

誘導サイホン作用における管内圧力の解析

| | |
|-------|--|
| メタデータ | 言語: jpn 出版者: 公開日: 2018-11-16 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 藤村, 和也 メールアドレス: 所属: |
| URL | http://hdl.handle.net/10291/19702 |

誘導サイホン作用における管内圧力の解析
(Analysis of Pneumatic Pressure in Drains on Induced Siphonage)

学位請求者 建築学専攻
藤村 和也

内容の要旨

1. 本研究の問題意識と目的

衛生器具からの排水は、排水管を経て、下水道または浄化槽等に搬送される。この排水の経路は、排水が行われていない場合は、下水管からの、有害・悪臭成分が含まれている排水ガスの経路ともなりうる。そこで、その問題に対応するために、約2世紀前に排水トラップが登場した。現在の主流となっている水封式トラップは封水を保持することにより、排水ガスや衛生害虫の室内への侵入を阻止することができる。しかしながら、その封水は種々の原因で損失し、その封水損失が進展すると破封という状態に至る。破封を引き起こす原因としては、自己サイホン作用、誘導サイホン作用、蒸発、毛細管現象などが考えられるが、そのうち最も重要なものが誘導サイホン作用である。誘導サイホン作用とは、複数の衛生器具が横枝管に接続されている場合、または立て管に近接して器具が設置された場合に、他の器具の排水によって生じる管内の負圧によって封水が吸引され、サイホン作用によって封水が損失する現象で、その防止には、排水システム側の管内圧力の制御（緩和）と、トラップの耐圧力性能（管内圧力の変動に対する封水保持性能）が関連してくる。そして、その排水システム側の管内圧力の制御のためには、排水システムの排水能力（許容排水流量）を正確に予測し、排水管径を適切に設計することが重要となる。

これに対して、空気調和・衛生工学会規格SHASE-S 218では、特殊継手排水システムを主な対象とした許容排水

流量を決定するための排水能力試験法が規定されており、その試験判定基準は、トラップの封水損失が25mm以下であること、もしくは、各階の排水横枝管において発生する管内圧力変動の最大・最小値が $\pm 400\text{Pa}$ 以内に収まっていること、という2つの条件が併用されている。

一方で、トラップの性能試験に関する研究が進み、共振現象などの封水振動応答特性が明らかとなり、管内圧力の評価を振幅値のみで行うことは不十分であることが明らかとなった。また、SHASE-S218では、試験用負荷は定流量排水が採用されているが、実際の排水システムでは、大便器からの器具排水による負荷が排水システムに大きな影響を与えると考えられ、実態とかけ離れていることが考えられる。また、許容管内圧力のみによる評価を行う場合、各階の横枝管にはトラップを接続せずに、PVC キャップ等で蓋をした状態で試験を行うが、近年の研究により、排水横枝管にトラップを接続した場合と、蓋をした場合の管内圧力を比較すると、最小値が変化するということが明らかとなった。しかしながら、SHASE-S 218で規定されている試験法では、トラップの接続の有無に関する詳細な試験条件は設定されておらず、この条件を明確にしなければ、管内圧力の評価を適切に行うことができないおそれがある。

以上の背景から、本研究では、誘導サイホン作用に対する管内圧力変動の傾向を調べるために、実大排水実験タワー実験を行い、排水負荷形態が管内圧力に及ぼす影響、およびトラップの有無が管内圧力変動に及ぼす影響を解析した。また、管内圧力変動に対するトラップの封水変動の挙動の数値モデルを作成し、実測との比較を行った。

2. 本研究の構成ならびに各章の要約

本研究は、誘導サイホン作用に対する管内圧力変動の傾向を調べるために実大排水実験タワーを用いた排水負荷実験（以下、タワー実験という）を行い、管内圧力と封水変動の解析を行った。また、封水の振動を1自由度系の振動とみなし、数値モデルを作成し、タワー実験により得られた封水変動との比較を行った。

第1章では、本研究の目的と概要、およびその流れについて解説した。また、本研究に関連する既往の研究をまとめ、検討すべき課題について考察した。

第2章では、本研究で用いた排水トラップと管内圧力の解析手法に関する基礎理論について解説した。また、本研究において、定義を明確にしておく必要がある用語の解説を行った。

第3章では、トラップ封水が管内圧力と管内圧力変動のパワースペクトル密度分布に影響を及ぼす要因を明らかにするため、パラメータの異なるトラップを対象に実大排水実験タワーにおいて、SHASE-S218に基づいた定流量排水負荷実験（負荷流量：4.0L/s、6.0L/s）を行い、管内圧力の解析を行った。供試トラップの基本パラメータを表1に、断面形状を図1に、実験排水システムの概要を図2に示す。

表1 供試トラップの基本パラメータ

| 供試トラップ | 脚断面積比 [-] | 口径 [mm] | 封水深 [mm] | 封水量 [mL] |
|-----------|-----------|---------|----------|----------|
| 75A Pトラップ | 1 | 75 | 50 | 2,000 |
| 30A Pトラップ | 1 | 30 | 50 | 150 |
| Sトラップ | 1 | 30 | 60 | 120 |
| わんトラップ | 1.37 | - | 53 | 430 |
| 4わんトラップ | 1.37 | - | 53 | 1,720 |
| 逆わんトラップ | 1.07 | - | 50 | 330 |
| 大便器 | 0.16 | - | 58 | 2,400 |

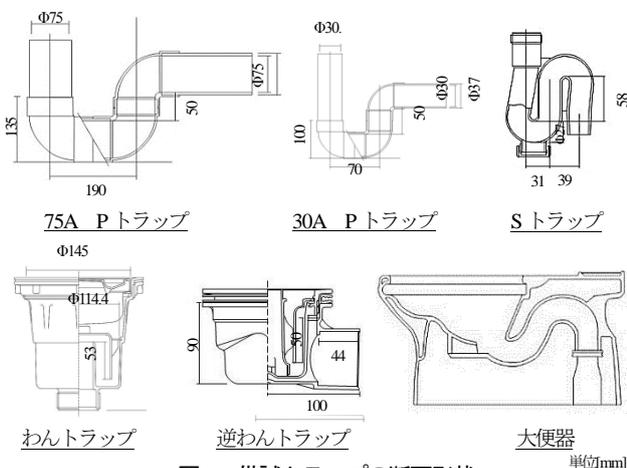


図1 供試トラップの断面形状

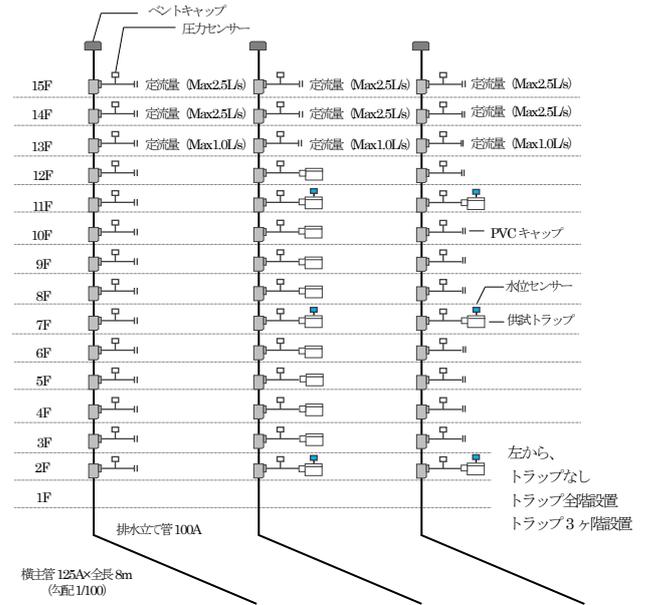


図2 実験排水システムの概要

- ① すべての供試トラップにおいて、トラップありの管内圧力が小さくなることが確認できた。また、管トラップと隔壁トラップを比較すると、隔壁トラップの方が圧力値の低減が大きい傾向にあった。管内圧力変動の標準偏差の低減率を比較すると、封水量が多い、Pトラップ (75A)、わんトラップ、逆わんトラップにおいては低減率の平均値がそれぞれ0.91、0.82、0.88となり、既往研究と同様に概ね10%の圧力値の低減が確認できた。特に、逆わんトラップにおいては、20%近い低減が確認できた。一方、封水量が少ない、PトラップやSトラップの低減率の平均値は、それぞれ0.96、0.98となり、圧力値の低減傾向が明快に現れなかった。これより、トラップの接続による圧力値の低減傾向は、トラップの種類によって異なることを明らかにした。
- ② 各供試トラップ接続時のシステム最大・最小圧力値 P_{smax} 、 P_{smin} と低減率を図3に示す。

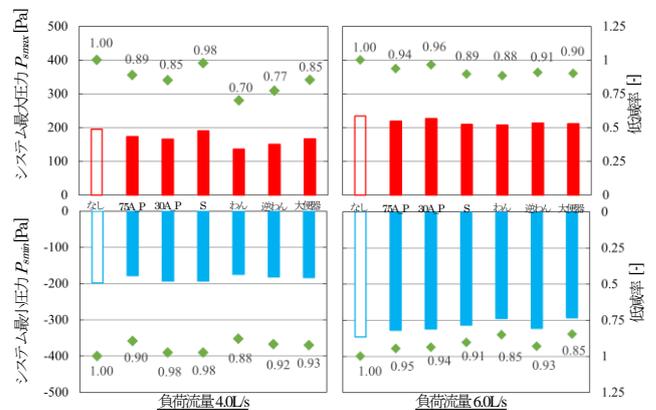


図3 システム最大・最小圧力値と低減率

トラップを接続した場合、全てのトラップにおいて、

低減率は1より小さい値となった。また、負荷流量4.0L/sの場合、 $P_s \max$ はトラップを接続することで大きく低減する傾向にあったが、 $P_s \min$ の低減はわずかであった。一方、負荷流量6.0L/sの場合は、 $P_s \max$ および $P_s \min$ ともに、低減率は約0.85~0.95に推移しており、トラップの接続によってシステム最大・最小圧力値は約10%低減すると考えられる。また、管トラップと比較して隔壁トラップを接続した場合の方が $P_s \max$ と $P_s \min$ は大きく低減した。これより、隔壁トラップは管トラップに比べ、システム最大・最少圧力値を低減させる作用が大きいと考えられる。

③ 各供試トラップを接続した場合の管内圧力変動のパワースペクトル密度分布の一例を図4に示す。

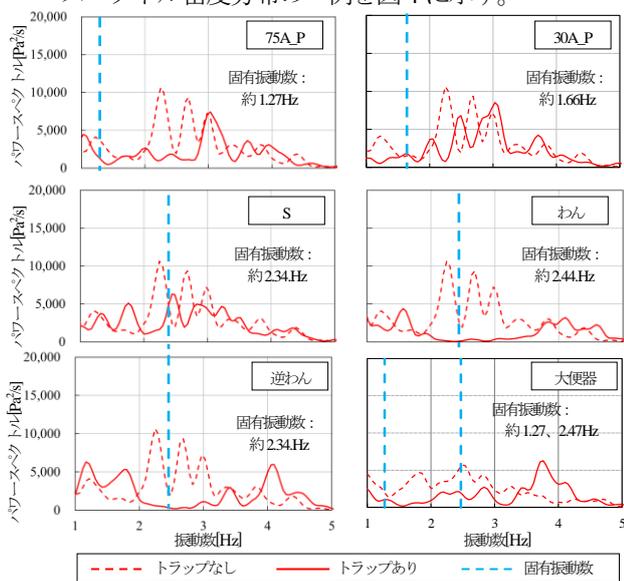


図4 パワースペクトル密度分布の一例 (全階設置 7階)

パワースペクトル密度分布の傾向はトラップによって大きく異なる結果となった。トラップを接続していない場合の卓越振動数は、2~3Hzに分布しているのに対して、わんトラップ、逆わんトラップといった隔壁トラップを接続した場合は、2~3Hzの範囲が0に近い値となる傾向がみられた。一方、75Aと30AのPトラップでは、この傾向がみられなかった。これは、隔壁トラップであるわんトラップ、逆わんトラップの固有振動数が、2~3Hzに分布しているのに対して、75Aと30AのPトラップの固有振動数は1~2Hzであり、各供試トラップの固有振動数が異なることによるものと考えられる。トラップを接続していない場合(自然状態)の管内圧力変動では2~3Hzの振動成分が多いため、振動域が一致する隔壁トラップを接続した場合に応答現象が大きく現れたと考えられる。しかし、Sトラップの固有振動数は2~3Hzに分布するが、わんトラップ、逆わんトラップと同様の傾向がみられなかった。これは、Sトラップの封水量が

他のトラップと比較して非常に少なかったことが原因であると考えられる。

第4章では、定流量排水負荷と器具排水負荷が管内圧力に与える影響を明らかにするために、実大排水実験タワーにおいて、SHASE-S218₂₀₀₈に基づく定流量排水負荷(1.5L/s、3.0L/s、4.5L/s)を与える実験(以下、定流量排水実験という)と節水型大便器による器具排水負荷(1台、2台、3台)を与える実験(以下、器具排水実験)を行った。実験排水システムの概要を図5に、供試トラップと供試便器の断面形状を図6に示す。

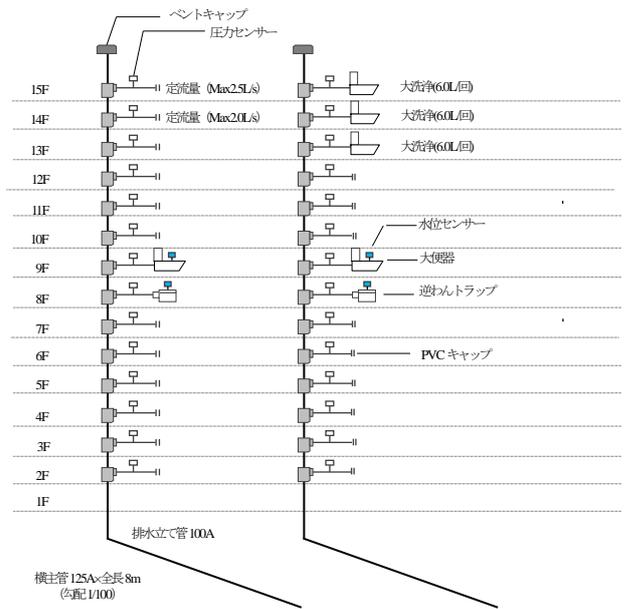


図5 実験排水システムの概要

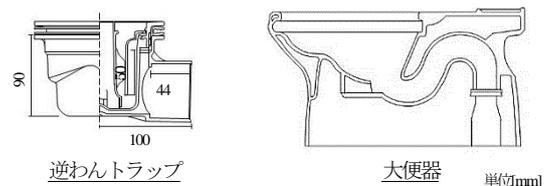


図6 供試便器と供試トラップの断面形状

① 圧力変動波形と封水変動波形の一例を図7に示す。

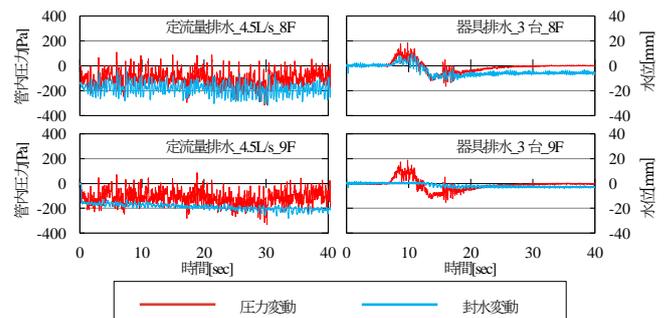


図7 圧力変動波形と封水変動波形の一例
両負荷形態とも、封水変動は圧力変動に応答した波形

を示したが、波形は負荷形態によって大きく異なった。定流量排水では、定常状態に達した際（測定開始時）にはすでに封水は圧力変動にตอบสนองし、損失している状態であったが、器具排水では、排水が通過する直前と考えられる最大圧力発生時に、封水は管内圧力にตอบสนองして変動し、その後、損失を生じた。

また、逆わんトラップの封水変動の方が、大便器のものと比較して変動幅と標準偏差が大きくなり、逆わんトラップの標準偏差は、大便器の約2倍となっていた。これは、トラップの構造や封水量によるものと考えられる。

② 各負荷形態の負荷流量と最小圧力の関係の一例を図8に、その一次回帰式の決定係数 R^2 をまとめたものを表2に示す。

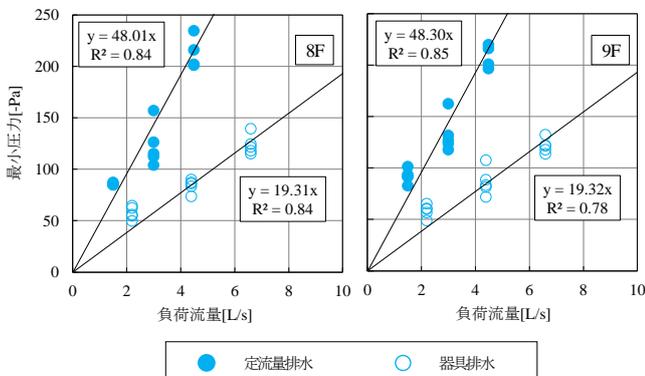


図8 負荷流量と最小圧力の関係の一例

表2 負荷流量と最小圧力の決定係数 R^2

| 負荷形態 | 階数[F] | | | | | | | | | | | |
|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|--|
| | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | |
| 定流量排水 | 0.64 | 0.70 | 0.78 | 0.77 | 0.77 | 0.81 | 0.84 | 0.85 | 0.89 | 0.88 | 0.91 | |
| 器具排水 | 0.74 | 0.93 | 0.84 | 0.76 | 0.70 | 0.79 | 0.84 | 0.78 | 0.77 | 0.83 | 0.81 | |

決定係数 R^2 は定流量排水、器具排水ともに0.64~0.93と大きく、負荷流量と最小圧力には高い相関性があることが確認された。また、各負荷方法の一次回帰水に対する定流量排水の回帰係数比 α を表3に示す。

表3 器具排水に対する定流量排水の回帰係数比 α (各階)

| 階数[F] | 回帰係数 a | | 回帰係数比 α |
|-------|----------|-------|----------------|
| | 定流量排水 | 器具排水 | |
| 12 | 53.62 | 27.57 | 1.94 |
| 11 | 55.18 | 24.92 | 2.21 |
| 10 | 51.52 | 19.19 | 2.68 |
| 9 | 48.30 | 19.32 | 2.50 |
| 8 | 48.01 | 19.31 | 2.49 |
| 7 | 43.67 | 19.14 | 2.28 |
| 6 | 41.58 | 18.67 | 2.23 |
| 5 | 37.82 | 17.32 | 2.18 |
| 4 | 35.89 | 15.33 | 2.34 |
| 3 | 27.99 | 12.98 | 2.16 |
| 2 | 24.53 | 9.93 | 2.47 |

回帰係数比 α は1.94~2.68となり、このことから、負荷

流量が同値の場合、定流量排水において発生する最小圧力値は、器具排水のおよそ2~2.5倍となることが予測できる。

負荷流量とシステム最小圧力値の関係を図9に示す。

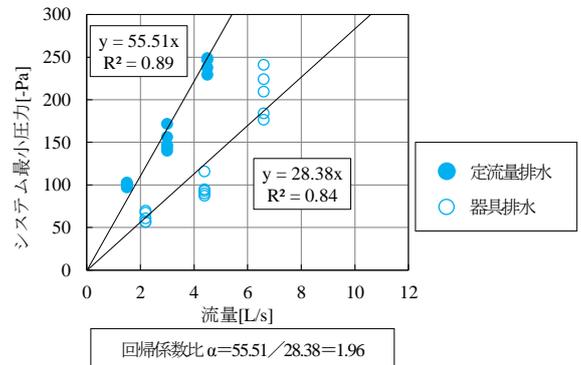


図9 負荷流量とシステム最小圧力の関係

各階の回帰係数比と同様に、回帰係数比 α は1.96を示したことから、負荷流量が同値の場合、定流量排水において発生するシステム最小圧力値は、器具排水の約2倍となることが予測できる。

③ 8階と9階のトラップの封水損失を表3に示す。

表3 トラップの封水損失 [mm]

| 供試トラップ | 定流量排水 | | | 器具排水 | | |
|----------|--------|--------|--------|------|----|----|
| | 1.5L/s | 3.0L/s | 4.5L/s | 1台 | 2台 | 3台 |
| 8F (逆わん) | 6 | 9 | 16 | 2 | 4 | 7 |
| 9F (大便器) | 8 | 12 | 22 | 1 | 3 | 4 |

各負荷形態における封水損失を比較すると、定流量排水の封水損失の方が大きい傾向となった。また、逆わんトラップ (8階) の封水損失は、定流量排水では、大便器 (9階) と比較して小さい値であったのに対して、器具排水では、大きい値となった。このことから、負荷形態によって、トラップの耐圧力性能は異なることが考えられる。

各負荷形態における最小圧力値と封水損失の関係を一次回帰式で表した散布図を図10に示す。

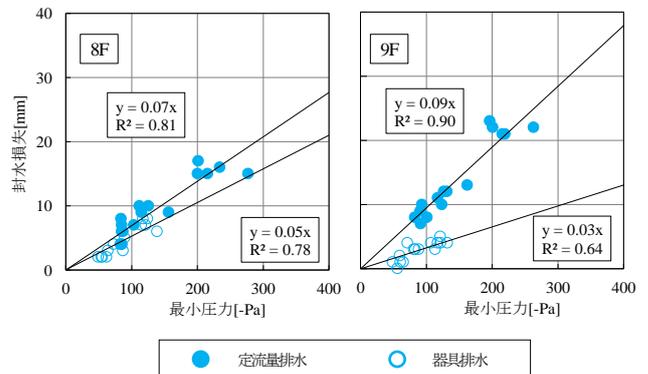
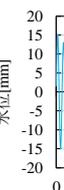


図10 最小圧力値と封水損失の関係

また、一次回帰式の回帰係数 a と器具排水に対する定流



量排水の回帰係数比 α を表 4 に示す。

表 4 器具排水に対する定流量排水の回帰係数比 α

| 階数[F] | 回帰係数 α | | 回帰係数比 α |
|---------|---------------|-------|----------------|
| | 定流量排水 | 器具排水 | |
| 8F(逆わん) | 0.069 | 0.053 | 1.32 |
| 9F(大便器) | 0.095 | 0.033 | 2.91 |

図 10 より、決定係数 R^2 は定流量排水、器具排水ともに 0.64~0.90 と大きく、最小圧力と封水損失には高い相関性があることが確認できた。表 4 より、回帰係数比 α は、逆わんトラップ (8 階) で 1.32、大便器 (9 階) で 2.91 となった。これより、同程度の最小圧力値が発生した際、定流量排水における封水損失は、逆わんトラップの場合には約 1.3 倍となり、大便器の場合には約 3 倍となることが予測できる。最小圧力値と封水損失の回帰係数比 α には、供試トラップによって大きな差があったことから、一般的な定義づけを行うことは難しいと考えられる。

第 5 章では供試トラップの封水変動を 1 自由度系の振動とみなし、封水の挙動モデルを作成し、数値解析を行い、タワー実験によって得られた実測値との比較を行った。

- ① 1 自由度系における、減衰自由振動の運動方程式を表 5 に、自由振動モデルにおける解析値と実測値を図 11 に示す。減衰自由振動の運動方程式から作成した自由振動モデルを用いて求めた解析波形は実験により得られた波形とよく一致したため、減衰自由振動の運動方程式を用いることで高い精度で封水の振動現象を再現できた。

表 5 減衰自由振動の運動方程式 (同径トラップ)

$$y = \rho AL \frac{dy}{dt^2} + c \frac{dy}{dt} + 2\rho Agy = 0$$

ここに、

- ρ : 水の密度 [g/cm^3]
- A : トラップの断面積 [cm^2]
- c : 減衰係数
- g : 重力加速度 [cm/s^2]
- y : 封水の変位 [cm]

図 11 自由振動モデルにおける解析値と実測値

- ② 封水損失による質量の変化を考慮した、圧力に応じて振動する強制振動のモデル式の作成を行い、プログラミング言語に VBA を用いて、ルンゲ・クッタ法を適用して数値解析を行った。強制振動モデルにおける解析値と実測値の比較を図 12 に示す。タワー実験により得られた管内圧力変動を入力値として得られた封水振動波形は、タワー実験により得られた封水変動波形とよく一致したため、本報において作成した強制振動モデルは、高い精度でトラップの強制振動現象を再現できると考えられる。

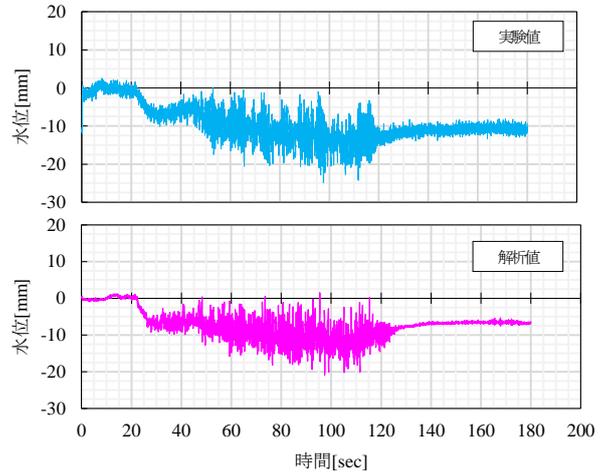


図 12 強制振動モデルにおける解析値と実測値の比較

第 6 章では、以下の検討により得られた知見を総括し、今後の課題をまとめた。本研究では、実大排水タワーによる実験を行い、管内圧力変動と封水変動の解析を行うことにより、種々の条件が管内圧力に及ぼす影響を明らかにした。また、トラップ封水挙動を数学モデル化し、実測値との比較を行うことで、その有効性を確認した。今後はより高精度かつ実用的な数値モデルの開発を行う予定である。

