

21. 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

独立行政法人土木研究所材料地盤研究グループ（土質） 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

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測される。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。本研究では、長期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を提案する。

2. 研究のアウトライン

本調査は本年度より3年間の計画で実施される。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。地中構造物に作用する土圧が長期的に変化する場合、その要因としては以下のものが考えられる。

- A. 地中構造物周辺の地盤に外的条件（外力）が加わって変位が生じた場合。
- B. 地中構造物の変形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。

ここでAの外的条件としては、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考えられる。Bの作用は埋設時においてはとくにたわみ性管を使用した場合に影響が大きく、長期間にわたって管自体が劣化または破損し変形することも考えられる。また、Cにあげた地盤材料の時間効果は粘性効果（速度効果やクリープ、リラクゼーションなど）と年代効果（セメンテーションや構造化などのエイジング作用）に大別される。

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た。現時点で予定している調査項目は以下の通りである。

- ① 土圧（特に地中構造物周辺の土圧）の経年変化に関する文献調査。
- ② 長期間経過後の地中構造物周辺地盤の実態調査。
- ③ 地中構造物の変位または劣化に伴う周辺の土圧特性、及びその経年変化に関する実験的研究。
- ④ 埋戻土の変形強度特性における時間効果の実験的研究。
- ⑤ 地中構造物への作用土圧の経年変化の予測解析。

本年度は上記のうち①～③を着手した。

3. 長時間経過後の地中構造物周辺地盤の実態調査 (塩竈)

宮城県塩竈市にて、敷設後 30 年を経過した下水管の周辺地盤の調査を実施した。調査地は軟弱地盤上に埋立てを施しており全般に地盤沈下が著しい。埋立てに用いられている土は細粒分まじりの砂礫で、ごく一般的に用いられる埋立て材であった。径 40cm の下水管が深さ約 2m の位置に設置され、埋戻しの上部は約 55cm の砂礫層と 15cm のアスファルトで覆われていた。本調査では、30 年経過後の埋戻し土の力学特性を調べる目的で不攪乱試料採取を試みたが、砂礫混じりの上未固結のため、乱さない試料を採取するのは不可能であった。同時に表面波探査を実施し、埋戻し土の現在の S 波速度を調べたところ、150~180m/秒であった。30 年程度の時間経過では埋戻し土に固結などの顕著な年代効果を期待するのは難しいことが示唆された。今後さらに事例を収集する必要がある。

4. 地中埋設管に作用する土圧の長期モニタリング

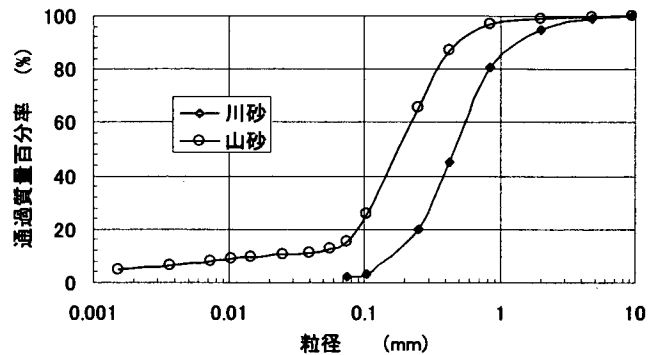
4.1 埋設管の長期挙動計測

土槽内のモデル地盤にひずみゲージを装着した管を埋設し、埋設時及び埋設後の周辺地盤土圧や管の変形を計測した。地盤材料には、埋戻しに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を用いた (各材料の粒度は図 1 参照)。埋設管は、剛性管と撓み性管として、ヒューム管と塩ビ管をそれぞれ使用した。埋設時には砂を塗布したベニヤ板を土槽側面にあらかじめ設置して、埋戻土に対して硬質の (安定した) 原地盤を模擬した。径 10cm の土圧計を 30 cm 四方の鋼板に埋め込んだものを図 2 に示す位置に配置して土圧を測定した。基礎地盤として 20cm 盛立てた後管を設置し、以後 1 層あたり 20cm ずつ 60kg タンパーで 2 往復の転圧を施した。土被りは管頂部で約 1.3m である。埋戻土の含水比と乾燥・湿潤密度を表 1 に示す。

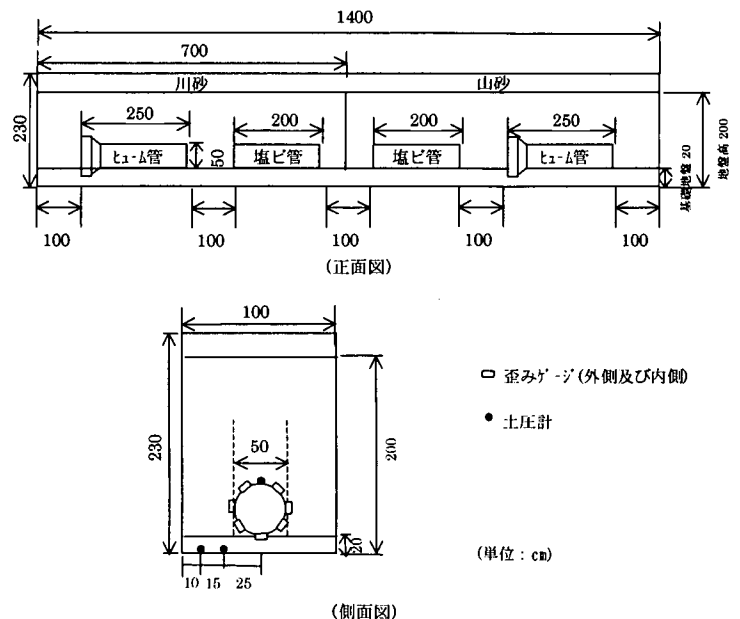
表一 埋戻土の締固め

	含水比 (%)	湿潤密度 (g/cm ³)	乾燥密度 (g/cm ³)
川砂	7~8	1.64~1.69	1.53~1.56
山砂	11~12	1.59~1.67	1.42~1.49

ひずみ及び土圧の計測は、設置が終了した時点より、一層毎の盛立高に対して行った。また、埋戻し終了より 1 日ごとに各データの自動計測を行った。なお、計測は現在も継続中で、本調査終了時点 (H15 年度) まで続行する予定である。



図一 粒径加積曲線

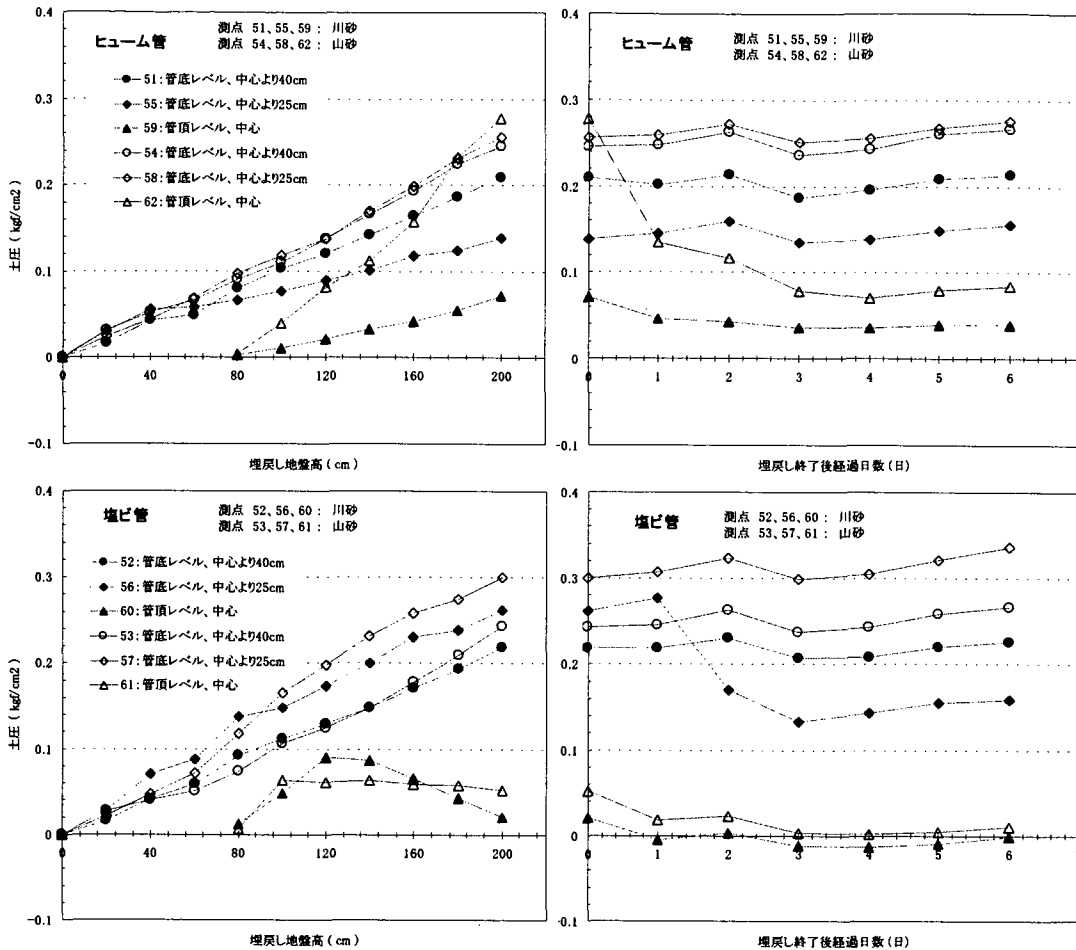


図二 管の埋設状況

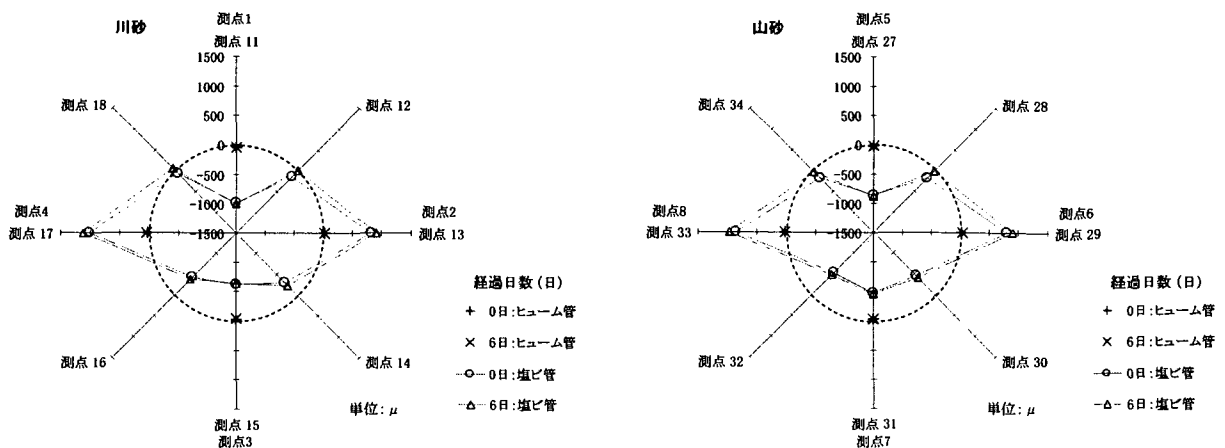
4. 2 埋設時及び直後の管の変形と周辺土圧

各計測地点の土圧を、埋設時の埋め戻し地盤高及びその後の経過日数に対してプロットしたものを図3に示す。それぞれの計測地点の土被りから理論上計算される鉛直土圧は、管底レベルで約 0.30kgf/cm^2 、管頂レベルで約 0.21kgf/cm^2 である。以下のような現象が観察される。

- 管底レベルの土圧は埋戻しとともにほぼ線形に増加し、埋設終了時には理論的土被り圧と比べると 10～20%程度小さめの値となっている。ただし川砂に埋設したヒューム管周辺の土圧は理論的土被り圧の約



図一3 土圧の変化



図一4 ひずみ分布

55%とさらに小さい。土槽側面や管の摩擦により土塊の重さが一部支えられたためであろう。

- ・ 川砂の方が若干大きめの密度であるにもかかわらず、山砂と比べて全体に土圧が小さめであった。両材料の力学的性質の差異によるものと思われる。
- ・ 管頂レベルの土圧は、理論的土被り圧に比べるとはるかに小さい。ただし、山砂に埋設したヒューム管のケースでは大きな土圧が計測され、終了後に大きく減少した。また、管頂レベルの土圧はヒューム管では埋戻しとともに増加しているが、塩ビ管では管の変形に伴って土圧が著しく減少する。塩ビ管の管頂部の土圧は埋設終了後にはほとんどゼロとなった。
- ・ 埋設終了後は値が落ち着くのに約3日間かかるがその後有意な変化は見られない。

図4には埋設終了直後と6日後の管のひずみ分布を示す。塩ビ管は最大1000 μ 程度のひずみが生じたのに対して、ヒューム管では50 μ 以下と非常に小さい。なお、塩ビ管の場合でも設計における許容たわみ量(管径の5%)に比べるとひずみははるかに小さい。両者とも上下方向に潰れる変形モードとなっている。また、時間の経過とともに若干のひずみの進行が見られる。

以上のように、剛性管と撓み管の両ケースにおいて、管頂部の土圧は土被り圧よりも小さめで、特に撓み管の場合は設計における許容変形量よりもはるかに小さなオーダーの変形に伴って土圧が著しく減少した。その後埋設後1ヶ月経過時点まではあまり変化は見られないが、今後も計測を継続し、長期にわたる土圧の挙動を観察する。また、地表から動的載荷を加えて土圧や管のひずみの変動などを計測する予定である。

5. 降下床実験による緩み土圧の時間効果の計測

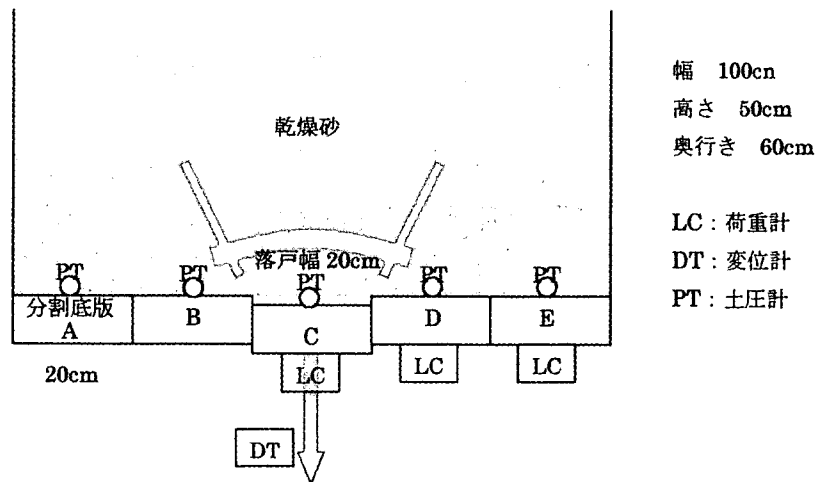
前述した管の埋設実験でも確認されたように、地中構造物に作用する土圧は、その構造物の変形に伴って大きく変化する。降下床実験により、土槽に作成したモデル地盤のゆるみ土圧や降下床上部に形成されるアーチ効果を調べることは古くから行われてきたが、その速度効果やリラクゼーションによる応力変化などを調べた例はほとんどない。そこで、本研究では豊浦標準砂で土槽内に作成したモデル地盤に対して降下床の移動速度を様々に変化させた実験を行った。

5.1 降下床実験の概要

幅1m(奥行き60cm)の土槽の床を5分割し、各底版の上載荷重を別々に測定した。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できる。各底版間のスペースには隙間テープを貼り、摩擦を軽減すると共に隙間からの砂の流出を防いだ。摩擦により発生する中央部底版の荷重の変化は

1.5kgf/cm²以下で、これは今回土槽内に作成した砂重量の1.7%に相当する。計測項目は、底版上載荷重、降下床変位、底版中央部の土圧、砂地盤の温度及び気温である。図5に実験装置を模式的に表した。

乾燥した豊浦標準砂を用い、土槽内に幅1m、奥行き60cm、高さ50cmの均一で中密なモデル地盤を作成した。色砂を層状に配置し、変形の様子を容易に観察できるようにした。4ケース実施した実験条件は表2に



図—5 降下床実験装置

示す通りである。

表一 2 降下床実験条件

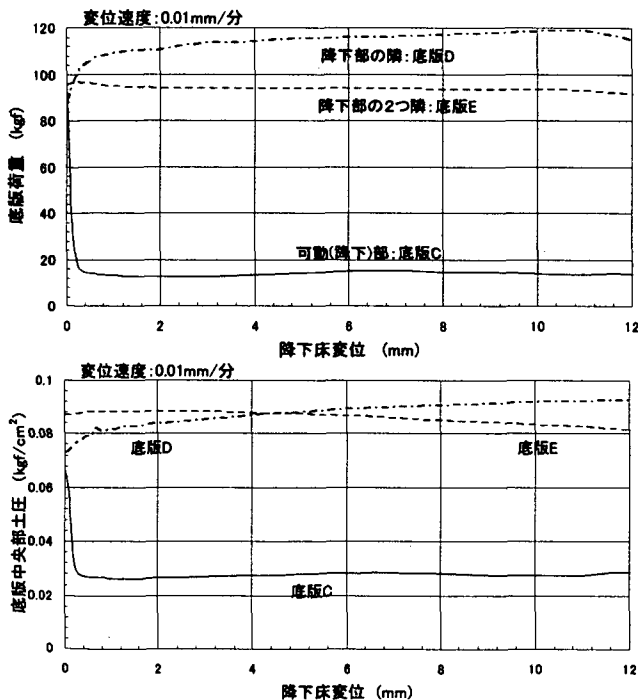
テストの種類	砂地盤乾燥密度 (g/cm^3)	変位速度条件
A 一定速度試験 (遅)	1.473	終始一定速度 (0.01mm/分) で降下
B 一定速度試験 (速)	1.473	終始一定速度 (0.1mm/分) で降下
C 速度急変試験	1.481	0.01mm/分と0.1mm/分の間で急変
D リラクゼーション試験	1.479	0.1mm/分で降下中2時間以上のポーズを10回

5. 2 実験結果

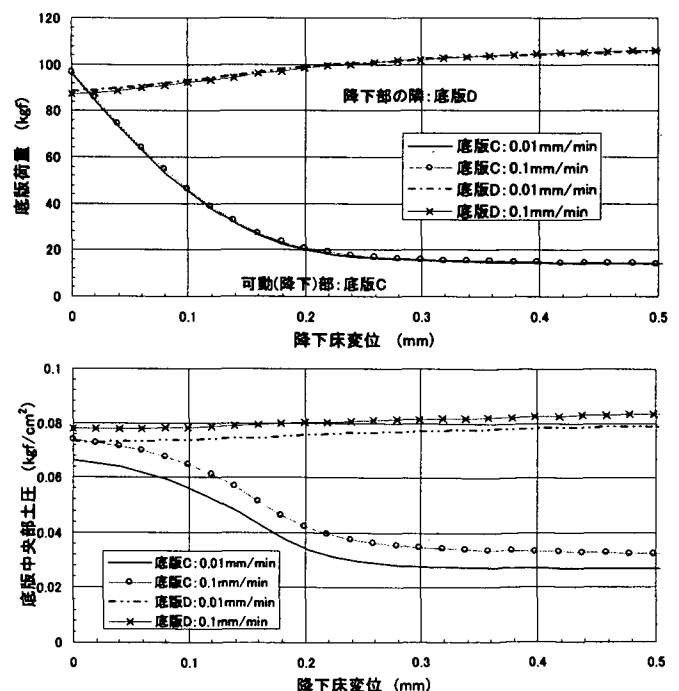
ケース A で得られた底版荷重、底版中央部土圧と降下床変位の関係を図 6 に示す。降下部 (底版 C) の荷重は変位と共に当初荷重の 15% 程度にまで著しく減少した。一方隣接部 (底版 D) の荷重は 30% 程度増加した。底版中央部に配置した土圧計の計測結果は底版荷重と同様の变化の傾向を呈している。ただし、底版上の鉛直応力は均一に分布しているわけではないので変化の度合いは異なる。なお、ほぼ一定の荷重に落ち着くまで要する変位は 0.3mm 程度とごく微小であった (図 7 の微小変位部拡大図参照)。

ケース B ではケース A の 10 倍の変位速度を与えた。荷重・土圧と変位の関係の初期の部分と比較したものを図 7 に示す。関係はほぼ完全に一致していて、本実験の条件の範囲内 (砂地盤における変位速度が 10 倍の相違) では速度による違いは見られないことがわかった。

最近の地盤材料の時間効果に関する研究により、一定変位速度の载荷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事が報告されている⁽¹⁾。これは要素試験において粘着性のない砂のような粒状材料でも確認され、見かけの粘性効果と解釈されてクリープなど時間依存性挙動の予測に役立てられているが、詳細なメカニズムは解明されていない。今回このような現象



図一 6 降下床実験 (ケース A)



図一 7 降下床実験における速度効果

(TESRA 現象：Temporary Effects of Strain Rate and Acceleration) が現れるかどうかを確認するために、変位速度を毎分 0.01mm と 0.1mm の間で急変させる試験をケース C として実施したが、図 8 に示すように、速度急変部は若干のゆらぎが見られるもののほぼスムーズに連続して移行し、顕著な粘性効果はみられなかった。応力レベルが小さく、速度の変化範囲も 10 倍程度であったため顕著な差が出なかった可能性もある。

ケース 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 10 回実施した。図 9 の底版荷重-降下変位の関係では、降下時を太い実線で、停止時を細い点線で表した。本実験は 3 日間にわたって行ったが、実験期間中の温度変動が最大約 $\pm 1.25^{\circ}\text{C}/\text{時}$ と大きく、測定結果がその影響を受けて乱れた。計測装置自体の温度変化の影響は無視しうるものであることが確認済であったが、土槽や砂地盤が温度変化の影響を受けて伸縮し、荷重変化をもたらしたようである。従って図 9 に示すケース D の試験結果は十分なものではないが、リラクゼーション時の降下部の底版荷重はその温度条件などに左右されるものの降下を再開すると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がわかった。

このように、一連の降下床実験では、豊浦砂のような粒状体の場合は見かけの粘性効果はあまり顕著に現れなかった。ケース A~D のように多様な変位速度履歴を与えたにもかかわらず、荷重-変位関係の全体的挙動はほぼ共通であった。このことは、実験により求めた短時間の荷重-変位関係を長期間の挙動に当てはめた推測が可能であるという事を示唆する。ただし、見かけの粘性をより正確に把握するには速度急変の程度を拡大し、温度管理を厳密に施した実験を実施する必要がある。

6. まとめ

長期間経過後の埋設管に作用する土圧が変化する場合の要因を考察し、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った。以下の事が明らかになったが、今後より詳細かつ広範囲な調査が必要である。

- ・ 埋戻し土の固結などの年代効果は数十年の期間では期待できない。
- ・ 地中構造物のわずかな変位で土圧は大きく変化する。下水管理程度程度の荷重レベルでは土圧と変位の関係はその速度履歴に影響されない。

参考文献：(1) 例えば Di Benedetto, H., Tatsuoka, F. and Ishihara, M. (2002), "Time-dependent deformation characteristics of sand and their constitutive modelling" to appear in *Soils and Foundation*.

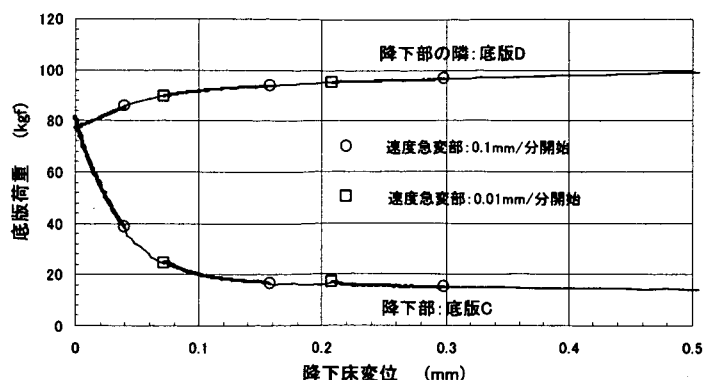


図-8 速度急変時の挙動

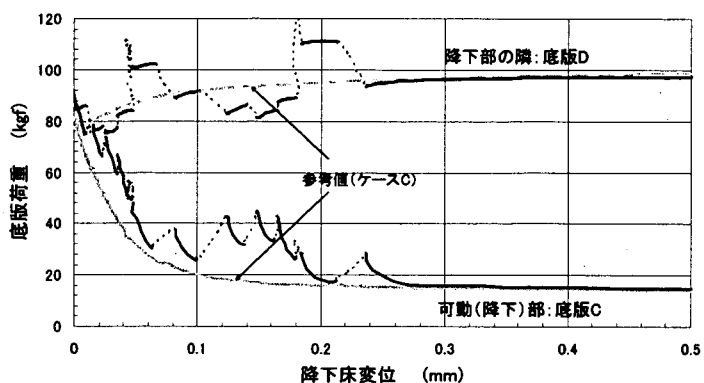


図-9 リラクゼーション試験