d. 240~270cm
- e. 300~330cm

水分の蒸発を防止するため、右図のようにプラスチック製密閉容器に試料を封入して輸送した。(写真 7.1.1 参照)



写真 7.1.1 試料の保管状況

7.2 土質関係調査分析

本報告では粒子径 9.5mm 以上の粒子を大粒子、それ以下の粒子径のものを砂粒と呼び区別する。

- (1) 土砂含水比 及び 大粒子 (>9.5mm) の重量割合

B-1 平均 含水比 8.9% 大粒子の重量割合 60.3% (試料乾燥重量 16.98kg)

B-2 平均 含水比 7.4% 大粒子の重量割合 56.8% (試料乾燥重量 21.10kg)

B-3 平均 含水比 8.3% 大粒子の重量割合 60.5% (試料乾燥重量 20.09kg)

掘削土砂 含水比 4.6% 大粒子の重量割合 63.3% (試料乾燥重量 29.18kg)

掘削土砂は、サンプル時に砂粒がこぼれ落ちている等の作業状況を考慮すれば、大粒子の重量割合は大きめに算出されていると考えられる。そこで大粒子の重量割合 M_G は B-1~B-3 の加重平均をとって $M_G = 59.1\%$ と考える。ただし 2.7m より深い部分は多量の水分とともにサンプルから砂粒が抜け落ちたためこの集計から除いた。また、含水比はボーリング実施日 (3月8日) の前々日に雪融けが急速に進んだので事故当時の状態とは異なる可能性がある。

(下記の気象庁データを参照)

http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/daily_a1.php?prec_no=17&prec_ch=%96%D4%91%96%8Ex%92%A1&block_no=0074&block_ch=%96k%8C%A9&year=2007&month=3&day=&elm=daily&view=

測定結果の数値データを表 7.2.1 に、また、B-1~B-3 の含水比と大粒子割合の深さ方向の変化を図 7.2.1 に示す。

表 7.2.1 オールコアボーリングサンプルの解析結果

資料番号	深さ (cm)	湿り 重量	乾燥 重量	水分 kg	含水 比 %	乾燥大 粒子	乾燥 砂	大粒子 割合	水分を砂 粒に集中	
B-1	60-90	5.84	5.16	0.68	13.18	2.65	2.51	0.51	27.09	
B-1	120-150	7.24	6.86	0.38	5.54	3.90	2.96	0.57	12.84	
B-1	180-210	2.64	2.44	0.20	8.20	1.68	0.77	0.69	25.97	
B-1	240-270	2.67	2.43	0.24	9.88	1.95	0.48	0.80	50.00	
B-1	300-330	1.87	1.68	0.19	11.31	1.09	0.59	0.65	32.20	除凝灰岩
凝灰岩層	315cm		18.57			11.27		0.61		
B-2	60-90	5.92	5.32	0.60	11.28	2.88	2.44	0.54	24.59	
B-2	120-150	6.53	6.03	0.50	8.29	3.63	2.39	0.60	20.92	
B-2	180-210	3.53	3.39	0.14	4.13	2.69	0.70	0.79	20.00	
B-2	240-270	6.68	6.36	0.32	5.03	2.79	3.56	0.44	8.99	
B-2	300-330	4.27	3.05	1.22	40.00	2.30	0.73	0.76	167.12	含凝灰岩
凝灰岩層	280cm		24.15			14.29		0.59		
B-3	60-90	7.39	7.05	0.34	4.82	4.90	2.12	0.70	16.04	
B-3	120-150	5.70	4.94	0.76	15.38	1.50	3.44	0.30	22.09	
B-3	180-210	4.26	3.87	0.39	10.08	2.08	1.79	0.54	21.79	
B-3	240-270	4.41	4.23	0.18	4.26	3.68	0.66	0.85	27.27	黒色岩石隗
B-3	300-330	3.06	2.86	0.20	6.99	2.02	1.04	0.66	19.23	除凝灰岩
凝灰岩層	315cm		22.95			14.18		0.62		
掘削砂れき	掘削部	30.52	29.18	1.34	4.59	19.46	10.72	0.64	12.50	
火山灰	掘削部 北端	1.74	1.34	0.41	30.31					

大粒子割合は深さと共に大きくなる。ただし、深さ 3m 程度からは凝灰質砂岩（シルト）層になる。また含水比は深さとともに小さくなる傾向を示している。なお、ボーリング柱状図によれば B-1 の孔内水位は 3.35m、B-2 は 3.70m（B-3 は無記入）、B-1 と B-2 の中間の A-10 では 3.18m であることを考慮すると深さ 3m ~ 3.3m のボーリングコアの含水比は実際にはもっと大きいものと想像される。この誤差の原因は、含水比がある限界を超えると砂粒がスラリー化し、ボーリングコアをサンプルする際に多量の水分とともに砂粒が滑り落ちてしまったためと考えられる。

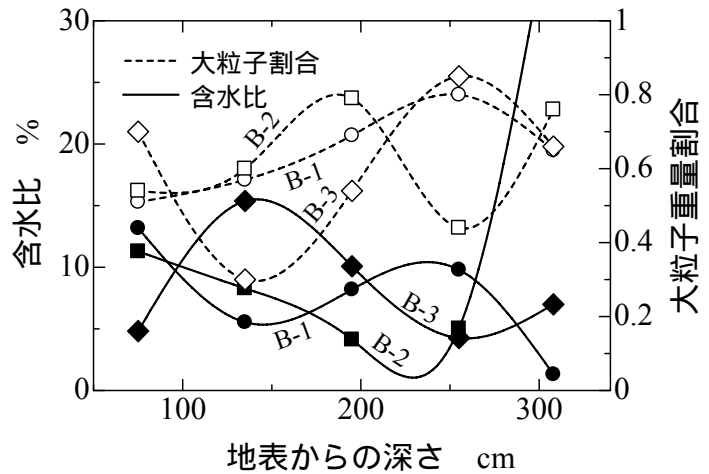


図 7.2.1 含水比と大粒子割合の深さ方向の変化

この誤差の原因は、含水比がある限界を超えると砂粒がスラリー化し、ボーリングコアをサンプルする際に多量の水分とともに砂粒が滑り落ちてしまったためと考えられる。

(2) 乾燥砂粒充てん空間率測定及び乾燥砂粒空気透過率測定

乾燥砂粒充てん空間率を測定するにあたり、最初に砂粒と大粒子の密度を測定する。大粒子には 10cm 程度の石も含まれており、通常使用されるピクノメータに入れることはできない。また大粒子は均質なものではなく、種々の密度を持つ岩石の混合物であるので、できるだけ多量の試料について測定する必要がある。このことを踏まえ、ここでは 1L のメスシリンダを用いて液浸法で測定した。その結果を表 7.2.2 に示す。

表 7.2.2 砂粒と大粒子の比重測定

	粒子質量 g	浸水質量 g	水体積 mL	粒子体積 mL	密度 g/mL	
大粒子	1088.2	1665.6	577.4	422.6	2.575	
	1079.4	1643.3	563.9	436.1	2.475	
	1105.7	1672.1	566.4	433.6	2.550	
	1118.6	1669.4	550.8	449.2	2.490	
	1305.2	1787.3	482.1	517.9	2.520	
	1185.7	1711.6	525.9	474.1	2.501	
	1027.0	1619.0	592.0	408.0	2.517	
加重平均	7909.8			3141.5	2.518	採用
砂粒	1586.8	1945.9	359.1	640.9	2.476	
	1011.0	1599.0	588.0	412.0	2.454	
加重平均	2597.8	3544.9	947.1	1052.9	2.467	NG
逆注水法	1569.3	1944.9	375.6	624.4	2.513	NG
煮沸法	1613.9	2003.6	389.7	610.3	2.644	採用

同表において、粒子質量とは 1L のメスシリンダに充てんした粒子の質量をいい、浸水質量とは水を注入して充てん粒子と水の体積の合計を 1 L としたときの質量をいう。

これから粒子体積が測定できるが、砂粒については脱気に注意する必要がある。同表中、逆注水法とは、写真 7.2.1(A)のように、メスシリンダの底部まで通したパイプを經由して砂粒層の底部から注水し、粒子間の空気を追い出す方法である。しかしながら、ガス事業者の土質試験結果を参照すると、砂粒の密度は 2.62 ~ 2.70 g/mL となっていた。このため、メスシリンダを強力な放射熱で直接加熱し、内容物を煮沸して粒子間の空気を水蒸気で追い出す方法を採用した。写真 7.2.1(B)のメスシリンダの底部右に見える白っぽく変色した部分は液状水が気化した状態である。前出のガス事業者の試験結果では、試料は総量で 30g しかなく、平均密度の測定には不十分であるため、ここでは乾燥した大粒子 7.9kg、砂粒 1.6kg の試料を用いて、大粒子の密度を 2.518 g/mL、砂粒の密度を 2.644 g/mL とした。



(A) 逆注水法

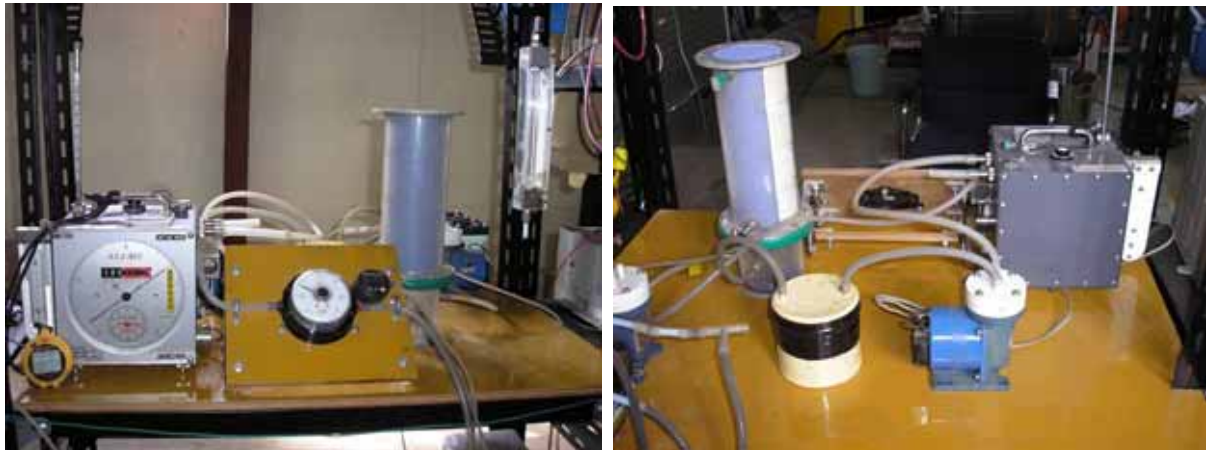
(B) 煮沸法

写真 7.2.1 砂粒層からの脱気法

空間率と空気の透過係数を測定するための装置を写真 7.2.2 に示す。

粒子の充てん管は、充てん状態や液状水の分布状態が観察できるように透明なアクリル管を用いた。管の内径は 90mm、粒子の充てん部の高さは 250mm であり、大粒子が混入されたときの透過率測定にも対応できるようになっている。充てん層の底部からダイヤフラムポンプで吸引し、充てん層頂部から底部に向けて空気を流し、そのときの圧力損失を測定する。ポンプは 2 L/min、5 L/min、12 L/min の各種を用意し

た。空気流量は湿式ガスメータで測定した。また差圧はフルスケール 3 kPa のアナログ差圧計と、フルスケール 12 kPa のデジタル差圧計を併用した。空気の脈動が差圧測定に悪影響を及ぼさないように整流タンクを用いている。



正面

背面

写真 7.2.2 空気の透過係数測定用装置

この充てん管を傾け、砂粒（密度を 2.644 g/mL とする）をゆっくり静に流し込むと間隙率は大きくなり 39～41%程度になる。逆にタッピングをしながら少しずつ詰めると最も密に詰められ、間隙率は 33～35%程度になる。その間の間隙率は粒子を層高の半分、あるいは全部にゆるく詰めておいて軽く揺する等、タッピングをすることにより製作した。

製作した粒子充てん層に空塔速度 1.31cm/s で空気を流したときの充てん層全体（250mm）の圧力損失と間隙率の関係を図 7.2.2 に示す。

同図から確認できるとおり、圧力損失は間隙率に対し、大きくばらついている。これは、ここでの砂粒の粒子径分布が非常に

広く、偏析を起こしやすい粒子であることが原因である。しかしながら、間隙率の依存性は全体としてコゼニー・カルマン式にのっており、間隙率の変化に応じた補正が必要な場合には、図中の式を利用することができる。

すなわち、空気の透過係数 K_{air} と充てん層の間隙率 ϵ_s の関係は現地の砂粒に対して

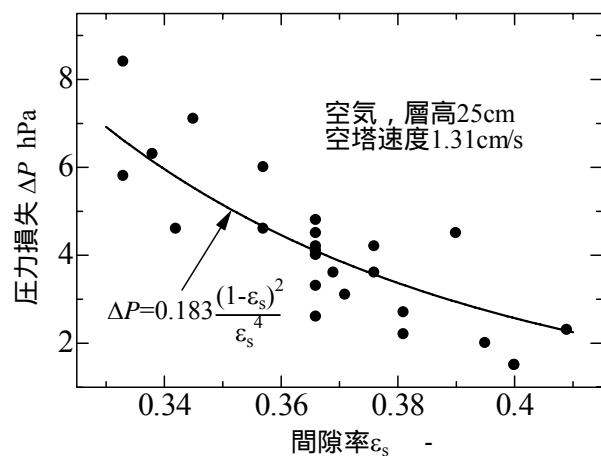


図 7.2.2 間隙率と通気抵抗の関係

$$K_{air} = u / (\Delta P / H) = 0.018 \epsilon_s^4 / (1 - \epsilon_s)^2 \quad [\text{m}^2 / (\text{hPa} \cdot \text{s})] \quad (1)$$

で表すことができる。ここで、 u はガスの空塔速度、 P は充てん層での差圧、 H は充てん層の高さである。

この式により、現地砂粒を任意の間隙率で充てんしたときの透過係数を求めることができる。具体的には

ゆるく充てんしたとき	$s=0.40$	$K_{air}=1.3 \times 10^{-3}$	$m^2/(hPa \cdot s)$
中位に充てんしたとき	$s=0.37$	$K_{air}=0.85 \times 10^{-3}$	$m^2/(hPa \cdot s)$
きつく充てんしたとき	$s=0.34$	$K_{air}=0.55 \times 10^{-3}$	$m^2/(hPa \cdot s)$

となる。

空気中での実験結果をガス中の値に換算するのは粘性の補正をすればよく、北見市で漏えいしたガスの粘性は空気の 0.8 倍であることから、次式のとおりとなる。

$$K_s = K_{air} / 0.8 \quad (2)$$

以上、(1) 及び (2) 式を用いて現地砂粒中のガス透過係数 K_s を推定することができるが、この値は大粒子が混入されていない乾燥した砂粒層に対する値であることに注意する必要がある。

(3) 濡れ砂粒空気透過率測定

容器外部で水と砂粒を混合しできるだけ一様に充てんした場合

含水比に影響されることなく充てんされた砂粒の乾燥質量が一定になるように充てんし、砂粒のみでの間隙率を 0.366 にした。充てんすべき砂粒の濡れ重量を予め計算し、それを 4 分割してむらのないよう充てんした。この状態で空気透過率を測定した結果を図 7.2.3 に示す。

この方法で行った結果、水分が入ることにより偏析が防止され、図 7.2.2 と比較しても、データの再現性が得られている。

データの傾向としては、含水比が大きくなると通気抵抗が減少（透過係数が増大）し、7.5%あたりに極値がみられる。しかしながら、極値を超えると通気抵抗は急増し、12%以上ではガスの透過性が殆どなくなる。この結果から、ガスが透過できる領域は砂粒の含水比が 10%以下であることがわかる。

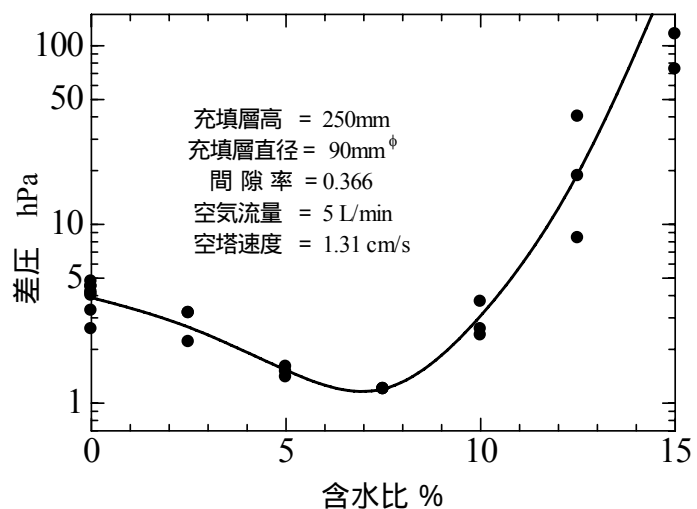


図 7.2.3 通気抵抗に対する含水比の影響（外部混合）

乾燥砂粒充てん層に水を添加した場合

間隙率 0.366 の乾燥砂粒の充てん層（嵩体積 1590mL、充てん砂粒質量 2.66kg）に

50mL ずつ水を加えていく。水を加えた後 20 分放置して液状水の分散を待ってから通気抵抗を測定した結果を図 7.2.4 に示す。

総量で 300mL 注水すると充てん層の底部から水が滴下し始め、20 分後に通気抵抗の測定のために 5L/min の空気流量で吸引したとき、気流により合計約 30 mL の水が排出された。その後、通気乾燥実験に移るため 20 L/min で吸引したところ更に約 30mL の排水が進んだ。そこで

86 時間放置して内部の液状水を安定させたのち、20 L/min の空気量で乾燥を開始した。この乾燥の初期段階で更に約 15 mL の液状水が排出されたが、その後は液状水が滴下することはない、順調に乾燥過程に移った。このときの含水量は容器ごとの秤量によれば 223 mL であった。通気乾燥は約 15 時間かけてほぼ完全に乾燥するまで続けた。

写真 7.2.3 の写真から分かるように、注水時も乾燥時も水分の分布は不均一であるため、図 7.2.4 の通気抵抗から透過係数の含水率依存性を議論することはできない。しかし注水時と乾燥時を比較すると、水分が減少するときに通気抵抗が乾燥時の 1/2 以下に減少することがわかる。この現象は図 7.2.3 で含水比 7.5% のところに極値がある現象とともに微粒子の凝集に関連した現象であると考えている。

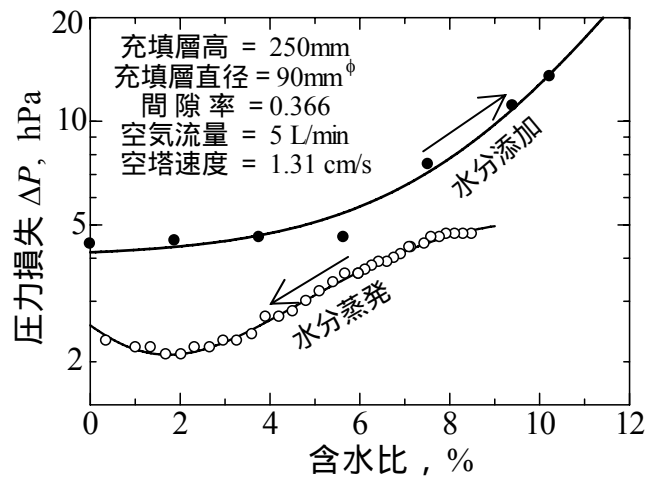


図 7.2.4 通気抵抗に対する含水比の影響(頂部注水)



注水時 (含水量 150mL)



乾燥時 (含水量 160mL)

写真 7.2.3 充てん層頂部から水を注入時の状態 (注水時、乾燥時ともに不均一)

(4) 礫混入砂粒空気透過率測定

礫の配向が空気透過率に及ぼす効果を強調するため、写真 7.2.4 のような扁平な石を故意に選び、砂粒に混ぜて空気の透過抵抗を測定した結果を図 7.2.5 に示す。このとき、同写真のような扁平の粒子をランダムに混入するのは困難なので、ランダム配置には厚みのある粒子を別に選定した。なお、現地の砂礫から分離した砂粒では偏析により再現性が得られないので、100～300 μm の範囲に整粒した流動層試験用の川砂（密度：2.25g/mL）を用いた。この測定では砂粒の間隙率を 40.5% の一定値に固定した。

同図の縦軸は砂粒だけの場合の透過係数 K_s と大粒子が混入されたときの透過係数 K との比であり、 ϵ_G は大粒子を除いた空間が充てん層嵩体積に占める割合である。同写真のような扁平の粒子を流れに平行及び直交させるように故意に充てんした場合の差異は、ランダム充てんの場合の 20% 程度であり、実際にはこのような極端な配向状況はあまり起こらないと考える。

同図中の式はランダム充てんの場合に対する実験式である。現地地盤のガス透過係数の推算には礫の配向性を無視しこの式を用いることにする。



写真 7.2.4 砂粒に混ぜる扁平な大粒子(配向の効果)

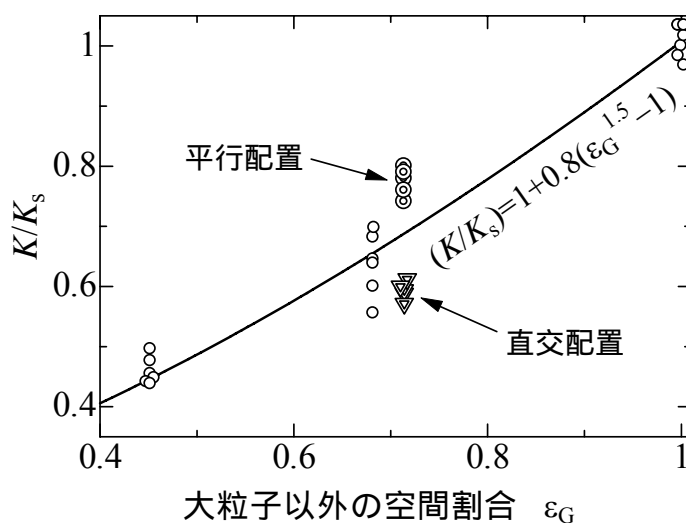


図 7.2.5 大粒子混入による透過係数の変化

7.3 漏えいガスの住宅への侵入経路(推定)

(1) パラメータ条件

数値計算にあたりそれで利用するパラメータを決定しておく必要がある。重要なパラメータは、現地地盤の実効的な間隙率、つまり大粒子や砂粒及び液状水を除いた空間の割合 ϵ_G とガスの透過係数の代表値 K である。

いま、大粒子の重量割合を M_G 、大粒子を除いた空間の割合を ϵ_G 、砂粒の間隙率を ϵ_s とすると質量バランスから

$$\rho_r = (1 - \varepsilon_G) \rho_G + \varepsilon_G (1 - \varepsilon_S) \rho_S \quad (3)$$

$$M_G = \frac{(1 - \varepsilon_G) \rho_G}{(1 - \varepsilon_G) \rho_G + \varepsilon_G (1 - \varepsilon_S) \rho_S} = \frac{(1 - \varepsilon_G) \rho_G}{\rho_r} \quad (4)$$

ここで ρ_r はガンマ線密度計による現地地層の嵩密度で2.07g/mLであり、 ρ_G 及び ρ_S はそれぞれ大粒子と砂粒の粒子密度2.518g/mL及び2.644g/mLである。 M_G の値は、7.2(1)の測定で0.591と求められており、これを使えば $\varepsilon_G=0.514$ 、 $\varepsilon_S=0.377$ と求められる。ここでは、これらの値を用いることにするが、 M_G の値はあまり信頼できない

ので、種々の M_G に対する ε_G と ε_S を計算して図7.3.1に示した。地盤の中の間隙率は水分がなければ ε_G と ε_S の積になるが、これに対する M_G の影響は

$M_G=0.650$ のとき $\varepsilon_G\varepsilon_S=0.1916$

$M_G=0.591$ のとき $\varepsilon_G\varepsilon_S=0.1939$

$M_G=0.550$ のとき $\varepsilon_G\varepsilon_S=0.1955$

となり、乾燥した地盤の間隙率は M_G の測定誤差の影響を殆ど受けないことがわかる。

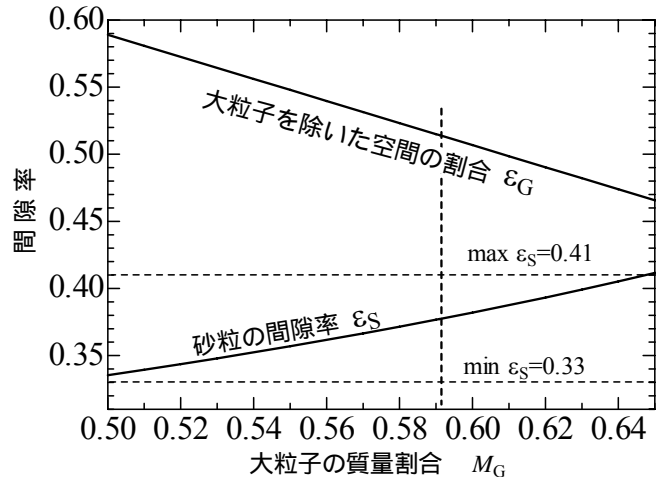


図 7.3.1 種々の M_G に対する ε_G と ε_S

7.2(1)の含水比測定で述べたが、

ボーリング実施日が事故発生から50日後なので含水比のデータは信頼性が低い。別に事故数日後のデータによると、砂礫層の含水比は平均で5.3%であった。このデータから液状水の量は、 $2.07 \times 0.053 = 0.110 \text{ m}^3/\text{m}^3$ となり、 $\varepsilon_G\varepsilon_S=0.194$ とすれば実効的な間隙率 ε は $0.194 - 0.11 = 0.084 \text{ m}^3/\text{m}^3$ となる。

次に透過係数の代表値を求める。まず(1)式に $\varepsilon_S=0.377$ を代入し乾燥砂粒のみのときの透過係数を求めると $K_{\text{air}}=0.94 \times 10^{-3} \text{ m}^2/(\text{hPa}\cdot\text{s})$ が得られる。これに(2)式の粘性の補正を加え $K_S=1.17 \times 10^{-3} \text{ m}^2/(\text{hPa}\cdot\text{s})$ となる。次に図7.2.3から水分により透過係数が2倍になるとして $K_S=2.3 \times 10^{-3} \text{ m}^2/(\text{hPa}\cdot\text{s})$ 、更に図7.2.5に $\varepsilon_G=0.514$ を与えれば $K=1.14 \times 10^{-3} \text{ m}^2/(\text{hPa}\cdot\text{s}) = 1.14 \times 10^{-2} \text{ m}^2/(\text{kPa}\cdot\text{s})$ が得られる。

(2) 地中ガス伝播推測計算

事故発生場所における地中ガス移動に関するシミュレーションプログラムを作成し、影響範囲を定量的に確認するにあたり、小規模のガス漏れ事故の解析では代用電荷法が有効な手段であった。しかしながら、本件は計算領域が非常に広いため、代用電荷法では十分に処理ができない。このため、次の3つの手順で成り立つ新しい方法を考案し、シミュレーションを実行した。

鉛直な無限長の線状ガス源より地中に一様な放射状流線を発生する。

ガスの点発生源、点吸収源、双極子ガス源などを計算領域外の適切な位置に配置し、無限長の線状ガス源のうち、真のガス源に対応する部分(本件では地下0.5m

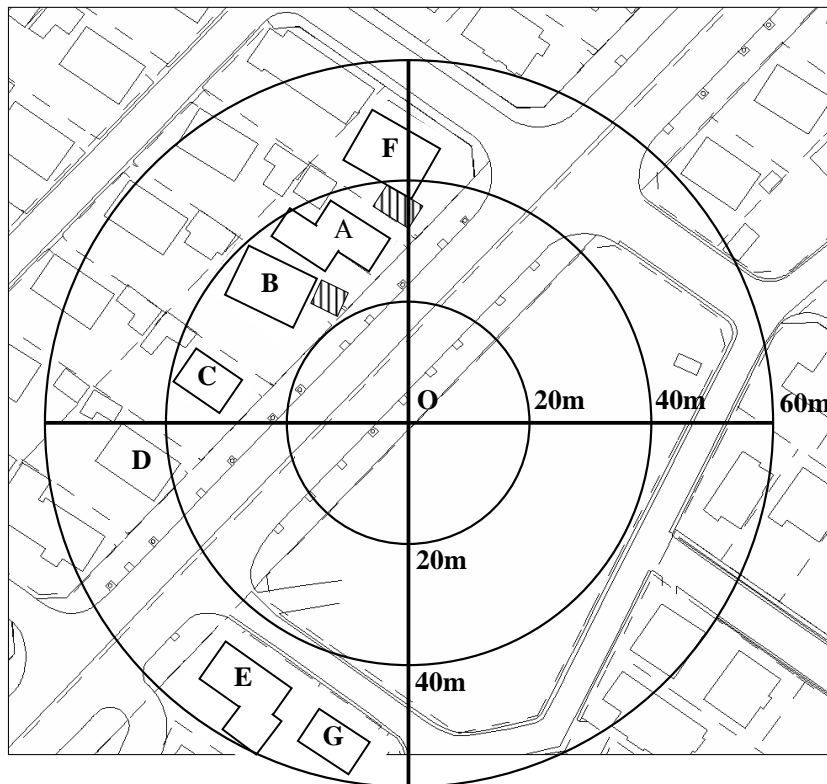
から 2.5m の部分) から発する流線が境界条件を満足するように制御する。

真のガス源に対応する部分から発する流線をたどり、それらが大気に開放される領域を求める。もしその領域が実際の大気開放領域からずれていたら開放部におく制御用ガス吸収源の位置を修正する。

代用電荷法では境界面の電位あるいは電界を外部電荷で制御するのに対し、この方法では流線(電気力線に対応)を外部ガス源(外部電荷やダイポールに対応)で制御する点異なる。このプロセスでこの制御を行うが、現状ではトライアル&エラーによるしかなく、非常に手間がかかる。しかしながら、この手法により、制御用の外部ガス源の数を大幅に減少できるので、パーソナルコンピュータで計算可能になる。

このプロセスは、開放端から放出される流線が制御用ガス源から発した無意味なものを含むのでそれらを除外するために必要になる。この手順の補足段階、つまり開放端付近の制御用ガス吸収源の位置修正は、流線のコントロール法、マスキング法などの技法により事実上不要になる。

北見市春光町の事故発生場所付近を図 7.3.2 に示す。



地図の原点は管破断箇所
の鉛直方向地表面である。

図 7.3.2 北見市春光町の事故発生場所付近

同図において、原点はガス漏えい地点を示している。また、図中ハッチング部は車庫であり、床はコンクリート製でガスは透過できないものとした。また、F 宅には、図中には示していないが土地境界線付近にブロック塀があり、当該塀の基礎は地下 1m まで達しているものがあつた。シミュレーションでは、その状態も再現したが、ガスの流れには影響はほとんど現れなかった。

このシミュレーションで想定する地盤のモデルでは、地下 2.5m 以下は含水比が高

く通気性がないものとしている。また、地表近くは凍結のためガスは透過できない。事故当時、凍結深さは車道下で約 90 cm、歩道下で 50 cm、公園などの積雪部で 30～40 cm である。この計算では車道下で 90 cm、それ以外では 50 cm 程度と考える。したがって、車道下ではガス流路の上下幅 160 cm、それ以外では 200 cm となる。なお、南大通の車道下には太い下水管が通っているが、流線がそれを迂回するように正確にコントロールすることはシミュレーションの目的から言って無意味であると考え、ガス流路の上下幅を若干小さくとることにより表現した。

ガスは地表近くの凍結層と地下 2.5m の高含水層の間に閉じ込められた状態で地中を透過する。ガスが家屋の床下のような、比較的乾燥していて温度が高く、凍結していない場所に達すると、そこから大気に放散される。大気中に放出された後のガス移動は、このシミュレーションの検討外とした。

前出の流線制御の例として、B 宅へ向かう流線と、E 宅へ向かう流線を図 7.3.3 に示す。ガスの流れが道路下を潜り抜け、住宅の床下に侵入する様子である。床下全体でなく、開放部の端部に集中してガスが抜けることが分かる。なお道路の手前で上方に向い地表に抜ける流線は実在するものではなく、単に計算の都合で現れたものである。また流線が本来平行であるべき部分でも若干の波うちが出るのは、流線のコントロール上の誤差である。また、大気への開放端以遠の部分については流線が激しく乱れるため流線のコントロールは難しくなり、ここでは無制御のまま放置してある。

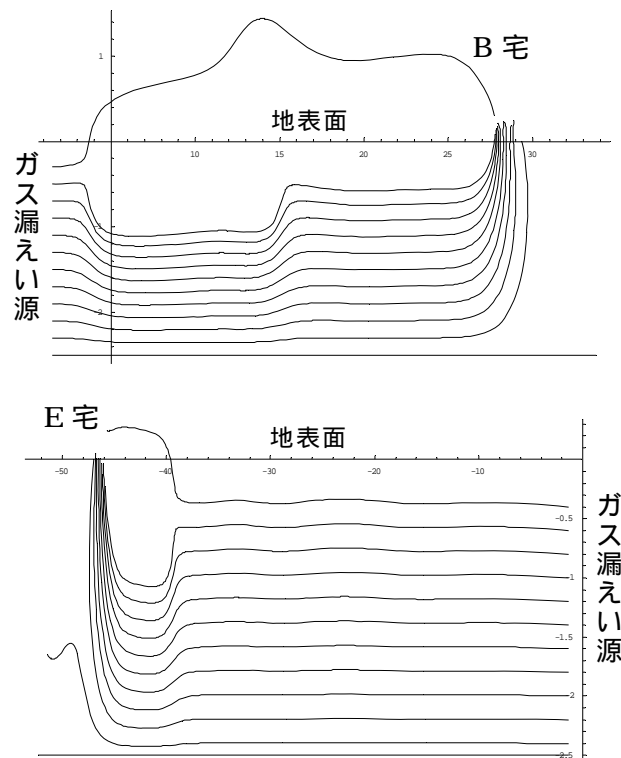


図 7.3.3 B 宅（上）と E 宅（下）へ向かう流線（流線制御の例）

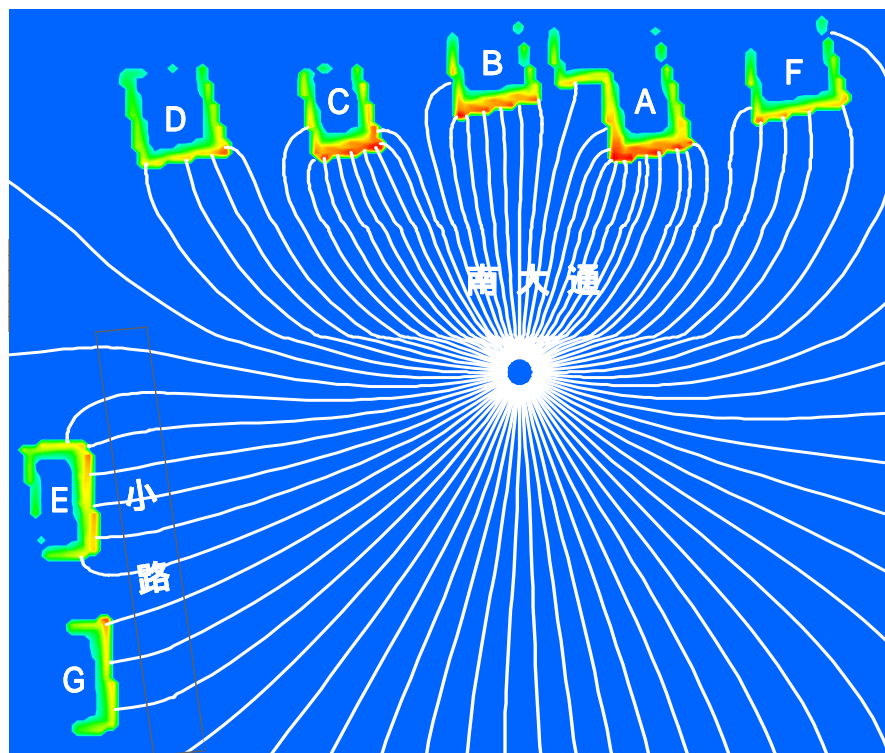


図 7.3.4 各住戸に流れ込むガスの流線（深さ 0.55m から出発した流線）

地下 0.55m で放射状に発した流線が各住戸に流れ込む様子を図 7.3.4 に示す。各流線の間を流れるガス流量は等しく、流線の間隔が狭いほど流速が速くなる。また、住戸の床下からのガス流束は色別で表してあり、緑、黄、赤の順で強くなる。ガスが床下の縁に集中して放出されていることがわかる。なお、南大通の部分で増加する通気抵抗の影響が流線の屈折という形で明瞭に現れているが、道路下の特殊性がガスの流れ全体に与える効果は小さい。むしろ、南大通を横断した側に大きな開口部があるので、そちらに向う流れが強くなっている。

各住宅の床下からのガス流束を立体的に表現したものを図 7.3.5 に示す。

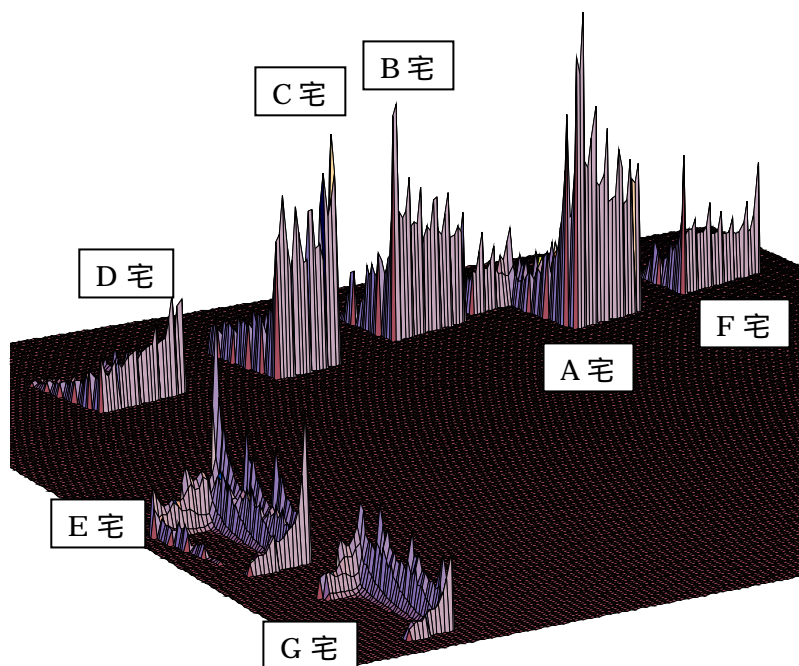


図 7.3.5 A から G 宅の床下からのガス流速

次に、各住宅の床下に分配されるガス流量を計算した結果を表 7.3.1 に示す。

表 7.3.1 住宅の床下に流入されるガス流量の分配率

(総漏えい流量：100%)

住 戸	A 宅	B 宅	C 宅	D 宅	E 宅	F 宅	G 宅	合 計
分配率 f_i	16.7 %	9.0 %	10.9 %	5.2 %	8.1 %	4.8 %	4.5 %	59.2 %

(参考) ガス漏えい箇所周辺住宅の人的被害

A 宅：死者 1 名 負傷者 3 名 B 宅：死者 1 名
 C 宅：死者 1 名 負傷者 2 名 (入院 2 名)
 D 宅：負傷者 3 名 (入院 1 名) 同居人 5 名中 2 名は被害なし
 E 宅：負傷者 3 名 (入院 3 名) F、G 宅：人的被害なし

図 7.3.2 から漏えい箇所からの住宅までの距離が短い順序は、次のとおり。

A 宅 < B 宅 < C 宅 < F 宅 < D 宅 < E 宅 < G 宅
 また、表 7.3.1 からガス流入量の分配率が多い順序は、次のとおり。

A 宅 > C 宅 > B 宅 > E 宅 > D 宅 > F 宅 > G 宅

これらに人的被害の状況を加味すると、E 宅と F 宅の被害レベルに相当の差異のあることがわかる。これは図 7.3.4 に示すとおり、F 宅に移動していたガスが A 宅で吸収されるような状態が生まれ、F 宅にはガスの流入が少なくなったためである。

また、D 宅と E 宅の人的被害は同じであるものの、その内容を見ると、E 宅の居住者 3 名が負傷、3 名とも入院を要したが、D 宅は居住者 5 名のうち 3 名が負傷、うち入院を要した者は 1 名と、大きく異なっている。これは D 宅に移動していたガスが C 宅で吸収されるような状態が生まれ、D 宅へのガスの流入が少なくなったためである。

こうした観点から、シミュレーション結果と実際の被害状況の対応が整合している。

7.4 ガスの到達時間の推定

シミュレーションによって求められた流線をさらに詳細に分析した結果、各戸への流量経時変化は「むだ時間一次遅れ系」で近似できる。

A 宅への流入流量の過渡特性を図 7.4.1 に示す。(他の住宅については図 7.4.2 に示す。) 縦軸は流入流量の最終値で規格化した流量、横軸 τ は時間尺度(実時間ではない)である。 $\tau = 0$ でガス漏れが始まるが、 $\tau = 0.341$ までは流量は零である。この時間をむだ時間 τ_d と呼ぶ。その直後に流量は突然増え、縦軸の値が $1 - (1/e) = 0.632$ に達するまでにむだ

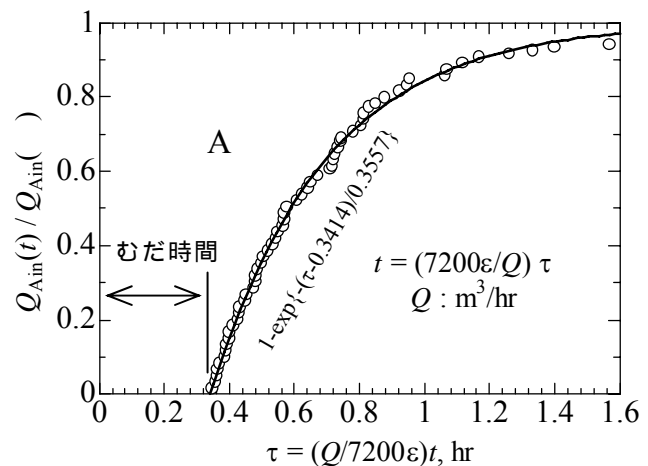


図 7.4.1 A 宅への流入ガス流量の過渡特性

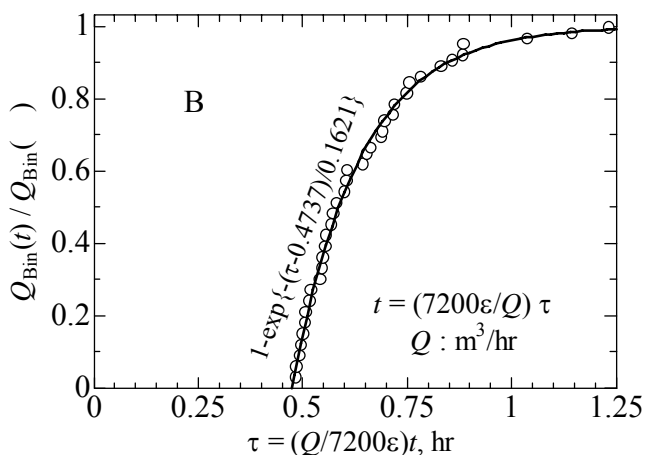
時間から経過した時間を遅れの時定数 τ_c と呼ぶ。

各住戸への流入ガス流量に対するむだ時間と遅れの時定数を表 7.4.1 に示す。ただしこれらの値はガスの漏れ流量 Q (m^3/hr) と実効空間率 ε に応じて次式により実時間に換算する必要がある。

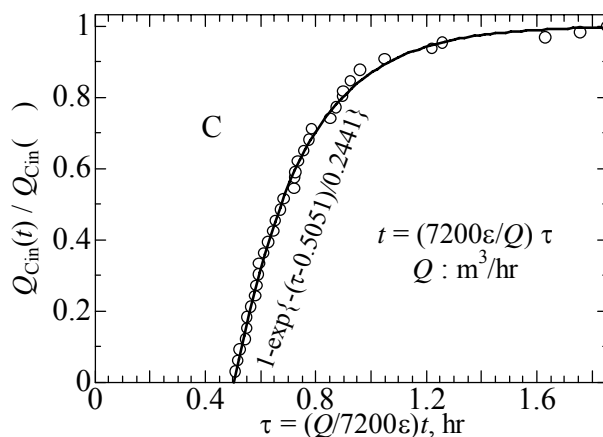
$$T = (7200/Q) \varepsilon \tau \quad (5)$$

表 7.4.1 各戸への分配率、むだ時間、および遅れの時定数

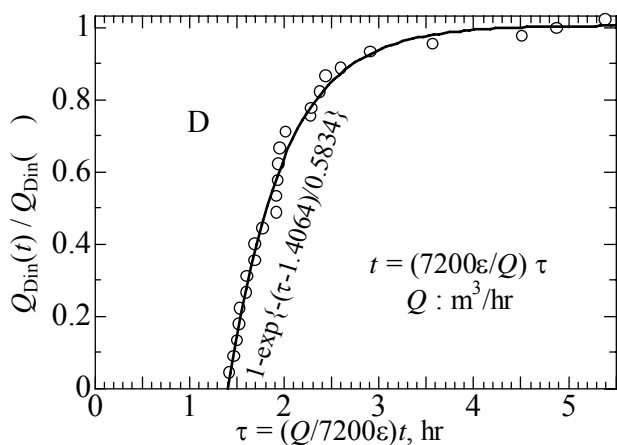
	A 宅	B 宅	C 宅	D 宅	E 宅	F 宅	G 宅
分配率 f_i	0.167	0.090	0.109	0.052	0.081	0.048	0.045
τ_d (hr)	0.341	0.474	0.505	1.406	1.809	1.243	2.306
τ_c (hr)	0.356	0.162	0.244	0.583	0.333	0.911	0.672



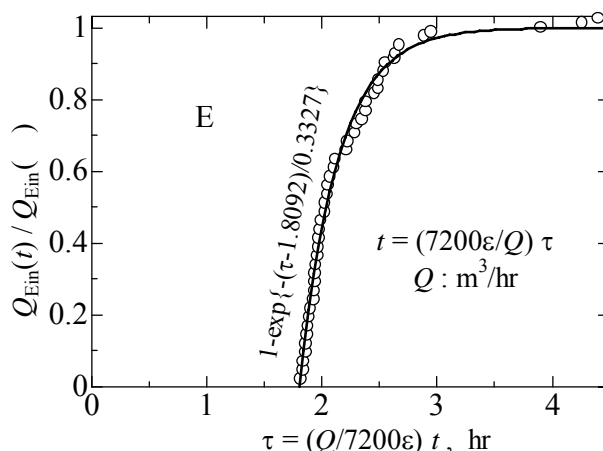
(1) B 宅への流入ガス流量の過渡特性



(2) C 宅への流入ガス流量の過渡特性

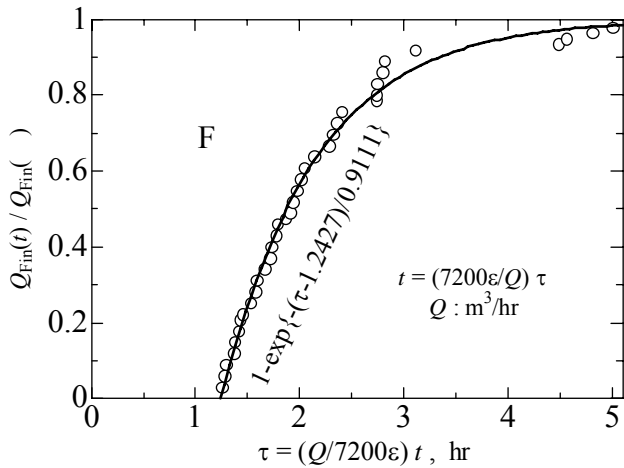


(3) D 宅への流入ガス流量の過渡特性

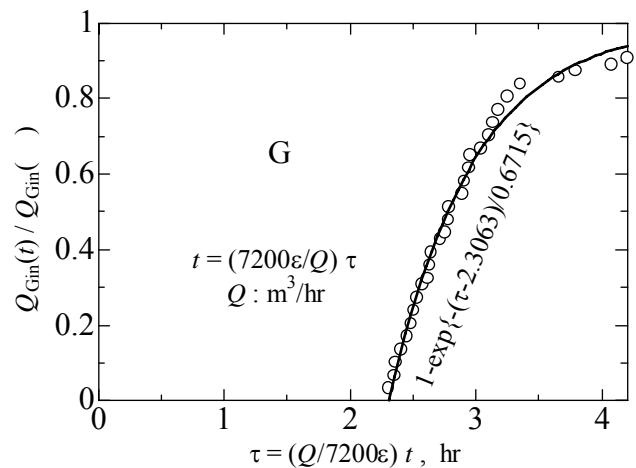


(4) E 宅への流入ガス流量の過渡特性

図 7.4.2 B 宅から G 宅への流入ガス流量のガス特性



(5)F 宅への流入ガス流量の過渡特性



(6)G 宅への流入ガス流量の過渡特性

図 7.4.2 (続き) B 宅から G 宅への流入ガス流量のガス特性

(5)式で実時間に換算したむだ時間 T_{Ad} 、および遅れの時定数 T_{Ac} を使うと流入流量は、

$$Q_A(t) = \begin{cases} 0 & \text{for } t \leq T_{Ad} \\ Q f_A \left[1 - \exp\left\{-\frac{(t - T_{Ad})}{T_{Ac}}\right\} \right] & \text{for } t > T_{Ad} \end{cases} \quad (6)$$

となる。ここで、 f_A は A 宅へのガスの分配率である。

さらに、住戸の内容積を V (m^3)、1 時間あたりの換気回数を n (hr^{-1}) とすると、住戸内の CO ガスの平均濃度は、次式で表せる。

$$C_A(t) = \begin{cases} 0 & \text{for } t < T_{Ad} \\ \frac{Q f_A C_{CO}}{n(1 - nT_{Ac})V} \left[1 - nT_{Ac} \left\{ 1 - \exp\left(\frac{T_{Ad} - t}{T_{Ac}}\right) \right\} \right] - \exp\{n(T_{Ad} - t)\} \end{cases} \quad (7)$$

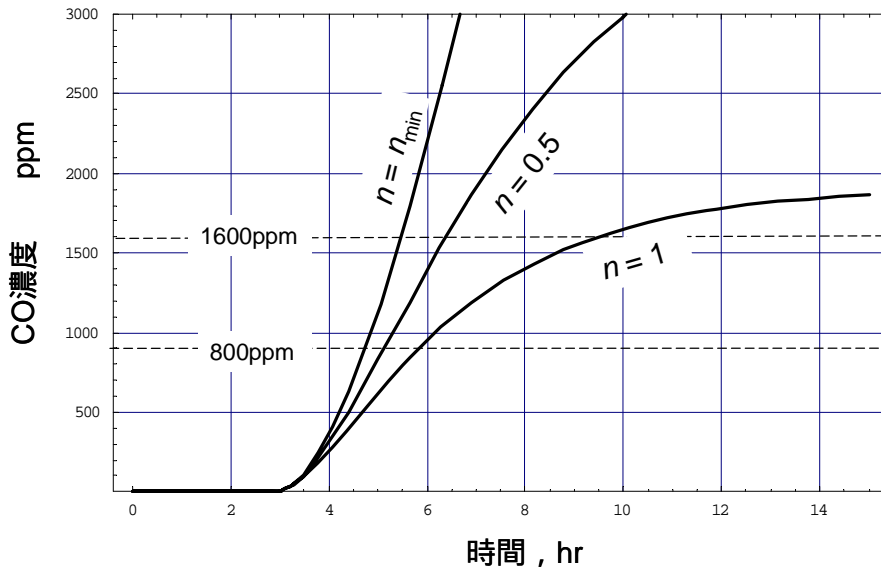
ここで、 C_{CO} はガス中の一酸化炭素 (CO) 濃度で 4.78% である。

次に、(7)式に $Q = 20$ L/s (= 72 m^3/hr)、屋内容積 $V = 300m^3$ とした場合の計算結果を図 7.4.3 に示す。ここで、換気回数 n が零の場合 ($n = n_{min}$) はガスのみが流入するときに対応し、1 時間に 1 回 ($1.0h^{-1}$) の頻度で換気する場合及び 2 時間に 1 回 ($0.5h^{-1}$) の頻度で換気する場合について算定したものである。なお、換気回数 $0.5 hr^{-1}$ は密閉度が高い住戸に相当する。

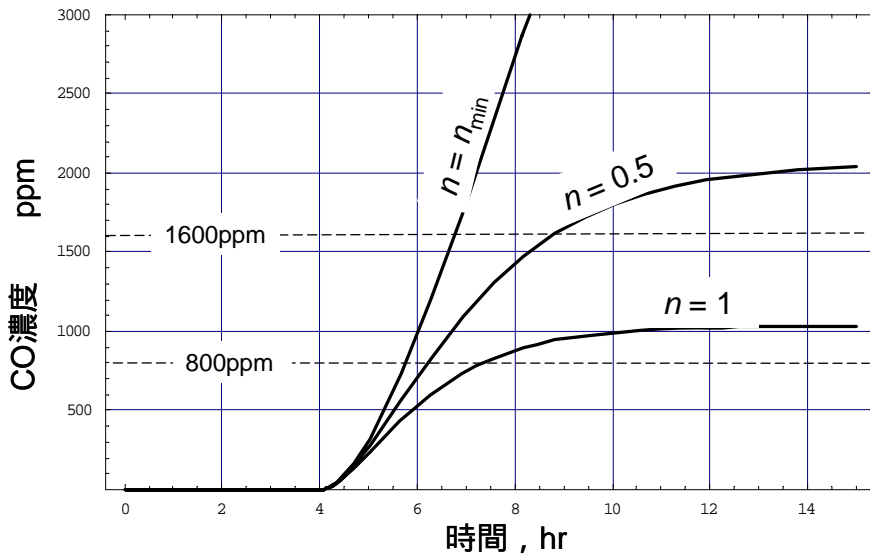
また、CO の平均濃度が 800ppm に達すると中毒症状が現れ、1600ppm に達すると数時間で死に至る可能性があることから、同濃度での状態を指標にする。

同図から A 宅では、CO の平均濃度が 1600ppm に達した時間に着目すると、 $n = n_{min}$ で約 5.5 時間、 $n = 0.5$ で約 6.4 時間、 $n = 1.0$ で約 9.5 時間である。ただし、この時間は、宅内の容量を仮定した上で、当該宅内における CO 濃度を平均化した計算結果であるので、宅内の濃度分布の状態を把握するためには詳細な実験と計算を行う必要がある。

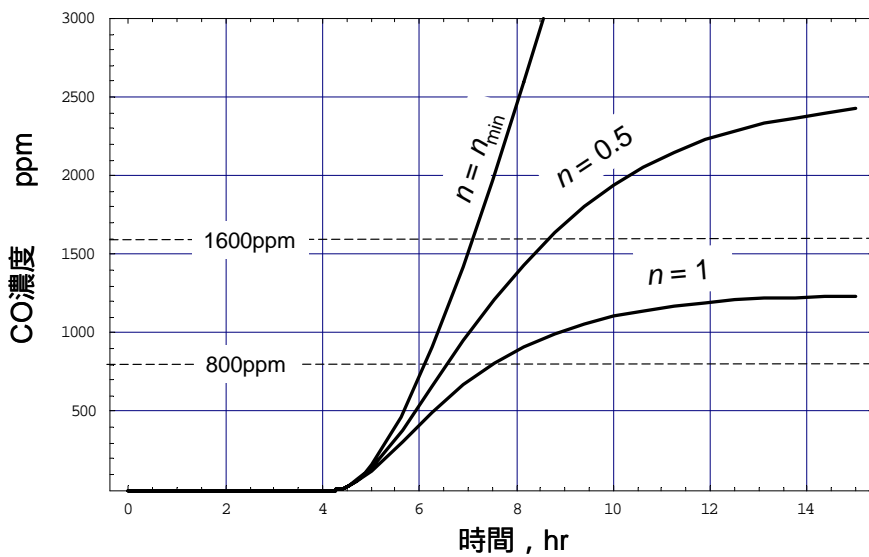
このような仮定もあるが、換気回数 n を 1 時間に 1 回 ($1.0h^{-1}$) の場合及び 2 時間に 1 回 ($0.5h^{-1}$) に限定し、CO の平均濃度が 800ppm 及び 1600ppm に達する時間を算定し、まとめたものを表 7.4.2 に示す。



(1)A 宅における屋内のCOガス平均濃度の経時変化

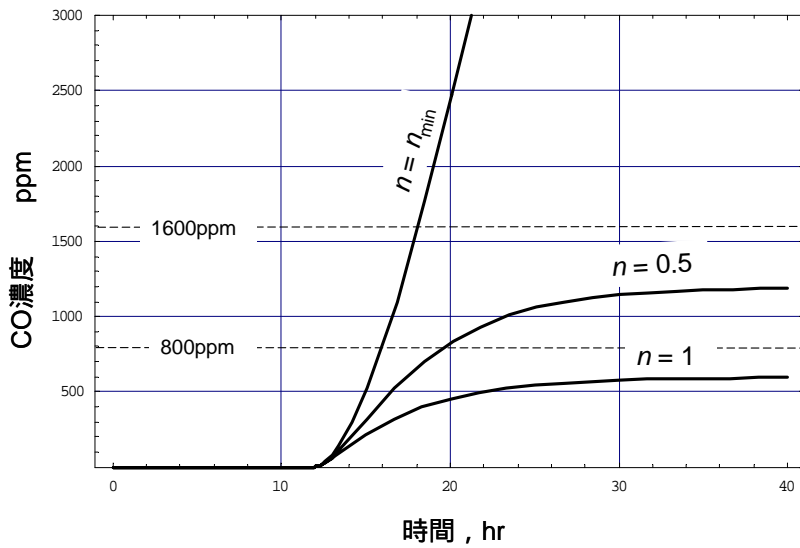


(2)B 宅における屋内のCOガス平均濃度の経時変化

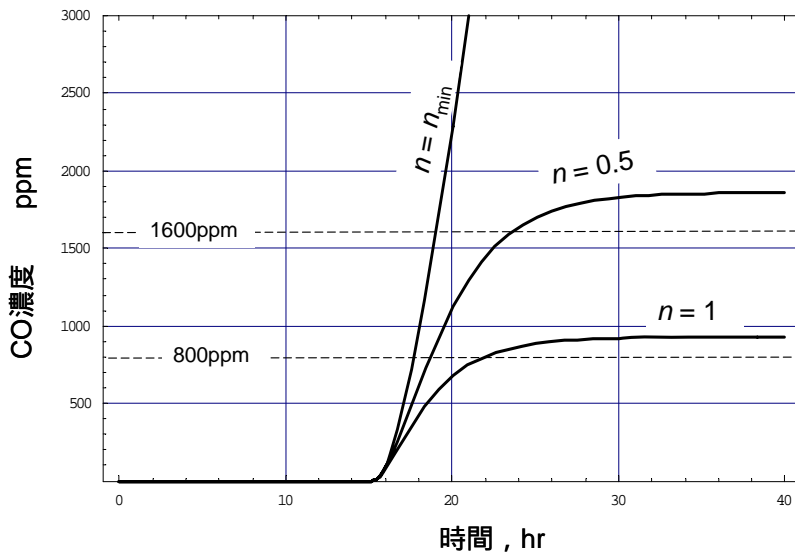


(3)C 宅における屋内のCOガス平均濃度の経時変化

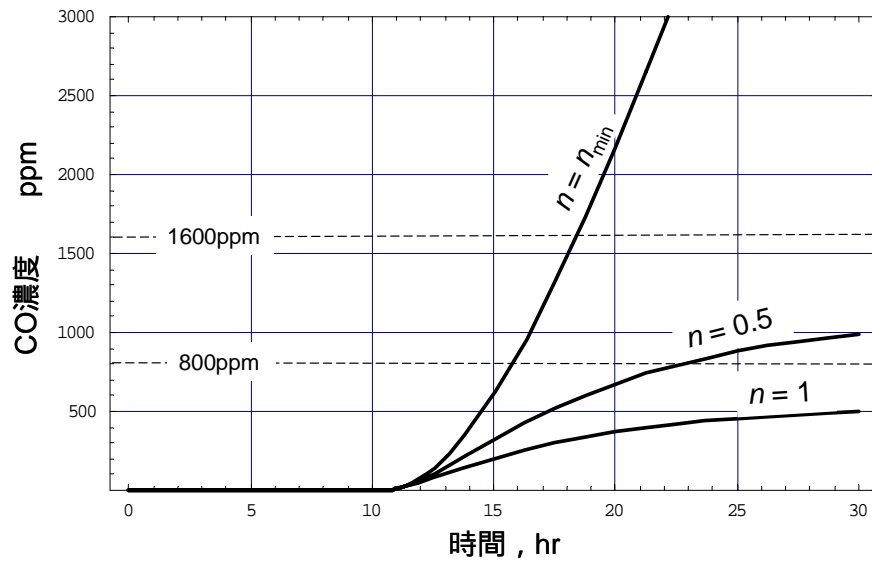
図 7.4.3 各住宅における屋内のCOガス平均濃度の経時変化



(4)D 宅における屋内のCOガス平均濃度の経時変化

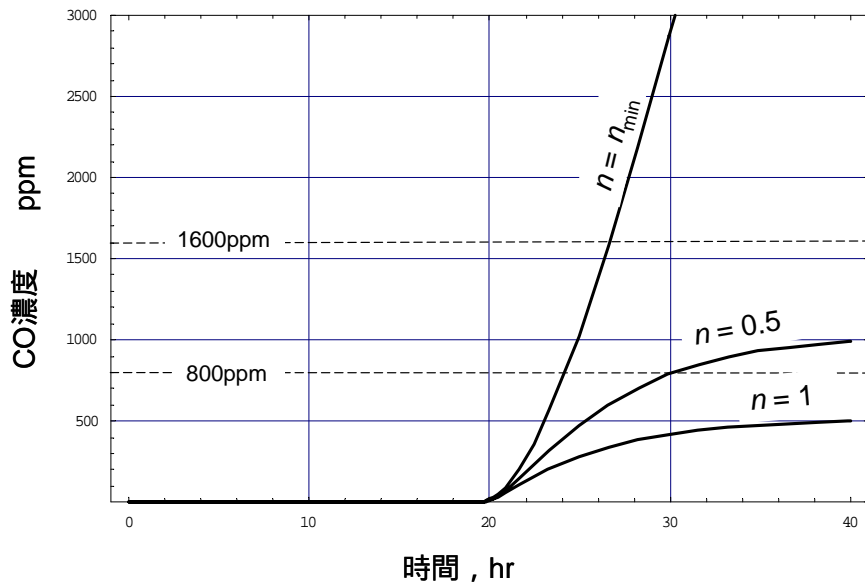


(5)E 宅における屋内のCOガス平均濃度の経時変化



(6)F 宅における屋内のCOガス平均濃度の経時変化

図 7.4.3 (続き) 各住宅における屋内のCOガス平均濃度の経時変化



(7)G 宅における屋内のCOガス平均濃度の経時変化

図 7.4.3 (続き) 各住宅における屋内のCOガス平均濃度の経時変化

表 7.4.2 各住宅の屋内におけるCO濃度 800ppm 及び 1600ppm に達する時間

(単位 : 時間)

漏れ流量	換気回数	CO 濃度	A 宅	B 宅	C 宅	D 宅	E 宅	F 宅	G 宅
15 L/s 54 m ³ /hr	$n = 0.5$ hr ⁻¹	800 ppm	6.82	8.61	9.08	32.80	25.69	51.44	達せず
		1600ppm	9.29	達せず	13.72	達せず	達せず	達せず	達せず
	$n = 1.0$ hr ⁻¹	800 ppm	8.18	達せず	12.13	達せず	達せず	達せず	達せず
		1600ppm	達せず	達せず	達せず	達せず	達せず	達せず	達せず
20 L/s 72 m ³ /hr	$n = 0.5$ hr ⁻¹	800 ppm	4.95	6.21	6.58	19.62	18.69	22.65	30.91
		1600ppm	6.39	8.74	8.65	達せず	23.54	達せず	達せず
	$n = 1.0$ hr ⁻¹	800 ppm	5.53	7.33	7.51	達せず	21.94	達せず	達せず
		1600ppm	9.46	達せず	達せず	達せず	達せず	達せず	達せず
25 L/s 90 m ³ /hr	$n = 0.5$ hr ⁻¹	800 ppm	3.90	4.87	5.17	14.66	14.74	15.94	22.18
		1600ppm	4.90	6.38	6.51	達せず	17.21	達せず	達せず
	$n = 1.0$ hr ⁻¹	800 ppm	4.21	5.37	5.63	達せず	15.97	達せず	達せず
		1600ppm	6.12	達せず	達せず	達せず	達せず	達せず	達せず
30 L/s 108m ³ /hr	$n = 0.5$ hr ⁻¹	800 ppm	3.21	4.01	4.26	11.81	12.18	12.49	17.81
		1600ppm	3.99	5.10	5.25	18.01	13.85	27.14	到せず
	$n = 1.0$ hr ⁻¹	800 ppm	3.41	4.30	4.54	16.40	12.85	25.72	達せず
		1600ppm	4.65	達せず	6.86	達せず	達せず	達せず	達せず

8 . 幸町管及び常盤町管のガス漏えいのフォールトツリー

(1) 幸町管

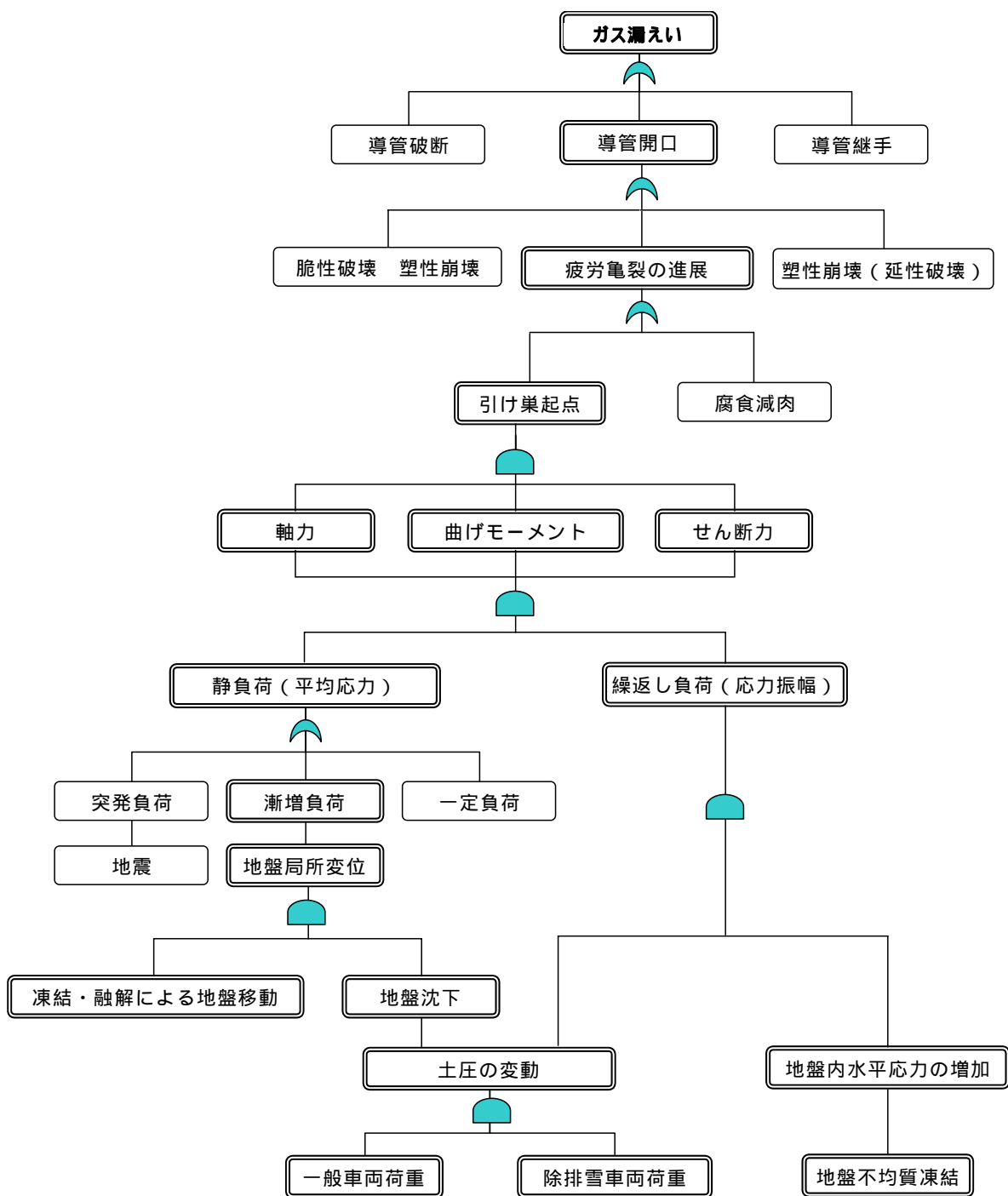


図8.1.1 幸町管のガス漏えいのフォールトツリー図

(2) 常盤町管

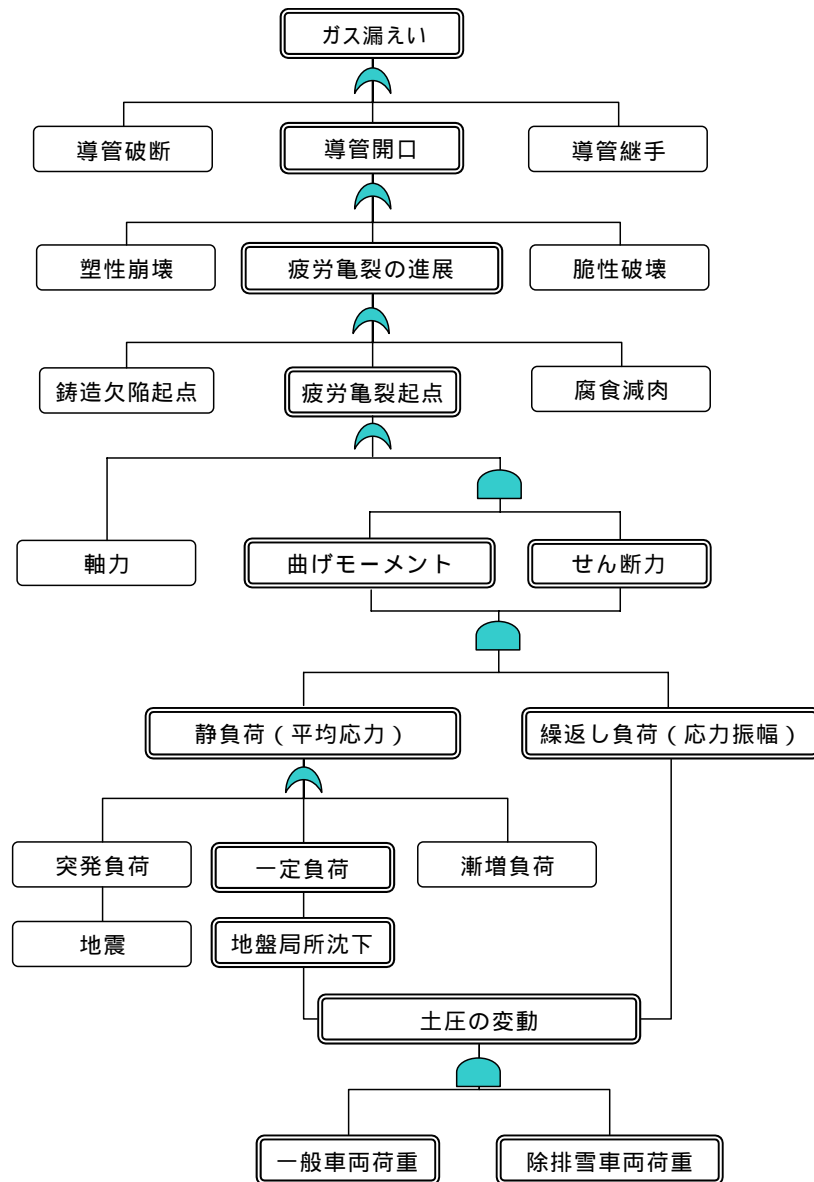


図8.1.2 常盤町管のガス漏えいのフォールトツリー図

9 . 用語説明 (五十音順)

N 値 (えぬち)

地盤の硬さを示す数値で、標準貫入試験を行って把握するもの。一般に、N 値が大きいと硬い地盤で、N 値が小さいと柔らかい地盤と言われる。

遠心金型鑄造管 (えんしんかながたちゅうぞうかん)

鑄型を回転させた状態で熔融金属を流し込み、遠心力を利用して熔融金属を加圧し、鑄造品を作る方法。主として中空の管を作るのに用いられる鑄造方法。

延性破面 (えんせいはいめん)

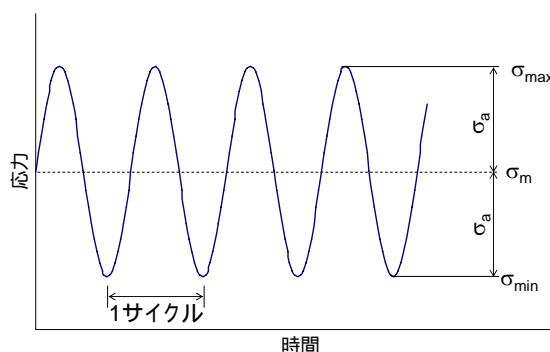
材料の最終破断までに著しい伸びや絞りを伴う破壊を延性破壊という。延性破壊によって生じた破面が延性破面であり、電子顕微鏡で観察するとゴルフボールの表面の凹凸のようなディンプルと呼ばれる破面やうねった縞状模様が観察される。

応力拡大係数 (おうりょくかくだいけいすう)

破壊力学で使用する係数。き裂先端近傍の弾性応力・ひずみ場を記述する力学パラメータ。き裂先端近くにおける応力や歪みの大きさの尺度となる。

応力振幅 (おうりょくしんぷく)

材料の疲労強度は規則的な繰返し応力をくわえたときに破壊を生ずるまでの応力の繰返し数(サイクル数)によって表される。加えられる繰返し応力の振幅を応力振幅 a という(最大応力 σ_{max} と最小応力 σ_{min} の差を 2 で割ったもの)。



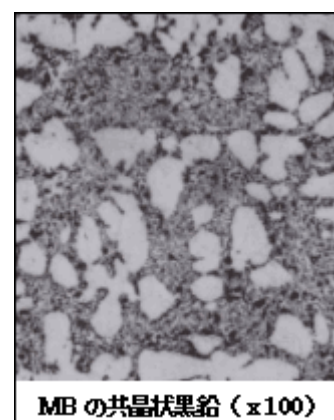
共晶状 D 型黒鉛の組織

共晶状黒鉛 (きょうしょうじょうこくえん)

ISO で定めた、普通鑄鉄(ねずみ 鑄鉄)に於ける黒鉛組織分類の 5 形式のひとつ。共晶セル全体が微細な黒鉛組織になったもので、D 型黒鉛とも呼ばれる。

D 型黒鉛 (でいがたこくえん)

ISO で定めた、普通 鑄鉄における黒鉛組織分類の 5 形式のひとつ。共晶セル全体が微細な黒鉛組織になったもので、共晶に近い組成で生成し易い。共晶状黒鉛組織、または過冷黒鉛組織と呼ばれる。(写真中の黒色部が共晶状黒鉛、白色部はフェライト)



凝灰岩（ぎょうかいがん）

火山から噴出された火山灰が地上や水中に堆積してできた岩石

巨視破面（きょしはめん）

配管など破壊した金属面を光学顕微鏡レベルで拡大して観察された破面。マクロ観察。

形状係数（けいじょうけいすう）

無限寸法の板に直線亀裂がある場合の応力拡大係数

$K = \sqrt{a}$ に対し、有限寸法で種々の形状を持つ亀裂の場合の応力拡大係数の補正のための係数

孔内水平載荷試験（こうないすいへいさいかしけん）

ボーリング孔内において孔壁をガス圧や油圧を利用して加圧し、そのときの圧力と孔壁の変位の関係から、地盤の変形係数、地盤反力係数、降伏圧力、極限圧力、静止土圧などの地盤の力学特性を求めるもの

地盤反力係数 単位面積当りの荷重変化に対する沈下量の変化の割合

後背低地（こうはいていち）

自然堤防や洪積台地などの間であって、細粒土の堆積物からなる軟弱地盤で周囲よりも低平な土地のこと

地盤ばね係数（じばんばねけいすう）

地盤ばねとは、与えられた地盤の変位を荷重として管に伝えるもの。したがって、地盤ばね係数は、単位長さ当たりで示したものである。例えば、地盤が軟らかければ地盤ばねも小さくなり、管に作用する荷重も小さくなる。逆に硬い地盤で同じような変位が生じれば、管に大きな荷重が作用する。

脆性破壊（ぜいせいはいかい）

材料の最終破断までに著しい伸びや絞りを伴わない破壊を脆性破壊という。これに対して最終破断までに著しい伸びや絞りを伴う破壊を延性破壊という。脆性は必ずしも材料に固有な性質でなく、温度、力学的拘束、ひずみ速度などの延性を支配する要因の影響を受ける。

配管の塑性崩壊（はいかんのそせいほうかい）

配管の破壊形態のひとつ。配管に限界を超えた曲げ荷重が加わった場合、曲げモーメントが最大になる位置の全断面が降伏し、不安定な急激な破壊が生じる破壊形態

耐久限度曲線（疲労限度曲線）（たいきゅうげんどきょくせん）

繰返し応力の上限と下限応力の絶対値が等しくない場合に、上限と下限応力の平均値を平均応力とし、その差の 1/2 を応力振幅として、横軸に平均応力、縦軸を応力振幅

とした図を耐久限度曲線という。疲労限度が平均応力によって変化することを表している。

立型（砂型）鑄造管（たてがたちゅうぞうかん）

砂を内張りした円筒形の外型と砂を張った芯型を使用し、隙間に熔融金属を流し込む鑄造方法。鑄鉄管の鑄造方法として古くから使用されてきた方法である。

段丘（だんきゅう）

川・湖・海の沿岸で、海水の後退、地殻変動、河川・海岸の侵食・堆積作用などで造られた階段状の地形のことをいう。

凍結・凍上（とうけつ・とうじょう）

凍結：土の間隙水が凍ること

凍上：土が凍っていくとき、氷の成長に伴って土の体積が膨張すること。もともとは凍結によって地盤の表見が隆起することをいう。凍上しやすいのは、シルト以下の細粒分を多く含む土。

ねずみ鑄鉄管（ねずみちゅうてつかん）

鑄物に使用する炭素を主成分とする鉄合金のうち、炭素が黒鉛の形でより多く存在する合金で作った管。黒鉛を含んだ金属破面の色がねずみ色をしていることからねずみ鑄鉄管と呼ばれる。

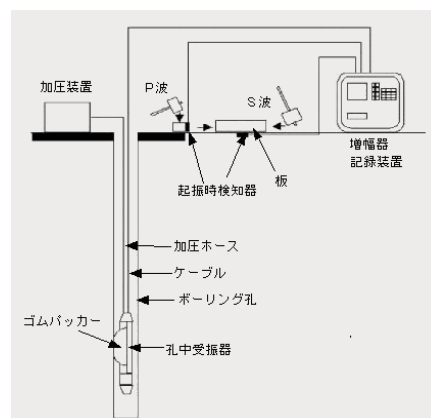
破壊靱性（はかいじんせい）

材料のき裂からの破壊発生に対する抵抗値を破壊靱性という。き裂状欠陥を有する部材にある有限の限界荷重が負荷されると、急速にき裂が進展して破壊にいたる。き裂材の強度である破壊靱性は、応力拡大係数などの破壊力学パラメータで表現される。

PS 検層（びーえすけんそう）

右図のとおり、速度検層はボーリング孔を利用して、地盤を伝播する弾性波を測定し、速度を求める調査方法。求めようとする弾性波速度にはP波とS波があり、その両方を求める場合をPS検層という。

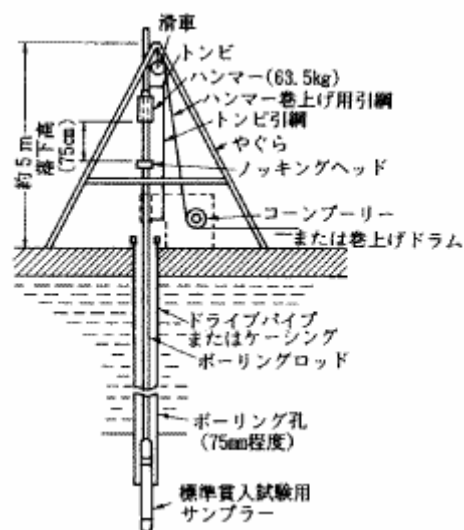
得られた弾性波速度から、地山岩質や土質地盤の力学的特性を定量的に評価することができる。



標準載荷試験（ひょうじゅんさいかしけん）

63.5kgのハンマー（おもり）を75cmの高さから自由落下させて、サンプラーを土中に30cm貫入させるのに要する打撃回数を測定する試験で、この時の打撃回数がN値となる。

一般にボーリング調査と併用され、1m毎に実施する。



表面波探査（ひょうめんはたんさ）

地盤の表層を伝わる表面波を同時多チャンネルで測定し、解析することによって地盤のS波速度の2次元鉛直断面を得ることができる物理探査技術。対象深度は地下15m程度以浅で、山岳地形などの複雑な場所を除いた通常の地盤に適応可能である。S波速度は、地盤の固さや締まり具合、さらには動的な地盤特性と密接に関係するパラメータであり、表面波探査を用いることにより、簡便な測定・解析で、素早く低コストに広範囲のS波速度構造を大局的に把握することが可能になる。

疲労（ひろう）

材料は繰返し応力のもとでは、通常、静的強度よりはるかに低い応力によっても破壊を起こす。このような現象を材料の疲労という。

疲労限度（ 10^7 回時間強度）（ひろうげんど）

炭素鋼などの鉄鋼材料では応力振幅がある限界値以下になると、何回繰返しても破壊しなくなる。この限界の応力を疲労限度という。通常 $10^6 \sim 10^7$ 回の間に存在する。アルミニウム合金などの非鉄金属では明確な疲労限度を示さないため、 10^7 回に対する時間強度を疲労限度の代わりに用いる。

平均応力（へいきんおうりょく）

加えられる繰返し応力の最大応力と最小応力の平均を平均応力という。

へき開破面（へきかいはめん）

脆性破壊によって生じた破面であり、電子顕微鏡で観察すると特定の結晶面で分離破断した破面が観察される。き裂進展速度が速い場合に現れる。

密度検層（みつどけんそう）

原位置で地盤の密度の分布を人工的な線源を用いて地層の密度を測定する方法。

ボーリング孔等から線源地層に向け照射し、衝突・散乱した線の強度を深度ごとに測定し、連続的に地層密度の変化を記録する。

ガンマ線エネルギーの減衰は、照射する地層の電子密度に関係し、ガンマ線の線源よりある間隔に置かれた検出器により衝突・散乱したガンマ線の強度を測定する事により地層の見掛け密度を求められる。

照射されたガンマ線の減衰度は、地層の単位体積当たりの密度(電子密度)に比例し、ガンマ線強度が強い部分は地層密度が低く、ガンマ線強度が弱い部分は地層密度が高くなる。

有効上載圧（ゆうこうじょうさいあつ）

全上載圧（それ以上にある土や地下水を含めたすべての質量による圧力）から地下水位以下の浮力分を差し引いた圧力のこと。例えば、有効上載圧が大きな地盤は液状化現象が起きにくい。