

JNC TJ7410 2005-011

/

図書室

# 瑞浪超深地層研究所における 立坑覆工コンクリートの健全性調査

## ● 報 告 書

(核燃料サイクル開発機構 契約業務報告書)

平成 16年 2月

三井住友建設株式会社

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松 4 番地 49  
核燃料サイクル開発機構  
技術展開部 技術協力課  
電話：029-282-1122（代表）  
ファックス：029-282-7980  
電子メール：jserv@jnc.go.jp

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:  
Technical Cooperation Section,  
Technology Management Division,  
Japan Nuclear Cycle Development Institute  
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184, Japan

© 核燃料サイクル開発機構

(Japan Nuclear Cycle Development Institute) 2005

平成16年2月

## 瑞浪超深地層研究所における 立坑覆工コンクリートの健全性調査

勝沼 好夫※ 樋口 正典※  
斯波 明宏※ 片居木 功\*\*\*

### 要 旨

瑞浪超深地層研究所の研究坑道は、深度約1,000mに達する超大深度の立坑と水平坑道から構成される。研究坑道の建設および研究に使用する期間は15年程度の長期間となる。このため、研究坑道のうちでも特に立坑覆工の安定性、維持管理が重要な課題のひとつとなっているが、立坑の覆工コンクリートについては、その健全性を調査した事例が非常に少なく、調査結果もほとんど公表されていない状況にある。

本業務では、わが国に現存する鉱山の立坑において覆工コンクリートの健全性調査を実施し、その健全性を評価するとともに、今後の立坑工事に対する設計、施工及び長期的な品質管理に資するデータの取得を行った。

調査は、国内の2箇所の鉱山立坑で行った。調査項目は、①文献調査、②目視観察による外観変状の調査、③コア採取による圧縮強度および中性化深さの調査、④反発硬度法によるコンクリート強度の推定、⑤細孔径分布の測定、⑥熱分析、⑦配合推定、⑧塩化物イオン量の測定、⑨粉末X線回折、⑩EPMAによるマッピング分析である。

目視観察で確認された変状は、①ジャンカやコールドジョイントなどの初期欠陥、②初期欠陥に伴う漏水、③ひび割れ、④表層剥離、⑤剥落である。特に、断層付近では、ひび割れや剥落が確認された。

化学分析などの結果から推定されるコンクリートの劣化は、①中性化、②表面部での風化・老化（炭酸化を含む）によるセメント水和物の変質である。また、ひとつの立坑では、促進剤として塩化カルシウムを使用した可能性があり、鋼材腐食発生限界濃度（一般に1.2kg/m<sup>3</sup>）を超える塩化物イオンが確認された。

さらに、これらの調査結果をもとに、瑞浪超深地層研究所における立坑覆工コンクリートの設計、施工および維持管理上の留意点について考察を行った。

---

※) 三井住友建設株式会社 技術研究所 土木研究開発部

\*\*\* 三井住友建設株式会社 土木事業本部 土木統括部 機電部

## 目 次

1. はじめに	1
2. 調査概要	2
2. 1 コンクリートの劣化機構	2
2. 2 調査範囲	4
2. 3 調査内容	4
2. 4 調査立坑	8
3. 文献調査	9
3. 1 X立坑の調査結果	9
3. 1. 1 立坑の主な仕様	9
3. 1. 2 掘削工期	10
3. 1. 3 立坑本体部の開削方法	10
3. 1. 4 覆工コンクリートの施工方法	11
3. 2 Y立坑の調査結果	13
3. 2. 1 立坑の主な仕様	13
3. 2. 2 掘削工期	15
3. 2. 3 立坑本体部の開削方法	15
3. 2. 4 覆工コンクリートの施工方法	15
3. 2. 5 上部水平パイプ坑道連接部の施工方法	17
4. 目視観察による外観変状の調査	18
4. 1 X立坑	18
4. 2 Y立坑	19
5. コア採取による調査	21
5. 1 コアの採取	21
5. 2 圧縮強度試験	22
5. 3 中性化深さの測定	24
6. 反発硬度法によるコンクリート強度の推定	26
6. 1 反発硬度の測定	26
6. 2 反発硬度と圧縮強度の関係	27
6. 3 圧縮強度の推定結果	27
7. 細孔径分布の測定	30
7. 1 測定方法	30
7. 2 測定結果	31

8. 熱分析	33
8. 1 分析方法	33
8. 2 分析結果	34
9. コンクリートの配合推定	35
9. 1 推定方法	35
9. 2 推定結果	36
10. 塩化物イオン量の測定	37
10. 1 測定方法	37
10. 2 測定結果	37
11. 化学分析によるコンクリート劣化因子の調査	39
11. 1 粉末X線回折	39
11. 1. 1 分析方法	39
11. 1. 2 分析結果	40
11. 2 EPMA（電子線マイクロアナライザー）によるマッピング分析	41
11. 2. 1 分析方法	41
11. 2. 2 分析結果	42
12. 調査結果のまとめと考察	49
12. 1 立坑覆工コンクリートの材料	49
12. 2 立坑覆工コンクリートの配合	49
12. 3 立坑覆工コンクリートの強度	50
12. 4 立坑覆工コンクリートの変状	50
12. 5 立坑覆工コンクリートの劣化機構	50
12. 6 立坑覆工コンクリートの設計、施工および維持管理上の留意点	53
13. 今後の課題	57
14. おわりに	58
<参考文献>	59

## 1. はじめに

核燃料サイクル開発機構（以下、「サイクル機構」とする）が計画している超深地層研究所の研究坑道は、深度約1,000mに達する超大深度の立坑と水平坑道からなる。立坑の覆工コンクリートについては、その健全性を調査した事例が非常に少なく、調査結果もほとんど公表されていない状況にある。そこで、わが国に現存する鉱山の立坑2箇所において覆工コンクリートの健全性調査を実施し、その健全性を評価するとともに、今後の立坑工事に対する設計、施工及び長期的な品質管理に資するデータの取得を行う。

## 2. 調査概要

### 2. 1 コンクリートの劣化機構

コンクリート構造物における主な劣化現象として、中性化、塩害、凍害、アルカリ骨材反応および化学的腐食がある。中性化と塩害は主にコンクリート中の鋼材の劣化に影響を及ぼし、凍害、アルカリ骨材反応、化学的腐食はコンクリートそのものの劣化に影響を及ぼす。以下にこれらの概要<sup>1)</sup>を示す。

#### (1) 中性化

中性化は、大気中の二酸化炭素がコンクリート内に侵入し、炭酸化反応を起こすことによって、コンクリートのpHが低下する現象である。二酸化炭素がコンクリートの細孔内に侵入し、細孔溶液に溶解して炭酸イオンとなり、コンクリート中に存在する水酸化カルシウムと反応して炭酸カルシウムが生成される。コンクリートは通常pH12~13の強アルカリ性であるが、水酸化カルシウムが炭酸イオンと反応して消費されることにより、細孔溶液のpHが低下していく。鉄筋は、強アルカリ性環境下では、不動態皮膜と呼ばれるバリアを覆っているが、pHが11以下になると、その皮膜が失われ、腐食しやすい状態になる。その状態で酸素と水が供給されると、腐食が進展し、錆を生成する。錆により鉄筋の体積が膨張し、その膨張圧によってかぶりコンクリートにひび割れや剥離などの変状が発生する。中性化は、適度な水分供給と適度な乾燥状態にある場合に最も進行が早く、常に水と接している場合や、湿度が非常に低い環境下では、進行速度は遅くなる。また中性化は、鉄筋腐食に対する影響が大きく、コンクリートそのものの物性にはほとんど影響を及ぼさない。ただし、炭酸イオンにより、セメント水和物が分解され、コンクリートが脆弱化する一種の化学的腐食現象も見られる場合があり、中性化と区別するために炭酸化と呼ばれることがある。一般的に、水セメント比の大きいコンクリート（強度の小さいコンクリート）の方が中性化進行速度は大きい。

#### (2) 塩害

塩害は、鉄筋や鋼材の腐食を促進し、腐食による断面欠損や腐食膨張による、かぶりコンクリートのひび割れ、剥離などを引き起こす現象である。塩害の主因子である塩化物イオンは、海水や凍結防止剤（塩化カルシウムなど）などの外部から供給される場合と、水、混和剤、骨材などの元々のコンクリート材料に含まれている場合とがある。1974年に塩化物量規制が行われる以前のコンクリート構造物では、海砂などを洗わずに用いた場合もあるため、内在する塩化物イオンが主要因となって腐食に至る場合も見られるが、塩害の大半は外部からの供給によるものである。塩化物イオンがコンクリート内部に侵入し、鋼材表面近傍で鋼材腐食に必要な濃度に達すると、中性化で述べた鋼材の不動態皮膜が破壊され、腐食が進展していく。腐食には酸素と水が必要であるため、海洋環境などでは、海水中よりも水しぶきを受ける飛沫帯の方が、腐食進行が早くなる。また塩害による鋼材腐食は、中性化による鋼材腐食よりも激しい場合が多く、さらに中性

化との複合的な劣化により、想定以上に腐食が進展する場合もある。なお、塩害によりコンクリートそのものが脆弱化することはほとんどない。一般的に、水セメント比の大きいコンクリート（強度の小さいコンクリート）の方が塩化物イオンの拡散速度は大きい。

### （3）凍害

凍害とは、コンクリート中の水分が凍結し、その凍結膨張によって発生するものであり、長年にわたる凍結と融解の繰返しによって、コンクリートが徐々に劣化する現象である。コンクリート中の微細な空隙に存在する水分は、大きい空隙から順に凍結し（小さい空隙ほど氷点が降下するため）、体積膨張を生じる。この時、膨張圧を緩和するだけの微細な空隙が周りに存在しない場合、コンクリートに膨張圧が作用し、微細なひび割れを引き起こす。ひび割れにより、さらに水分がコンクリート内部に浸透し、同様の現象が繰返し引き起こされることによって、コンクリート組織が破壊されていく。凍害の特徴としては、コンクリート表面にスケーリング（表面が薄片状に剥離）、微細ひび割れ（網目状、紋様）、崩壊（小さな塊）などが見られる。凍害は、凍結と融解の繰返し（寒暖の差が激しい）回数が多いほど、最低気温が低いほど、外部からの水分供給が多いほど激しくなる傾向があり、北海道や東北地方はもちろんのこと、温暖地の内陸部でも発生する。現在では、ある一定の空気泡を含んだ AE コンクリートが主流であり、構造耐力にまで及ぶ劣化は少なくなったが、それ以前のコンクリートでは、数多く見られる劣化現象である。

### （4）アルカリ骨材反応

アルカリ骨材反応とは、コンクリート中のアルカリ成分とアルカリシリカ反応性鉱物を有する骨材が反応して、膨張し、その膨張圧によってひび割れなどを引き起こす現象である。アルカリシリカ反応性骨材は、コンクリート中の水酸化物イオン（OH<sup>-</sup>）と反応して、アルカリシリカゲルと呼ばれる白色不透明の物質を生成する。このアルカリシリカゲルがコンクリート中の水分を吸収し、異常膨張することによって周囲の組織を破壊していく。アルカリ骨材反応の特徴としては、無筋コンクリートや鉄筋量の少ないコンクリートの場合、表面に網目状、亀甲状のひび割れが発生する。梁や柱などでは、部材軸方向のひび割れも発生する場合がある。アルカリ骨材反応は、コンクリートのアルカリ性が高く、コンクリート内の相対湿度が高く（水分供給が多い）、アルカリシリカ反応性骨材の反応性が活発なほど激しくなる傾向があり、西日本および北陸地方を中心全国的に見られる現象である。1986 年にアルカリ骨材反応に関する規制（セメントのアルカリ量、骨材の反応性の有無）が設けられた。

### （5）化学的腐食

化学的腐食とは、コンクリートが外部からの化学的作用を受け、その結果として、セ

メント硬化体が変質あるいは分解して結合能力を失っていく現象である。化学的腐食の要因としては、酸類、アルカリ類、塩類、油類、腐食性ガスなど多岐にわたり、その劣化過程も様々である。その中で、最も多く見られる現象は、酸類と塩類による劣化である。酸類が主要因の場合では、コンクリートが酸により侵食され、表面から溶けるようにして劣化が進展する。塩類が主要因の場合は、コンクリート中の水酸化化合物と反応して、エトリンガイトと呼ばれる著しい膨張性を持った物質を生成し、その膨張圧によってコンクリート組織を破壊していく。化学的腐食は、一般の環境下で問題となることは少なく、温泉地や酸性河川流域、下水道関連施設、化学工場、食品工場、腐食性ガス発生箇所などの特殊な環境下で見られる。

## 2. 2 調査範囲

- (1) 文献調査
- (2) 目視観察による外観変状の調査
- (3) コア採取による圧縮強度と中性化深さの調査
- (4) 反発硬度法によるコンクリート強度の推定
- (5) 細孔径分布の測定
- (6) コンクリート配合の推定
- (7) 塩化物イオン濃度の測定
- (8) 化学分析によるコンクリート劣化因子の調査
- (9) 調査結果のまとめと考察

## 2. 3 調査内容

### (1) 文献調査

調査対象立坑の設計時及び施工時の記録（設計図書や施工記録など）ならびに過去の維持管理記録（点検記録など）の有無を調査し、記録が残っているものについては、立坑の竣工年月、用途、規模、地質条件、構造、使用材料、施工法、使用状況などを調査する。

### (2) 目視観察による外観変状の調査

コンクリートの劣化が進行すると、その変状がコンクリートの表面に顕在化してくることが多いため、目視によりコンクリートの表面状況の観察を行い、変状が認められる箇所においては、デジタルカメラによる写真撮影を行う。

観察すべき変状としては、以下が挙げられる。

- ① コンクリートの変色、汚れ（カビ、エフロレッセンス、白色ゲルの溶出など）
- ② コンクリートのひび割れ（方向、パターンなど）
- ③ コンクリートのスケーリング
- ④ コンクリートの浮き

## ⑤ コンクリートのはく離, はく落

### (3) コア採取による圧縮強度と中性化深さの調査

コンクリートコアは、調査状況及び劣化状況に応じて採取可能な位置から採取するが、1立坑について2箇所、1箇所当たり3本採取する。コアの直径は約100mmとし、長さは200mm以上を目標とする。

採取したコアを用いて、コンクリートの物理試験、圧縮強度試験及び中性化深さの測定を行う。

#### ① 物理試験

コンクリートの単位体積質量及び含水比の測定を行う。

単位体積質量は、圧縮強度試験に使用する全てのコア供試体において質量及び体積(直径及び高さの測定値から算出)を測定し、質量／体積から算出する。

含水比については、一般にコア供試体を110°Cで一定質量になるまで乾燥し、乾燥による質量減少量／乾燥後の供試体質量から算出することが考えられる。しかし、コンクリート中には自由水、吸着水、結合水など様々な形態の水分が存在するため、110°C乾燥による含水比を測定しても物性の評価にはあまり利用できないものと考えられる。よって、ここでは熱分析を行うこととする。分析試料は中性化深さ測定及び圧縮強度試験後のコアから採取することとし、使用コンクリートが異なる3箇所(1立坑×2深度+1立坑×1深度)から採取した3種類とする。試料数は1種類当たり2試料(表層部及び内部各1試料)とする。

熱分析は、試料を常温から順次加熱していったときの試料の重量および発熱・吸熱を連続的に測定するものであり、試料中にどのような化合物がどの程度含まれているかも知ることができる。

#### ② 圧縮強度試験

採取した全てのコアから長さ100~200mmの供試体を切り出し、コンクリートの圧縮強度試験を行う。コアの圧縮強度試験は、JIS A 1107-1993「コンクリートからのコア及びはりの切取り方法並びに強度試験方法」及びJIS A 1108-1999「コンクリートの圧縮強度試験方法」に準じて行う。

#### ③ 中性化深さの測定

採取した全てのコアの表面から約50mmを切り出し、コンクリートの中性化深さの測定を行う。中性化深さの測定は、コアの割裂面にフェノールフタレンの1%アルコール溶液を噴霧し、紫赤色に発色しない部分を中性化領域として表面からの深さを測定する。

コンクリートの中性化は、大気中の二酸化炭素がコンクリート内に侵入し炭酸化反応を起こすことによって細孔溶液のpHが低下する現象であり、一般にはコンクリート内部の鋼材の腐食が問題となるが、水和物の変質と細孔構造の変化を伴うため、コンクリ

ートの強度変化などを引き起こす可能性もある。

#### （4）反発硬度法によるコンクリート強度の推定

コンクリート強度を調査する手法としては、コア抜きにより直接圧縮強度を測定する手法（コア抜き法）やテストハンマーでコンクリート表面を打撃し反発硬度を測定することにより間接的に強度を推定する手法（反発硬度法）などがある。

コア抜き法は、直接強度測定ができるため、最も信頼性のある方法であるが、構造物を傷めてしまうことになるため、自ずとコアの本数も限定されてしまうことが欠点である。それに対して、非破壊で検査できるテストハンマーによる反発硬度法は、精度的には劣るもの、任意の位置のコンクリート強度を推定できる利点を有しているだけではなく、構造物を傷めないで検査できることが特長である。

したがって、（3）②のコアによる圧縮強度試験を補うために、適宜、テストハンマーによるコンクリート強度の推定（反発硬度法）を実施する。調査方法は JSCE-G 504-1999「硬化コンクリートのテストハンマー強度の試験方法」に準じ、調査位置は調査状況及び劣化状況に応じて選定する。

#### （5）細孔径分布の測定

コンクリートの細孔構造は、劣化によって変化することが知られている。そこで、コアを覆工コンクリート表面から深さ方向（40mm）に4分割（厚さ10mm）し、コンクリートの細孔径分布を水銀圧入法により測定する。

コアは中性化深さ測定後のものを使用することとし、使用コンクリートが異なる3箇所（1立坑×2深度+1立坑×1深度）から採取した3種類とする。試料数は1種類当たり4試料（深さ方向4分割）とする。

#### （6）コンクリート配合の推定

コンクリートの強度、耐久性などの品質は、配合によって大きく異なるため、コンクリートの配合は、コンクリートの健全性を評価する上で重要な基礎データになる。そこで、圧縮強度試験に使用したコアを用いて配合推定を行い、実際に使用されたコンクリートの配合を推定する。

配合推定はセメント協会法によって行う。試料は使用コンクリートが異なる3箇所（1立坑×2深度+1立坑×1深度）から採取した3種類とし、試料数は1種類当たり1試料とする。

#### （7）塩化物イオン濃度の測定

立坑覆工コンクリートでは、早期強度が求められるため、促進剤として塩化カルシウムがよく使用される。また、細骨材として海砂が使用されている可能性もある。そこで、コンクリートの塩化物イオン濃度を測定し、海砂使用の可能性や塩化カルシウムの使用

量について検討する。

測定試料は圧縮強度試験後のコアから採取することとし、使用コンクリートが異なる3箇所（1立坑×2深度+1立坑×1深度）から採取した3種類とする。試料数は1種類当たり1試料とする。

#### （8）化学分析によるコンクリート劣化因子の調査

##### ① X線回折

コンクリート劣化因子の有無を確認するために、表層部及び内部のコンクリートについてX線回折を実施する。分析試料は中性化深さ測定及び圧縮強度試験後のコアから採取することとし、使用コンクリートが異なる3箇所（1立坑×2深度+1立坑×1深度）から採取した3種類とする。試料数は1種類当たり2試料（表層部及び内部各1試料）とする。

X線回折とは、結晶性の物質に一定の波長のX線を当てたとき、X線の入射角がある特定の角度（複数ある）になると、結晶により反射されて出てくるX線が干渉を起こし、強度が強くなる（回折）という原理を利用し、物質がどのような鉱物（結晶）からできているかを調べるものである。

##### ② EPMA（電子プローブマイクロアナライザ）

EPMAにより、C-S-H（水和生成物）のCa/Si比を覆工コンクリート表面から40mmの深さまで分析し、水和組織の変質の有無、範囲を調査する。また、X線回折において劣化因子が同定された場合には、その含有元素（1～2元素）の分布も調査する。分析試料は中性化深さ測定後のコアを使用することとし、使用コンクリートが異なる3箇所（1立坑×2深度+1立坑×1深度）から採取した3種類とする。試料数は1種類当たり1試料とする。

EPMAは、走査電子顕微鏡が形態の観察のみしかできないという欠点を補って、形態の観察と同時に、その物質がどのような元素から構成されているかをも同時に調べることができるようとしたものである。原理的には走査電子顕微鏡と同じで、電子プローブを試料表面に照射するが、その際、発生する二次電子のほかにX線を検知する。物質は電子線を照射された場合にも、その物質を構成する元素に特有の波長をもったX線を発生する。したがって、観察中の試料のある結晶に着目し、その結晶に電子線を照射したとき発生してくるX線の波長の分布を調べることにより、その結晶がどのような元素から構成されているかを知ることができる。

#### （9）調査結果のまとめと考察

以上の（1）から（8）までの調査結果をもとに、立坑覆工コンクリートの健全性を評価するとともに、今後の立坑工事に対する設計、施工及び長期的な品質管理における留意点について考察を行う。

## 2. 4 調査立坑

わが国に現存する鉱山立坑のうち、特別の仮設なしに調査のために立坑内部に立ち入ることが可能な以下の2箇所の立坑を対象として、一次覆工コンクリートの健全性調査を実施する。

### ①X立坑

- ・仕上がり内径×深さ :  $\phi 6.0\text{m} \times 790\text{m}$  (二次覆工なし)
- ・工 期 : 上部；昭和 20 年代半ば  
下部；昭和 40 年代前半
- ・使用目的 : 入気用
- ・工 法 : 上部；ロングステップ工法  
下部；ショートステップ工法
- ・岩 種 : 砂岩、砂質泥岩の互層

### ②九州Y立坑

- ・仕上がり内径×深さ :  $\phi 6.2\text{m} \times 640\text{m}$  (二次覆工なし)
- ・工 期 : 昭和 38 年～昭和 41 年
- ・使用目的 : 排気用
- ・工 法 : ロングステップ工法
- ・岩 種 : 玄武岩（上部約 68m）、砂岩、砂質泥岩の互層

立坑内部での現地調査項目を以下に示す。

- 1) 目視観察による外観変状の調査
- 2) 反発硬度法によるコンクリート強度の推定
- 3) コンクリートコアの採取

採取位置、数量は、調査状況及び劣化状況に応じて採取可能な位置から、1立坑について2箇所、1箇所当たり3本、合計12本（コア寸法： $\phi 10\text{ cm} \times 20\text{cm}$ 以上）を採取する。

### ①X立坑

上部立坑及び下部立坑の一次覆工コンクリート下方部分の2深度

### ②Y立坑

立坑上部の上部パイプ坑道連接部の一次覆工コンクリートより2箇所

### 3. 文献調査

調査対象立坑の設計時及び施工時の記録（設計図書や施工記録など）ならびに過去の維持管理記録（点検記録など）の有無を調査し、記録が残っているものについては、立坑の施工年月、用途、規模、地質条件、構造、使用材料、施工法、使用状況などを調査する。

#### 3. 1 X立坑の調査結果

本立坑は上部立坑部分が昭和 20 年代半ばに、下部立坑部分が昭和 40 年代前半に開削されており、建設時からの経過年数は、上部立坑で 50 年強、下部立坑で 30 数年となっている。

文献調査を行ったところ、本立坑関係の当時の設計図書や施工記録は現存していなかった。このため、鉱山会社および施工建設会社の関係者より当時の状況について聞き取り調査を行った。

本立坑のうち下部立坑部分の開削方法や一次覆工コンクリートの施工方法等については、当該鉱業所内の他の立坑で施工時期が連続している立坑について関係記録・資料を入手し調査を行った。調査の結果、下部立坑部分の開削方法、一次覆工コンクリートの配合、コンクリート施工方法は、この立坑と同様であることが分かった。

##### 3. 1. 1 立坑の主な仕様

###### （1）使用目的、用途

鉱山の入気用および人巻き用立坑として建設された。

###### （2）立坑規模、構造

仕上がり内径 :  $\phi 6.0\text{m}$

立坑深度 : 790m（上部立坑、下部立坑の合計）

本体部壁厚 上部立坑： 30～50cm※ 無筋コンクリート造（二次覆工なし）

下部立坑： 40cm 無筋コンクリート造（二次覆工なし）

※ 予想壁厚を示す。

###### （3）地質条件

砂岩と砂質泥岩（頁岩）の互層からなり、一部に石炭層を挟んでいる。フィッショントラック年代は42～45百万年である。

上部立坑部分では、地層の傾斜は $60^\circ \sim 70^\circ$ で下方に向かうに従って急傾斜になっている。また、特記すべき断層破碎帯は見受けられない。下部立坑部分では、地層の傾斜は $60^\circ \sim 80^\circ$ 弱で下方に向かうに従って急傾斜になっている。

なお、地層中の地下水には、覆工コンクリートの健全性に悪影響を与えるような有害成分は特には含まれていない。

### 3. 1. 2 掘削工期

上部立坑 昭和20年代半ば  
下部立坑 昭和40年代前半

### 3. 1. 3 立坑本体部の開削方法

上部立坑は坑口部以外の立坑本体部をロングステップ工法により、下部立坑はショートステップ工法により開削を行った。

上部立坑で採用されたロングステップ工法は、掘削と覆工を通常 20~40mごとに交互に施工していく方法で、掘削後の地山のゆるみを支保工で支え、地質に応じて一定の区間ごとにまとめて順巻覆工コンクリートを打設する工法である。本立坑では1ステップ長を地山条件に応じて 16~40m（平均段階長：約 28m）として掘削、築壁を交互に行なった。

下部立坑はショートステップ工法により開削を行った。ショートステップ工法は、穿孔、装薬、発破、ずり出し、一次覆工を1サイクルごとに順次行っていく工法で、切羽側壁を掘削後間もなくコンクリートで覆工していくため、通常支保工を必要とせず、安全性の高い工法である。ショートステップ工法による下部立坑開削の作業概要を図3-1に示す。

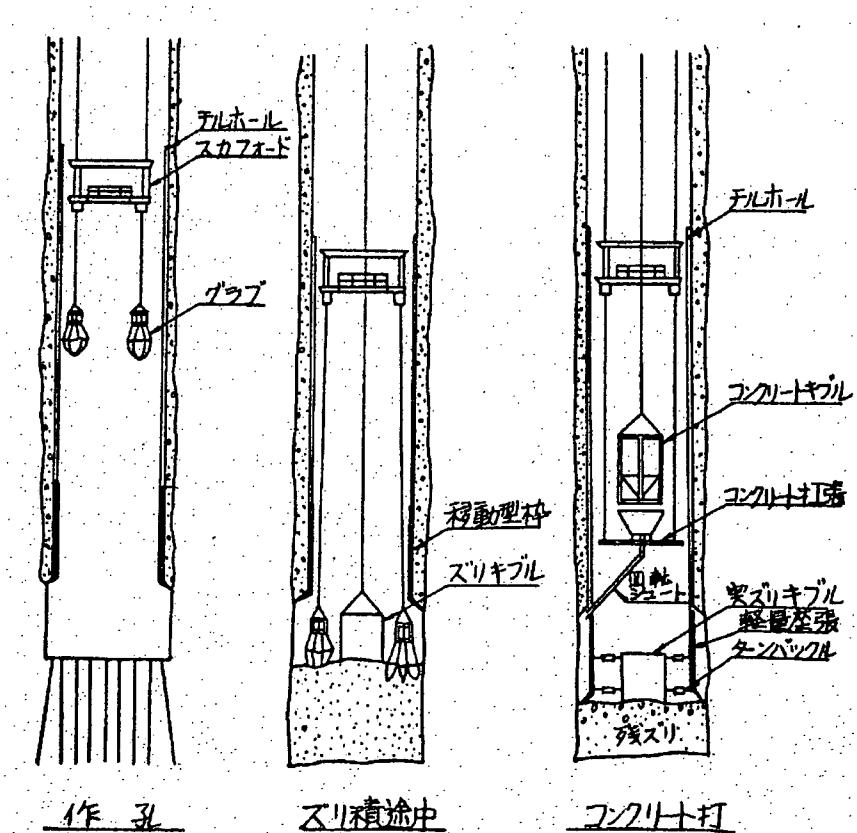


図3-1 下部立坑開削の作業概要（ショートステップ工法）

### 3. 1. 4 覆工コンクリートの施工方法

#### (1) コンクリートの打設方法

上部立坑の覆工コンクリートは、1ステップを掘削終了後、最下部にフーチング基礎を設けて、下部より順巻きで施工した。坑外のバッチャープラントで製造された生コンを、コンクリートキブルで坑内のコンクリートタンクに持ち込み、回転台を回しながらシートを用いて現場打ちした（図3-1参照）。

#### (2) コンクリートの配合

立坑上部部分のコンクリート配合、施工条件、養生方法については、書類がなく当時の関係者もいなくなっているため、不明であった。

立坑下部部分についても同様に書類がなかったが、前述したように、施工時期が連続している当該鉱業所内の2本の立坑における一次覆工コンクリート配合の実績が調査できたので、その結果を以下にまとめた。X立坑の下部立坑部分は、これら2本の立坑と同様に施工されている。

##### ①A立坑

表3-1にコンクリートの現場配合を示す。

表3-1 コンクリート現場配合  
(m<sup>3</sup>当たり)

粗骨材 の最大 寸法 (mm)	スランプ の範囲 (cm)	空気量 (%)	単位 水 量 (kg)	単位 セメント 量 (kg)	水セメント 比 W/C (%)	細骨材 率 S/a (%)	単位細 骨材量 S (kg)	単位粗骨材 量 G <sub>1</sub> (kg)	単位粗骨材 量 G <sub>2</sub> (kg)	単位混和剤 量 AE剤 (%)	塩化 カルシウム (%)
25	14±2		170	300	56.7	37.0	700	1,220	—	—	*

※ セメント:アサノベロセメント、\*:セメント重量比

配合決定に当たっての特記事項は、以下のとおりである。

- ・早期基準強度 :  $\sigma_{3h} = 10 \text{ kgf/cm}^2 (1.0 \text{ N/mm}^2)$  (打設終了から発破まで)
- ・コンクリート打設開始からずり積み開始までの時間は3時間であり、その時のコンクリート強度は、試験では  $\sigma_{3h} = 11 \text{ kgf/cm}^2 (1.1 \text{ N/mm}^2)$  となっている。
- ・コンクリート打設終了から発破までの時間は3.5時間
- ・コンクリート打設終了後脱型までの時間は約11時間であり、その時のコンクリート強度は、試験では  $\sigma_{10h} = 60 \text{ kgf/cm}^2 (5.9 \text{ N/mm}^2)$  となっている。
- ・冬期練り上がり温度：骨材を蒸気保温で25°C、温水ボイラーによる60°Cの温水を使用し、30°C±5°Cの練り上がり温度を確保した（ミキサー出口では20~25°Cのコンクリートが得られる）。
- ・急速掘進に備えて、冬期間の配合はセメント量を330kgf/m<sup>3</sup>に増量した。
- ・セメントは早強ポルトランドセメントのアサノベロセメント（商品名、比重3.15）を使用した。表3-2、表3-3に骨材の試験成績を示す。

表 3-2 細骨材の試験成績

比重	単位体積質量 kg/m <sup>3</sup>	吸水量	ふるい(mm) 通過 %						粗粒率
			5	2.5	1.2	0.6	0.3	0.15	
2.58	1,660	2.88	100	98	84	54	15	6	2.43

表 3-3 粗骨材の試験成績

比重	単位体積質量 kg/m <sup>3</sup>	吸水量	ふるい(mm) 通過 %					粗粒率
			25	20	15	10	5	
2.65	1,680	1.10	100	81	67	25	1	6.93

## ②B立坑

表 3-4 にコンクリートの現場配合を示す。

表3-4 コンクリート現場配合 (m<sup>3</sup>当たり)

粗骨材 の最大 寸法 (mm)	スランプ の範囲 (cm)	空気量 (%)	単 位 水 量 (kg)	単位 セメント量 (kg)	水セメント比 W/C (%)	細骨材 率 S/a (%)	単位細 骨材量 S (kg)	単位粗骨材量		単位混和剤量 AE剤 (%)	塩化 カルシウム (%)
								5~25 G <sub>1</sub> (kg)	25~40 G <sub>2</sub> (kg)		
25	14±2		186	300	62.0	39.5	730	1,130	—	—	*

※ セメント:アサノベロセメント、\*:セメント重量比

配合決定に当たっての特記事項は、以下のとおりである。

- ・配合はセメント量を普通にして、28日強度として 200kgf/cm<sup>2</sup>(20N/mm<sup>2</sup>)を目標に決めた。
- ・コンクリートの練り上がり温度はコンクリートの初期強度に大きな影響を与えるため、練り上がり温度管理には特に留意した(コンクリート用水、骨材の加熱等)。
- ・現場で採取したテストピース強度は、以下の通りである。

$$\sigma_{6h} = 11 \sim 25 \text{ kgf/cm}^2 (1.1 \sim 2.5 \text{ N/mm}^2) \quad \text{平均 } 15 \text{ kgf/cm}^2 (1.5 \text{ N/mm}^2)$$

$$\sigma_1 = 97 \sim 138 \text{ kgf/cm}^2 (9.5 \sim 13.5 \text{ N/mm}^2) \quad \text{平均 } 115 \text{ kgf/cm}^2 (11.3 \text{ N/mm}^2)$$

$$\sigma_7 = 198 \sim 257 \text{ kgf/cm}^2 (19.4 \sim 25.2 \text{ N/mm}^2) \quad \text{平均 } 210 \text{ kgf/cm}^2 (20.6 \text{ N/mm}^2)$$

- ・打設コンクリートの圧縮強度が 5 kgf/cm<sup>2</sup> (0.5N/mm<sup>2</sup>)の時に発破試験を行ったが、コンクリートには何ら異状は認められなかった。

### 3. 2 Y立坑の調査結果

Y立坑は、小島に石炭採掘のために昭和39～41年に建設された立坑で、建設から40年弱が経過している。商業ベースの採炭はすでに中止されているが、現在でも排気立坑として使用されている。

文献調査により工事報告書を入手できたので、以下に調査結果を述べる。なお、工事報告書に記載されていない事項については、施工建設会社の関係者に聞き取り調査を行い、調査内容の確認、補充を行った。

#### 3. 2. 1 立坑の主な仕様

##### (1) 使用目的、用途

石炭鉱山の総排気、人員の昇降、石炭の搬出、その他電力配線、排水管、圧気管、冷房管等の敷設された多目的立坑である。

##### (2) 立坑規模、構造

仕上がり内径 :  $\phi 6.2m$

立坑深度 : 640m

壁厚 本体部: 30～40cm 無筋コンクリート造（二次覆工なし）

連接部: 60～120cm 鉄筋コンクリート造（二次覆工なし）

図3-2に立坑の概要を示す。覆工コンクリートの健全性調査は、立坑内部へのアクセスや坑内保安上の制約などから、図に示すように上部水平パイプ坑道連接部付近で行った。

##### (3) 地質条件

この地域には下位に古第三系の地層が分布している。主に砂岩、砂質泥岩からなる海成層で、互層構造となっており、上部は炭層を伴う。地表より約68mまでは、新第三系～更新統の新規火山岩類である玄武岩に覆われている。

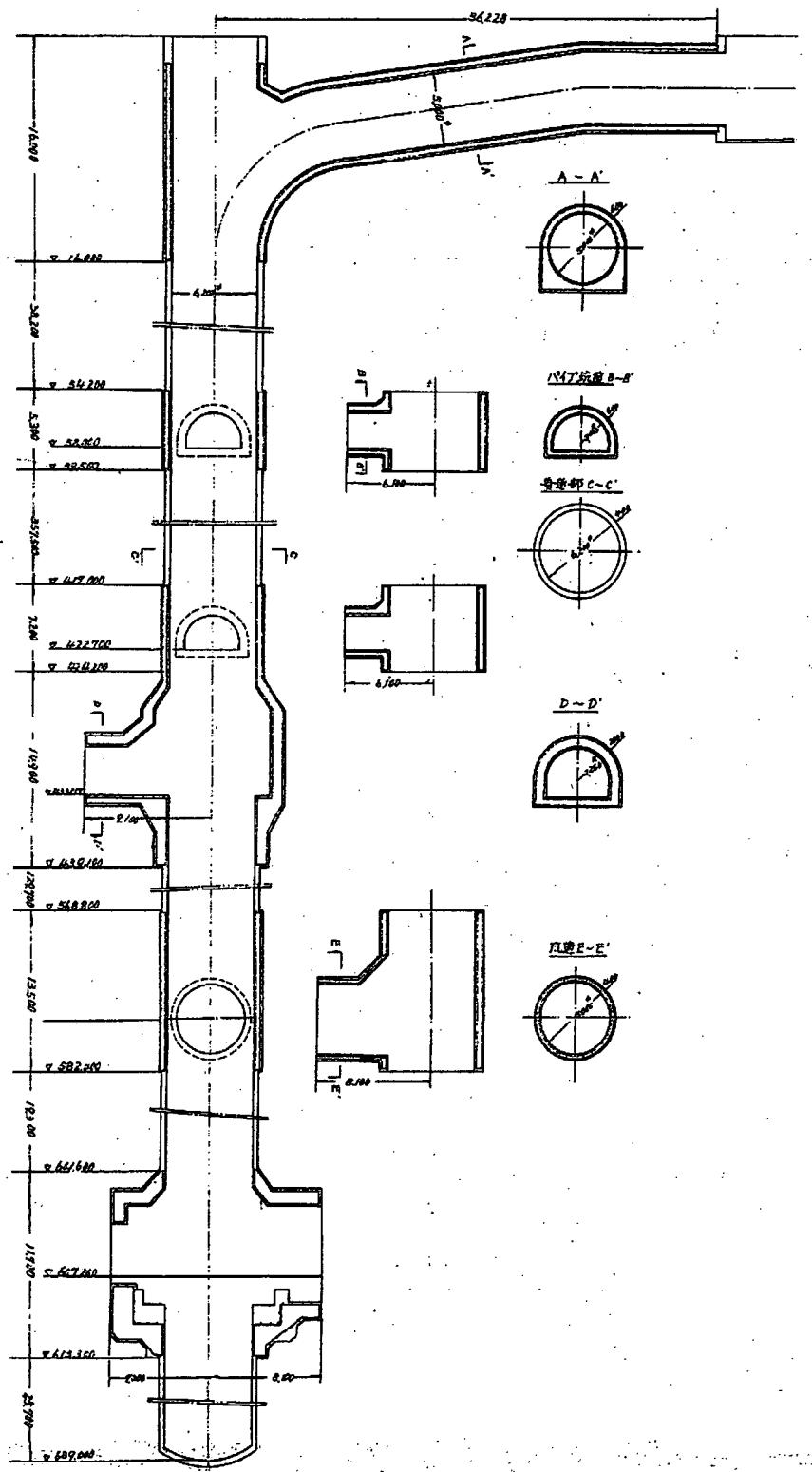


図3-2 Y立坑の概要

### 3. 2. 2 堀削工期

昭和39年～昭和41年

### 3. 2. 3 立坑本体部の開削方法

立坑本体部は、ロングステップ工法により開削を行った。すなわち、従来から採用されてきた「ステップシンキング」方式により、1ステップ20～30mごとの掘削、築壁を交互に施工し、次のステップの掘削前に探査、止水工事を行った。

### 3. 2. 4 覆工コンクリートの施工方法

#### (1) コンクリートの打設方法

覆工コンクリートは、1ステップごとに築壁基礎として最下部にフーチングを設け、下方より上方に向かって順巻きにて打設した。

所定の深度まで掘削が完了した後、スカフォードを所定の位置まで移動し、仮枠回収、型枠組立が終了したらスカフォード上段に回転台を据え付け、コンクリートタンク（容量 1.4m<sup>3</sup>）を設置し、流し込みシートを取り付ける。

坑外のバッチャープラントで製造された生コンは、コンクリートキブル（容量 1.4m<sup>3</sup>）で坑内のコンクリートタンクに持ち込み、回転台を回しながらシートを用いて現場打ちする。図3-3に覆工コンクリートの打設概要図を示す。

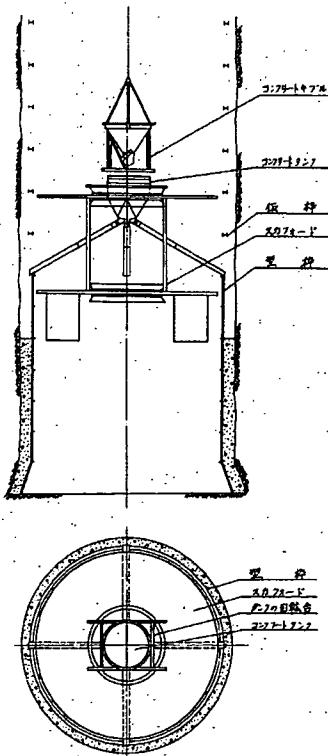


図3-3 覆工コンクリートの打設概要図

## (2) コンクリートの配合

コンクリート強度は、28日で $200\text{kg}/\text{cm}^2(20\text{N}/\text{mm}^2)$ 以上を確保するように設計配合した。1バッチ当たりの設計配合は、表3-5のとおりである。また、コンクリート用骨材の試験成績を、図3-4、表3-6、および表3-7に示す。

表3-5 コンクリートの設計配合

(1バッチ当たり)

粗骨材 の最大 寸法 (mm)	スランプ の範囲 (cm)	空気量 の範囲 (%)	単位 水 量 (kg)	単位 セメント 量 (kg)	水セメント 比 W/C (%)	細骨材 率 S/a (%)	単位細 骨材量 S (kg)	単位粗骨材量		AE剤 (%)	塩化 カルシウム (%)
								5~25	25~40		
40			78	150	52.0		330	540		-	-

※ セメント:宇部興産・宇部ポルトランドセメント、細骨材:大川砂、粗骨材:カンラン玄武岩碎石

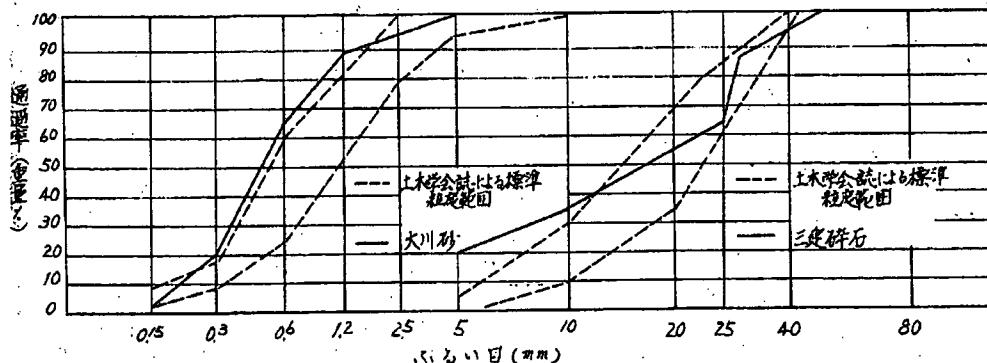


図3-4 コンクリート用骨材のふるい分析結果

表 3-6 細骨材の試験成績

比重	単位体積質量 kg/m <sup>3</sup>	吸水率	ふるい(mm) 通過 %						粗粒率
			5	2.5	1.2	0.6	0.3	0.15	
2.49	1,350	39 %	98	95	88	67	21	2	2.29

表 3-7 粗骨材の試験成績

比重	単位体積質量 kg/m <sup>3</sup>	吸水率	ふるい(mm) 通過 %								粗粒率
			50	40	30	25	20	15	10	5	
2.76	1,600	18 %	98	94	83	62	55	47	35	21	6.95

### 3. 2. 5 上部水平パイプ坑道連接部の施工方法

坑口より深度58mの位置に、本立坑最上部の連設部である冷房管、圧気管、排気管の取出用として使用される水平坑道との連接部がある。

この連接部は壁厚60cmの鉄筋コンクリート構造である。図3-5に連接部の一般図を示す。

この区間は掘削、築壁とも全断面施工した。岩質は粘土層に玄武岩の転石が混入しているため、掘削時はアーチ仮枠を1m枠間で施枠して岩石の崩落を防止した。

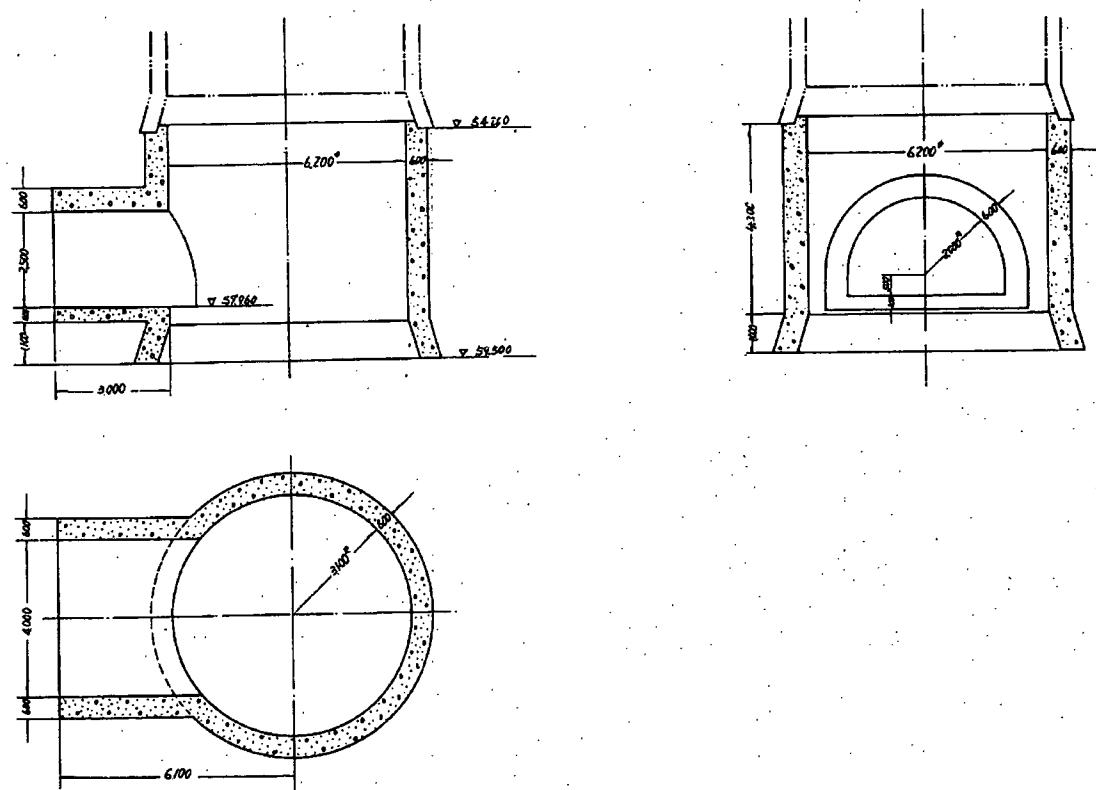


図3-5 連接部一般図

#### 4. 目視観察による外観変状の調査

##### 4. 1 X立坑

立坑内にはジャンカ※、コールドジョイント※およびそれに伴う漏水などの施工時に発生したと思われる変状が多く見られ、特に施工年代の古い上部立坑で多く確認された。ジャンカの深さは、それ程深くはないが、範囲が広く、コールドジョイント近傍に存在するケースが多かった。コールドジョイントは一般的に部材を貫通している場合が多く、上述のようにコールドジョイント付近はコンクリートの品質も低くなる傾向があるため、水などの侵入が容易になり、漏水が見られる場合が多い。また、ひび割れも見受けられた。ひび割れは、乾燥収縮や温度に起因する場合と、地震動や偏土圧などの外力による場合とが考えられる。ジャンカ、コールドジョイントおよびひび割れが存在すると、コンクリート内部への劣化因子の侵入が容易になるため、前述した中性化、塩害、凍害、アルカリ骨材反応、化学的腐食などの進行を助長する可能性がある。

コンクリートの表層剥離は、全体を通して散見された。部材内部に鉄筋が存在しないことから、経年劣化（風化）、中性化がさらに進んだ炭酸化、腐食性ガスによる化学的腐食などが要因として考えられる。コンクリートの剥落は広い範囲で数多く確認され、特に下部立坑で多く存在した。下部立坑には断層を横切っている箇所が数箇所あり、地盤変動により大きな剥落が発生した可能性も考えられる。またジャンカや空洞といった欠陥が存在する部分のコンクリートが種々の要因で脆弱化して自重を支えることができなくなった場合も考えられる。剥落部のほとんどは落下防止金網などで補強されている。

※ ジャンカ：打設されたコンクリートの一部に粗骨材が多く集まってできた空隙の多い部分で、打設時における材料の分離、締固め不足、型枠からのセメントペーストの漏れなどが要因となって発生する。

※ コールドジョイント：コンクリートの打ち重ねる時間の間隔を過ぎて打設した場合に、前に打込まれたコンクリートと後から打込まれたコンクリートが一体化せず、不連続な面が生じる現象である。部材を貫通している場合が多く、漏水などを伴うことが多い。設計段階で考慮する打ち継ぎ目とは異なる。

#### 4. 2 Y立坑

Y立坑内の状況を写真4-1～写真4-4に示す。Y立坑内は、写真4-1～写真4-3に見られるように、全体的にコンクリート表面の劣化が進んでいた。コンクリート表面がザラザラした状態になっており、部分的に薄く剥離している箇所も見られた。経年劣化や炭酸化により劣化したものと考えられる。

横坑との接合部では、写真4-4に示すようなコールドジョイントが確認されたが、コールドジョイントからの漏水や周辺のジャンカなどは見られなかった。

Y立坑は、一部変状が見られたが、比較的健全な状態であった。



写真4-1 表面の劣化

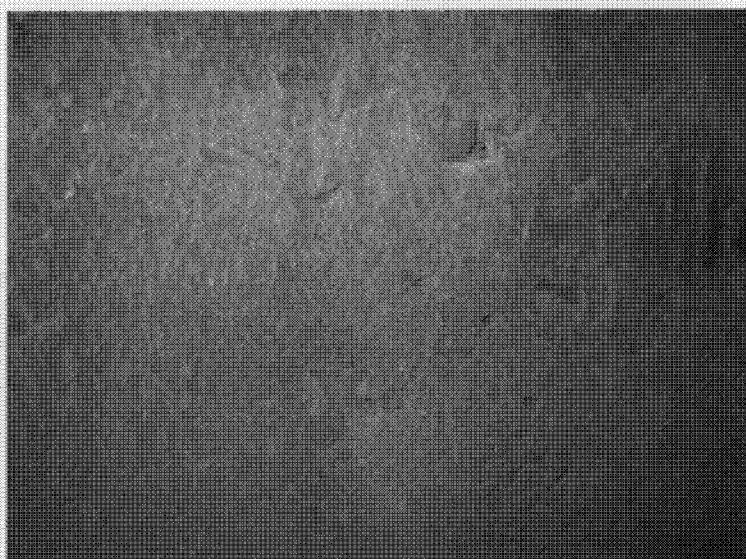


写真4-2 表面の劣化

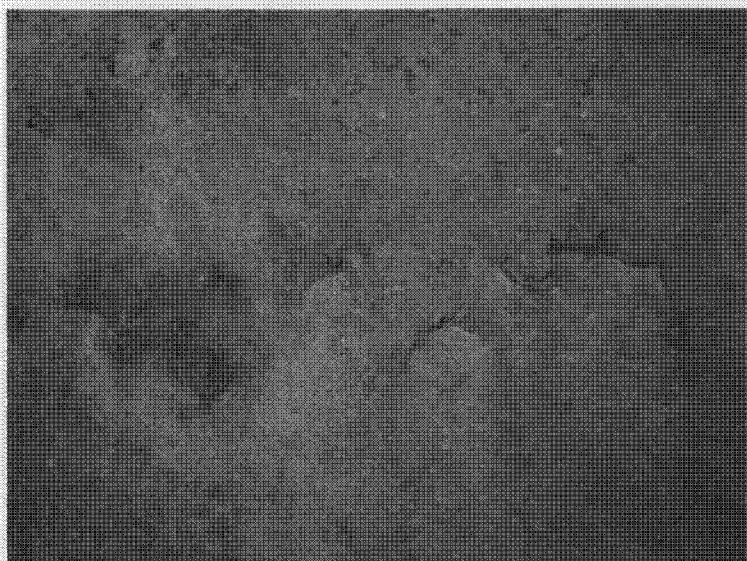


写真 4-3 表面の劣化



写真 4-4 横坑接合部付近のひび割れ

## 5. コア採取による調査

立坑覆工コンクリートからコアを採取し、コア供試体による圧縮強度試験および中性化深さの測定を行った。なお、圧縮強度試験では、単位体積質量、ヤング係数およびボアン比の測定も行った。

### 5. 1 コアの採取

X立坑では、施工年代の異なる上部と下部の2箇所からコアを採取し、上部は坑口より383.4m、下部は坑口より668.4mの位置とした。Y立坑では、坑口より58mの水平パイプ坑道との連接部の2箇所からコアを採取した。

コアの直径は100mmとし、1箇所当たり3本採取した。コアの長さは、供用中の立坑であることから貫通はさせず、200mm以上を目標とした。コアの採取状況を写真5-1および写真5-2に、採取したコアの状況を写真5-3および写真5-4に示す。

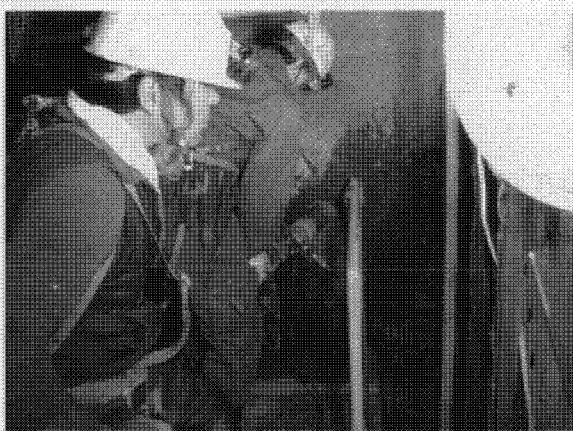


写真 5-1 X立坑でのコア採取状況

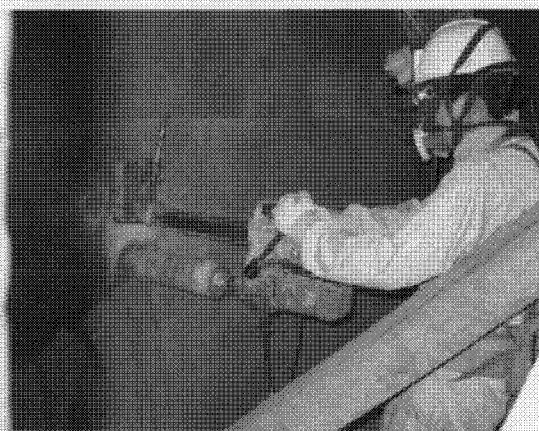
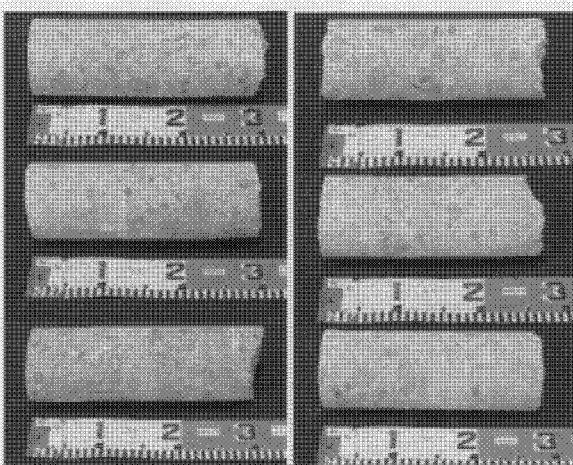


写真 5-2 Y立坑でのコア採取状況



(a) 上部(坑口より 383.4m) (b) 下部(坑口より 668.4m)

写真 5-3 X立坑コアの状況

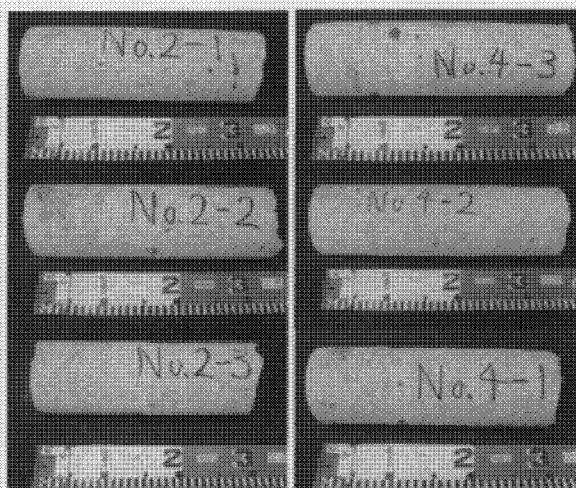


写真 5-4 Y立坑コアの状況

## 5. 2 圧縮強度試験

立坑覆工コンクリートから採取した全てのコアから長さ 200mm の供試体を切り出し、圧縮強度試験を行った。また、同時に単位体積質量、ヤング係数およびボアソン比の測定も行った。

単位体積質量は、圧縮強度試験前のコア供試体の質量および体積(直径および高さの測定値から算出)を測定し、質量／体積から算出した。圧縮強度試験は、JIS A 1107-1993「コンクリートからのコア及びはりの切取り方法並びに強度試験方法」および JIS A 1108-1999「コンクリートの圧縮強度試験方法」に準じて行い、コンプレッソメータを用いて、ヤング係数およびボアソン比の測定を行った。圧縮強度試験の状況を写真 5-5 に示す。

コンクリートコアによる単位体積質量、圧縮強度、ヤング係数およびボアソン比の測定結果を表 5-1 に示す。

圧縮強度は、X立坑の上部(坑口より 383.4m)で  $38.9 \text{ N/mm}^2$ 、下部(坑口より 668.4m)で  $25.5 \text{ N/mm}^2$ 、Y立坑で  $32.7 \text{ N/mm}^2$  であり、X立坑の下部で最も低い値を示したが、いずれも  $20 \text{ N/mm}^2$  以上の圧縮強度を示しており、十分な強度を有しているものと考えられる。

ヤング係数は、X立坑の上部で  $0.203 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ 、下部で  $0.115 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ 、Y立坑で  $0.251 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$  であり、土木学会コンクリート標準示方書【構造性能照査編】に示されている圧縮強度  $24 \sim 40 \text{ N/mm}^2$  で  $0.25 \sim 0.31 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$  に比べると大分小さな値を示した。原因については明確ではないが、ヤング係数は骨材の種類や品質の程度によって、また地域によって大きく変動することが知られている。

ボアソン比は  $0.178 \sim 0.200$  を示した。一般的には 0.2 程度といわれていることから、一般的な値であると考えられる。

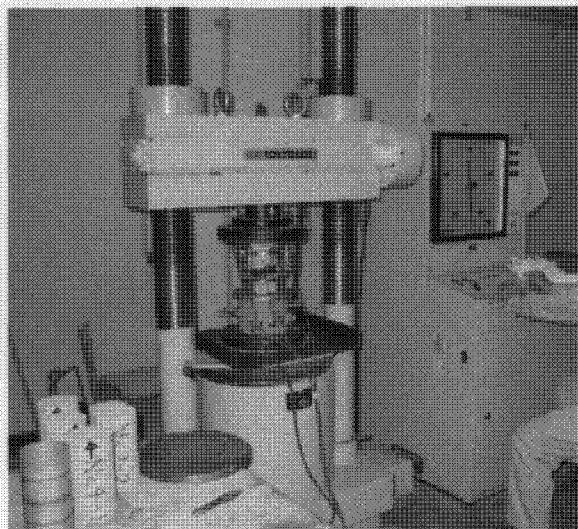


写真 5-5 コアの圧縮強度試験状況

表 5-1 コンクリートの単位体積質量、圧縮強度、ヤング係数およびポアソン比

コア種別	コアNo.	直径(cm)	高さ(cm)	単位体積質量(g/cm <sup>3</sup> )	圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数(×10 <sup>5</sup> N/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比
X立坑 上部 坑口より 383.4m	1	9.97	19.98	2.328	38.7	0.220	0.182
	2	9.97	19.98	2.296	37.3	0.168	0.205
	3	9.98	19.94	2.368	40.7	0.220	0.170
	平均			2.330	38.9	0.203	0.186
X立坑 下部 坑口より 668.4m	1	9.98	19.99	2.312	25.7	0.110	0.184
	2	9.97	19.93	2.297	21.3	0.113	0.160
	3	9.97	19.90	2.293	29.6	0.121	0.190
	平均			2.301	25.5	0.115	0.178
Y立坑 <sup>*1</sup>	1	9.94	19.80	2.343	28.4	0.223	0.212
	2	9.94	19.38	2.394	35.0	0.272	0.212
	3	9.95	16.25	(2.856) <sup>*2</sup>	31.8 <sup>*3</sup>	0.228	0.210
	1-3 平均			2.368	31.7	0.241	0.211
	4	9.93	19.90	2.322	30.8	0.253	0.210
	5	9.93	19.90	2.289	37.6	0.302	0.195
	6	9.94	19.84	1.991	32.6	0.227	0.160
	4-6 平均			2.200	33.7	0.261	0.188
	平均			2.268	32.7	0.251	0.200

※1 1深度2箇所から採取したもので、コンクリートは同じものである。

No.1~3とNo.4~6はそれぞれ同じ箇所から採取したものである。

※2 一部に鉄筋を含むため、参考データとして、除外した。

※3 供試体高さによる補正後の値を示す。

### 5.3 中性化深さの測定

コンクリートの中性化は、大気中の二酸化炭素がコンクリート内に侵入し炭酸化反応を起こすことによって細孔溶液のpHが低下する現象であり、一般にはコンクリート内部の鋼材の腐食が問題となるが、水和物の変質と細孔構造の変化を伴うため、コンクリートの強度変化などを引き起こす可能性もある。

立坑覆工コンクリートから採取した全てのコアの表面から約50mmを切り出し、コンクリートの中性化深さの測定を行った。中性化深さの測定は、コアの割裂面にフェノールフタレインの1%アルコール溶液を噴霧し、紫赤色に発色しない部分を中性化領域として表面からの深さを測定した。中性化深さの測定状況を写真5-6に示す。

中性化深さの測定結果を表5-2に、試薬噴霧時におけるコア割裂面の発色状況を写真5-7および写真5-8に示す。

中性化深さは、X立坑の上部（坑口より383.4m）で2mm、下部（坑口より668.4m）で28mm、Y立坑で8mmを示し、施工年代が最も古いX立坑の上部で最も小さな値を示した。

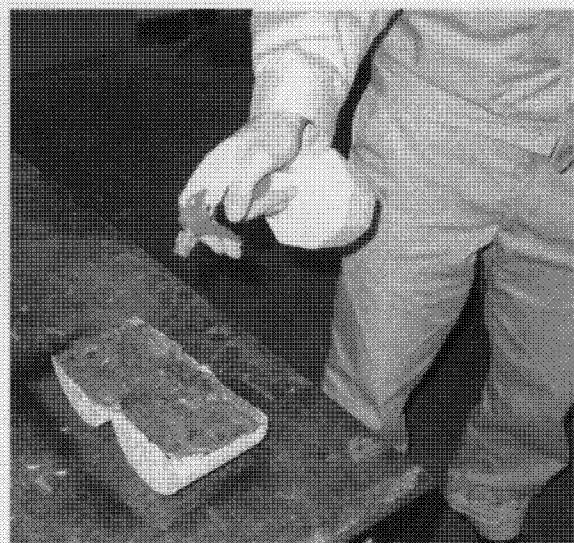


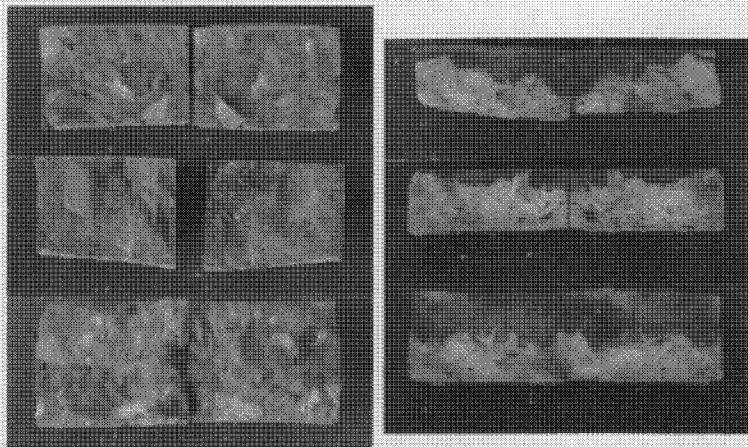
写真5-6 中性化深さの測定状況

表5-2 コンクリートの中性化深さ

コア種別	コアNo.	測定深さ(mm)						平均深さ(mm)	
X立坑 上部 坑口より 383.4m	1	1	2	1	3	2	2	2	-
	2	3	2	2	1	2	2		
	3	1	1	1	2	3	2		
X立坑 下部 坑口より 668.4m	1	30	31	27	22	21	26	28	-
	2	38	35	30	33	28	33		
	3	23	28	28	28	23	26		
Y立坑 <sup>*1</sup>	1	10	11	9	8	11	10	9	-
	2	8	10	10	6	5	8		
	3	9	8	9	8	10	9		
	4	8	8	7	6	6	7	7	8
	5	4	5	5	6	6	5		
	6	7	7	8	8	9	8		

\*1 1深度2箇所から採取したもので、コンクリートは同じものである。

No.1~3とNo.4~6はそれぞれ同じ箇所から採取したものである。



(a) 上部(坑口より 383.4m) (b) 下部(坑口より 668.4m)

写真 5-7 X立坑コアの発色状況

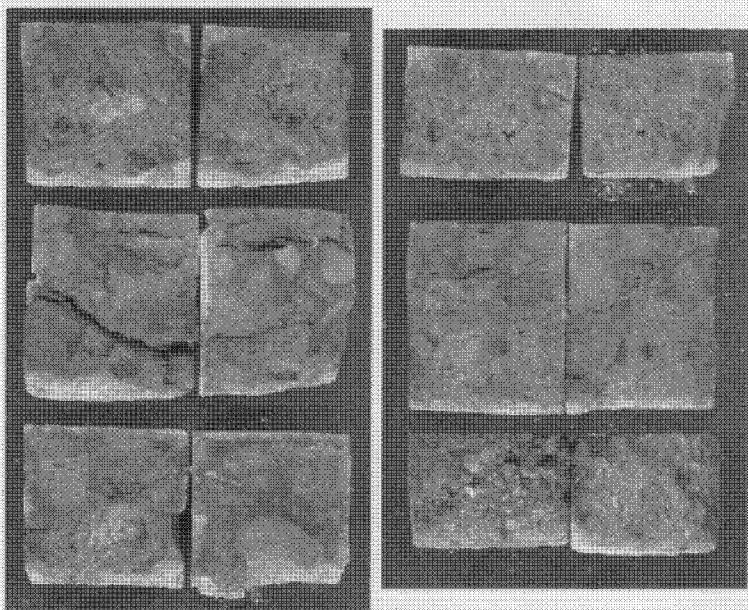


写真 5-8 Y立坑コアの発色状況

## 6. 反発硬度法によるコンクリート強度の推定

コンクリート強度を調査する手法としては、コア抜きにより直接圧縮強度を測定する手法（コア抜き法）やテストハンマーでコンクリート表面を打撃し反発硬度を測定することにより間接的に強度を推定する手法（反発硬度法）などがある。

コア抜き法は、直接強度測定ができるため、最も信頼性のある方法であるが、構造物を傷めてしまうことになるため、自ずとコアの本数も限定されてしまうことが欠点である。それに対して、非破壊で検査できるテストハンマーによる反発硬度法は、精度的には劣るもの、任意の位置のコンクリート強度を推定できる利点を有しているだけでなく、構造物を傷めないで検査できることが特長である。

したがって、「5. コア採取による調査」のコアによる圧縮強度試験を補うために、テストハンマーによる立坑覆工コンクリート強度の推定（反発硬度法）を実施した。

### 6. 1 反発硬度の測定

テストハンマーを用いて立坑覆工コンクリートの反発硬度を測定した。X立坑における測定位置は、コア採取位置を含め、立坑の深さ方向に約 100mm の間隔で 9 箇所とし、Y立坑では、コア採取位置を含め、坑口より 58m の水平パイプ坑道との連接部における 7 箇所とした。反発硬度の測定状況を写真 6-1 および写真 6-2 に示す。

テストハンマーは、X立坑では亀倉精機製、Y立坑では Proceq 社製を使用した。反発硬度の測定は、JSCE-G 504-1999「硬化コンクリートのテストハンマー強度の試験方法」に準じて行い、1 箇所の測定打撃点数は、図 6-1 に示すように、互いに 3cm 以上の間隔を持った 20 点とした。

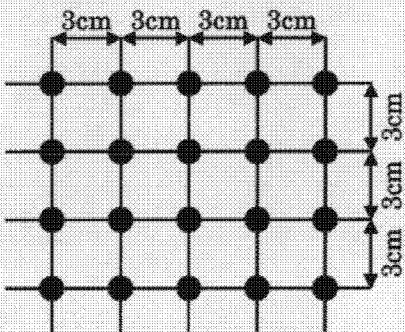


図 6-1 打撃点



写真 6-1 X立坑での反発硬度の測定状況



写真 6-2 Y立坑での反発硬度の測定状況

## 6. 2 反発硬度と圧縮強度の関係

「5. コア採取による調査」で得られたコア強度とコア採取位置で測定した反発硬度の関係を図 6-2 に示す。図中の実線は、式(6-1)～式(6-3)に示す土木学会、建築学会および東京都での推定式における反発硬度と圧縮強度の関係を示したものである。

$$\text{土木学会}^1) : F = 1.27R - 18.0 \quad (6-1)$$

$$\text{建築学会}^2) : F = 0.72R + 9.8 \quad (6-2)$$

$$\text{東京都建築材料検査所}^1) : F = 0.98R - 10.8 \quad (6-3)$$

ここに、F：圧縮強度(N/mm<sup>2</sup>)、R：反発硬度

この結果から、X立坑における反発硬度とコア強度の関係は、土木学会または東京都における推定式に比較的近く、Y立坑における反発硬度とコア強度の関係は、建築学会における推定式に比較的近いことがわかる。

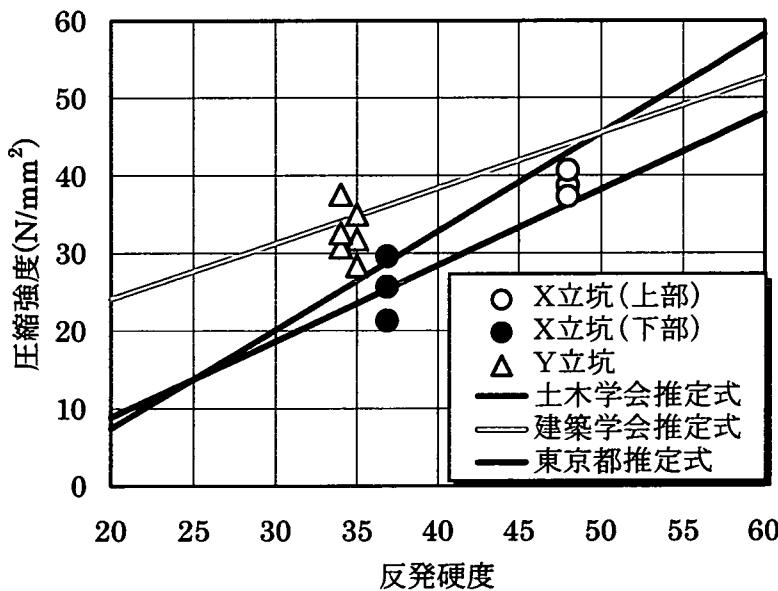


図 6-2 反発硬度と圧縮強度の関係

## 6. 3 圧縮強度の推定結果

土木学会、建築学会および東京都における推定式を用いた圧縮強度の推定結果を表 6-1 および表 6-2 に示す。

土木学会および東京都における推定式を用いたX立坑における推定強度は、上部（坑口より約 440m まで）で 27.5～43.4 N/mm<sup>2</sup>、下部で 25.4～38.3 N/mm<sup>2</sup> である。また、建築学会における推定式を用いたY立坑における推定強度は 34.0～41.6 N/mm<sup>2</sup> であり、いずれも 20 N/mm<sup>2</sup> 以上の圧縮強度を示すことから、立坑覆工コンクリートは全体的に十分な強度を有するものと考えられる。

表 6-1 反発硬度法によるコンクリート強度推定結果（X立坑）

測定位置	反発硬度					推定強度(N/mm <sup>2</sup> )			備考	
	測定値*					平均値	土木学会式	建築学会式		
坑口より 123.4m	40	42	45	41	43	43	36.2	40.3	31.1	温潤
	49	45	42	43	40					
	38	39	38	39	44					
	48	43	47	46	42					
坑口より 223.4m	44	42	33	37	42	40	32.2	38.1	27.9	温潤
	40	42	42	36	40					
	35	38	34	41	33					
	33	41	44	47	46					
坑口より 323.4m	35	44	33	36	32	39	31.7	37.8	27.5	温潤
	42	30	33	42	44					
	44	35	30	42	40					
	38	44	44	36	40					
坑口より 383.4m	48	52	57	45	47	48	43.4	44.4	36.6	コア採取 位置
	45	46	44	44	41					
	48	49	47	54	49					
	50	46	56	51	48					
坑口より 425.4m	40	38	34	44	44	44	37.6	41.1	32.1	凹凸あり
	46	42	49	46	44					
	42	34	43	43	47					
	49	43	37	48	43					
坑口より 518.4m	47	45	46	46	50	44	38.3	41.5	32.6	
	42	43	50	43	42					
	37	44	40	34	38					
	49	48	43	49	40					
坑口より 633.4m	42	40	42	34	36	37	29.4	36.5	25.8	補強金網 付近
	36	36	38	40	36					
	33	37	37	34	36					
	37	33	40	35	44					
坑口より 668.4m	41	41	41	36	33	37	28.8	36.2	25.4	コア採取 位置
	31	40	36	34	48					
	39	35	39	32	44					
	33	35	28	28	45					
坑口より 708.4m	46	43	43	42	50	43	36.8	40.7	31.5	
	50	45	41	44	46					
	46	37	39	48	37					
	43	39	40	41	43					

※ 数値は削除データ(±20%の範囲外)を示す。

表 6-2 反発硬度法によるコンクリート強度推定結果（Y立坑）

測定位置	反発硬度					備考
	測定値*		平均値	土木学会式	建築学会式	
No.1	42	38	32	29	39	コア採取位置
	31	36	30	38	33	
	35	35	26	32	30	
	37	32	30	39	44	
No.2	41	29	36	29	40	コア採取位置
	34	32	32	29	35	
	30	36	33	42	36	
	42	28	44	45	45	
No.3	42	49	44	38	35	コア採取位置
	48	48	33	45	42	
	34	40	40	46	41	
	44	42	35	47	37	
No.4	30	29	27	29	31	コア採取位置
	37	39	39	32	36	
	34	36	34	36	39	
	26	26	26	41	43	
No.5	38	42	36	36	44	
	41	36	39	33	32	
	42	35	32	41	39	
	40	43	36	39	36	
No.6	45	43	42	40	37	
	42	39	38	47	44	
	39	44	44	46	45	
	47	46	47	50	48	
No.7	36	46	43	36	45	
	47	48	44	46	45	
	46	41	48	39	48	
	46	50	45	47	42	

\* 数値は削除データ(±20%の範囲外)を示す。

## 7. 細孔径分布の測定

コンクリートの細孔構造は劣化によって変化することが知られていることから、立坑覆工コンクリートの細孔径分布の測定を行った。

### 7. 1 測定方法

細孔径分布の測定は、使用コンクリートが異なるX立坑の上部、下部およびY立坑の覆工コンクリートについて行った。試料は、中性化深さ測定後のコアから採取し、表面から10mm毎に深さ40mmの位置まで切断した。切断後、アセトンに漬けて脱水し、それをさらに5mm角程度の大きさにした後、1週間真空乾燥をしてから測定に使用した。

細孔径分布の測定は、Micromeritics社製 AUTOPORE II 9220 を用い、水銀圧入法により行った。使用した測定装置の写真を写真7-1に示す。

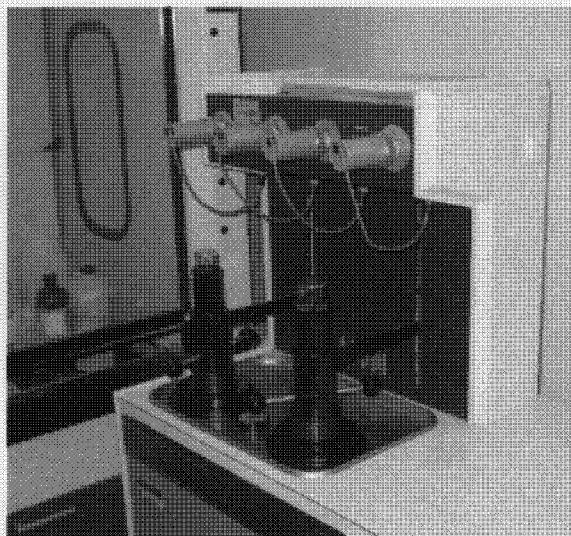


写真7-1 細孔径分布測定装置

## 7. 2 測定結果

細孔径分布の測定結果を図7-1～図7-3に、測定結果の概要を表7-1に示す。また、測定データを添付資料に示す。

X立坑の上部では、いずれの深さにおいても類似した細孔径分布の結果が得られた。

細孔径分布では、300～400nm付近の空隙量が多い特徴が見られた。

X立坑の下部では、表面～20mmと20～40mmで明らかな違いが見られた。表面～20mmでは細孔直径が30nm付近の空隙量が多いのに対して、20～40mmにおいては100～1000nm付近の空隙量が多い結果となり、上部に似た傾向を示した。表面～20mmは中性化が生じた領域であることから、細孔径分布の違いは中性化が影響していると推測される。

Y立坑では、いずれの深さとも類似した傾向を示した。その細孔径分布は20nm以下の空隙量が多い特徴を示し、X立坑とは違う傾向を示した。また、空隙率もX立坑に比べ明らかに大きな値を示した。

表7-1 細孔径分布測定結果の概要

コア・試料種別		全細孔容積 (ml/g)	平均細孔直径 (μm)	かさ密度 (g/ml)	空隙率 <sup>*</sup> (%)
X立坑 上部	表面～10mm	0.0750	0.0185	2.0546	15.41
	10～20mm	0.0820	0.0157	1.9698	16.15
	20～30mm	0.0783	0.0164	1.9803	15.51
	30～40mm	0.0832	0.0173	1.9919	16.57
X立坑 下部	表面～10mm	0.1101	0.0302	2.0270	22.32
	10～20mm	0.0886	0.0250	2.0909	18.53
	20～30mm	0.0887	0.0179	2.0024	17.76
	30～40mm	0.1101	0.0201	1.9396	21.35
Y立坑	表面～10mm	0.1552	0.0102	1.8003	27.94
	10～20mm	0.1633	0.0139	1.7871	29.18
	20～30mm	0.1637	0.0103	1.7445	28.56
	30～40mm	0.1553	0.0103	1.8281	28.39

※ 空隙率(%)=全細孔容積×かさ密度×100

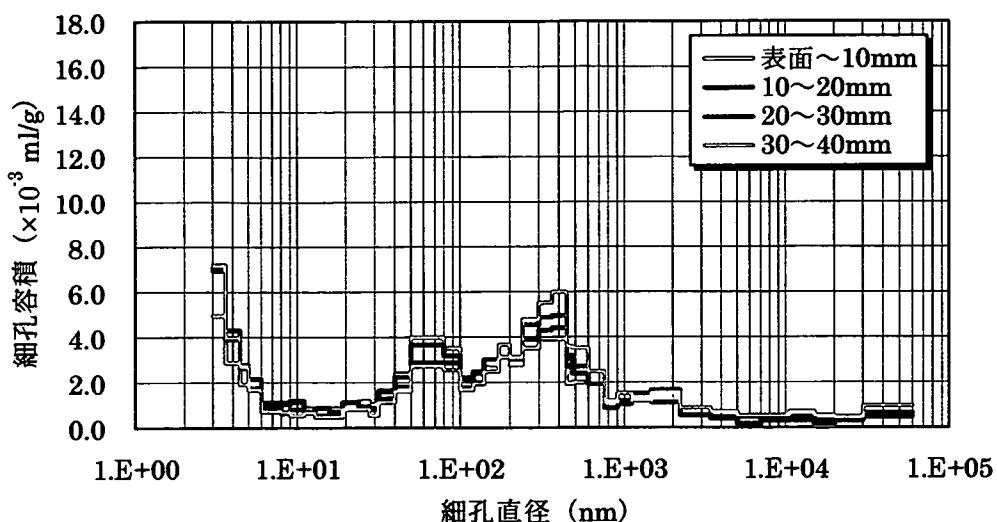


図 7-1 X立坑上部覆工コンクリートの細孔径分布

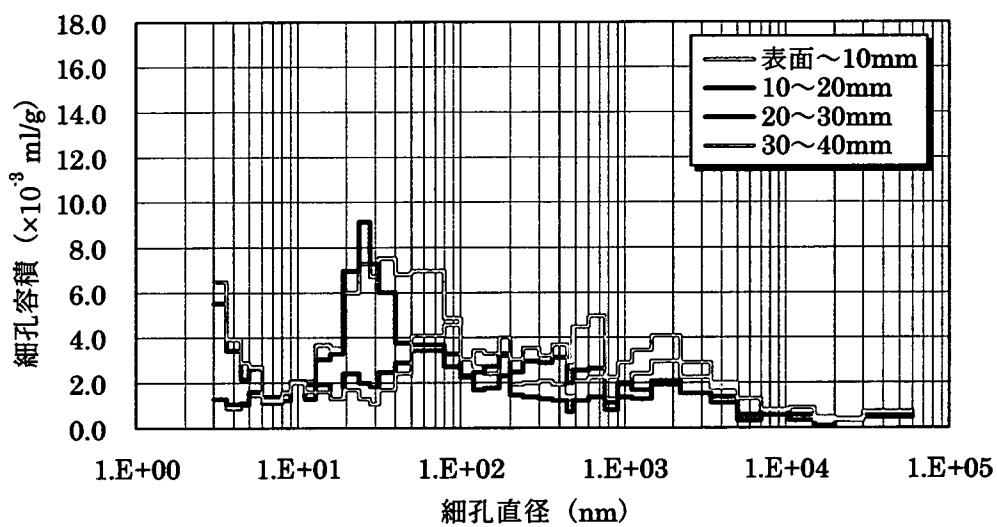


図 7-2 X立坑下部覆工コンクリートの細孔径分布

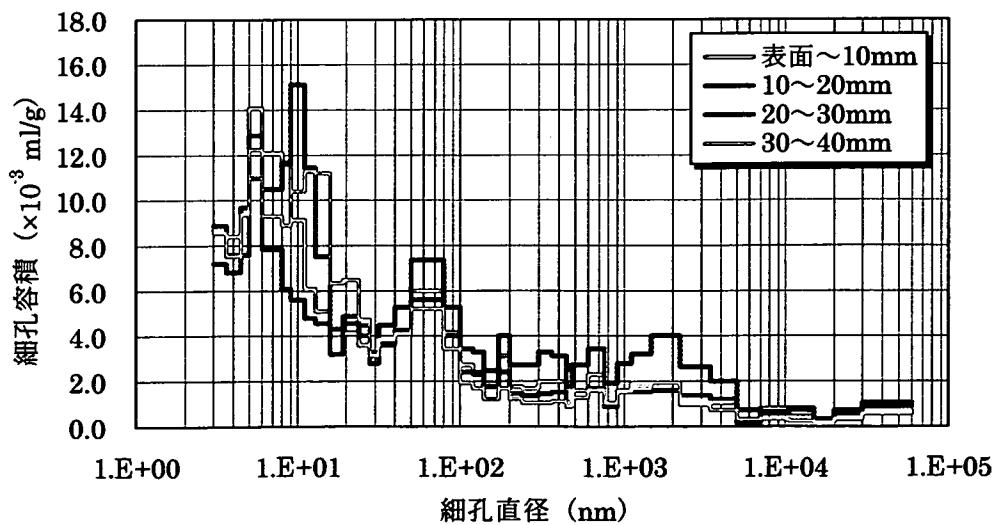


図 7-3 Y立坑覆工コンクリートの細孔径分布

## 8. 熱分析

立坑覆工コンクリートの熱分析を行い、コンクリート中の水分量とその形態を調査した。

熱分析は、試料を常温から順次加熱していったときの試料の重量および発熱・吸熱を連続的に測定するものである。セメント水和物、セメント水和物と腐食性物質との反応生成物の中のあるものは、加熱されると、ある一定の温度で水を放出するなどの重量変化を生じる。重量変化を生じる温度と重量減少の量から、試料中に含まれている化合物の種類と量がわかる。また、一般に、試料の中で水の放出、化学反応、結晶転位などが生じると、発熱または吸熱を伴うため、特定の化合物が何度付近で発熱または吸熱を起こすか、その時の発熱量または吸熱量がどれだけかをあらかじめ知っておけば、試料の発熱または吸熱温度、その時の発熱量または吸熱量を測定することにより、試料中にどのような化合物がどの程度含まれているかを知ることができる。

### 8. 1 分析方法

熱分析は、使用コンクリートが異なるX立坑の上部、下部およびY立坑の覆工コンクリートの表面部と内部について行った。試料は、圧縮強度試験および中性化深さ測定後のコアから採取し、内部試料の採取位置は、圧縮強度試験後のコアの最も深い位置とし、X立坑の上部で表面から27~28cm、下部で表面から23.5~24.5cm、Y立坑で表面から30~31cmである。採取した試料は、メノウ乳鉢で粗碎した後、目開き105μmのふるい通過分をさらに微粉碎して、熱分析用試料とした。

熱分析は理学電機社製示差熱天秤TAS-200を用いて行い、分析条件は測定温度範囲30~1000°C、昇温速度10°C/分、窒素雰囲気下とした。使用した示差熱天秤の写真を写真8-1に示す。

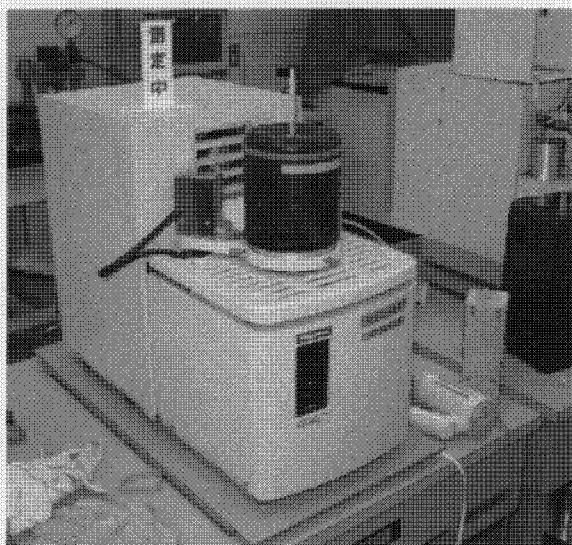


写真8-1 示差熱天秤

## 8. 2 分析結果

熱分析の結果を表8-1に示す。また、測定チャートを添付資料に示す。

いずれのコアにおいても、表面部では炭酸化の影響で、炭酸カルシウム ( $\text{CaCO}_3$ ) が生成していることが確認された。炭酸カルシウムは、大気中の二酸化炭素 ( $\text{CO}_2$ ) と各種セメント水和物との反応（炭酸化反応）によって生成される。なお、この炭酸化反応によって細孔溶液のpHが低下する現象を中性化という。

内部では、セメント水和物のけい酸カルシウム水和物 ( $3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ ) の脱水、エトリンガイト ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ ) やモノサルフェート水和物 ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ ) の結晶水の脱水に起因する300°Cまでの減量値が表面部よりも大きく、X立坑では水酸化カルシウム ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) も確認された。Y立坑では、内部においても、水酸化カルシウムは確認されなかった。

また、X立坑上部の表面では、350°C～400°Cにかけて発熱ピークが確認された。

「11.1 粉末X線回折」では、コンクリートには含まれ難いような異物は確認されなかったことから、オイル等が付着していたか、あるいは何か加熱により分解発熱するような樹脂が含まれていた可能性が考えられる。

表 8-1 热分析結果

コア・試料種別		減量測定値(wt%)				含有量計算値(wt%)	
		30～300°C	450°C	700°C	30～1000°C	$\text{Ca(OH)}_2$	$\text{CaCO}_3$
X立坑 上部	表面	8.00	0.40	8.80	28.70	1.6	20.0
	内部	13.58	1.58	1.74	22.14	6.5	4.0
X立坑 下部	表面	3.88	—	8.40	24.48	—	19.1
	内部	16.63	0.77	1.95	25.66	3.2	4.4
Y立坑	表面	3.56	—	17.08	25.76	—	38.8
	内部	10.73	—	0.68	16.95	—	1.5

- 各反応の開始点、終了点は、重量変化曲線の傾きが変化する点とした。
- 各鉱物の含有量の計算に用いた分子量は、 $\text{Ca(OH)}_2=74.08$ ,  $\text{CaCO}_3=100.08$ ,  $\text{H}_2\text{O}=18.00$ ,  $\text{CO}_2=44.00$  とした。
- 水酸化カルシウム( $\text{Ca(OH)}_2$ )の含有量は、450°C付近の減量を $\text{Ca(OH)}_2$ の脱水によるものとし、次式により計算した。

$$\text{試料中 } \text{Ca(OH)}_2=100\% \text{とした場合の減量 : } 18.00 / 74.08 \times 100 = 24.3\% \\ \text{Ca(OH)}_2 \text{含有量( \% )} = (450\text{ }^\circ\text{C} \text{付近の減量測定値}) / 24.3 \times 100$$

- 炭酸カルシウムの( $\text{CaCO}_3$ )含有量は、700°C付近の減量を $\text{CaCO}_3$ の脱炭酸によるものとし、次式により計算した。

$$\text{試料中 } \text{CaCO}_3=100\% \text{とした場合の減量 : } 44.00 / 100.08 \times 100 = 44.0\% \\ \text{CaCO}_3 \text{含有量( \% )} = (700\text{ }^\circ\text{C} \text{付近の減量測定値}) / 44.0 \times 100$$

## 9. コンクリートの配合推定

コンクリートの強度、耐久性などの品質は、配合によって大きく異なるため、コンクリートの配合は、コンクリートの健全性を評価する上での重要な基礎データになる。そこで、立坑覆工コンクリートの配合推定を行い、実際に使用されたコンクリートの配合を推定した。

### 9. 1 推定方法

配合推定は、使用コンクリートが異なるX立坑の上部、下部およびY立坑の覆工コンクリートについて行った。試料は圧縮強度試験後のコアを用い、採取位置は、X立坑の上部で表面から6.5～25.5cm、下部で表面から6～26cm、Y立坑で表面から10～30cmである。

配合推定は、セメント協会法<sup>3)</sup> ((社)セメント協会コンクリート専門委員会法)によって行った。この方法は、105μmふるい全通程度に微粉碎した試料を塩酸(約N/10程度)で処理した後、不溶残分および酸化カルシウムを定量し、これらの値からそれぞれ骨材量およびセメント量を推定する方法である。

ただし、配合推定に用いた試料は圧縮強度試験後のものであるため、得られた結果は空気量や吸水量を多く見積もる可能性が高い。そこで、空気量の推定方法および骨材量の推定方法を改良した方法<sup>4)</sup>によっても推定を行った。なお、この方法は圧縮強度試験により見かけの吸水量が増加した場合でも、増加した吸水量を試行錯誤的に補正することができる。

## 9. 2 推定結果

セメント協会法による配合推定結果を表9-1に、補正後の結果を表9-2に示す。また、配合推定計算シートを添付資料に示す。

表9-1 立坑覆工コンクリートの配合推定結果（セメント協会法）

	X立坑 上部	X立坑 下部	Y立坑
単位骨材量（絶乾）（kg/m <sup>3</sup> ）	1641	1799	1850
単位セメント量（kg/m <sup>3</sup> ）	447	284	239
単位水量（kg/m <sup>3</sup> ）	234	230	222
水セメント比（%）	52	81	93

表9-2 立坑覆工コンクリートの配合推定結果（補正後）

	X立坑 上部	X立坑 下部	Y立坑
単位骨材量（絶乾）（kg/m <sup>3</sup> ）	1662	1835	1897
単位セメント量（kg/m <sup>3</sup> ）	433	278	231
単位水量（kg/m <sup>3</sup> ）	181	169	163
水セメント比（%）	42	61	71

X立坑の下部については、「3. 文献調査」の結果から、単位セメント量が300kg/m<sup>3</sup>程度、単位水量が170～186kg/m<sup>3</sup>程度、水セメント比が56.7～62.0%程度と考えられるが、補正後の推定結果もそれに比較的近い値を示す。

Y立坑については、文献調査の結果では、単位セメント量が331kg/m<sup>3</sup>程度、単位水量が172kg/m<sup>3</sup>程度、水セメント比が52%程度と考えられるが、補正後の推定結果では、単位セメント量が231kg/m<sup>3</sup>、単位水量が163kg/m<sup>3</sup>、水セメント比が71%と、大きく異なる結果が得られた。「5. 2 圧縮強度試験」の結果から、Y立坑覆工コンクリートの圧縮強度は、X立坑の上部と下部の間にあり、同種のセメントを用いていれば、水セメント比もその間にあると考えられる。したがって、Y立坑覆工コンクリートの水セメント比は、文献調査で得られた52%程度と考えられ、配合推定において異なる結果が得られた原因としては、普通ポルトランドセメント以外のセメントが使用されていたことが考えられる。

セメント協会法は、セメントが普通ポルトランドセメントで、骨材があまり特殊なものでない場合に適用できる。また、当時の使用セメント、骨材が入手できないため、骨材およびセメントの分析値は全国平均値を用いて計算を行っている。

## 10. 塩化物イオン量の測定

立坑覆工コンクリートでは、早期強度が求められるため、促進剤として塩化カルシウム ( $\text{CaCl}_2$ ) がよく使用される。また、細骨材として海砂が使用されている可能性もある。そこで、立坑覆工コンクリートの塩化物イオン量を測定し、海砂使用の可能性や塩化カルシウムの使用量について検討した。

### 10.1 測定方法

塩化物イオン量の測定は、使用コンクリートが異なるX立坑の上部、下部およびY立坑の覆工コンクリートについて行った。試料は、粉末X線回折および熱分析用の試料を採取した圧縮強度試験後のコアの最も深い位置から約4cmを切削して採取し、採取後、粉碎して測定に用いた。採取位置は、X立坑の上部で表面から23~27cm、下部で表面から19.5~23.5cm、Y立坑で表面から26~30cmである。

塩化物イオン量の測定は、JIS A 1154「硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンの試験方法」に準じて行った。

### 10.2 測定結果

塩化物イオン量の測定結果を表 10-1 に示す。立坑覆工コンクリートの塩化物イオン量は、X立坑の上部で  $0.05\text{kg}/\text{m}^3$ 、下部で  $2.07\text{kg}/\text{m}^3$ 、Y立坑で  $0.09\text{kg}/\text{m}^3$  であり、X立坑の下部で大きな値を示した。

セメント中にも塩化物イオンが 0.005~0.01%、練混ぜ水には、水道水を用いた場合で最大 200ppm の塩化物イオンが含まれており、単位セメント量と単位水量がそれぞれ  $300\text{kg}/\text{m}^3$ 、 $180\text{kg}/\text{m}^3$  のコンクリートでは、最大  $0.05\sim0.07\text{kg}/\text{m}^3$  程度の塩化物イオンがセメントと水から導入される。また、AE 剤や減水剤などの化学混和剤の中にも塩化カルシウムを含むものがあり、特に凝結を早めるために用いる促進型には多量に含むものがある<sup>5)</sup>。したがって、塩化物イオン量が少ないX立坑の上部とY立坑では、促進剤としての塩化カルシウムや海砂は使用されなかったものと考える。

X立坑の下部では、「3. 文献調査」の結果からも促進剤として塩化カルシウムを使用した可能性があるため、塩化カルシウムの使用量について検討を行った。塩化物イオン量の測定結果から、 $2.00\text{kg}/\text{m}^3$  の塩化物イオンが塩化カルシウムから導入されたものとすれば、 $\text{CaCl}_2/\text{Cl}_2 = 1.565$  から、塩化カルシウムの使用量は  $3.13\text{kg}/\text{m}^3$ （単位セメント量を  $300\text{kg}/\text{m}^3$  程度とすれば、セメントの約 1 %に相当）になる。

表 10-1 立坑覆工コンクリートの塩化物イオン量

コア種別	塩化物イオン濃度 (Cl <sup>-</sup> wt%)	単位体積質量 <sup>※1</sup> (kg/m <sup>3</sup> )	塩化物イオン量 <sup>※2</sup> (Cl <sup>-</sup> kg/m <sup>3</sup> )
X立坑 上部	0.002	2330	0.05
X立坑 下部	0.090	2301	2.07
Y立坑	0.004	2268	0.09

※1 コアによる測定値

※2 塩化物イオン量(Cl<sup>-</sup> kg/m<sup>3</sup>)= 塩化物イオン濃度(Cl<sup>-</sup> wt%) × 単位体積質量 ÷ 100

## 11. 化学分析によるコンクリート劣化因子の調査

立坑覆工コンクリートにおける劣化因子の有無を確認するために、粉末X線回折を実施した。また、水和組織の変質の有無、範囲を確認するために、EPMA（電子線マイクロアナライザー）によるマッピング分析を実施した。

### 11.1 粉末X線回折

X線回折とは、結晶性の物質に一定の波長のX線を当てたとき、X線の入射角がある特定の角度（複数ある）になると、結晶により反射されて出てくるX線が干渉を起こし、強度が強くなる（回折）という原理を利用し、物質がどのような鉱物（結晶）からできているかを調べるものである。健全部分と劣化部分のX線回折のチャートを比較することにより、どのような反応生成物ができているかを判定でき、劣化原因の推定には非常に有力な手段になる。

#### 11.1.1 分析方法

粉末X線回折は、使用コンクリートが異なるX立坑の上部、下部およびY立坑の覆工コンクリートの表面部と内部について行った。試料は、「8. 熱分析」の試料と同じものを用いた。すなわち、圧縮強度試験および中性化深さ測定後のコアから採取し、内部試料の採取位置は、X立坑の上部で表面から27～28cm、下部で表面から23.5～24.5cm、Y立坑で表面から30～31cmである。また、採取した試料は、メノウ乳鉢で粗碎した後、目開き $105\text{ }\mu\text{m}$ のふるい通過分をさらに微粉碎して、粉末X線回折用試料とした。

粉末X線回折は理学電機社製粉末X線回折装置 RINT2500 を用いて行った。使用した粉末X線回折装置の写真を写真 11-1 に示す。



写真 11-1 粉末X線回折装置

### 11.1.2 分析結果

粉末X線回折より得られた確認鉱物を表11-1に示す。また、測定チャートおよび解析結果を添付資料に示す。

いずれのコア表面部においても、炭酸化によりカルサイトやバテライトといった炭酸カルシウム( $\text{CaCO}_3$ )が生成していることは確認されたが、その他の反応生成物は特に確認されなかった。

X立坑のコア内部では、セメント水和物の水酸化カルシウム( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ )の明瞭なピークやけい酸カルシウム水和物( $3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ )が確認され、健全な状態にあると考えられる。Y立坑のコア内部では、けい酸カルシウム水和物とエトリンガイト( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ )は確認されたが、水酸化カルシウムは確認されなかった。

表 11-1 粉末 X 線回折測定結果

確認鉱物	コア・試料種別		X立坑 上部		X立坑 下部		Y立坑	
	表面	内部	表面	内部	表面	内部	表面	内部
セメント関連	カルサイト (Calcite, $\text{CaCO}_3$ )	○	△	○	○	○	○	△
	バテライト (Vaterite, $\text{CaCO}_3$ )	△	-	○	-	-	-	-
	水酸化カルシウム (Portlandite, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ )	○	○	-	○	-	-	-
	エトリンガイト (Ettringite, $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ )	△	-	-	△	-	-	△
	モノサルフェート水和物 ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ )	-	○	-	-	-	-	-
	けい酸カルシウム水和物 ( $3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ )	-	○	-	○	-	○	-
骨材関連	石英 (Quartz, $\text{SiO}_2$ )	○	○	○	○	○	○	○
	長石 (Anorthite, $(\text{Na}, \text{Ca})(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_8$ )	○	○	○	○	○	○	○
	角閃石 (Tremolite, $2\text{CaO} \cdot 5\text{MgO} \cdot 8\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ )	△	○	△	△	-	-	△
	蛇紋石 (Lizardite, $3\text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )	△	○	△	△	△	-	-
	緑泥石 (Clinochlore, $(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Al})_{12}(\text{Si}, \text{Al})_8\text{O}_{20}(\text{OH})_{16}$ )	-	-	△	-	-	-	-
	白雲母 (Muscovite, $\text{K}_2\text{O} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )	-	-	△	-	-	-	△

○：明瞭に確認されたもの △：少量だが確認されたもの - : 確認されず

## 11.2 EPMA（電子線マイクロアナライザー）によるマッピング分析

EPMA（電子線マイクロアナライザー）は、走査電子顕微鏡が形態の観察のみしかできないという欠点を補って、形態の観察と同時に、その物質がどのような元素から構成されているかをも同時に調べることができるようになしたものである。原理的には走査電子顕微鏡と同じで、電子線を試料表面に照射するが、その際、発生する二次電子のほかにX線を検知する。物質は電子線を照射された場合にも、その物質を構成する元素に特有の波長をもったX線を発生する。したがって、観察中の試料のある結晶に着目し、その結晶に電子線を照射したとき発生してくるX線の波長の分布を調べることにより、その結晶がどのような元素から構成されているかを知ることができる。これは、劣化コンクリート中の反応生成物が何であるかをその外観のみから判断できない場合の、非常に有力な判定手段になる。マッピング分析は、微量元素の存在状態をマクロなマッピング像として連続的に捉えるものである。

### 11.2.1 分析方法

EPMAによるマッピング分析は、使用コンクリートが異なるX立坑の上部、下部およびY立坑の覆工コンクリートについて行った。分析元素は、カルシウム(Ca)、ケイ素(Si)、塩素(Cl)、硫黄(S)の4元素とし、分析範囲は、表面から50mmの深さまでとした。試料は、中性化深さ測定後のコアから採取し、深さ方向が観察できるように、ダイヤモンドカッターを用いて、厚さ約1cm、縦横約6cmの大きさに切断した。真空乾燥後、メタクリル樹脂により包埋し、観察面を研磨した。観察面にメタクリル樹脂を含浸させた後、再度研磨を行い、カーボンを蒸着させて、EPMAによるマッピング分析用試料とした。

EPMAによるマッピング分析は日本電子社製電子線マイクロアナライザーJXA-8621Mを用いて行った。使用した電子線マイクロアナライザーの写真を写真11-2に示す。

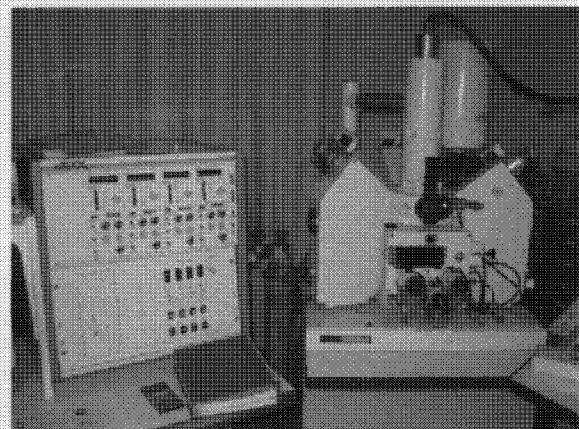


写真 11-2 EPMA

### 11.2.2 分析結果

EPMA によるマッピング分析の結果を図 11-1～図 11-3 に示す。また、マッピング分析の結果から算出した、CaO（%）、SiO<sub>2</sub>（%）、Cl（%）、SO<sub>3</sub>（%）および CaO/SiO<sub>2</sub>（モル比）分布を図 11-4～図 11-8 に示す。これらの値にはマッピング画像の横方向を平均した値を用いており、骨材の影響は排除してある。

X立坑上部での結果をまとめると以下のようになる。

- ① CaO については、試料表面から約 5mm および粗骨材の周囲で、濃度の低下が見られた。
- ② Cl については、試料の表面付近のごく一部に若干濃度の高い部分が見られたが、それ以外の変化は見られなかった。
- ③ SiO<sub>2</sub> については、CaO 濃度の低い部分において、濃度が低い傾向が見られた。
- ④ SO<sub>3</sub> については、試料表面から約 2mm の範囲で濃度の低下が見られ、それよりも内部では若干の増加が見られた。これ以外に特に変化は見られなかった。なお、白く表示された部分は骨材にあたり、硫化物を含むと考えられる。
- ⑤ CaO/SiO<sub>2</sub> については、試料の表面部で 2.5 以上の高い部分が一部に見られ、そのすぐ内部で 1.5 以下を示す部分も見られた。また、粗骨材の周囲においても若干低い値を示す傾向が見られた。これ以外には特に変化は見られなかった。

X立坑下部での結果をまとめると以下のようになる。

- ① CaO については、粗骨材の周囲で若干の濃度低下が見られたが、試料の深さ方向では大きな違いは見られなかった。
- ② Cl については、試料表面から 20～25mm の範囲において、明らかな濃度低下が見られた。濃度低下が見られた範囲では、試料観察面の色が薄く変色していた。
- ③ SiO<sub>2</sub> については、Cl 濃度の低下が見られた範囲において、若干の濃度低下が見られた。なお、SiO<sub>2</sub> 濃度が 30% 以上の部分は骨材である。
- ④ SO<sub>3</sub> については、Cl 濃度の低下が見られなかった範囲では、濃度がほぼ一定だったのに対し、Cl 濃度の低下が見られた範囲では、濃度の低下した部分と増加した部分が見られた。
- ⑤ CaO/SiO<sub>2</sub> については、Cl 濃度の低下が見られた範囲で、低下が見られなかった範囲よりも高い値を示した。

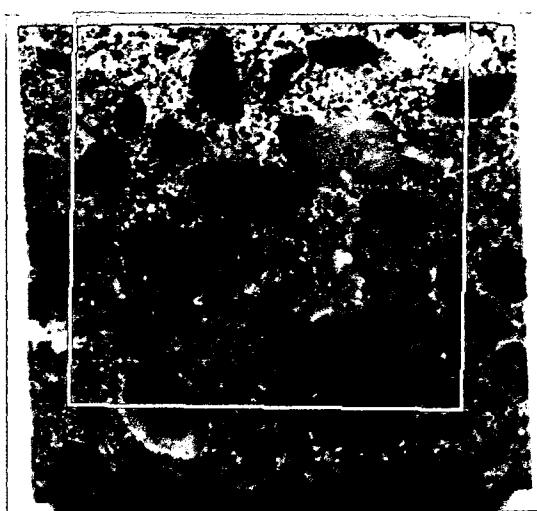
Y立坑での結果をまとめると以下のようになる。

- ① CaO については、試料表面から約 10mm の範囲で、濃度の低下が見られた。
- ② Cl については、試料表面から約 15mm の範囲で、濃度の低下が見られた。
- ③ SiO<sub>2</sub> については、試料表面から約 10mm の範囲で、濃度の低下が見られた。
- ④ SO<sub>3</sub> については、SiO<sub>2</sub> 濃度の低下が見られたところでは 0.5% と低く、それよりも内部では 1 % 以上の部分が見られた。

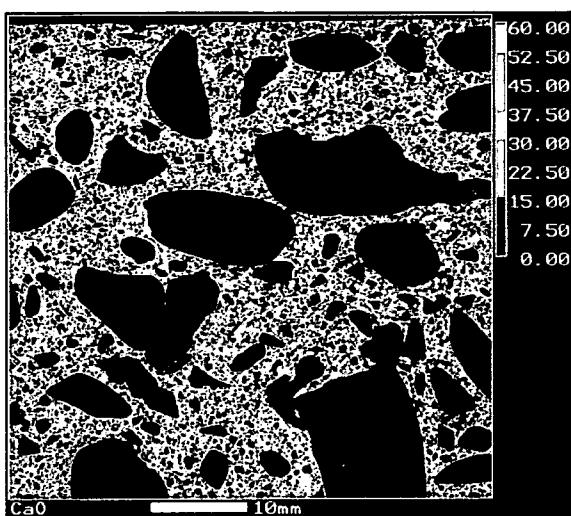
- ⑤  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$  については、試料表面付近で 2.5 以上の高い部分があり、それよりも内部の約 15mm までの  $\text{CaO}$  濃度の低下が見られた範囲では 1 以下の値を、さらにそれよりも内部では 1 前後の値を示した。また、X 立坑に比べ全体的に低い値を示している。

以上の分析結果から、以下が考えられる。

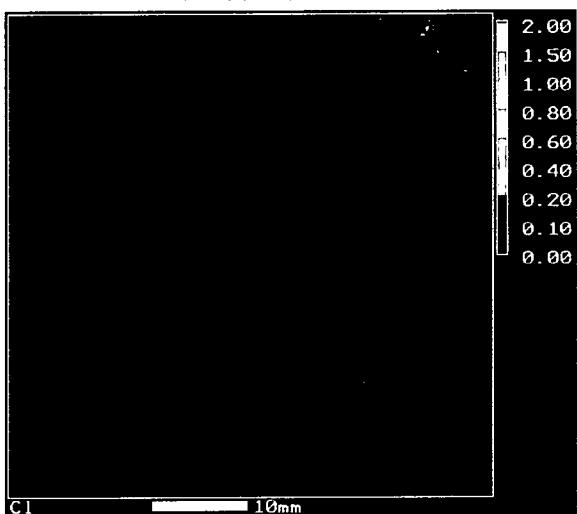
- ① 一般に、セメント水和物の変質は、 $\text{Ca}$  の溶脱による  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$  の低下によって確認できるが、今回の結果では、いずれの試料においても表面で大きく、内部に行くに従って小さくなる傾向を示した。これは、 $\text{Ca}$  量の低下も見られるものもあるが、主に  $\text{Si}$  量の低下によるものであり、けい酸カルシウム水和物( $3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ )量の低下によるものと考えられる。したがって、立坑覆工コンクリート表面部においては、けい酸カルシウム水和物の分解や溶脱などによるセメント水和物の変質が生じている可能性があると考える。なお、 $\text{Ca}$  量の低下が比較的少なかった原因としては、炭酸化による炭酸カルシウム ( $\text{CaCO}_3$ ) の析出が考えられる。
- ② Y 立坑での  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$  は、X 立坑に比べ全体的に低い値を示すことから、X 立坑と Y 立坑ではセメントの種類が異なる可能性が考えられる。
- ③ X 立坑の下部と Y 立坑で確認された、 $\text{Cl}$  濃度の低下 ( $\text{Cl}$  の移動) と  $\text{SO}_3$  濃度の変動 ( $\text{SO}_3$  の移動) が同じ場所で生じる現象は、コンクリートの中性化が生じた場合に見られる現象であり、その範囲は中性化深さの測定結果とほぼ一致するものである。



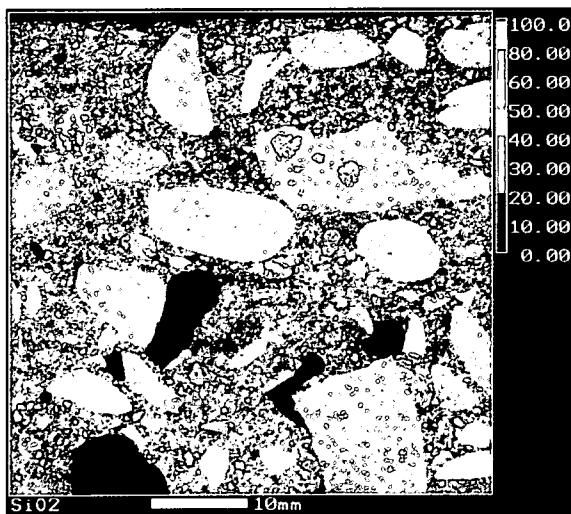
(a) 分析面の状況



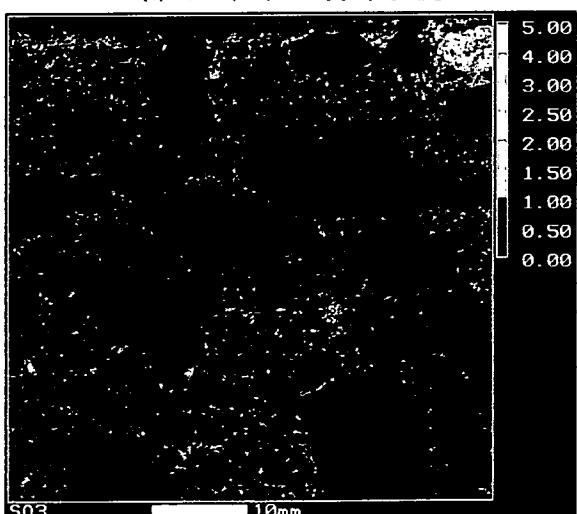
(b) CaO (%) の分布状況



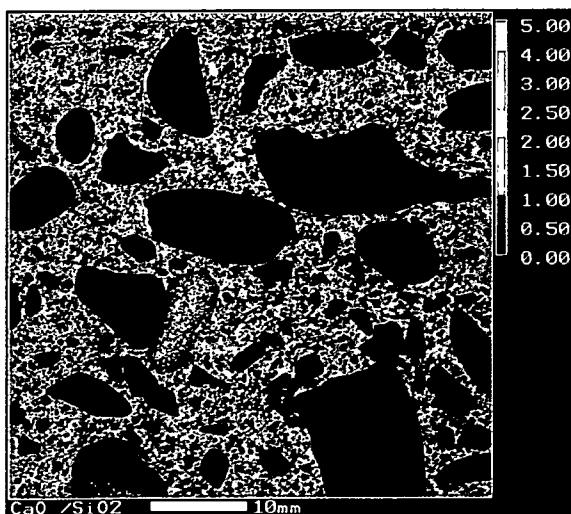
(c) Cl (%) の分布状況



(d) SiO2 (%) の分布状況

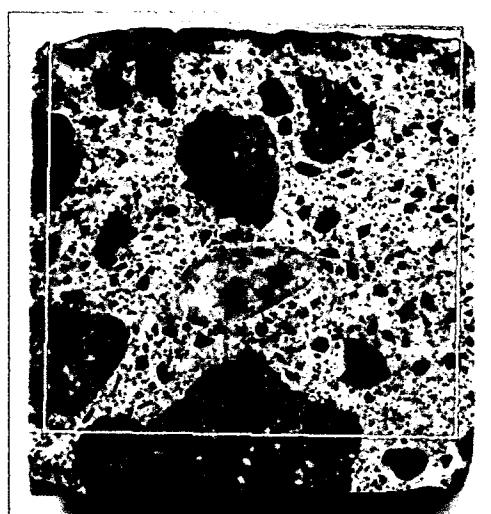


(e) SO3 (%) の分布状況

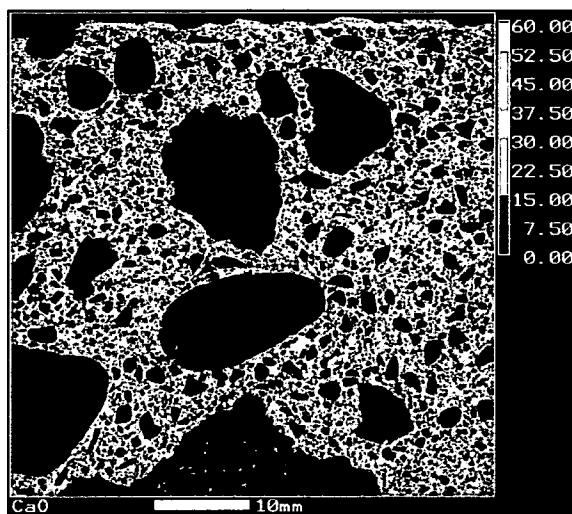


(f) CaO/SiO<sub>2</sub> (モル比) 分布状況

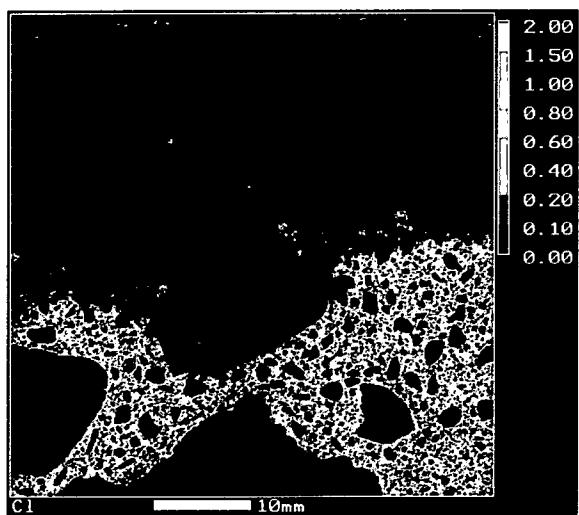
図 11-1 X立坑上部コアのEPMAマッピング分析結果



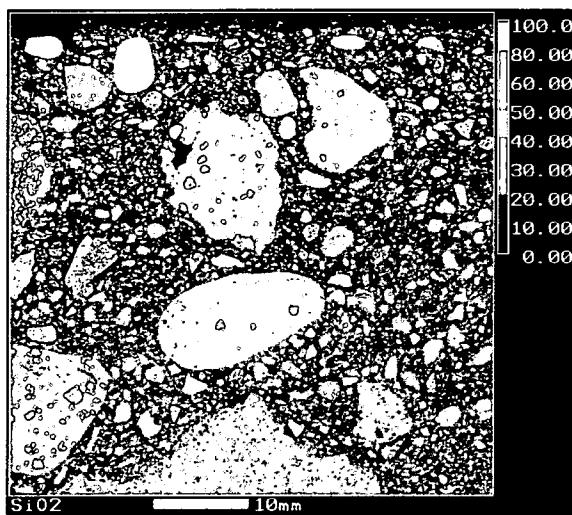
(a) 分析面の状況



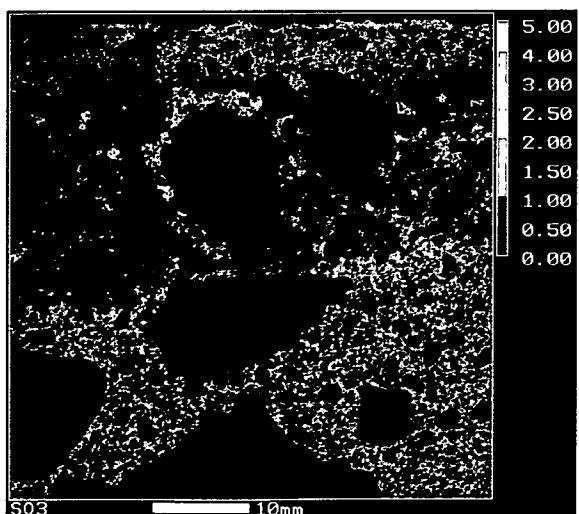
(b) CaO (%) の分布状況



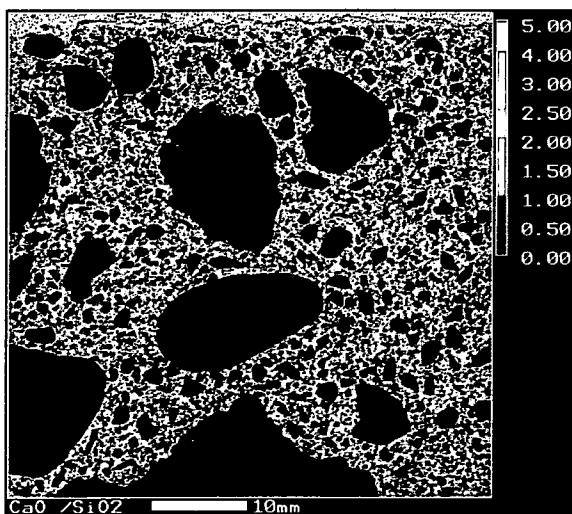
(c) Cl (%) の分布状況



(d) SiO<sub>2</sub> (%) の分布状況



(e) SO<sub>3</sub> (%) の分布状況

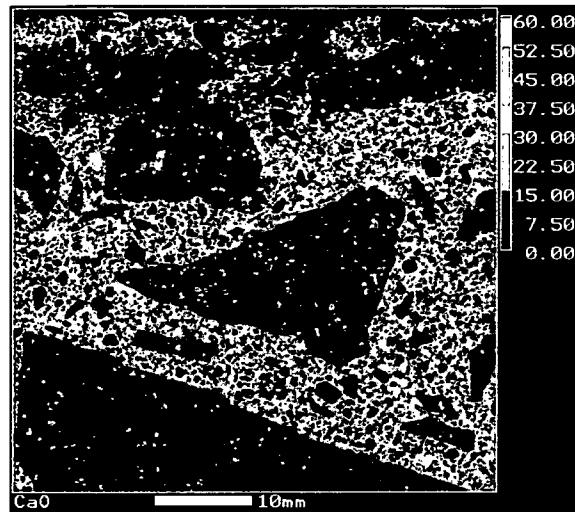


(f) CaO/SiO<sub>2</sub> (モル比) の分布状況

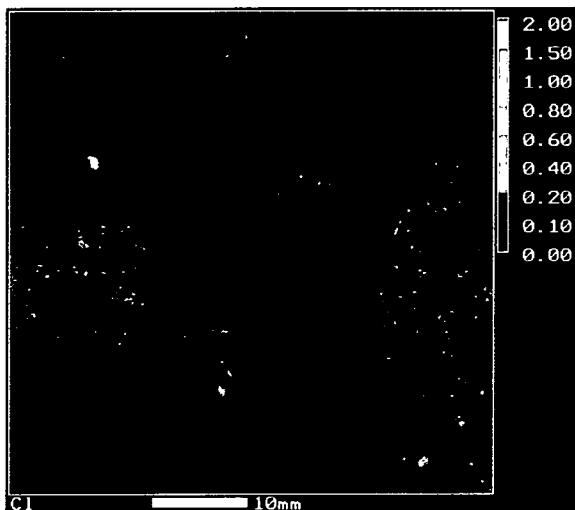
図 11-2 X立坑下部コアのEPMAマッピング分析結果



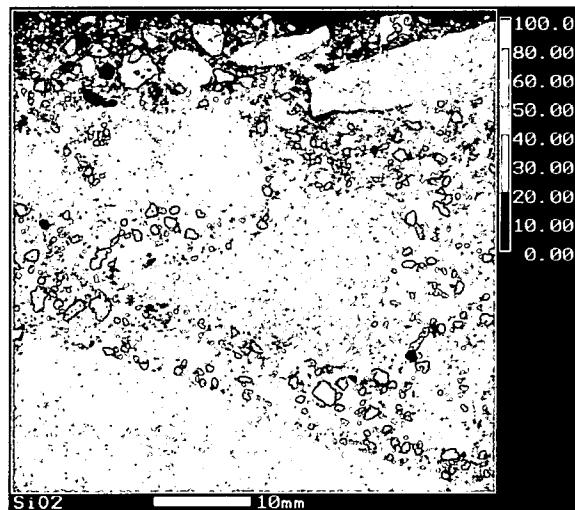
(a) 分析面の状況



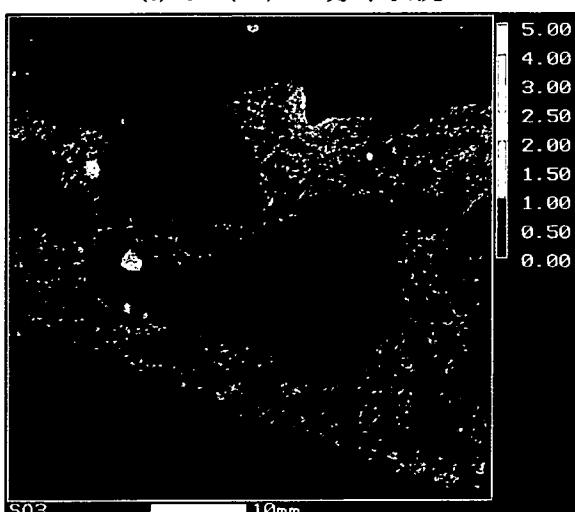
(b) CaO (%) の分布状況



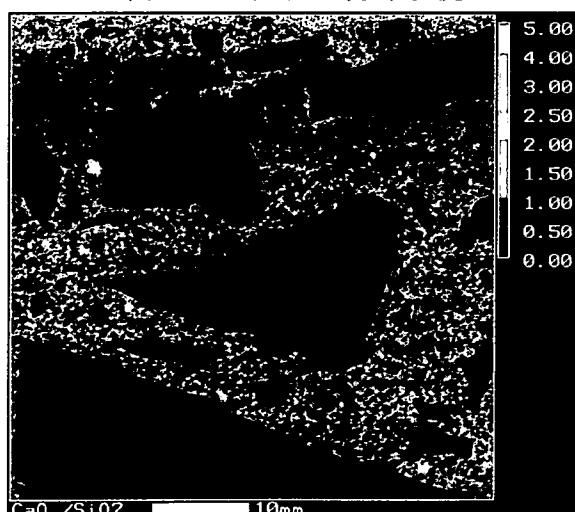
(c) Cl (%) の分布状況



(d) SiO<sub>2</sub> (%) の分布状況



(e) SO<sub>3</sub> (%) の分布状況



(f) CaO/SiO<sub>2</sub> (モル比) の分布状況

図 11-3 Y立坑コアのEPMAマッピング分析結果

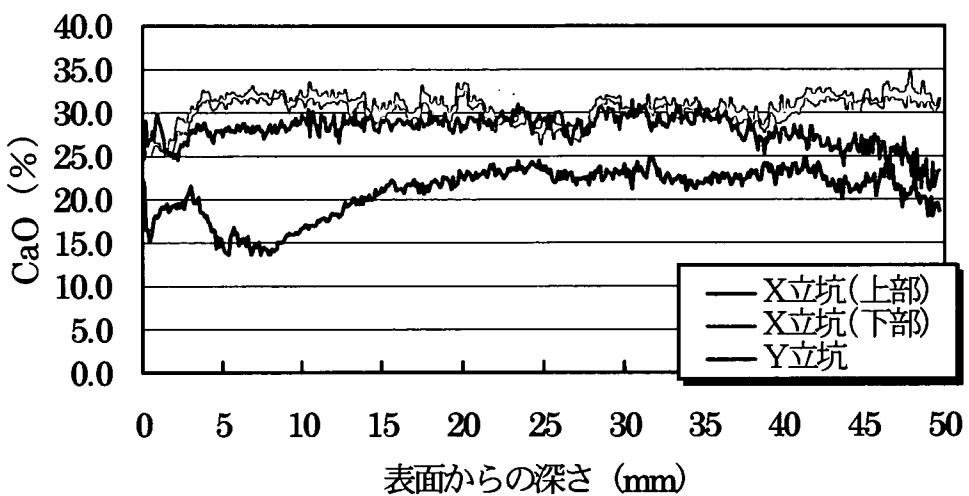


図 11-4 EPMA マッピング分析における CaO 分布

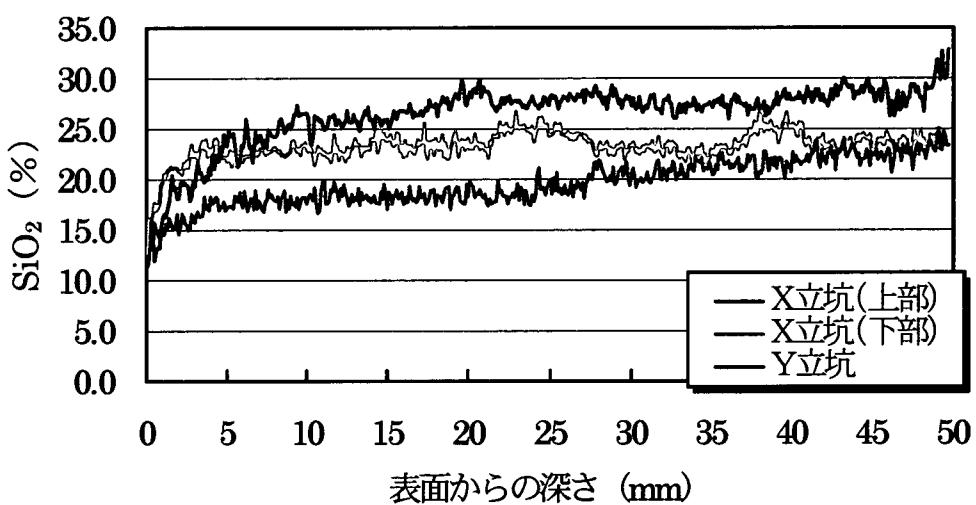


図 11-5 EPMA マッピング分析における SiO<sub>2</sub> 分布

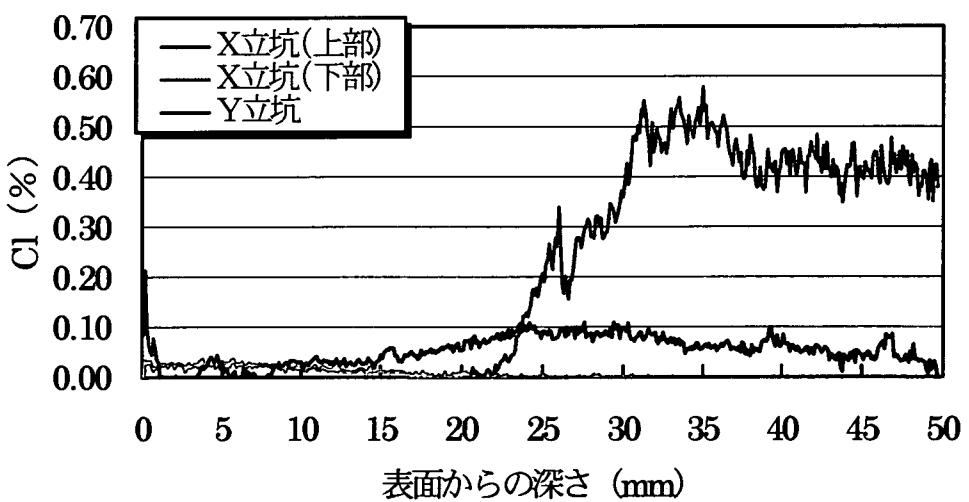


図 11-6 EPMA マッピング分析における Cl 分布

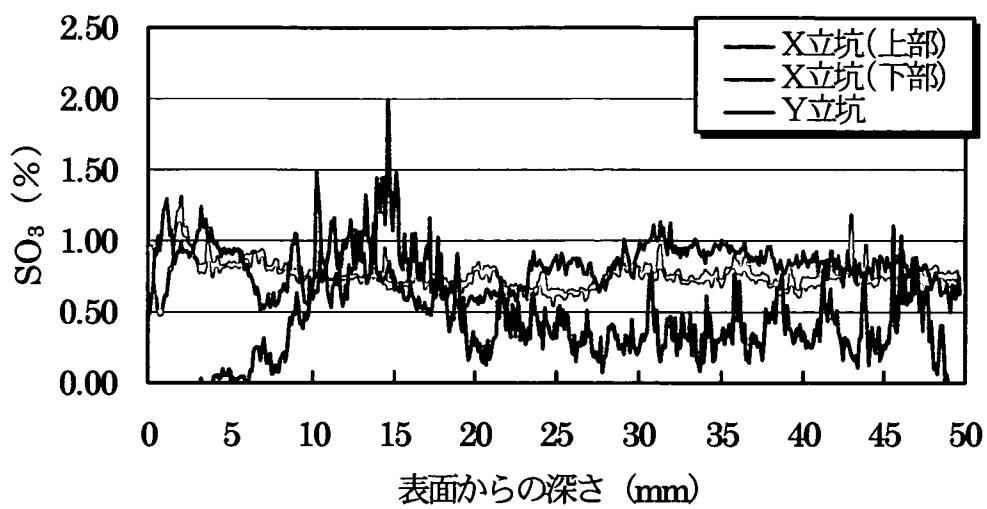


図 11-7 EPMA マッピング分析における  $\text{SO}_3$  分布

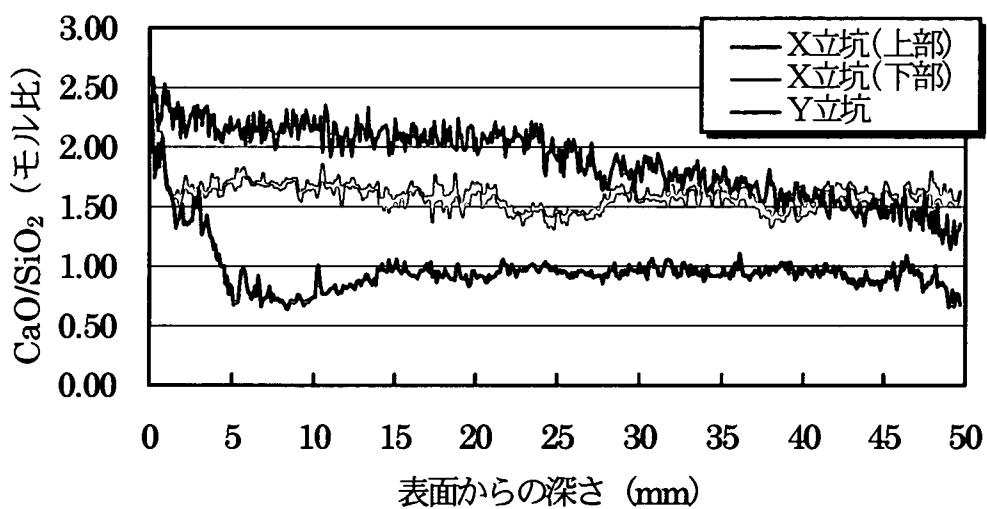


図 11-8 EPMA マッピング分析における  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$  分布

## 12. 調査結果のまとめと考察

今回の調査で得られた結果をもとに、当該立坑覆工コンクリートの材料、配合、変状および劣化機構について考察を行った。また、瑞浪超深地層研究所における立坑覆工コンクリートの設計、施工および維持管理上の留意点についても考察を行った。

### 12.1 立坑覆工コンクリートの材料

EPMAによるマッピング分析の結果から、Y立坑覆工コンクリートにおけるCaO/SiO<sub>2</sub>は、X立坑覆工コンクリートよりも明らかに小さく、X立坑とY立坑では、使用されたセメントの種類が異なる可能性が考えられる。また、熱分析および粉末X線回折の結果から、Y立坑覆工コンクリートでは、その内部においても水酸化カルシウムの存在が確認されなかったことから、高炉スラグやフライアッシュなどの混和材もしくは混合セメントなどが使用された可能性も考えられる。

塩化物イオン量の測定結果から、X立坑の下部覆工コンクリートの施工では、促進剤として塩化カルシウム(CaCl<sub>2</sub>)が使用された可能性が考えられる。その量は、3.13kg/m<sup>3</sup>(単位セメント量を300kg/m<sup>3</sup>程度とすれば、セメントの約1%に相当)と推定される。

### 12.2 立坑覆工コンクリートの配合

X立坑の上部については、単位セメント量が433kg/m<sup>3</sup>、単位水量が181kg/m<sup>3</sup>、水セメント比が42%と推定された。

X立坑の下部については、単位セメント量が278kg/m<sup>3</sup>、単位水量が169kg/m<sup>3</sup>、水セメント比が61%と推定された。文献調査の結果から、単位セメント量が300kg/m<sup>3</sup>程度、単位水量が170~186kg/m<sup>3</sup>程度、水セメント比が56.7~62.0%程度と考えられるが、推定結果もそれに比較的近い値を示した。

Y立坑については、文献調査の結果では、単位セメント量が331kg/m<sup>3</sup>程度、単位水量が172kg/m<sup>3</sup>程度、水セメント比が52%程度と考えられるが、配合分析の結果では、単位セメント量が231kg/m<sup>3</sup>、単位水量が163kg/m<sup>3</sup>、水セメント比が71%と、大きく異なる結果が得られた。コアによる圧縮強度試験の結果から、Y立坑覆工コンクリートの圧縮強度は、X立坑の上部と下部の間にあり、同種のセメントを用いていれば、水セメント比もその間にあると考えられる。したがって、Y立坑覆工コンクリートの水セメント比は、文献調査で得られた52%程度と考えられ、配合推定において異なる結果が得られた原因としては、普通ポルトランドセメント以外のセメントが使用されていたことが考えられる。

配合分析に使用したセメント協会法は、セメントが普通ポルトランドセメントで、骨材があまり特殊なものでない場合に適用できる。また、当時の使用セメント、骨材が入手できないため、骨材およびセメントの分析値は全国平均値を用いて計算を行っている。

### 12.3 立坑覆工コンクリートの強度

コア採取による圧縮強度試験および反発硬度法による圧縮強度の推定を行った結果、X立坑の上部、下部およびY立坑覆工コンクリートの圧縮強度は、それぞれ  $27.5\sim43.4\text{N/mm}^2$ ,  $25.4\sim38.3\text{N/mm}^2$ ,  $32.7\sim41.6\text{N/mm}^2$  と推定された。いずれも  $20\text{N/mm}^2$  以上の圧縮強度を示すことから、立坑覆工コンクリートは十分な強度を有するものと考えられる。

### 12.4 立坑覆工コンクリートの変状

目視観察による外観変状の調査結果から、X立坑の覆工コンクリートでは、ジャンカ、コールドジョイント、漏水、ひび割れ、表層剥離、剥落が確認された。ジャンカやコールドジョイントは、施工時に発生する初期欠陥であり、特に施工年代の古い上部立坑で多く確認された。ジャンカやコールドジョイントなどの初期欠陥の発生は、コンクリートの品質や打込みおよび締固めなどの施工方法の影響を受ける。漏水は、ジャンカやコールドジョイントに伴うものであった。ひび割れは、乾燥収縮や温度に起因する場合と、地震動や偏土圧などの外力による場合と考えられる。

表層剥離は、全体を通して散見された。EPMAによるマッピング分析の結果から、覆工表面部では、けい酸カルシウム水和物の分解や溶脱などによるセメント水和物の変質の可能性が確認されており、表層剥離の発生原因としては、風化・老化（炭酸化を含む）が考えられる。風化・老化は、海洋環境、強酸や高濃度の硫酸根との接触、あるいは凍結融解作用を受ける環境などの特別な劣化促進因子に曝される環境を除外して、通常の使用条件で経年的にコンクリートが変質・劣化していく現象と定義されている。

コンクリートの剥落は広い範囲で数多く確認され、特に下部立坑で多く存在した。下部立坑には断層を横切っている箇所が数箇所あり、地盤変動によりひび割れ、剥落が発生した可能性も考えられる。剥落部のほとんどは落下防止金網などで補強されている。

Y立坑の覆工コンクリートでは、全体的にコンクリート表面の劣化が進んでいた。コンクリート表面がザラザラした状態になっており、部分的に薄く剥離している箇所も認められた。これは、X立坑と同様に、風化・老化（炭酸化を含む）によるものと考えられる。その他に、横坑との接合部で、コールドジョイントが確認されたが、コールドジョイントからの漏水や周辺のジャンカなどは認められなかった。Y立坑の覆工コンクリートは、比較的健全な状態であった。

### 12.5 立坑覆工コンクリートの劣化機構

立坑覆工コンクリートの劣化機構としては、表面部での風化・老化（炭酸化を含む）によるセメント水和物の変質の可能性と中性化が確認された。中性化深さは、X立坑の上部で  $2\text{mm}$ （約 52 年間）、下部で  $28\text{mm}$ （約 34 年間）、Y立坑で  $8\text{mm}$ （約 37 年間）であった。また、X立坑の下部覆工コンクリートでは、促進剤として塩化カルシウムが使用された可能性があり、鋼材腐食発生限界濃度（一般に  $1.2\text{kg/m}^3$ ）を超える、

2.07kg/m<sup>3</sup>の塩化物イオンが確認された。

風化・老化（炭酸化を含む）については、十分に解明されていない現状にあるが、成分溶出による劣化の評価基準の一例を表 12-1 に示す。この表を参考にすれば、当該立坑覆工コンクリートの風化・老化（炭酸化を含む）による劣化過程は、「進展期(状態Ⅱ)」と判定される。

表12-1 成分溶出による劣化の評価基準例<sup>1)</sup>

劣化の過程	評価対象とする現象と定義		
	鋼材腐食 (中性化の進行)	強度低下 (組織の空疎化)	美観・使用性の低下 (汚れ・エフロレッセンス の発生)
潜伏期 (状態Ⅰ)	かぶり部分の pH 低下が、腐食発生限界までに達していない期間	表面近傍の CH のみの溶出にとどまり、全域にわたって所定量の C-S-H が存在する期間	汚れが発生した時点から美観性能の低下が開始される。強度低下の加速期で述べたような現象が生じた場合は劣化速度も増加することになる。
進展期 (状態Ⅱ)	pH の低下によって鋼材の腐食が開始してから腐食ひび割れ発生までの期間	表面近傍から C-S-H が溶解し始めるものの、強度性能が低下するまでには至っていない期間	また、つららが大きくなつて落下による第三者被害が問題となるような事態も想定される。
加速期 (状態Ⅲ)	腐食ひび割れ発生により腐食速度が増大する期間	次の 2 つの現象が生じた場合に劣化速度が増大する期間。通常は劣化速度は拡散支配によるため経時に低下 <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 表面近傍の強度低下によって、新たなひび割れなどが導入されて溶出面が拡大</li> <li>・ 流水による洗い効果が卓越して保護層が消失</li> </ul>	いずれにしても、構造物種類・立地などで性能低下の分類指標を定める必要がある。
劣化期 (状態Ⅳ)	腐食量の増加により耐荷力の低下が明らかになる期間	強度低下領域が拡大して耐荷力の低下が明らかになる期間	

※ CH : 水酸化カルシウム, C-S-H : けい酸カルシウム水和物

つぎに、中性化の進行について検討を行った。中性化が定常状態での炭酸ガスのコンクリート中への拡散によって生ずると仮定すると、中性化深さ  $y$  は経過時間  $t$  の平方根に比例するという式(12-1)が導かれる。これは通常、 $\sqrt{t}$  則と呼ばれ、最も一般的に用いられている中性化速度式である。

$$y = \alpha \sqrt{t} \quad (12-1)$$

ここに、 $\alpha$  は中性化速度係数であり、多くの外的および内的要因によって定まる複雑な関数である。

土木学会では、普通ポルトランドセメントあるいは中庸熱ポルトランドセメントを用い、さらに、フライアッシュ等の混和材を含むコンクリートについて行った実験結果お

より実構造物における測定結果を基にして、式(12-2)を提案している<sup>7)</sup>。

$$y = \beta(-3.57 + 9.0 W/B)\sqrt{t} \quad (12-2)$$

$$W/B = W/(C + k \cdot A_d)$$

ここに、 $y$  は中性化深さ(mm),  $t$  は材齢(年),  $W/B$  は有効水結合材比,  $W$ ,  $B$ ,  $C$  および  $A_d$  は単位体積あたりの水, 有効結合材, ポルトランドセメントおよび混和材の質量である。 $k$  は混和材の種類により定まる定数で、フライアッシュの場合,  $k = 0$ , 高炉スラグ微粉末の場合,  $k = 0.7$  である。 $\beta$  は環境の影響を表す係数で、乾燥しやすい環境または南に面している場合,  $\beta = 1.6$ , 乾燥しにくい環境または北に面している場合,  $\beta = 1.0$  である。

そこで、中性化深さの測定値から求めた中性化速度係数と、土木学会の提案式における中性化速度係数の比較を行った。その結果を図 12-1 に示す。なお、結合材の種類は普通ポルトランドセメントとし、覆工コンクリートの水セメント比は推定値とした。

X立坑の上部とY立坑における中性化速度係数は、土木学会の提案式に近い値を示したが、X立坑の下部では大きな値を示しており、環境の影響を表す係数 $\beta=2.5$ に相当する。したがって、今回の結果から判断すれば、立坑覆工コンクリートの中性化に関する照査は、環境の影響を表す係数 $\beta=2.5$ を用いて行うことが考えられる。

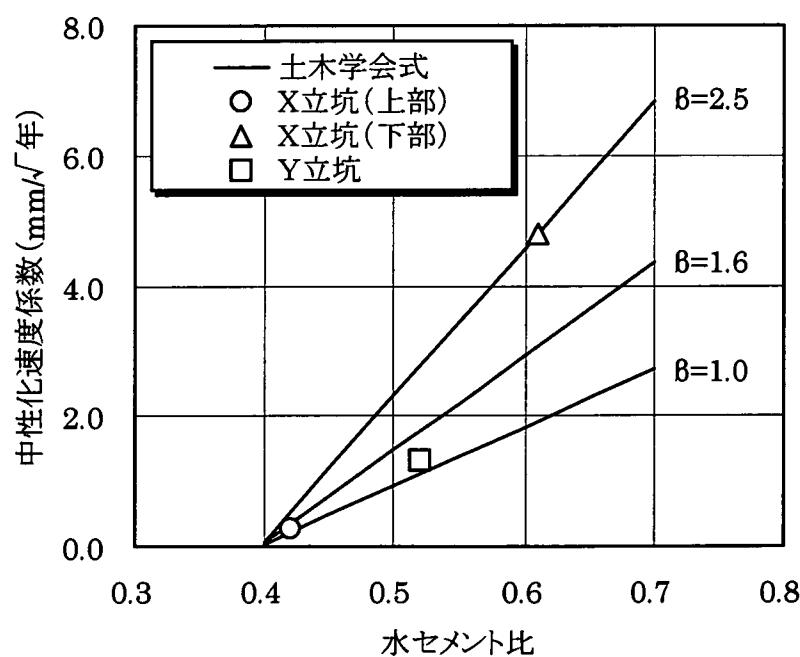


図 12-1 中性化速度係数の比較

## 12.6 立坑覆工コンクリートの設計、施工、維持管理上の留意点

本調査結果をもとに、瑞浪超深地層研究所における立坑覆工コンクリートの設計、施工および維持管理上の留意点について考察を行った。

立坑覆工コンクリートの設計上の留意点としては、断層の影響と考えられるひび割れ、剥落が観察されたことから、特に断層破碎帯などの影響により、偏圧が予測される区間については、鋼材による補強を検討する必要がある。また、鋼材による補強を行う場合には、中性化に関する照査と促進剤などから導入される塩化物イオンによる鋼材腐食に関する照査を実施する必要がある。特に、促進剤を使用する場合には、その種類や使用量などを十分に検討する。

覆工表面部における風化・老化（炭酸化を含む）については、構造性能に影響を及ぼすような劣化ではないが、表層剥離の原因にもなるため、必要に応じて、水セメント比の低減などによる水密性の向上、被膜養生剤などによる養生対策、含浸材などによる表面処理などの適用を検討する。なお、これらの対策は、乾燥収縮などに伴うひび割れの低減に対しても有効であると考える。

また、今回の調査では確認されなかったが、アルカリ骨材反応や地下水などの作用による化学的侵食などの劣化も考えられる。アルカリ骨材反応とは、骨材中に含まれる反応性シリカ鉱物や炭酸塩岩を有する骨材がコンクリート中のアルカリ性水溶液と反応して、コンクリートに異常膨張やひび割れを発生させる劣化現象であり、安全な骨材の使用やコンクリート中のアルカリ総量の抑制が重要になる。また、化学的侵食とは、酸性物質や硫酸イオンとの接触によりコンクリート硬化体が分解したり、化合物生成時の膨張圧によってコンクリートが劣化する現象であり、立坑覆工コンクリートでは、主に地下水の接触が問題になると考えられる。そのため、地下水の成分や濃度を十分に調査し、コンクリートの劣化に及ぼす影響を検討する必要がある。なお、耐久性の照査については、2002年制定 土木学会コンクリート標準示方書〔施工編〕<sup>6)</sup>に準ずるものとする。

立坑覆工コンクリートの施工上の留意点としては、ジャンカやコールドジョイントなどの初期欠陥が確認されたことから、施工中におけるコンクリートのワーカビリティーの確保および適切な施工計画および管理が重要になると見える。特に、立坑覆工コンクリートでは、早期強度が求められることから、硬化促進剤を使用する場合が多く、凝結が促進されるため、施工中におけるコンクリートのワーカビリティーの確保に注意すべきである。そのためには、コンクリートの凝結および強度発現特性と、施工のサイクルタイムを十分に考慮した施工計画の立案が重要であり、施工時には、季節によるコンクリート品質の変動に対する管理、練混ぜから打込みまでの時間管理、打込み位置での品質管理、脱枠強度の管理などが重要になると見える。

コンクリートの打込みについては、特に一般の施工と変わりはないが、ジャンカの発生に対しては、コンクリートが材料分離しないように打設し、バイブレータで十分に締め固めるとともに叩きなどで念入りに充填するのがよい。また、コールドジョイントの

発生に対しては、コンクリートを連続して打込むことが重要であり、打込み時の中断は避けるようにする。中断した場合でも後のコンクリートを早急に打込み、十分に先に打込まれたコンクリートと一体になるよう締固めを行うなどの対処が必要である。

また、ステップ間の打継ぎ目は、水密性や耐久性の上で欠陥となりやすい。さらに、今回の調査では、その切欠き部において剥落が確認されていることから、ステップ間の打継ぎは入念に施工することが重要である。

立坑覆工コンクリートの維持管理については、特に一般のコンクリート構造物と異なる点はないと考える。2002年制定土木学会コンクリート標準示方書〔維持管理編〕<sup>8)</sup>には、図12-2に示すような、コンクリート構造物の維持管理の流れが示されているので、これを参考とし、適切な維持管理計画を立案する必要がある。

初期点検は、竣工後あるいは大規模な補修・補強後に初期欠陥、損傷、劣化の有無を把握するとともに、劣化機構の推定および劣化予測を行うことを目的として実施する。構造物全体を対象とし、目視や打音法による点検と、設計や施工に関する図書調査を原則とする。目視や打音法による点検では、ひび割れ、豆板、コールドジョイント、砂すじなどの初期欠陥や損傷の有無の確認を行い、基礎や地中構造物の背面など、目視や打音法による点検が困難な部位については、設計の記録や工事記録に基づく調査のみでよい。

日常点検は、日常の巡回で点検可能な箇所について、劣化、損傷、初期欠陥の有無や程度の把握を目的として実施する。点検は、目視、写真、ビデオ、双眼鏡などによる目視点検を主体とし、異常等が発見された場合は、打音法による点検を行うことを原則とする。目視点検や打音法による点検の項目には、①ひび割れ状況、②浮き、剥離、剥落、スケーリングの有無、③鋼材の露出状況や錆の有無、④錆汁、遊離石灰の有無、⑤漏水の有無、⑥異常な変位、変形、⑦支持状態の異常、⑧異常音や異常な振動、⑨変色の有無などがある。

定期点検は、日常点検による点検部位に日常点検で把握し難い構造物の細部も含めて、劣化、損傷、初期欠陥の有無や程度の把握を目的として実施する。点検の部位は原則として構造物全体とする。点検は、目視点検や打音法による点検を主とし、必要に応じて非破壊検査やコア採取などを組み合わせるものとする。点検項目は、日常点検と同様とする。点検の頻度は、一般に1回／数年程度である。

詳細点検は、初期点検、日常点検、定期点検および臨時点検で必要と判断された場合に実施するものであり、構造物の状態や生じている劣化の状況を詳細に把握するために実施する。詳細なデータが必要な部位（一般には劣化などの変状が生じている部位）について実施するものであり、外観上の損傷状況を把握するとともに、コンクリートの品質の劣化状況や補強用鋼材の腐食の状況などのデータを定量的に採取するとよい。点検の項目および方法の選定は、詳細点検の目的を考慮し、高度な専門的知識に基づいて適切になされなければならない。一般的な点検項目は、①ひび割れ幅、長さ、深さ、進行状況、②浮き、はく離、はく落、スケーリングの有無、③鋼材の腐食状況、④鋼材露出

の程度、⑤かぶり、鋼材位置などの配筋状態、⑥コンクリートの物性、⑦中性化深さ、⑧塩化物含有量、⑨残存膨張量、⑩内部欠陥の有無、⑪コンクリートの断面積、⑫異常な変位や変形、⑬振動特性、⑭支持状態、⑮遊離石灰や漏水の有無、⑯表面の変色の有無、⑰化学的侵食因子の浸透深さ、⑱劣化外力の測定、などがある。また、これらの点検方法は、目視、打音法、非破壊検査、はつりやコア抜きによる鋼材の状態の確認やコンクリートなどの試料採取、採取した試料の試験および分析、載荷試験や振動試験など多岐にわたっている。

臨時点検は、地震や台風などの天災、火災、および車両、船舶の衝突などが構造物に作用した場合に実施するものであり、災害や事故などが作用した後の構造物の状況を把握するとともに、対策の要否を評価および判定することを目的とする。損傷を受ける可能性を有する部位・部材を対象とし、目視や打音法による点検を原則とする。点検項目は、ひび割れ状況、断面欠損状況、浮き、剥離、剥落、漏水などの有無、変形状況、支持状態、異常音や異常な振動などが挙げられる。

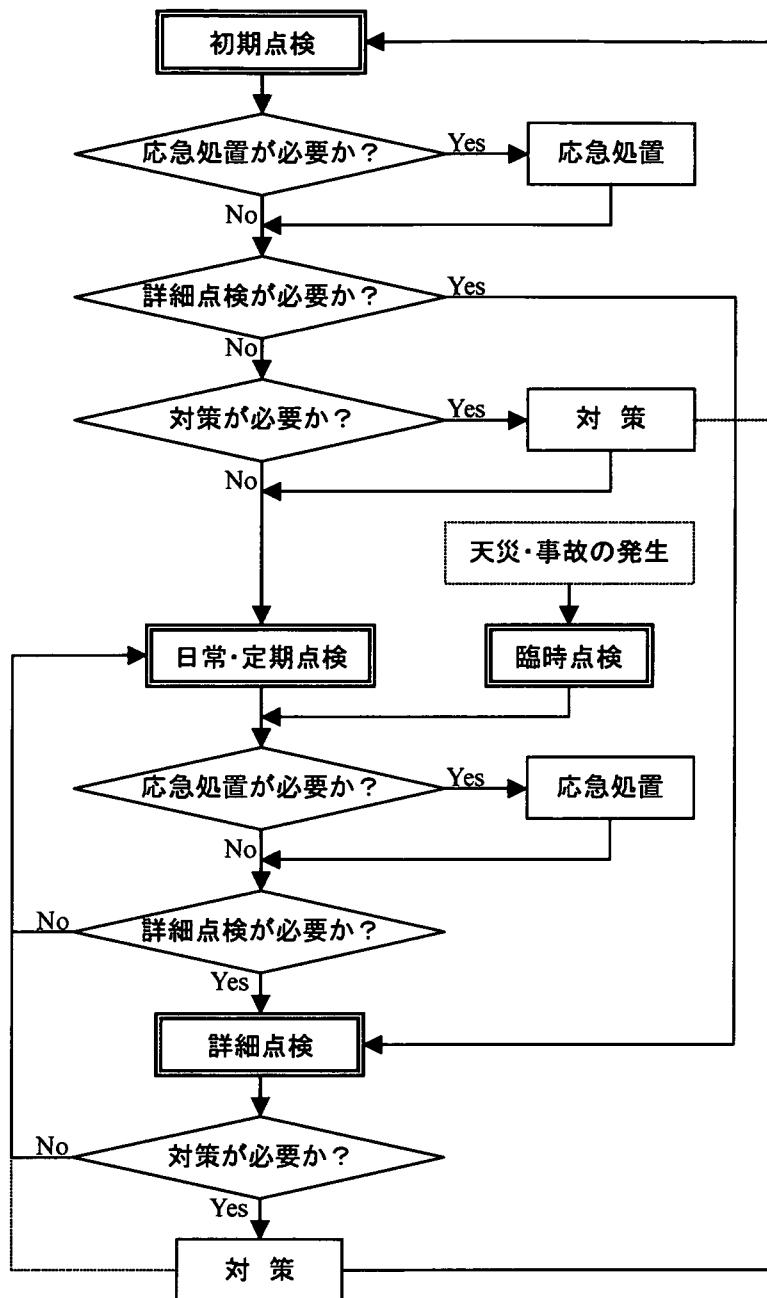


図 12-2 コンクリート構造物の維持管理の流れ<sup>8)</sup>

### 13. 今後の課題

今回は立坑覆工背面の調査は実施できなかった。背面部については地下水の作用による化学的侵食なども考えられることから、今後の課題としては、立坑覆工コンクリートの背面部における健全性評価が挙げられる。

評価の方法としては、地下水の成分や濃度を十分に調査し、コンクリートの劣化に及ぼす影響を検討する。そして、コンクリートの劣化に影響を及ぼす成分や濃度が確認された場合には、既存の試験データの調査や室内試験の実施などにより劣化の進行を予測することが考えられる。また、それらの結果をもとに、コンクリートの配合設計や防食対策などを検討することが考えられる。

#### 14. おわりに

瑞浪超深地層研究所の研究坑道は、深度約 1,000m に達する超大深度の立坑と水平坑道から構成される。研究坑道の建設および研究に使用する期間は 15 年程度の長期間となる。このため、研究坑道のうちでも特に立坑覆工の安定性、維持管理が重要な課題のひとつとなっている。

これまで、立坑の覆工コンクリートについては、その健全性を調査した事例が非常に少なく、調査結果もほとんど公表されていない状況にある。

そこで、本調査では、わが国に現存する鉱山の立坑において覆工コンクリートの健全性調査を実施し、その健全性を評価するとともに、今後の立坑工事に対する設計、施工及び長期的な品質管理に資するデータの取得を行った。

調査は、特別の仮設なしに立坑内部に立ち入ることが可能な国内の 2箇所の鉱山立坑を対象として、一次覆工コンクリートの健全性調査を実施した。

これら 2 立坑の文献調査結果を第 3 章に示した。立坑内部での現地調査では、①目視観察による外観変状の調査、②反発硬度法によるコンクリート強度の推定、③コンクリートコアの採取を行った。その結果を第 4 章～第 6 章にまとめた。次いで、採取したコンクリートコアを用いて実施した圧縮強度試験、中性化深さの測定、細孔径分布の測定、熱分析、コンクリートの配合推定、塩化物イオン量の測定、および化学分析によるコンクリート劣化因子の調査の結果を、第 5 章、第 7 章～第 11 章にまとめた。

第 12 章では、以上の現存 2 立坑の覆工コンクリートの健全性調査結果を、材料、配合、強度、変状および劣化機構の点からまとめるとともに考察を加え、超深地層研究所の覆工コンクリートの健全性を確保する上で必要な設計、施工および維持管理上の留意点を取りまとめた。さらに、今後の課題を第 13 章に示した。

本調査の実施により得られた成果が、サイクル機構殿の推進している「瑞浪超深地層研究所計画」の今後の工事や研究の円滑な進捗に少しでも寄与できるものと考える。

## ＜参考文献＞

- 1) (社) 日本コンクリート工学協会：コンクリート診断技術 '02 [基礎編], (2002)
- 2) (社) 日本建築学会：コンクリート強度推定のための非破壊試験方法マニュアル, (1983.2)
- 3) (社) セメント協会：コンクリート専門委員会報告 F-18 「硬化コンクリートの配合推定に関する共同試験結果」, (1967)
- 4) 石川陽一：硬化コンクリートの配合推定の精度向上に関する 2, 3 の考察, 第 56 回セメント技術大会講演要旨, p116～117, (2002)
- 5) 大即信明, 他 : コンクリート構造物の耐久性シリーズ 塩害 (II), 1 版, 技報堂出版, p70～71, (1991)
- 6) (社) 土木学会 : 【2002 年制定】コンクリート標準示方書 [施工編], (2002)
- 7) (社) 土木学会 : 平成 11 年版コンクリート標準示方書 [施工編] - 耐久性照査型 - 改訂資料, (2000)
- 8) (社) 土木学会 : 【2002 年制定】コンクリート標準示方書 [維持管理編], (2002)