

# 垂直管渠技術評価 に関する調査研究

## 1. 序論

### 1.1 背景

らせん案内路式ドロップシャフトは、1980年代後半に米国アイオワ大学において高落差を対象に開発された落差処理工法の1つである。

本工法は、らせん状に設けた案内板により、立坑内に安定したらせん流を形成することで効率的なエネルギー減勢および空気分離を可能とする工法である。このため、底部への流下エネルギーの集中、空気混入量が軽減できることから、立坑底部に減勢施設、排気施設の設置が困難な場合に有利な工法といえる。

らせん案内路式ドロップシャフトの事例は、米国フェニックス市の下水処理施設への採用が最初である。国内では、(財)下水道新技術推進機構との共同研究成果に基づき、国内第一号のらせん案内路式ドロップシャフトが長野県千曲川流域下水道において設置された(平成8年度)。その後、施工件数が着実に増加し、平成12年度末において、全国で約150件の施工実績が報告されるまでに至っている。

### 1.2 研究目的

本研究は、千曲川流域下水道(上下流処理区)に設置された垂直管渠(らせん案内路式ドロップシャフト)を対象に、設計・施工・維持管理上の技術的課題の整理を行うとともに、水理形状の設定方法に

ついて検討することを目的とする。

- ・ 既往実験内容等の整理  
長野県、東京都、京都府 etc.
- ・ 既往文献の整理  
アイオワ大学、東京大学
- ・ 実施事例の整理
- ・ ドロップシャフトの実態調査
- ・ ドロップシャフトの水理的考察

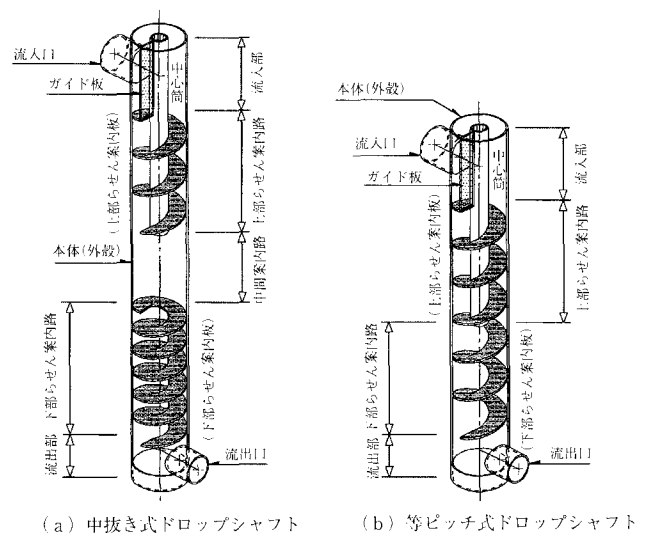


図-1 らせん案内路式ドロップシャフトの概念図

## 2. 研究内容

### 2.1 既往実験内容等の整理

らせん案内路式ドロップシャフトの既往実験成果を整理し、問題点の把握および合理的な水理形状を選定するための基礎資料としてまとめる。

表-2 既往実験の整理表

報告書名	年度	実験実施機関
斬新的な中抜き案内路落差工について	1993	東京都下水道局
大深度貯留管渠施設に関する水理実験 調査設計委託 水理実験 報告書	H4	アイオワ大学 財下水道新技術推進機構
案内路付ドロップシャフトの設計法の開発	H8	長野県千曲川流域下水道 東京都下水道局 東京大学 財下水道新技術推進機構
合流式下水道に導入する高落差工の標準化に係る共同研究 報告書	H8	東京都下水道局 東京大学 財下水道新技術推進機構
合流式下水道に導入する高落差工の標準化に係る共同研究その2 報告書	H9	東京都下水道局 東京大学 財下水道新技術推進機構
桂川右岸流域下水道雨水幹線実施設計業務委託 報告書	H10	京都府流域下水道 東京大学 財下水道新技術推進機構
溜池幹線に導入する高落差工に係る水理検討 報告書	H12	東京都下水道局 財下水道新技術推進機構

### 2.2 既往文献の整理

アイオワ大学<sup>1),2)</sup>および東京大学<sup>3),4)</sup>で実施されたらせん案内路式ドロップシャフトの代表的な研究論文の整理を行う。

### 2.3 実施事例の整理

らせん案内路式ドロップシャフトの国内施工実績は、平成12年度末時点で約150件である。

これらの施工実績に基づき、施工件数、ドロップシャフトの規模、地域別施工件数の推移について整理する。

### 2.4 ドロップシャフトの実態調査

長野県千曲川流域下水道建設事務所に対して、らせん案内路式ドロップシャフトの設計・施工・維持管理等に係る問題点についてヒアリング・実態調査を行った。

- ・設計手法について
- ・施工方法について
- ・維持管理について

・適用範囲について

### 2.5 ドロップシャフトの水理的考察

ドロップシャフト径、流入部・上部案内路、中間案内路、下部案内路、流出部の水理的考察を行い、各部形状の合理的設計方法について示すとともに、らせん案内路式ドロップシャフトの適用範囲の考え方について示す。

## 3. 既往研究成果の整理結果

### 3.1 既往実験内容等の整理結果

らせん案内路式ドロップシャフトの流入部～上部らせん案内路および下部らせん案内路の設定方法には2つの方法が提案されている。各々の方法で設計されたドロップシャフトが実績として混在しており、これら2つの方法について十分な比較検討が行われていない。また、中間案内路については、必要な水理機能と設定根拠が十分に検証されていないことが判明した。

### 3.2 既往文献の整理結果

ドロップシャフトの水理模型実験および理論的考察から得られた各部形状を設定するための解析的手法について整理した。

### 3.3 実施事例の整理結果

らせん案内路式ドロップシャフトの国内実績は、平成8年以降増加傾向にある。また、ドロップシャフトの規模（ドロップシャフト径、落差高）についても大型化の傾向にある。県別実績では長野県の64件に続き、東京都24件、大阪府10件、北海道・福島県・兵庫県3件、その他9件となっている。

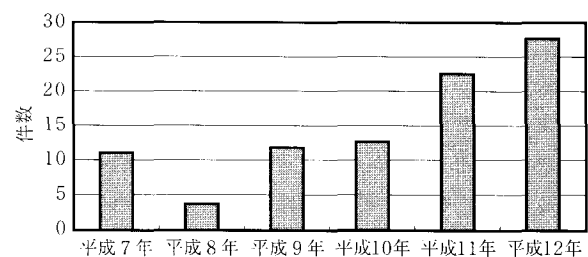


図-2 国内施工件数の推移

### 3.4 実態調査結果の整理

らせん案内路式ドロップシャフトの設計・施工・維持管理等に係る問題点についてヒアリングを行っ

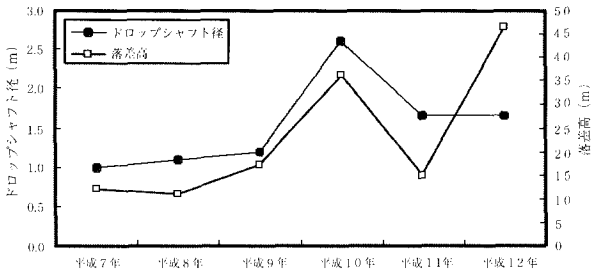


図-3 ドロップシャフト径，落差高の年最大値の推移

た。

以下にヒアリング結果を列挙する。

- ・設計対象流量の設定方法がわかりにくい (余裕率の考え方)
- ・形状選定方法がわかりにくい (流入部落差・中間案内路高さ・下部案内板間隔・流出管径)
- ・歩掛の見直しが必要 (長さによる補正の必要性)
- ・閉塞時，緊急時の具体的対策が必要
- ・検査方法等が不明瞭
- ・最低落差高を明示してほしい(副管との使い分け)
- ・材質について規定してほしい

## 4. ドロップシャフトの水理的考察

### 4.1 ドロップシャフト径

開発当初 (1993年) にアイオワ大学により提案された方法<sup>1)</sup>では，直径0.292mの標準的な中抜き式らせん案内路式ドロップシャフトに0.038m<sup>3</sup>/sの流量が安定して流れたという実験的事実に基づき，次に示すような方法を提案している。

$$Ds = 0.292 \times Lr$$

$$Lr = (Qp / Qs)^{0.4} \quad (1)$$

ここに，Ds：ドロップシャフト径 (m)，

Qp：計画流量 (m<sup>3</sup>/s)

Qs：実験により得られた安定流下流量 (0.038m<sup>3</sup>/s)

その後実施された各種実験結果を整理したところ，同様な手法でドロップシャフト径を設定しており，機能上問題とならないことを確認している。

### 4.2 流入部・上部案内路の形状

流入部・上部案内路が具備すべき要件として，①流入管に背水の影響がないこと，②安定した流況が得られることが挙げられる。したがって，流入部・

上部案内路の形状は，流入部において限界水深が現れ，シャフト内で安定した跳水が生じるような流況が得られるように設定する必要がある。

流量，流入部落差，上部案内板間隔を各種に設定し，流入部の流況を確認した既往実験結果によると，流入部の流況は次のように区分できることが判明している。

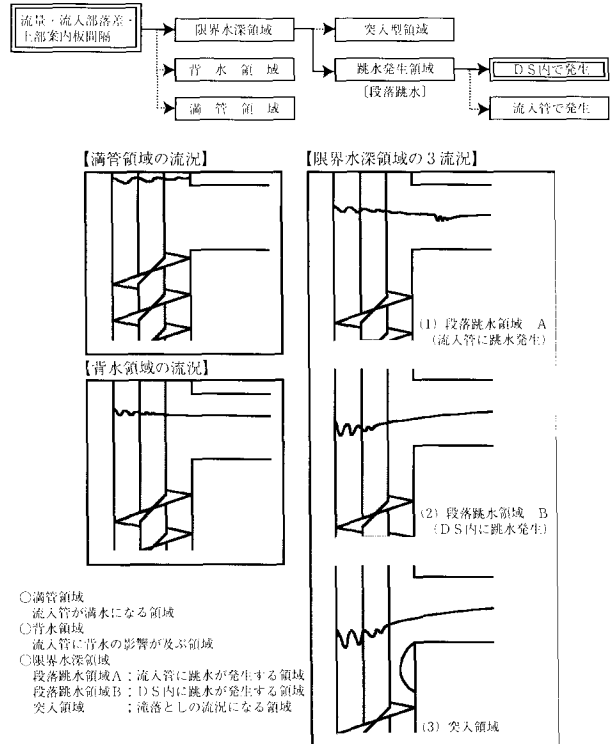


図-4 流入部の流況区分図

この中で，流入部に限界流が出現し，ドロップシャフト内で跳水が発生する領域が，流入管への背水の影響，立坑内の安定流況の観点から有利である。流入部・上部案内路の流れは，Q，H<sub>d</sub>，P<sub>i</sub>に依存することから，流入部形状を標準的に求める手法を確立するには，Q，H<sub>d</sub>，P<sub>i</sub>の変化に応じて，流入部の流況がどのように遷移するかを把握する必要がある。そこで，実験により得られた突入領域から背水領域への遷移時の条件を既設事例を含め H<sub>d</sub>/P<sub>i</sub>~Fr<sup>2</sup>関係で整理した。なお，Frは流入部のフルード数で次式により表現される。

$$Fr = Q_d^2 / D_s^2 P_i^3 \quad (2)$$

ここに，Q<sub>d</sub>は設計流量，P<sub>i</sub>は上部らせん案内板間隔，D<sub>s</sub>はドロップシャフト径である。

段落跳水 (D<sub>s</sub>内で発生) 時には，H<sub>d</sub>/P<sub>i</sub>とFr<sup>2</sup>は次図に示すようにほぼ一価的な関係が認められる。

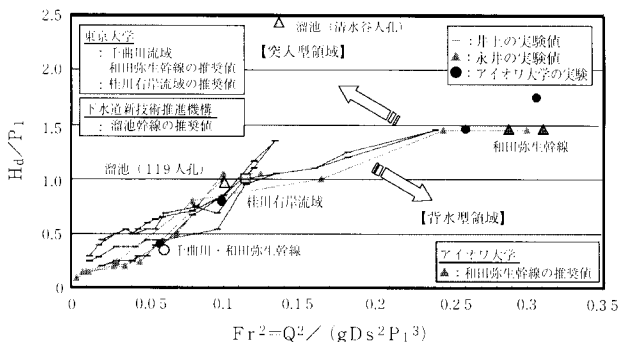


図-5 流入部の  $H_d/P_1 \sim Fr^2$

代表的事例の千曲川（長野県千曲川流域建設事務所），和田弥生幹線落差工（東京都下水道局），桂川右岸流域立坑（京都府下水道課）では， $H_d/P_1$ と  $Fr^2$ の関係は異なっているが，ほぼ同一線上に位置するため，流入部の流下能力は水理的に同程度と考えられる。

永井<sup>3)</sup>は， $Q_d$ ， $D_s$ が与えられたときに流入部の流況が段落ち跳水（ $D_s$ 内で発生）となる  $H_d$ ， $P_1$ の組み合わせを理論的に導いた（永井の提案式）。その後，井上により，理論式の修正（運動量保存則の圧力項の見直し）がなされ，流況区分図（限界領域境界線）の精度向上が図られた（井上の修正曲線）。

永井，井上の提案する判別曲線を併記したものを図-6に示す。 $Fr^2 = 0.12$ を境に実験値が理論曲線から次第に乖離することがわかる。実験結果と理論曲線との適合度に応じて2つの領域に区分した。

領域Ⅰ：実験結果と理論曲線とが適合する領域  
 $Fr^2 < 0.12$

領域Ⅱ：実験結果と理論曲線とが適合しない領域  
 $Fr^2 > 0.12$

領域Ⅰは理論の前提条件が実現象を満足することから，その前提であるフルードの相似則が模型縮尺によらず保証される領域と考えることができる。反対に，領域Ⅱは理論的に立証することができないあいまいさの残る領域と考えられる。実験結果は，理論曲線よりも背水領域にシフトしていることから，流下能力的に安全側に乖離するものと推察されるが，実験結果の信頼性を考慮し，理論の適用範囲である  $0 < Fr^2 < 0.12$ を標準設計の推奨範囲とする。

以上の考察から，流入部・上部案内路の設計の推奨範囲を  $0 < Fr^2 < 0.12$ とした。すなわち，この範囲であれば実施に適用した場合も所要の実験時流況が得られるものと考えられる。しかしながら，設計流量に対して取り得る  $P_1$ と  $H_d$ の組み合わせは無数に存在することとなるため，実用に供するには

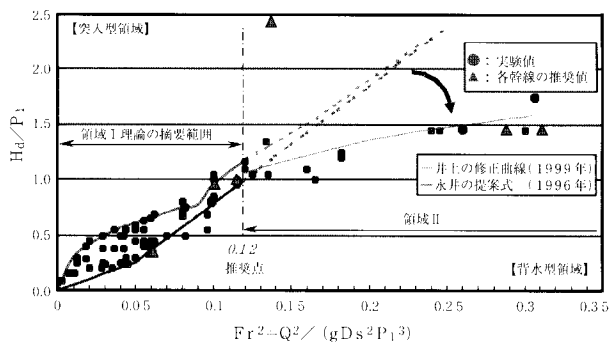
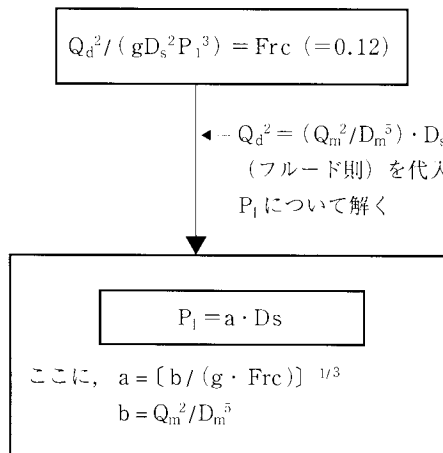


図-6 流入部の  $H_d/P_1 \sim Fr^2$ 関係

更なる推奨値の絞り込みが望まれる。現状の技術的水準においては，水理的要件のみでこれ以上の絞り込みは困難であるので，既往実績に照らして  $Fr^2 = 0.12$ の事例が多いことを踏まえ，当面この考え方を継承し，領域Ⅰの上限値（ $Fr^2 = 0.12$ ）を設計時の推奨値とする。ちなみに， $Fr$ の大きな領域を選定することは， $P_1$ を小さくすることになり，案内板の規模を小さくすることから，経済性の観点からも有利な構造と考えられる。

設計値として，領域Ⅰの上限値（ $Fr^2 = 0.12$ ）を推奨値とした。その場合，ドロップシャフト径をフルード相似則に基づき算定すると，次のように， $P_1$ ， $H_d$ を求めることができる。

$Fr^2 = [Q_d^2 / (g D_s^2 P_1^3)]$ が0.12となるように  $H_d$ ， $P_1$ を設定する。



定数  $a$ については，設計流量とドロップシャフト径の比から一義的に求めることができる。3.2項に示す方法からドロップシャフト径を算定することを前提にすると， $a \doteq 0.8$ となるので， $P_1 = 0.8 \cdot D_s$ として求めることができる。 $Fr^2 = 0.12$ 時の  $H_d/P_1$ は図-6より1.0となるので，結果的に  $H_d = P_1 = 0.8 \cdot D_s$ が導かれる。

したがって、流入部落差・上部案内板間隔の標準的設定要領は次のとおりである。

上部案内板間隔  $P_1 = 0.8 D_s$   
 流入部落差  $H_d = 0.8 D_s$

### 4.3 中間案内路の形状

上部案内路から放出された旋回流は、中間案内路において渦流を形成し、壁面に沿って流下した後に下部案内路に到達する。中間案内路が長いと、途中で渦流が消滅し、垂直落下を生じることとなる。中間案内路が具備すべき要件としては、流況安定を図り、下部案内路で分離した空気の流れを阻害することなくスムーズに上方に排出するための空断面を確保することが挙げられる。したがって、中間案内路の形状は、水脈が壁面に沿うように流下し、空気の疎通を確保できる構造とすることが必要であるが、この要件が満たされるかどうかを評価する指標として、中間案内路における渦流形成に着目した。

#### (1) 実験事例 (その1)

以下の流量・施設条件の下で行った実験では、上部案内路から放出された水脈は、中間案内路を一周した後、接線流速を確保した状態で下部案内板に到達することを確認している。図-7は、上部案内路から放出された水脈が、下部案内板に到達するまでの軌跡をプロットしたものである。なお、このときの空気連行量は流量に対し最大でも1.25%程度であった。

- ・設計流量 ( $Q_d$ ) : 2.531 m<sup>3</sup>/s
- ・流量条件 : 0.2  $Q_d$ , 0.5  $Q_d$ , 1.0  $Q_d$ , 1.2  $Q_d$
- ・ドロップシャフト径 ( $D_s$ ) : 1.6m
- ・中間案内路高さ ( $H_m$ ) : 16m
- ・ $H_m / D_s = 10$

なお、設計流量時に下部案内板一枚目に0.5 ~ 1.0  $D_s$ の空気塊を含む泡状の水面が形成された。

#### (2) 実験事例 (その2)

以下の流量・施設条件の下で行った実験では、上部案内路から放出された水脈は、流入部落差にもよるが、上部案内板下端から10 $D_s$ 付近で渦流が消滅し、水脈が管壁に沿って垂直落下したことを確認した。図-8は、このときの壁面に作用する平均圧力をプロットしたものであるが、6 $D_s$  ~ 10 $D_s$ 付近で水脈が剥離し、負圧が形成されていることがわかる。また、空気連行量についても流量に対し、最大で15.0%程度と高い値を示すことが確認された。

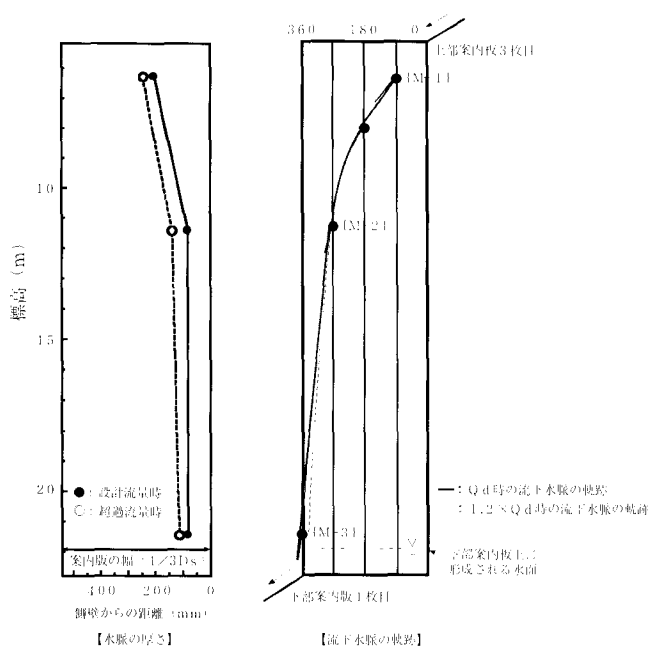


図-7 中間案内路の流況

これらの知見に基づき、中間案内路高さを短縮するための対策として、中間部にらせん案内板が設置された。この結果、安定した渦流が中間案内板の下方で再形成され、空気連行量も4.3%まで低減した。

- ・設計流量 ( $Q_d$ ) : 3.0 m<sup>3</sup>/s
- ・ドロップシャフト径 ( $D_s$ ) : 1.65 m
- ・流入部落差 ( $H_d$ ) :  $D_s$ ,  $2P_1$ ,  $2 D_s$  (m)
- ・中間案内路高さ ( $H_m$ ) : 31m  
→中間らせん案内板設置後 14 m
- ・ $H_m / D_s = 19$   
→中間らせん案内板設置後 8

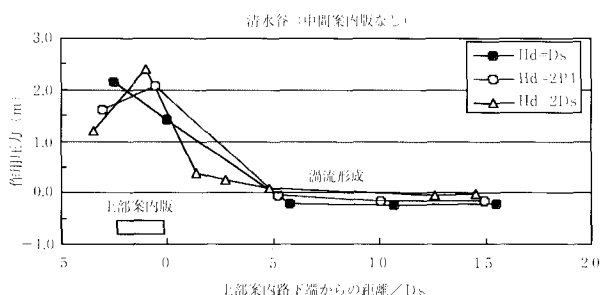


図-8 中間案内板がない場合の側壁の作用圧力

2つの実験で判明したことを要約すると、以下のとおりである。

- ・上部案内路から放出された旋回流が安定した渦流を確保できる限界高は10 $D_s$ 程度と考えられる。
- ・中間案内路が10 $D_s$ を超えると、渦流が消滅し、

垂直落下を開始するが、19Ds 程度までは壁面に沿う流れが存在することが確認された。

空気連行量は、中間案内路が渦流が維持される10Ds 以下の場合7%未満であるが、19Ds の場合は15%にまで増加する。

#### 4.4 下部案内路の形状

下部案内路が具備すべき要件として、流水が余裕を持って流下し、空気分離を確実に行うことが挙げられる。したがって、下部案内路の形状は、安定したらせん流を形成し、所要の空芯断面を確保するように流下することが必要である。

$P_2$ はドロップシャフトの規模によらず、一義的にドロップシャフト径の1/2程度とすることができる。

したがって、下部案内板間隔の標準的設定要領は次のとおりである。

$$\text{下部案内板間隔} : P_2 = 0.5 D_s$$

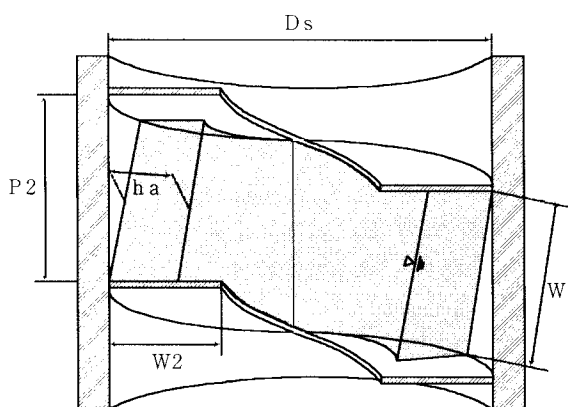


図-9 下部らせん案内路の流況

#### 4.5 流出部の形状

流出管径は、ドロップシャフト径の1/2に絞る形状が一般的である。これは、流出管径を1/2Ds 程度とする形状が設計流量に対して空気連行量が最も少なかったという実験的事実に基づいている。現状では、流出管径と空気連行量との間連について十分な知見は得られていないが、標準的なドロップシャフトにおいては、流出管径 ( $D_2$ ) をドロップシ

ャフト径の1/2程度とすることを基本とする。

(参考文献)

- 1) S.C.ジェイン他:斬新的な中抜きらせん案内路落差工に関する水理実験報告書, アイオワ大学, 1993.
- 2) Kenedy, J.F.他" The helicoid ramp dropshaft"; J.Hydr.Eng., ASCE, Vol.114, No.3, 1988.
- 3) 永井秀樹, 案内路付ドロップシャフトの設計法の開発, 東京大学修士論文, 1996.
- 4) 井上 学: 高落差立坑に用いる螺旋案内板の設計法に関する研究, 東京大学卒業論文, 1999.

#### ●この研究を行ったのは

事務局次長兼企画部長 鈴木 茂  
 企画部事業課長 松本 征

#### ●この研究に関するお問い合わせは

事務局次長兼企画部長 鈴木 茂  
 企画部事業課長 稲毛 順二