

## 18. 更新時の下水道管渠の構造的評価と補修工法に関する調査

土質チーム 上席研究員 恒岡 伸幸  
主任研究員 桑野 玲子  
研究員 古本 一司  
交流研究員 山内 慶太

### 1. はじめに

下水道整備の拡大とともに既存施設が増大するにつれて、耐用年数を超過した管渠も増え始めており、今後老朽化は急速に進むと予想される。しかし、その補修工法選定において重要な要素となる、既設管渠に作用する土圧等外力の状態は不明な点が多く、場合によっては管渠に想定以下の土圧しか作用せず、補修が過剰となることも考えられる。合理的な下水道管渠の維持、補修を進めるにあたっては、管渠に作用する土圧の経年変化等を明らかにする必要がある。本研究は、平成 13 年度より 3 年計画で実施されており、長時間経過後の管渠周り地盤の特性について調査すると共に、管渠に作用する土圧の経年変化等について実験的及び解析的検討を進め、作用土圧の評価手法の提案を目標とするものである。

### 2. 研究のアウトライン

埋設管に作用する土圧の長期的変化は既往の研究例が皆無に等しく、実験、現場測定、解析ともに事例が極めて少ない。時間経過に伴い埋設管上の鉛直土圧が増加する場合と減少する場合がそれぞれ報告され、地盤・地下水・埋設条件などに複雑に影響されているものと思われる。まず、地中構造物に作用する土圧が長期的に変化する要因を考察し、以下のように分類した。

- A. 地中構造物周辺の地盤に外的条件（外力：上載荷重、交通振動、地震、地下水の上下、溝型や突出型の埋設管敷設に伴う近接地山部分との摩擦など）が加わって変位が生じた場合。
- B. 地中構造物の変形（埋設時における撓み性管の変形や長時間経過後の管の劣化又は破損など）によってその相互作用として周辺地盤に変位が生じた場合。
- C. 周辺地盤自体の力学特性が時間経過に伴って変化した場合。（地盤材料の速度効果やリラクゼーションなどの粘性効果やセメンテーションなどの年代効果）

本テーマについてはメカニズムに不明な点が多い上、種々の作用の定量的評価に多くの仮説が伴うため、様々な角度から幅広く調査を展開することとし、平成 13 年度は以下の 3 項目を実施した。

- ①長時間経過後の地中構造物周辺地盤の実態調査（塩竈）
- ②地中埋設管に作用する土圧の長期モニタリング
- ③降下床実験による緩み土圧の時間効果の計測

平成 14 年度は上記の②及び③について、平成 13 年度の実験を発展させた調査を行い、より詳細な実験により検討を行った。

### 3. 地中埋設管に作用する土圧の長期モニタリング

#### 3. 1 埋設管の長期挙動計測

平成 13 年度実施したモニタリング実験のうち、埋戻し材料に山砂を使用したケースの計測は継続して行っている。また、埋戻し材料に川砂を使用したケースのほうは 340 日程度計測を継続したのち撤去し、新たに埋戻し材料として、山砂にセメントを 5% 混合したセメント改良土を用いた実験を行った。埋戻し材料としてセメント改良土を用いたのは、埋戻し土の年代効果（セメンテーションや構造化などのエイジング作用）を早期に発現させるためと、埋設管の変形に対して、追隨して動く砂と追隨して動かないセメント改良土の違いが、埋設管の歪みや埋設管に作用する土圧の変化にどう影響するのかを調べるためである。川砂の撤去を、基礎地盤はそのまま埋設管も動かさないように行ったのち、改良土を 1 層 20cm で層厚 180cm まで敷均し転圧を行った。実験モデルを図-1 に示す。

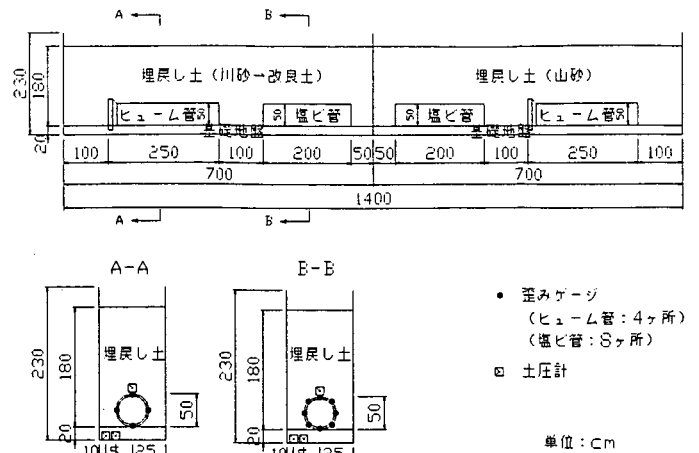


図-1 実験モデル

歪み及び土圧の測定は、1 層毎の埋戻し厚に対して行い、埋戻し終了後からは 1 日毎に自動計測した。

#### 3. 2 埋設管の変形と周辺土圧

平成 13 年 2 月より 340 日以上継続して、埋設管に作用する土圧、埋設管の歪みの計測を行った。埋戻し材料としては一般的に用いられる、粒径の揃った川砂と、細粒分の混ざった山砂の 2 種類を用いた。各材料の粒度を図-2 に示す。また、埋戻し材料に川砂を使用したほうは、約 340 日間計測したのちに撤去を行った。埋設管に作用する土圧の計測結果を埋

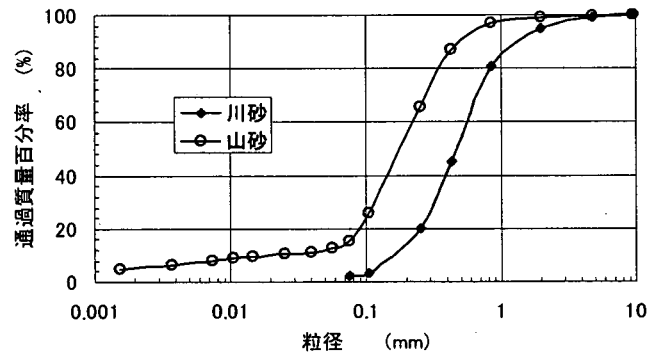


図-2 粒径加積曲線

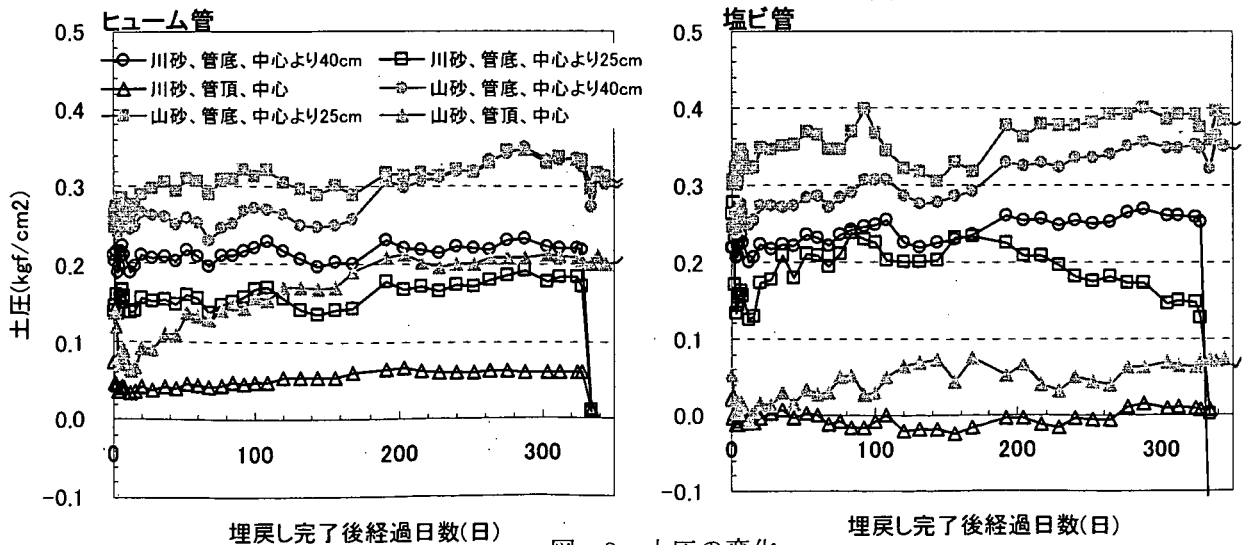


図-3 土圧の変化

戻し終了1日後を0日目として経過日数に対してプロットしたものを図-3に、埋設管の歪みの計測結果を図-4に示す。

まず、図-3（土圧の計測結果）より、ヒューム管（剛性管）、塩ビ管（撓み性管）のいずれも埋戻し終了後は、多少のばらつきは見られるが概ね一定の値を示していることが分かる。但し、理論的土被り圧（管底で約0.3kgf/cm<sup>2</sup>、管頂で約0.2kgf/cm<sup>2</sup>）に対して、川砂に埋設した場合は、管の性質に関わらず管底部で10～20%、管頂部で50%程度小さめの値になっている。一方、山砂に埋設したヒューム管（剛性管）では、管底及び管頂部のいずれもほぼ理論値になっている。また、塩ビ管（撓み性管）では、管底部で理論値よりも10～20%程度大きな値になっているのに対して、管頂部では50%程度小さい値を示している。

埋戻し材を山砂と川砂で変えた場合の違いは、その材料の力学的特性の違いによるものと思われる。変形の大きい塩ビ管（撓み性管）の場合には管が撓むことにより管上部の地盤内にアーチ効果が発揮されるため、管頂部の土圧が軽減されているものと思われ、逆に管底部では山砂で埋め戻した場合に理論値より大きな値になっているものと思われる。

図-4（歪みの計測結果）より、山砂及び川砂で埋め戻したいずれの場合も、ヒューム管（剛性管）塩ビ管（撓み性管）で歪みの大きさにかなりの違いはあるが、変形モードは上下方向に潰れる形になっている。また、ヒューム管では時間が経つ毎に歪み量が増加（管が膨張）している。なぜ歪み量が増加したのかは不明である。

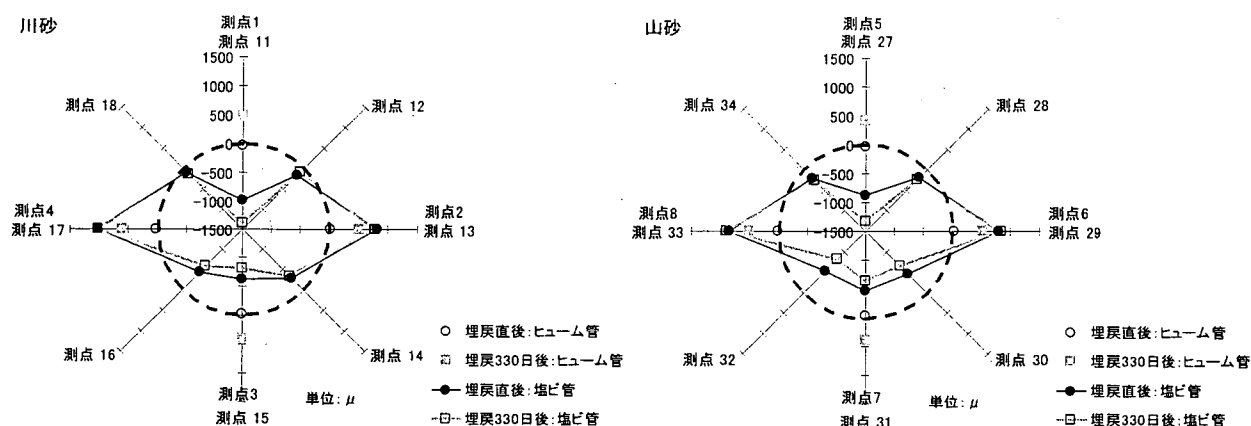


図-4 ひずみ分布

平成14年度、川砂撤去後に行ったセメント改良土（山砂+セメント5%）で埋戻した場合の、埋設管に作用する土圧を埋設時の埋戻し地盤高に対してプロットしたものを図-5に、埋設管の歪みを計測した結果を図-6に示す。また、セメント改良土の湿潤密度と一軸圧縮強度を表-1に示す。

表-1 セメント改良土の湿潤密度及び強度

湿潤密度 (g/cm <sup>3</sup> )	一軸圧縮強度（1週強度） (kgf/cm <sup>2</sup> )	一軸圧縮強度（4週強度） (kgf/cm <sup>2</sup> )
1.47～1.50	平均 3.0	平均 4.9

図-5（土圧の計測結果）より、管底部の土圧は、山砂で埋め戻した場合とほぼ同じように増加しているのが分かる。また、塩ビ管の管頂部での土圧も同じように変化している。ただしヒューム管の管頂部の土圧は増加割合が小さくなっている。山砂で埋め戻した時と同様の結果が出たのは、改良土でも埋戻している間は、

セメントによる固結が始まっておらず、山砂と性質的に同様であったのが理由であると思われる。

図-6（歪みの計測結果）において、改良土により埋戻す前に計測した値をみると、ヒューム管では川砂を撤去する前と後で若干歪みが増加しているが、ほぼ同じ値を示している。また、塩ビ管では、川砂を撤去することによって、歪みゲージの値は初期状態に近づくが完全にもとには戻らない。この状態から改良土により埋戻しを行うと、ヒューム管も塩ビ管も平成 13 年度の結果と同様に、上下方向に潰れる変形モードを示していることが分かる。

今後固結性が発揮されて、長期土圧に変化がみられるかどうか、計測を継続する予定である。

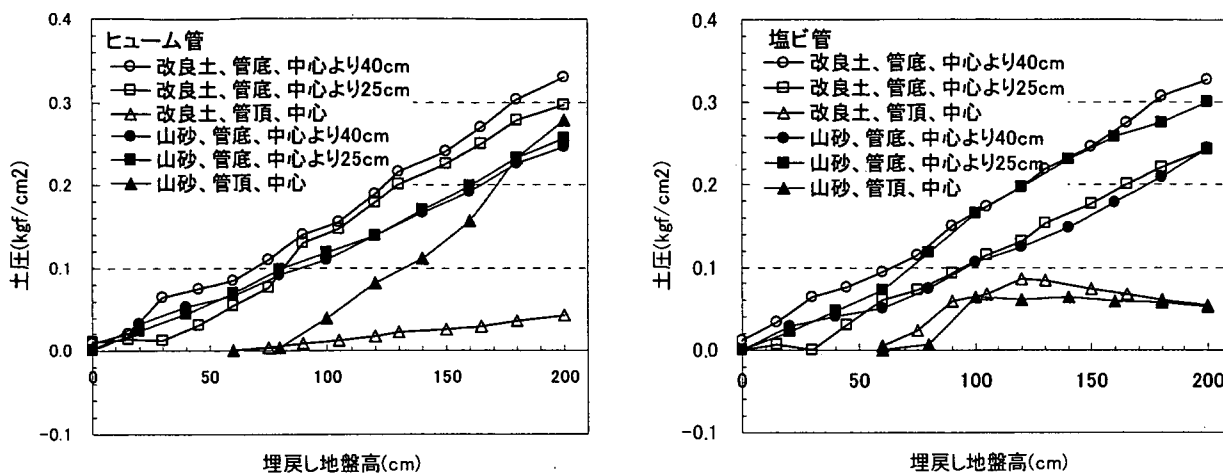
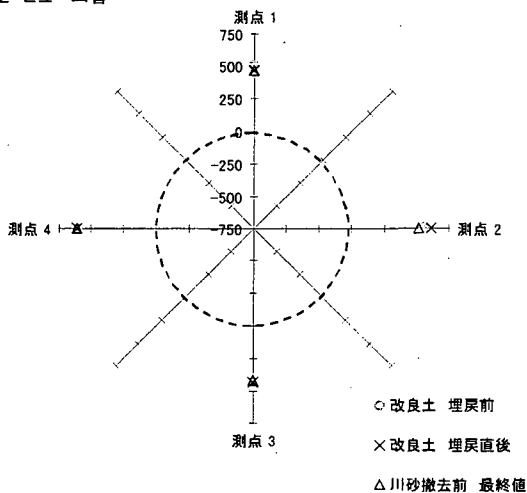


図-5 土圧の変化

(改良土→平成 14 年度計測、山砂→平成 13 年度計測)

改良土 ヒューム管



改良土 塩ビ管

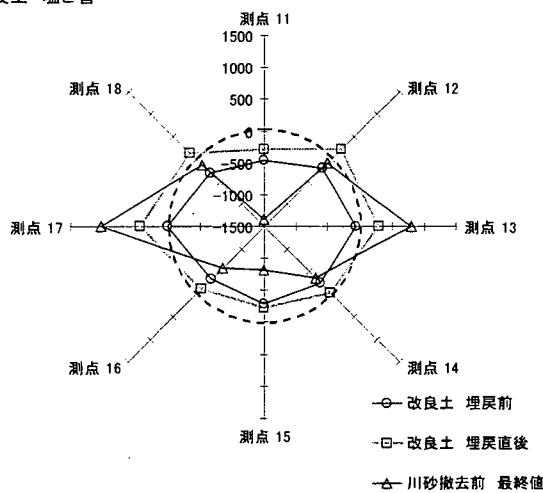


図-6 ひずみ分布

#### 4. 降下床実験による緩み土圧の時間効果の計測

平成 13 年度の実験で降下床実験により、土槽に作製したモデル地盤の緩み土圧や降下床上部に形成されるアーチ効果の降下速度による影響や、リラクゼーションによる応力変化などを調べた。しかし、速度変化の範囲が 10 倍程度であったり、実験期間中の気温変動が大きく測定結果がその影響を受けてしまったりしたため、

降下速度による影響を十分に把握できる結果が得られなかった。そこで、平成 14 年度はそれら種々の問題を解決した詳細な実験を行った。

#### 4. 1 降下床実験の概要

まず、土槽を気温変動の少ない ( $\pm 0.5^{\circ}\text{C}/\text{日}$ ) 場所に設置した。土槽自体は平成 13 年度と同じもの (幅 1.0m、奥行き 0.6m、高さ 0.5m) で底版を 5 分割し、中央部の底版はサーボモーターにより上下方向に可動で、変位速度を 0.01~1mm/分の範囲で任意に変えることが出来るものを使用した。また、平成 13 年度はデータサンプリング装置の能力が低かったため、サーボモーターが 0.01~1mm/分で降下速度を制御できるにも関わらず、0.01mm/分と 0.1mm/分の速度変化しか与えられなかった。そこで、データサンプリング装置に動ひずみアンプを用いて、高速データサンプリングを可能にし、降下速度の変化の範囲を 100 倍にした。計測項目は、底版上載荷重、降下床変位、底版中央部の土圧、地盤の温度及び気温である。

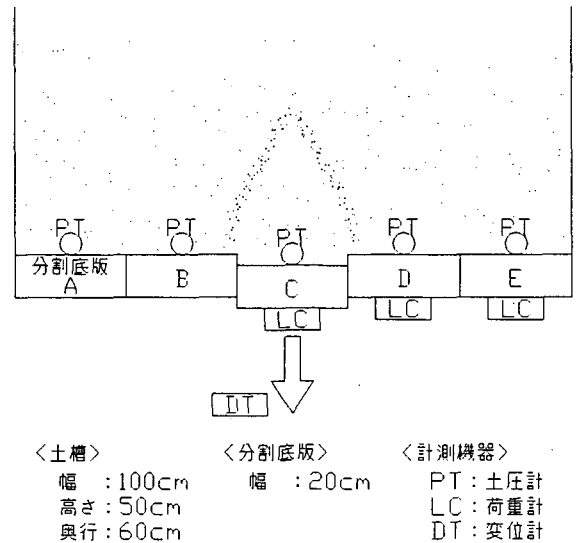


図-7 降下床実験装置

地盤材料としては、乾燥した豊浦標準砂を用いた場合 (ケース I) と、見掛けの粘性効果を期待して豊浦標準砂にクレーサンドを重量比で 35% 配合したもの (細粒分 20%) を用いた場合 (ケース II) で行った。実験ケースは、上記の 2 種類の地盤材料に対して、下記の各 4 ケース (A~D) 合計 8 ケース実施した。各ケースは降下床変位が約 10mm になるまで降下させた。

表-2 実験ケース一覧

ケース番号	地盤材料	試験の種類	変位速度条件
I-A	豊浦砂 (乾燥密度 1.46g/cm <sup>3</sup> )	一定速度試験 (遅)	終始一定速度 (0.01mm/分) で降下
I-B		一定速度試験 (速)	終始一定速度 (1mm/分) で降下
I-C		速度急変試験	0.01mm/分と 1mm/分の間で急変
I-D		リラクゼーション試験	1mm/分で降下中 2 時間以上のポーズを数回
II-A	豊浦砂+クレ-サンド (乾燥密度 1.53g/cm <sup>3</sup> )	一定速度試験 (遅)	終始一定速度 (0.01mm/分) で降下
II-B		一定速度試験 (速)	終始一定速度 (1mm/分) で降下
II-C		速度急変試験	0.01mm/分と 1mm/分の間で急変
II-D		リラクゼーション試験	1mm/分で降下中 2 時間以上のポーズを数回

#### 4. 2 降下床実験結果

ケース I-A、B で得られた底版荷重と降下床変位の関係を図-8 に、ケース II-A、B で得られた底版荷重と降下床変位の関係を図-9 に示す。ここに示すどのケースでも、降下部 (底版 C) の荷重は変位と共に当初荷重の 15% 程度にまで、著しく減少した。一方隣接部 (底版 D) の荷重は 30% 程度増加した。これは、昨年度の実験で得られた結果と同じである。但し、地盤材料が豊浦標準砂の場合 (ケース I) では、ほぼ一定の

荷重に落ち着くまでに要する変位が、0.3mm 程度であったのに対して、粘性を持たせた材料の場合（ケース II）では、1.5mm 程度であった。また、ケース I-B 及び II-B では、それぞれケース I-A 及び II-A の 100 倍の変位速度を与えた。底版荷重と降下床変位の関係は、速度が違うことにより多少の相違は見られるが、その傾向は把握できない。

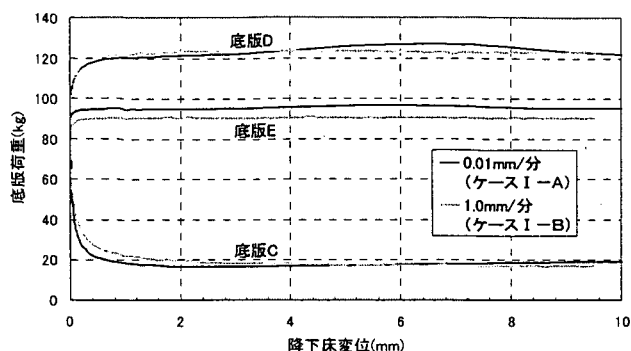


図-8 降下床実験における速度効果  
(ケース I)

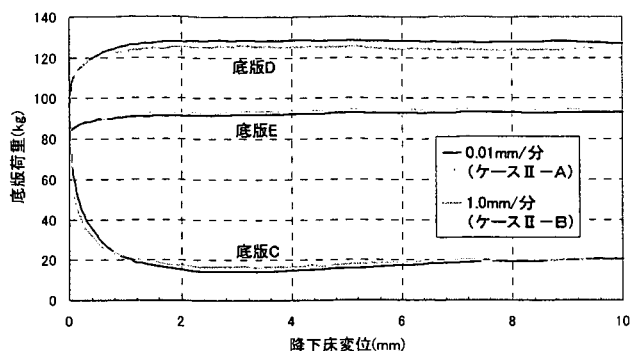


図-9 降下床実験における速度効果  
(ケース II)

平成 13 年度の実験では、「TESRA 現象（一定変位速度の荷重条件において異なる速度による違いが現れない場合でも、速度変化を与えると変形特性に一時的な影響を及ぼす現象）」を確認出来なかった。これは、応力レベルが小さく、速度の変化範囲も小さかったためである。そこで平成 14 年度は、その現象を確認するために速度の変位範囲が 100 倍となる、毎分 0.01mm と 1.0mm の間で急変させる実験を行った。ケース I-C で得られた底版荷重と降下床変位の関係の微小変位部を図-10 に、ケース II-C で得られた関係を図-11 に示す。これらのグラフから、速度を 0.01mm/分→1.0mm/分に急変させた場合には、降下部（底版 C）の荷重は減少し、1.0mm/分→0.01mm/分に急変させた場合には増加していることが分かり、降下速度を急変させることにより底版荷重に一時的な影響が出ていることを確認できる。つまり、「TESRA 現象」が確認できる。また、その荷重減少及び増加の割合はケース I-C で 3~6%、ケース II-C で 5~10%であり、ケース II-C のほうが速度急変時の荷重の変化が大きいと言える。これは、ケース II の材料のほうが粘性の大きい材料であることを意味している。

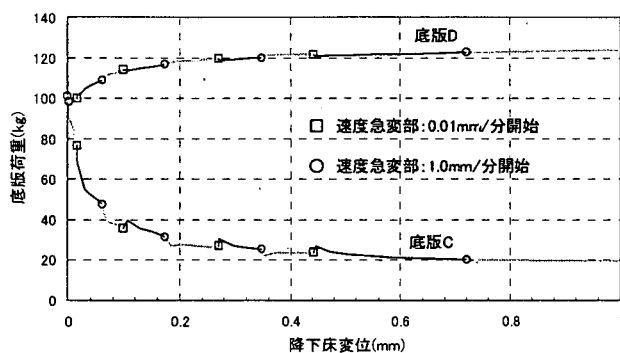


図-10 速度急変時の挙動（ケース I）

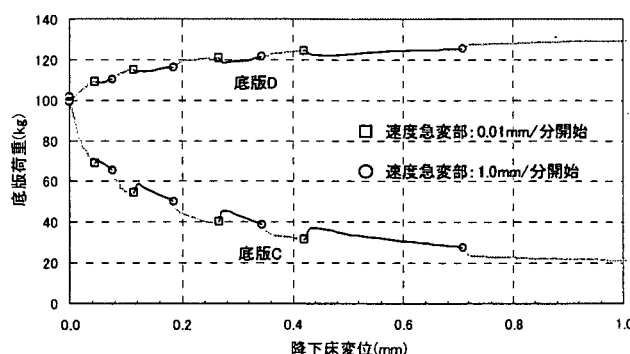


図-11 速度急変時の挙動（ケース II）

ケース I-D、II-D では、降下変位が 0.3mm に達するまでの間に、降下を 2 時間以上停止させるリラクゼーション試験を 5,6 回（ケース I-D で 5 回、ケース II-D で 6 回）行った。それぞれの試験結果の微小変位部を図-12、図-13 に示す。これらのグラフから、リラクゼーション時の降下部（底版 C）の荷重は、降

下を停止するとある程度（I-Dで15~19%、II-Dで20~37%）まで増加した。しかし、降下を再開すると地盤材料の種類に関わらず、すぐに荷重は減少し、速度履歴の影響をあまり受けない荷重-変位曲線に近づくことを確認できた。

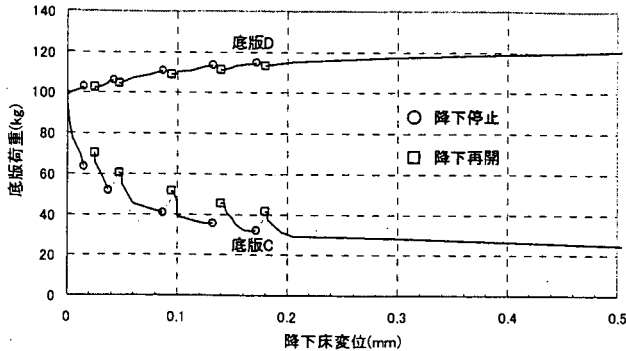


図-12 リラクゼーション試験（ケースI）

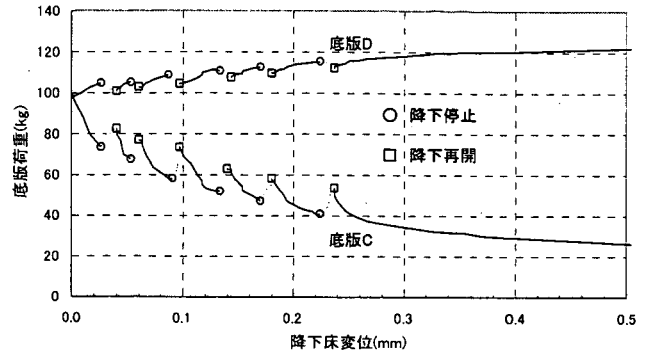


図-13 リラクゼーション試験（ケースII）

#### 4. 3 アーチ効果の攪乱試験

降下床実験では、移動床の降下に伴い地盤にアーチ効果が発揮され移動床上の土圧が著しく減少することが確認された。また、その後の時間経過によって、外部要因に変化がない限り土圧は大きく変化しないことが分かった。しかし、埋設管自体の変形や破損、地下水の上下、上載荷重の変化や地震荷重などにより、埋設後に安定した作用土圧が変化する可能性がある。そこで、一旦地盤内に形成されたアーチ効果が外部変位や荷重によってどの程度攪乱されるかを調べる実験を行った。移動床を約10mm降下させ、アーチ効果が形成されたのち、2時間程度放置し十分に安定させ、変位振幅約0.5mmで移動床を上下させた。地盤材料を豊浦砂で行った場合と、豊浦砂にクレーサンドを混ぜた場合の結果をそれぞれ図-14、図-15に示す。まず、地盤材料の違いに関わらず、移動床を上昇させるたびに底版荷重が大きくなっていくことが分かった。また、降下させると元の荷重値に戻ることも分かった。しかし、同じ回数振幅させても、地盤材料の違いにより上昇させる際に移動床にかかる荷重値に大きな差があることが分かった。

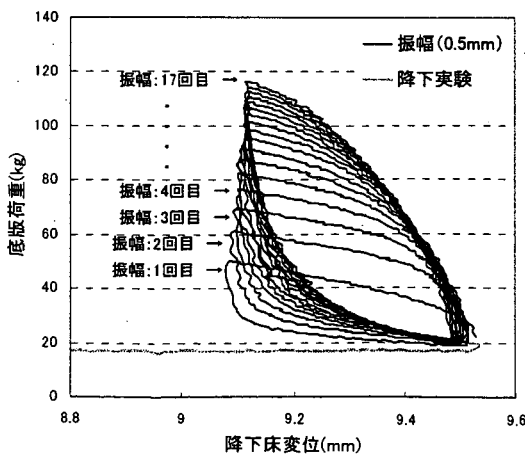


図-14 攪乱試験（豊浦砂）

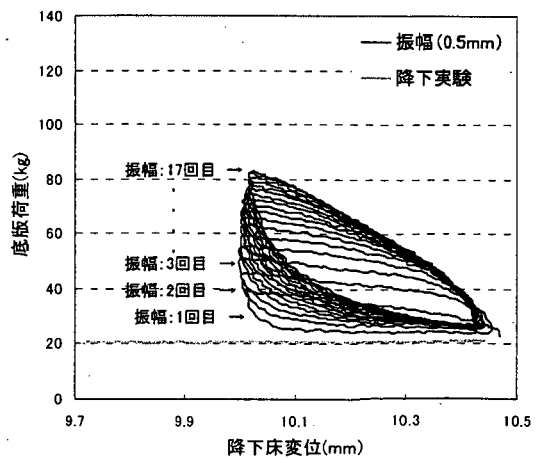


図-15 攪乱試験（豊浦砂+クレーサンド）

## 5. まとめ

平成 13 年度に引き続き、埋設管の変形に伴う地盤との相互作用による土圧変化と、地盤自体の力学特性の時間効果の 2 点に着目して調査を行い、以下のことが明らかになった。

- ・ 地中構造物のわずかな変位で土圧は大きく変化する。1 年間にわたる長期モニタリングでも土圧に有意な変化はみられなかった。
- ・ 埋設時の挙動は埋戻土が砂の場合も固結性をもつ材料の場合も傾向に違いはみられない。今後固結効果が十分に発現した場合の土圧挙動を引き続き調査する予定である。
- ・ 降下床実験では、土圧と変位の関係はその速度履歴にあまり影響されない。細粒分を含んだ砂を用いた実験ではアーチ効果の形成に、より大きな変位を必要とすることが分かった。
- ・ 降下床上に形成されたアーチ効果は、その後降下床を微小に上下することによって攪乱がみられる。その攪乱の程度は、細粒分を含んだ砂のほうが小さい。