

常時微動測定を用いた水道施設耐震診断の事例報告

日本上下水道設計㈱ 馬場 啓輔, 大嶽 公康

1. 序論

水道施設の耐震診断において、常時微動測定結果を用いて地盤や構造物の振動特性を評価した事例は殆どないが、常時微動に含まれる地盤や構造物の振動特性評価に関する研究成果は数多くあり、鉄道をはじめ橋梁、港湾等の分野では実用化が進んでいる。2009年度に改定された「水道施設耐震工法指針・解説²⁾」では、性能設計が本格導入され、動的解析による耐震計算手法の適用範囲が拡大されており、地盤や構造物の動的挙動を精度よく評価することは、水道施設を設計する上で重要となっている。

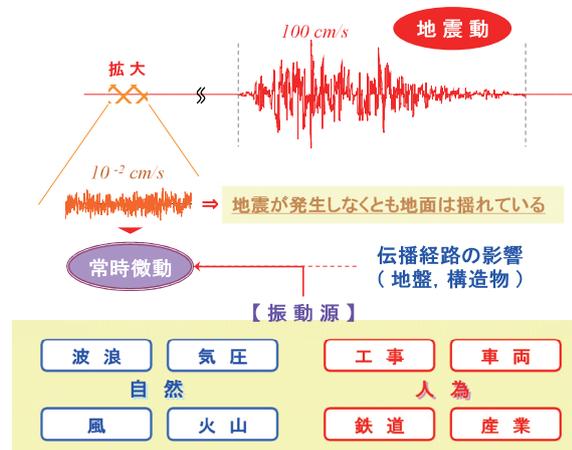
本稿では、常時微動を用いた地盤及び構造物の振動特性評価の一例を紹介するとともに、その評価結果を耐震診断における解析モデルの検証に適用した事例について報告する。

2. 常時微動の概要

2.1 常時微動の特性

常時微動は、地盤中を伝播する人工的または自然現象による振動のうち、数 10^{-2} cm/s 程度の微小な振動を指す。地盤や構造物で計測される常時微動は、これらの振動がさまざまな経路を通ったのちに観測されるものであり、地盤や構造物の振動特性等の情報を多分に含むことから、地震推定調査をはじめとする研究報告や活用事例が国内外で増加しつつある(図-1)。

常時微動の周期特性は、同一地点で観測された地震動の周期特性と一致する部分が多く、ある地点の常時微動測定結果から、地震発生時の振動特性をある程度予測することが可能となる。



(常時微動測定の活用例)

- ・ 周期頻度解析と地盤種別の判定
- ・ 常時微動と地震動のスペクトル対比による地震動特性推定
- ・ 建築構造物等の振動特性評価
- ・ 道路構造物の床版劣化診断

図-1 常時微動の概念図

2.2 常時微動測定

常時微動測定は、センサー部、AD変換部、増幅器により構成された常時微動計(図-2)を用いて測定する。モバイルPCがあればどこでも測定可能であり、測定は数分/回で完了し、機器設置を含めても10分/箇所程度と非常に簡便である。

測定は比較的平坦な場所を選定して行い、観測結果は水平成分(X, Y成分)と上下成分(Z成分)の波として得られる。常時微動の振幅は、測定対象が硬い場合は小さく、柔らかい場合は大きく観測される。さらに、振動の卓越周期は、前者では短く、後者では長くなる傾向がある。

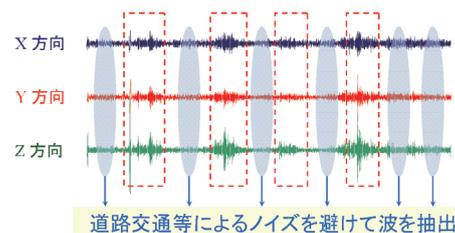


図-2 常時微動測定機器と観測波

3. 常時微動測定

3.1 対象施設及び地盤概況

以下に、3 浄水場における微動測定位置をそれぞれ示す。常時微動測定は、場内の沈澱池、急速ろ過池、高架水槽等を対象として、1 施設につき「地表面、躯体基礎（または1階）、躯体天端（または地下）」の3箇所で実施した。また、既存ボーリング調査が実施された箇所においても測定を実施し、常時微動から得られた評価結果との比較を行った。

(1) 浄水場 A

浄水場 A における常時微動測定位置を図-3 に示す。浄水場 A 内の表層地盤は、地表から 25m 程度まで軟弱な粘土層が主体であり、工学的基盤は地表から約 40m に分布する礫混じり粗砂層である。標準貫入試験 N 値から算定した地盤固有周期 T_G は 0.6~0.7 秒であり III 種地盤と判定される。場内は平坦で工学的基盤面や地質の変化もなく、地盤条件は均一である。

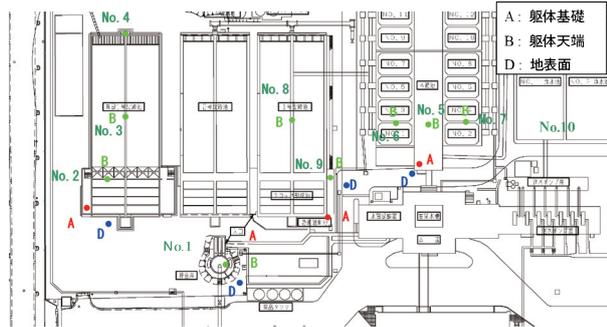


図-3 常時微動測定位置（浄水場 A）

(2) 浄水場 B

浄水場 B における常時微動測定位置を図-4 に示す。浄水場 B 内の表層地盤はローム及びシルトの粘性土が主体であり、工学的基盤は地表面から約 15~20m に分布する砂質泥岩層である。標準貫入試験 N 値から算定した地盤固有周期 T_G は 0.4~0.5 秒であり II 種地盤と判定される。場内の地形は概ね平坦であるが、場内の南部エリアに比べて北部は 3m 程度高くなっている。

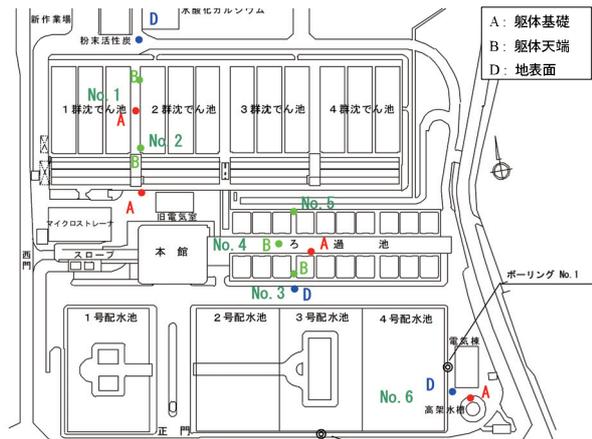


図-4 常時微動測定位置（浄水場 B）

(3) 浄水場 C

浄水場 C における常時微動測定位置を図-5 に示す。浄水場 C 内の表層地盤は粘性土が主体であり、工学的基盤は地表面から約 10m 前後に分布する砂礫層である。標準貫入試験 N 値から算定した地盤固有周期 T_G は 0.1~0.2 秒であり I 種地盤と判定される。場内は既存ボーリング調査が比較的多くあり、平坦で工学的基盤面や地質に大きな変化もなく、地盤条件は均一である。

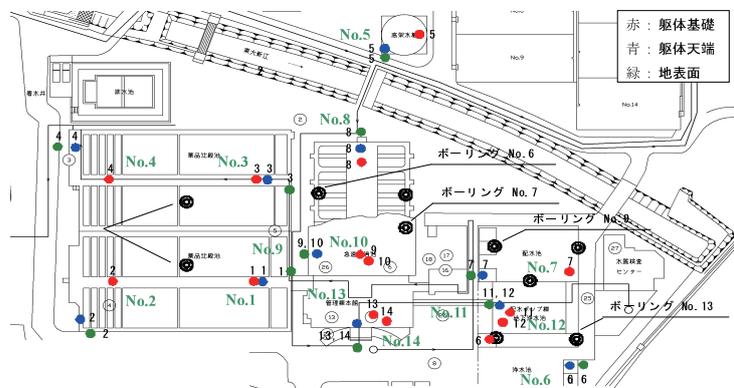


図-5 常時微動測定位置（浄水場 C）

3.2 常時微動測定を用いた地盤振動特性の評価

(1) 常時微動測定による地盤振動特性評価方法

既設建造物の耐震診断を実施する場合、地質調査位置や調査内容に制約を受けるケースが多く、対象施設近傍で地質調査が行われていないケースも多い。耐震設計上の地盤種別の判定に用いる地盤固有周期は、PS 検層等のせん断弾性波速度を用いて、1/4 波長則に基づく算定式により求めることが一般的であるが、「水道施設耐震工法指針・解説 2009 版²⁾」によると、施設の建設地点における地震観測記録や常時微動測定を用いて地盤の卓越周期を推定する手法についても推奨されている。

中村ら¹⁾、紺野ら³⁾の研究では、微動に表面波が優勢に含まれることを前提として、微動の水平動と上下動の振幅フーリエスペクトルの比（以下、H/V スペクトル比）が表層地盤の振動

特性と類似することを利用した地盤振動特性推定方法を提案している（表-1）。この方法では、H/V スペクトル比のピーク周期を「地盤の卓越周期」、その周期における振幅比の値を「表層地盤の増幅率」とみなすことで、強震記録のない地点においても地盤振動特性を簡便に求めることが可能となる。

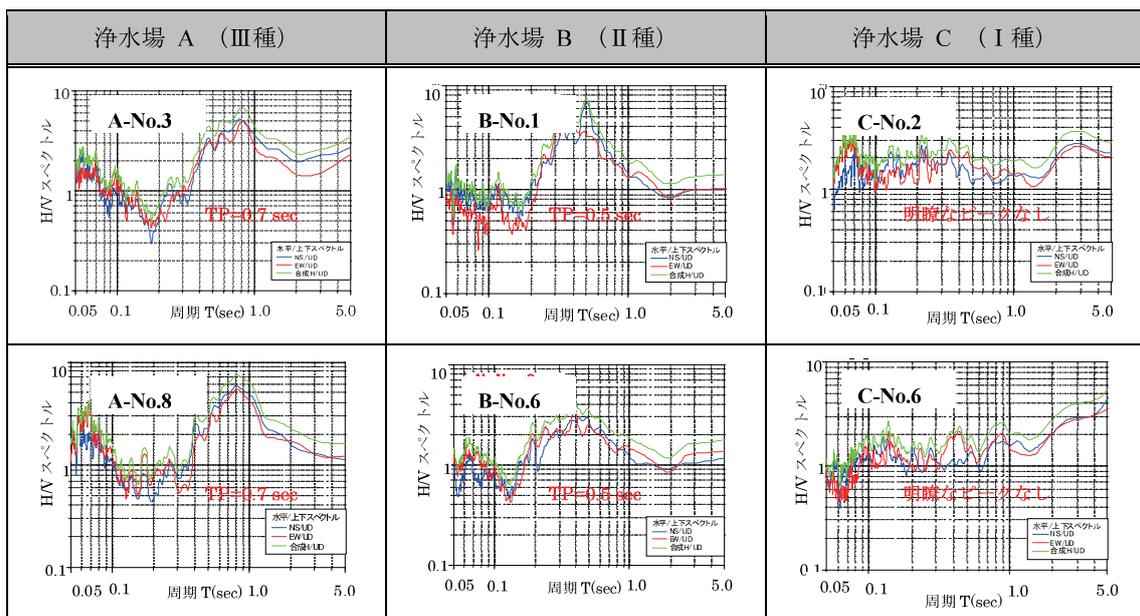
表-1 地盤特性推定手順

地盤特性推定手順	入手情報
1. 常時微動測定 「時刻層波形観測」 ・水平成分(X, Y) ・上下成分(Z)	(時刻層波形 3成分)
2. フーリエ変換 「観測波周期特性」 ・水平成分(X, Y) ・上下成分(Z)	(フーリエスペクトル 3成分)
3. H/Vスペクトル比 「地盤特性の抽出」 2. の水平成分を上 下成分で除す。 ・X/Z, Y/Z	(卓越周期, 増幅率)

(2) 常時微動測定を用いた地盤振動特性評価結果

各浄水場における地表面での常時微動測定 H/V スペクトル比を以下の表-2 に示す。H/V スペクトル比のピーク位置から算出した地盤卓越周期は、浄水場 A, B において 1/4 波長則から判別した地盤固有周期とほぼ一致した。一方、浄水場 C では、H/V スペクトル比に明瞭なピークが見られなかったが、これは表層地盤が薄く、表層地盤と工学的基盤のせん断弾性波速度のコンストラストが小さいためと推察され、これまでの測定実績においても、I 種地盤では同様の傾向が多く確認されている。

表-2 地表面の常時微動測定結果（H/V スペクトル比）



3.3 常時微動測定を用いた構造物振動特性の評価

(1) 常時微動測定による構造物固有周期の推定方法

構造物の地震時における動的挙動を評価することは、耐震設計で非常に重要であり、その評価結果を踏まえた適切な解析手法・モデルの選定を行う必要がある。建築構造物等の振動特性の評価では、常時微動計を地面上、基礎部、最上階に設置し、同時に計測することが多い。卓越周期は最上階と基礎部との水平動フリースペクトル比（以下、H/H スペクトル比）により求められる。

今回の事例報告においても、同様の手法を用いて構造物の卓越周期を求めたが、対象構造物の多くは基礎部が地中にあり観測が実施できないため、躯体天端部と地上部に常時微動計を設置し、両者の H/H スペクトル比から卓越周期を推定する方法を用いた。

(2) 構造物測定位置

浄水場 A における高架水槽の常時微動観測位置および H/H スペクトルの概念図を図-6 に、沈澱池および急速ろ過池の常時微動測定位置を図-7、図-8 にそれぞれ示す。図中の赤印は、躯体天端の測点および地表面の測点を示しており、常時微動計を 2 機用いて同時刻に観測を行った。また、測点の選定にあたっては、ポンプ等の稼働機器だけでなく、埋設管路のない地表面を選定するなど、常時微動計が振動源から受ける影響を軽減するよう配慮した。

高架水槽はタンク部の上面が躯体天端の測定位置であり、構造物の重心位置とはやや異なるが、地上 20m 付近での測定であり、水平方向の振幅は大きく、周期の長い波形がみられた。地表面の測点は天端部測定箇所直下の地面上とした。

沈澱池は EXP.J を有する 1 号沈澱池と EXP.J のない 3 号沈澱池の両方で測定を行った。沈澱池は地上部の高さが躯体の半分程度であり、地表面の測定地点は基礎部よりやや上方となるが、基礎部は完全に地中にあり、地盤とほぼ一体で挙動するものと考えられる。また、躯体天端の測点は、1 号沈澱池、3 号沈澱池ともに隔壁の上面とした。1 号沈澱池の測点は、EXP.J で区切られた池中央部となる。

急速ろ過池は、図-8 の断面図の左右で地盤高さが異なっていたため、基礎部と地表面が近い断面図左側を測定位置とした。躯体天端の測点は、側壁部の上面とした。

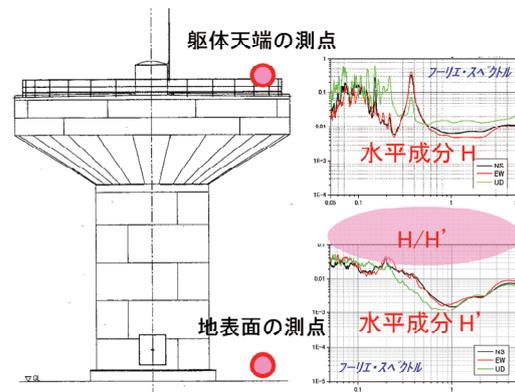


図-6 構造物の常時微動観測位置（高架水槽）

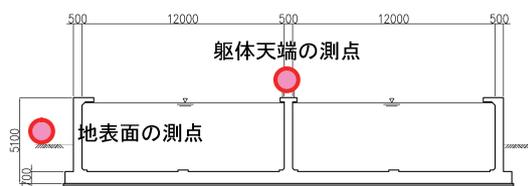


図-7 構造物の常時微動観測位置（沈澱池）

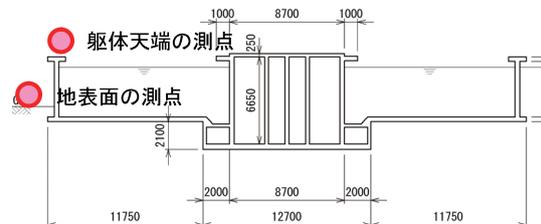


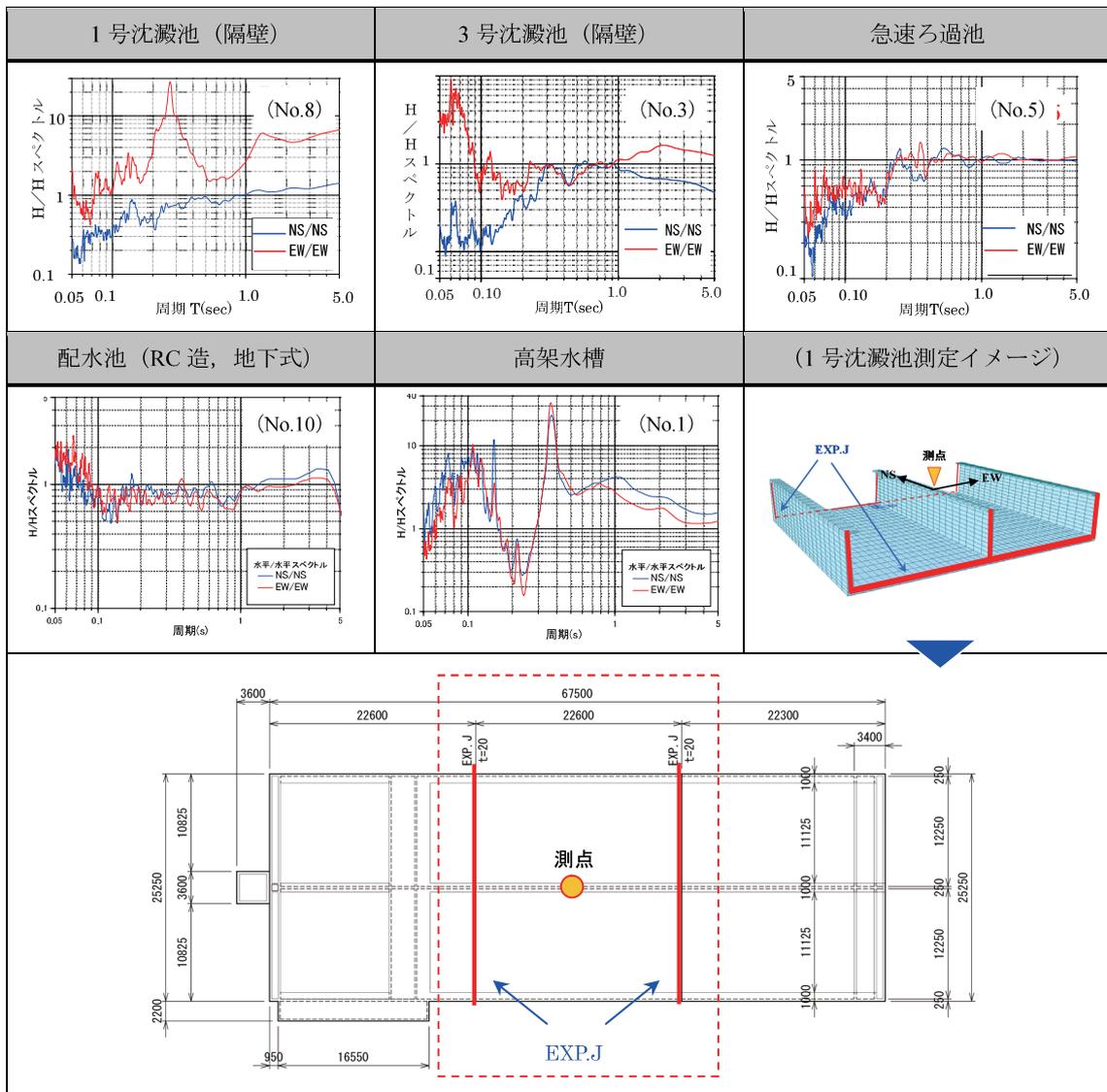
図-8 構造物の常時微動観測位置（ろ過池）

(3) 常時微動を用いた構造物振動特性評価結果

浄水場 A において沈澱池（1号，3号），急速ろ過池，配水池（RC造，地下式）及び高架水槽において，躯体天端と地表面での常時微動測定結果より算出した H/H スペクトル比を表-3 に示す。なお，1号沈澱池には隔壁・側壁を横断する EXP.J が設置されており，3号沈澱池は EXP.J を持たない構造である。

対象施設別にみると，3号沈澱池，急速ろ過池，配水池では H/H スペクトル比に明瞭なピークがみられない，あるいは，0.1 秒未満にピークが発生する結果となった。これは，地中部の割合が多い施設が地盤とほぼ同様の挙動を示すことに起因すると考えられ，これらの構造物卓越周期は 0.1 秒未満であると判断した。一方で，1号沈澱池では隔壁の天端 EW 方向（躯体短辺方向）で 0.27 秒にピークが発生した。NS 方向では3号沈澱池と同様に明瞭なピークが発生していないことから，EXP.J で縁が切られた隔壁部は壁等による拘束が少なく，3号沈澱池と傾向が大きく異なったものと考えられる。高架水槽の測定結果では H/H スペクトル比に明瞭なピークが出現し，卓越周期は 0.35 秒付近であると推測された。

表-3 構造物の常時微動測定結果（H/H スペクトル比）



4. 解析モデルの検証

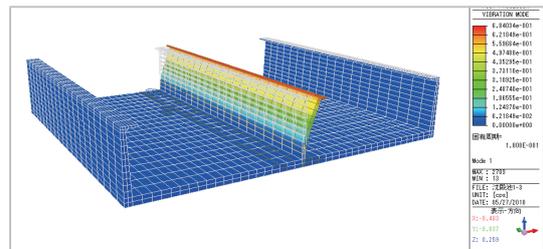
4.1 検証概要

常時微動測定結果から推定される構造物の卓越周期を、固有値解析から求められる固有周期と比較し、耐震診断解析モデルの妥当性を検証した。対象とする構造物としては、動的解析を用いる高架水槽及び H/H スペクトル比に 0.1 秒以上の明瞭なピークが出現した 1 号沈澱池を選定した。

4.2 検証結果

(1) 1 号沈澱池

固有値解析で得られた沈澱池の固有周期を図-9 に示す。図に示す 1 号沈澱池の解析モデルは EXP.J で縁が切られた構造となっており、壁による拘束は考慮されない。1 次固有周期は、0.18 秒であり、固有値解析においても 0.1 秒以上の結果が得られた。

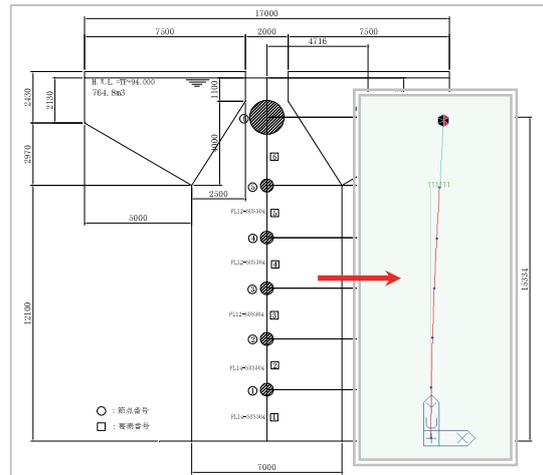


モード次数	周期(秒)	水平方向刺激係数
1	0.181	2.09
2	0.160	0.00
3	0.111	0.01
4	0.088	2.44
5	0.088	2.44

図-9 沈澱池固有値解析

(2) 高架水槽

質点系モデルを用いた固有値解析で得られた高架水槽の固有周期を図-10 に示す。解析結果より 1 次モードが支配的となり、構造物固有周期は 0.32 秒と求められた。



モード次数	周期(秒)	水平方向刺激係数
1	0.324	27.83
2	0.083	0.00
3	0.008	2.69
4	0.005	0.00
5	0.003	1.25

図-10 高架水槽固有値解析

(3) 常時微動測定結果との比較

常時微動測定による卓越周期と固有値解析による 1 次固有周期を表-4 に示す。

1 号沈澱池においては、常時微動測定結果から推定した卓越周期が 0.27 秒であったのに対して、固有値解析による 1 次固有周期は 0.18 秒とやや差異が見られた。しかし、両者の結果より 1 号沈澱池の構造物固有周期は 0.1 秒未満ではないものと判断し、EXP.J で区切られた解析モデルに用いる基準水平震度 K_{h01} 、 K_{h02} は、構造物固有周期 T を両者の平均値である 0.23 秒として算出した。なお、別途行った 3 号沈澱池における固有値解析で算出した構造物固有周期は 0.1 秒未満であった。

高架水槽においては、常時微動測定結果から推定した構造物卓越周期と固有値解析による 1 次固有周期が近い値を示しており、解析モデルは妥当であると判断した。

表-4 卓越周期と固有周期との比較

施設名称	卓越周期(秒) 常時微動測定	固有周期(秒) 固有値解析
1 号 沈 澱 池	0.27	0.18
高 架 水 槽	0.35	0.32

5. 結 論

以上の検討により、常時微動測定が水道施設耐震診断における地盤や構造物の振動特性（固有周期）の評価において有効な手法であることが明確に示された。本報告の成果を以下に整理する。

(1) 地盤卓越周期の推定による地盤種別の判定

耐震設計上の地盤種別は、常時微動測定から算出した卓越周期により地盤固有周期を推計することで、精度の高い判定結果が得られることを確認した。また、ボーリング等の地質調査箇所が少なく、地盤の評価が限定される場合において、地質調査位置での常時微動測定結果と、それ以外の位置での測定結果とを比較することにより、耐震診断に用いる地盤条件を類推することができた。

(2) 構造物固有周期の推定

建築分野で実績のある構造物の固有周期推定方法を水道施設（特に水槽構造物）に適用した結果、施設の形状や特性を捉えた常時微動測定結果を得ることができた。具体的には、沈澱池や急速ろ過池、地下式配水池のような水平剛性の高い構造物の固有周期が 0.1 秒未満であることを常時微動測定結果より検証することができた。これにより、池状構造物に震度法を適用する場合、固有周期の算定を省略することが可能であるという「水道施設耐震工法指針・解説²⁾、P125」の記述内容を裏付ける結果が得られたと考えている。

(3) 合理的な解析モデルの選定

高架水槽の固有周期を実測により算出することで、構造物の動的挙動を簡易に推定し、構造物耐震診断において適切な解析モデルの選定が可能となった。その結果、構造物の補強範囲が縮小され、事業費を低減することができた。

(4) EXPJ の解析モデルへの反映

EXPJ により水平剛性が低くなる構造物の場合は、EXPJ が設置されていない構造物より固有周期が長くなる傾向があることを常時微動測定結果により評価することができた。また、池状構造物を震度法で解析する場合において、EXPJ の影響を解析モデルに反映させる手法の一例を示すことができた。

【参考文献】

- 1) 中村豊：常時微動計測に基づく表層地盤の地震動特性の推定，鉄道総研報告，Vol.2, No.4, pp.18-27, 1988
- 2) 水道施設耐震工法指針・解説 2009 年版，(社) 日本水道協会，2009
- 3) 紺野克昭，大町達夫：常時微動の水平／上下スペクトル比を用いる増幅倍率の推定に適した平滑化とその適用例
土木学会論文集，No.525/ I -33, pp.247-259, 1995
- 4) 大嶽公康，大町達夫：人工改変地盤を対象とした水道管路の地震被害分布
土木学会年講，Vol.59, pp.1641-1642, 2004
- 5) 和泉正哲，勝倉裕，飛田潤：構造物の常時微動における振動システム
建築学会構造系論文報告集，No.409, pp.83, 1990
- 6) 馬場啓輔，大嶽公康：常時微動想定による地盤特性の評価と水道施設への適用事例
第 61 回全国水道研究発表会，pp.596-597, 2010