

無人化ニューマチックケーソン工法による沈殿池型貯留施設の提案

SEDIMENT STORAGE FACILITY BY UNMANNED PNEUMATIC CAISSON METHOD

水江功一 *・荒木繁雄 **・平野昌治 ***・新井孝弘 ***・飯田博光 ***・滝本孝哉 ****

Koichi MIZUE, Shigeo ARAKI, Masaharu HIRANO, Takahiro ARAI, Hiromitsu IIDA and Takaya TAKIMOTO

Sediment storage facilities constructed by the unmanned pneumatic caisson method are vertical underground storm water reservoirs with storage capacity of between 10,000 m³ and 30,000 m³. They can be constructed in urban areas where space is limited. In this study we proposed methods for improvement of the quality of stored water, a self-cleaning function, a rational structural analysis method for caissons, seismic evaluation, and an economical maintenance system for storage facilities with depths of 40 m to 60 m.

Keywords : sediment storage facility, unmanned pneumatic caisson method, water quality improvement, self-cleaning, three-dimensional FEM analysis, verification of seismic safety, monitoring systems

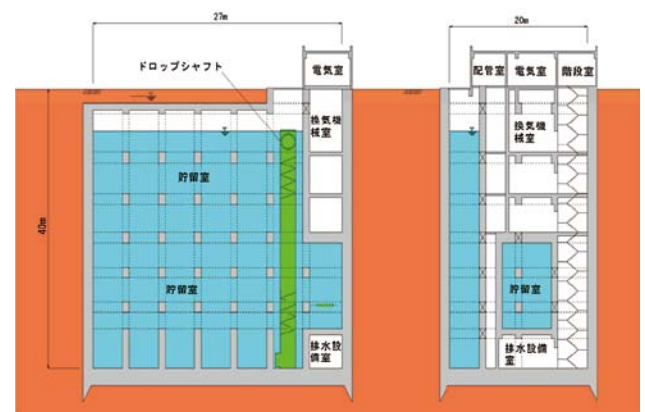
1. はじめに

近年、都市化の進展に伴い雨水流出量が増え、現状の下水道施設の能力不足による浸水被害が発生しており、早急な雨水の流出抑制対策（雨水貯留施設、雨水浸透施設など）が各地で求められている。しかしながら、地表における建築物の密集化や地中構造物の輻輳化などで、流出抑制対策施設の設置空間が十分に確保できない現状にある。このような状況を踏まえ、財団法人 下水道新技術推進機構、オリジナル設計株式会社、ジャパン・ザイペックス株式会社、大豊建設株式会社、株式会社鶴見製作所、ならびに日本シビックコンサルタント株式会社の 6 社は、2006 年度から 2 年間に亘り、狭隘な場所でも合理的に雨水貯留施設を構築できる工法に関する共同研究を行った。研究の成果は、財団法人 下水道新技術推進機構より「無人化ニューマチックケーソン工法による雨水貯留施設技術マニュアル」¹⁾（以下、技術マニュアルと称する）として、2008 年 3 月に発行されている。本報告は、技術マニュアルに記載されている事項の内、日本シビックコンサルタント株式会社が主に担当した下記の研究成果について紹介するものである。

- ・自浄機能付き沈殿池型貯留施設
- ・合理的な断面設計と耐震照査
- ・モニタリングシステムを用いた維持管理手法

2. 無人化ニューマチックケーソン工法による雨水地下貯留施設の概要

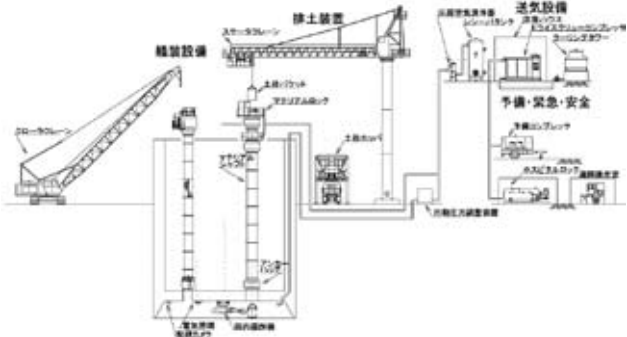
雨水地下貯留施設は、基本設備として流入設備・貯水槽・排水設備・換気設備・電力設備・照明設備等で構成され、必要に応じて汚泥撤去設備・脱臭設備・滅菌設備などを配置する計画である（図－1）。



図－1 縦型雨水貯留施設の概要例
（引用：技術マニュアル、図 2-1、p. 6）

都市部の狭隘な土地に雨水貯留量 10,000 ～ 30,000m³ の規模の施設を確保するためには、おおむね 20 ～ 60m の縦に深い構造物が必要となる。縦に深い施設の構築方法として、周辺への施工影響が少なく、高い地下水圧と深度方向の土質変化に対応可能な無人化ニューマチックケーソン工法を選定した（図－2）。無人化ニューマチックケーソン工法は、作業室内における掘削作業を地上からの遠隔

操作で行う工法で、掘削機械の保守点検作業などを除いては掘削作業のすべてを機械化しており（写真－１）、とくに函内ゲージ圧が 0.18MPa を超える高気圧作業の場合は有人掘削よりも作業効率が優位である。



図－２ 無人化ニューマチックケーソン工法概要
（引用：技術マニュアル、図 2-5、p. 10）



写真－１ 遠隔操作型掘削機
（引用：技術マニュアル、図 2-6、p. 10）

表－１ 雨水貯留運用形態と排水方式
（引用：技術マニュアル、表資 4-17、p. 225）

方式	単一水槽式			分割水槽式		水質対応式
項目	全水貯留型	直列排水型	大小ポンプ型	分割配置型	集中配置型	
概観図						
説明	満水位へ貯留後直ちに複数のポンプで排水する。	直列に設置されたポンプを水位によって運転台数を切り替えて排水する。	水位によって高揚性・低揚性のポンプを切り替えて排水する。	貯留槽を上下に分割、上層のポンプで配管を切り替えて段階排水する。	貯留槽を上下に分割、下層のポンプで配管を切り替えて段階排水する。	貯留槽で一定時間滞留させることで水質を分離し、水質毎に排水する。
ポンプ台数	2台	4台	4台（大小各2台）	4台（上下各2台）	2台	4台（上流水・懸濁水ポンプ各2台）
土木構造	単純 ○	単純 ○	単純 ○	分割で複雑 △	分割で複雑 △	やや複雑 △
排水効率	△	○	○	○	○	○
貯留効率	△	△	△	◎	◎	△
運転制御	○	△	○	△	△	△
保守点検	◎	○	○	○	○	○
特徴	1. 水質が汚い場合排水効率が悪くなる。 2. 水質が汚い場合、ポンプが故障する可能性がある。	1. 水質が汚い場合排水効率が悪くなる。 2. 水質が汚い場合、ポンプが故障する可能性がある。	1. 排水費用が高くなる。 2. 水質が汚い場合、ポンプが故障する可能性がある。	1. 貯留量が少ない場合は、貯留および排水共に効率的である。 2. 排水後が数日間必要となるため、検索性・保守性が悪くなる。	1. 貯留量が少ない場合は、貯留および排水共に効率的である。 2. 配管の切り替えが必要となる。	1. 水質の排水先の選別が可能となる。

縦型雨水貯留施設の計画は、（社）日本下水道協会「下水道雨水調整池技術基準」の考え方を基本としつつ、既存

42ヶ所の貯留施設について全国 15 の自治体へ施設の計画・規模ならびに設備配置、運用状況などについてアンケート調査を行い、縦型の雨水貯留施設に適した仕様としている。とくに、縦に深い構造であることから、排水設備については、表－１に示す貯留運用形態と、それに対応する排水方式の計画例を示し、地域性に合わせた合理的で経済的な縦型雨水貯留施設の運用例を示している。

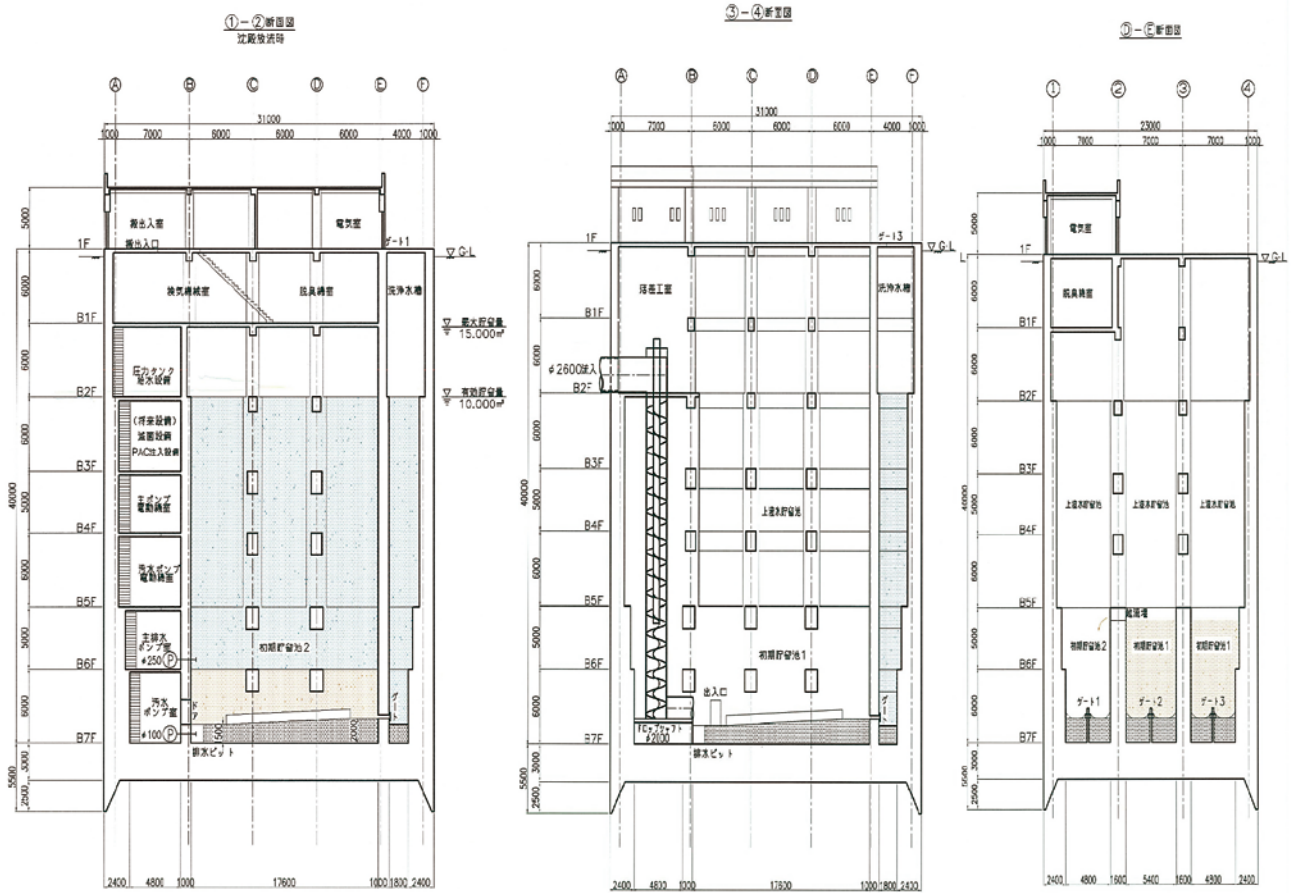
ニューマチックケーソン躯体の設計は、日本圧気技術協会「大型地下構造ケーソン設計マニュアル」に準拠しつつ、雨水貯留施設特有の繰返し貯留水圧の作用や乾湿繰返し環境に対して耐久性を確保するための要求性能を明示している。

3. 自浄機能付き沈殿池型貯留施設

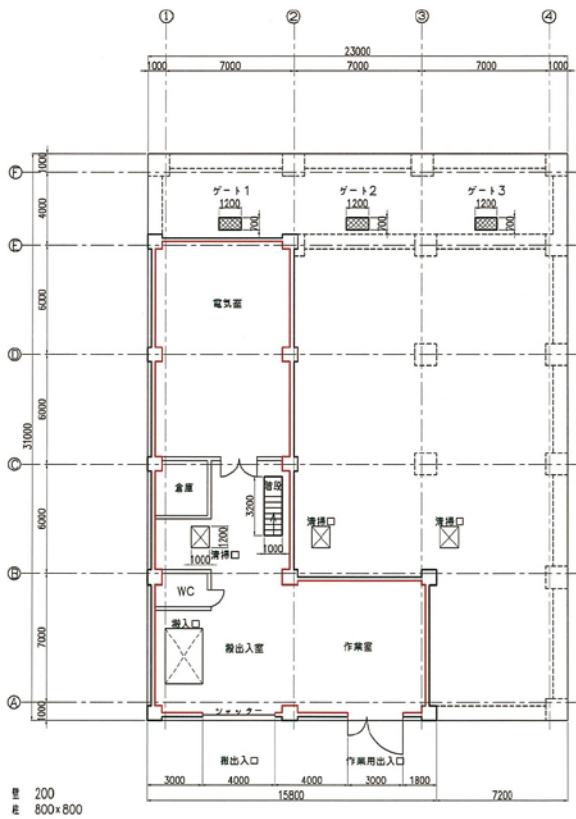
都市部の雨水流出抑制対策として、降雨ピーク時の雨水量の抑制を目的とする「雨水流出抑制型貯留施設」は、ピークカット時の「量対策」として計画されている。しかしながら、これに加えて、近年は、環境に良くない浸水時の「質対策」も求められるようになってきた。「質対策」の1つとして、公共用水域への汚濁負荷流出量の削減が挙げられる。市街地の小スペースに構築される「無人化ニューマチックケーソン工法による雨水貯留施設」は、縦に深い形状から貯留時に水の沈降分離を期待するための「沈殿時間」と「表面負荷率」を確保しやすい深い水槽構造をしている。これより、貯留施設の縦に深い形状の特性を活かした合流改善対策を有する貯留構造を考案し、加えて貯留水の位置エネルギーを利用した洗浄機能により電力消費を抑制する沈殿池型貯留施設を提案した。

(1) 沈殿池型貯留施設の構造

貯留量 10,000m³ の矩形の雨水貯留施設を図－３に示す（技術マニュアルでは、10,000～30,000m³ の貯留規模を対象にしている）。貯留水は、浮遊物質の沈降速度を速める有効な上向き流の手法を採用し、ドロップシャフトを用いて、1cm/s 程度の流入上向き速度による流入形態とした。貯留水の分配系統は沈殿法により沈降分離され、深さ方向に 1F から B5F に貯留された上澄水は、上段の主排水ポンプで公共用水域の河川へ放流する。ここでは、「水質汚濁防止法」や「市町村公害防止条例」などの水質規制値（BOD、SS、DO、大腸菌群数値など）を満足する水質のものであれば、公共用水域へ排水できることを仮定している。水槽下部に沈殿した懸濁水は B5F～B7F に貯留され、低段の汚水ポンプで下水処理場に戻す。懸濁水を貯留する水槽下部は、ケーソン施工時に生じるねじりなどの作用力に対する抵抗部材として施工される吊桁部材を活用して 3 室に分割し、流入量に応じた段階貯留を行うとともに独立した排水ポンプによる排水制御を行うことができる。



1 F 平面図



B 7 F 平面図

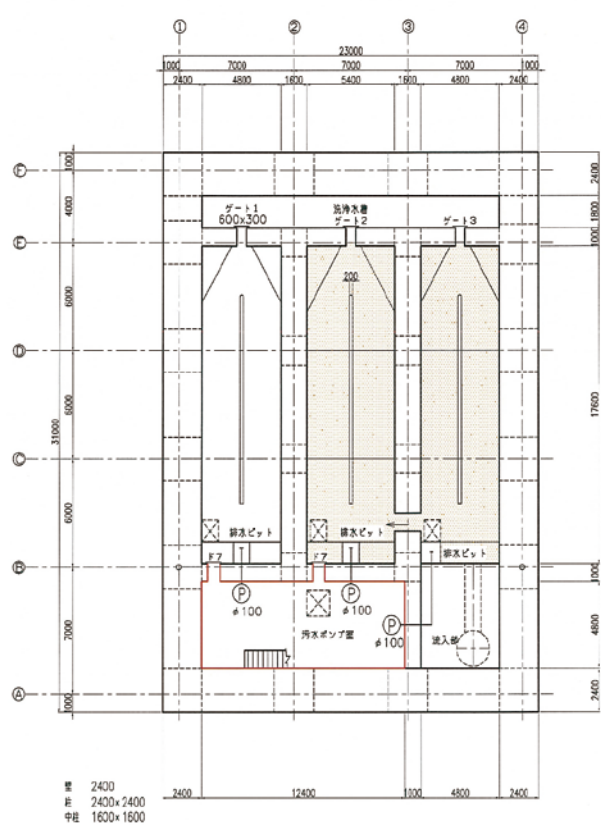


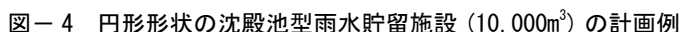
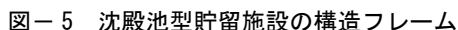
図-3 矩形形状の雨水貯留施設 (10,000m³) の計画例

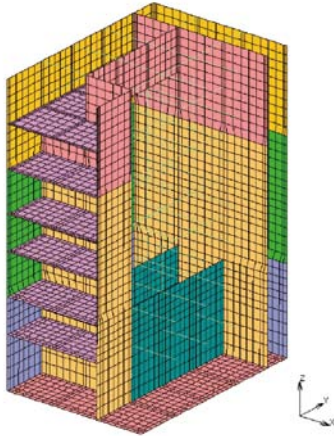
貯留施設には3室の各々に洗淨水槽を設置した。洗淨水槽には上澄水を貯留し、懸濁水の排出後に洗淨水槽の下部に設置したゲートを開放して、懸濁水槽の底面を洗淨する。これにより、し渣や沈砂の清掃に関する維持管理コストの大幅な低減を図ることが可能になる。

貯留量 10,000m³ の円筒形の雨水貯留施設を図－４に示す。縦に深い円筒形状の構造物は、壁面の応力状態が軸力卓越となり構造上で有利になる反面、貯留施設内の部屋割りにデッドスペースが生じるなどの欠点がある。図－４は、貯留施設内の設備を円形中央に集め、流入系統および排水系統、自動洗浄をドーナツ状に直列に配置することで、懸濁水の３室分離の分配系統の考え方を矩形形状と同様に維持しつつ排水ポンプの数を減らすなどの工夫したものである。

沈殿池型貯留施設は、地上部の管理棟建築物と地下部の貯留施設土木構造物の両者を併せた「建築複合構造物」に分類される。技術マニュアルは、地上部の建築構造物と地下部のケーソン躯体の貯留施設を一体にして構造解析する

手法を基本としている。既設の多くの貯留施設の設計で使われている構造解析手法は、立体フレーム解析ソフトである（図－5）。立体フレーム解析は、貯留施設を柱および梁構造でモデル化し、壁や床は柱や梁に支持され、その面積に作用する荷重に対して構造設計する手法を一般に用いている。つまり、ケーソン躯体に作用する外荷重に対しては、柱と梁のみで抵抗する設計となっている。そこで、ケーソン躯体部分の構造設計について、三次元 FEM 解析シェルモデル（図－6）を用いて、壁や床部材も外荷重の抵抗部材として柱と梁部材と同様にモデル化して試算した結果、主要な部材において約 6% の鉄筋量の低減が図れた。このように、ケーソン躯体の部材設計に三次元 FEM シェルモデルを用いることで、経済的な設計になると言える。しかし、相応の構造解析費用が必要なことや、外荷重に対し合理的に設定した構造部材が、ケーソン施工時の施工時荷重など、本解析で考慮していない荷重に対して安全か、などの検証が課題として残されている。





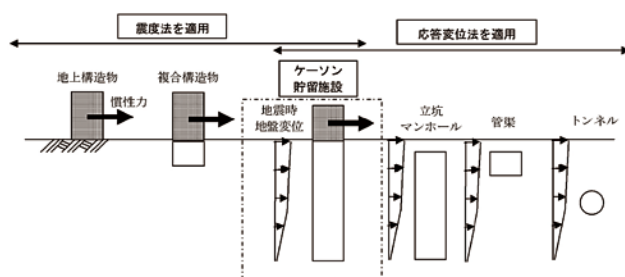
図－6 三次元 FEM 構造計算モデル（カットモデル）

(2) 縦に深い構造物の耐震照査手法の提案

従来の雨水貯留施設は、施設面積が広く、深さはおおむね 20m より浅い場合が多いので、地上部の管理棟建築物とともに耐震照査は震度法が一般に用いられている。しかし、ケーソン貯留施設は地中に深い形状を特徴としており、地震時の地盤変位の応答を強く受ける構造物であることから応答変位法が適している（表－2）。そのため、雨水貯留施設が地上に管理棟建築物を有する複合構造物であることも考慮して、地下の貯留施設部の応答変位法の解析モデルの上端に地上部の管理棟建築物の慣性力を作用させた応答変位法と震度法を組み合わせた耐震設計法を提案している（図－7）。

表－2 ケーソン貯留施設の耐震設計法としての震度法と応答変位法の適用性

	震度法	応答変位法
手法の概要	・構造物の自重に設計震度を乗じて求めた慣性力を地震時荷重として構造物に作用させる耐震設計法	・地震時の地盤変位を地盤ばねに於いて求めた地震時土圧を構造物に作用させる耐震設計法
適用構造物の例	・地上構造物 ・複合構造物 ・擁壁、等	・函渠 ・トンネル ・立杭、等
一般的適用性	・主な地震の影響が、慣性力となる地上構造物の耐震設計法。地下構造物の内、地上部の慣性力の影響が大きくなる複合構造物や、常時に主軸土圧が作用している擁壁等の耐震設計にも用いられる。	・常時には静止土圧が作用しており、主な地震の影響が地盤変位となる地中構造物の耐震設計法。
ケーソン貯留施設への適用性	・地上の建築構造物や地下部の内慣性力の影響が大きくなるケーソン上部の耐震設計法として有効である。	・建築構造物の慣性力の影響が及ばない地中深い深度の耐震設計法として有効である。



図－7 耐震設計法の適用区分

応答変位法に適用する地震時荷重は、地震時の地盤変位によるものである。応答変位法では、地震時の地盤変位を、式（1）で求めることができる。

$$u(z) = \frac{2}{\pi^2} \times S_v \times T_s \times \cos\left(\frac{\pi z}{2H}\right) \quad (1)$$

ここに、 $u(z)$: 地表面から深さ z (m) における地盤変位 (m)

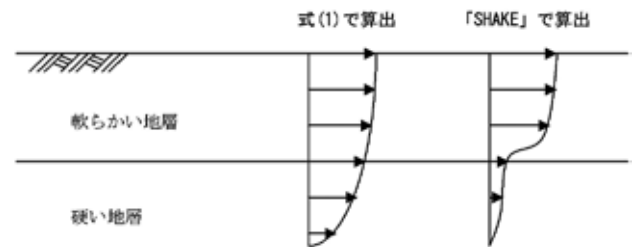
z : 地表面からの深さ (m)

H : 表層地盤の厚さ (m)

S_v : 設計速度応答スペクトル (m/s)

T_s : 表層地盤の固有周期 (sec)

式（1）によると、地盤の深度方向の変位分布がコサインカーブとなることは明らかである。地盤変位をコサインカーブで求める場合は、表層地盤を 1 層系の地盤として扱う。このように、式（1）は、比較的簡便な方法であるが、仮定を含んでいる。地盤が硬い場合、地盤変位は小さくなる。とくにケーソン貯留施設が深い場合には、深い深度で硬い地層が出現する可能性が高くなる。表層地盤の地層構成が複雑な場合、コサインカーブで求めた地震時の地盤変位と実際のものと誤差が大きくなることが考えられる。このような場合、地震時の地盤変位を式（1）ではなく、より詳細な「SHAKE」等の解析で求めることがある。コサインカーブで求めた地盤変位と「SHAKE」で求めた地盤変位の概念を示したものが図－8 である。



図－8 地盤条件と算出手法による地盤変位分布の違い（概念図）

図－8 から、地盤変位を式（1）で求めると、深い深度では過大設計となり、地層境界では危険側の設計になることがわかる。このような場合、地盤変位を「SHAKE」等の解析から求めるのが良いと考えられる。「SHAKE」は、N 値がわかっているならば実行することができるが、より詳細に行う必要がある場合は、PS 検層や動的変形特性試験の実施が望まれる。耐震設計に用いる地盤変位を式（1）から求めるか、「SHAKE」から求めるかは、地盤条件を考慮した上で判断することが望ましい。

5. モニタリングシステムを用いた維持管理手法

貯留空間が雨水の貯留と排出による乾湿繰り返し環境下

にあり、ケーソン沈下時に施工時荷重を受けるケーソン躯体の長寿命化を図るためには、劣化進行度合いと対策費用の関係を見極めた適切な維持管理が必要となる。貯留水の内水圧は壁面内側のひび割れを開かせるが、排出時にはひび割れは閉じてしまう。加えて、貯留空間が縦に深い構造であることから、上部の壁面劣化状態などを日常の維持点検で把握することは難しい状況にある。このような状況を踏まえると、合理的な維持管理を実現する手法として、図-9に示すラダーモニタリングセンサーを壁体の主要な箇所配置し、継続的な監視を行い、長期維持管理計画を逐次見直すことで、LCCを最適にすることが可能となる。

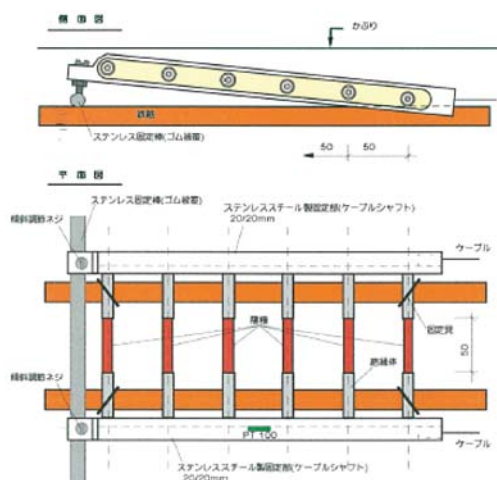


図-9 ラダーモニタリングセンサー概要

ラダーモニタリングシステムは、図-9のラダーモニタリングセンサーを主筋の被りコンクリート内に設置し、図-10に示すように部材の断面深さ方向に躯体表面からセンサー鉄筋が段階的（A1→A2→・・・→A6）に腐食する時期と速さとの相関値として把握し、腐食性環境が主筋に及ぶまでの時間を推定するものである。

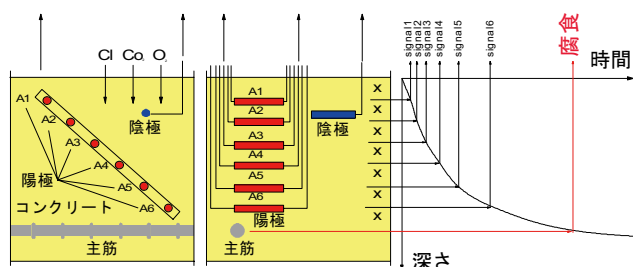


図-10 腐食モニタリングシステムイメージ

腐食劣化部を早期に発見した場合は、壁面の表面をはつりだした後に補修被覆する「表面処理工」で対応できるが、主鉄筋の腐食が始まった時点では腐食鉄筋の防錆材処理など「断面修復工」が必要となる。断面修復工の費用は表面処理工のおおむね3倍と試算される。50年間の維持管理期間において、図-9に示すラダーモニタリングセンサー

を主要な15箇所に配置した「予防保全型維持管理」は、5年に1回の大きかりな点検作業（貯留槽内に足場を組立て検査する）で異常を発見した都度に補修を行う「更新型維持管理」と比較して約20%のコスト縮減となる試算結果となった。なお、ラダーモニタリングシステムは、ドイツのアーヘン工科大学で考案され、世界13ヶ国37事業に設置されている。日本では外郭放水路のトンネルセグメントならびに、秋田中央道路トンネル、営団13号線トンネルの劣化監視計測に採用されている。

6. おわりに

無人化ニューマチックケーソン工法は、品質の優れた地下構造物を安全かつ経済的に構築できる工法で、各地の多様な場面で採用されてきている。本技術マニュアルは、雨水貯留槽に必要な施設および設備の基本的な考え方と維持管理、ならびに無人化ニューマチックケーソンの設計および施工方法、積算が網羅されている。これらの研究成果が各地の雨水貯留施設の構築に少しでも役立てれば幸いである。

参考文献

- 1) 財団法人 下水道新技術推進機構：無人化ニューマチックケーソン工法による雨水地下貯留施設技術マニュアル、2008.3

【新技術研究成果証明書】

