

6. 繰り返し微小変位に伴い変形が進行したU型擁壁の挙動

Behavior of U-type Retaining Wall Subjected to Cyclic Displacement

技術部 住吉 卓

1. 経緯

半地下式道路のコンクリートU型擁壁で、完成当初から約3年間にわたって側壁の主働方向への変形が進行した事例がある。種々の調査から、変形進行の主要因を「日々の温度変化による側壁の繰り返し微小変位に伴う背面土圧の増加」であると推定し、躯体に補強工を施して変形を抑えた¹⁾(以下「既報」と呼ぶ)。一方、今後の合理的な擁壁設計に資するため、推定した現象のメカニズムを明らかにすることが課題となった。

その後の室内模型実験により、繰り返し微小変位を伴う際には、側壁の主働方向への変形が進行しながら背面土圧が増加する場面があることを確認できた²⁾。続いて、現場擁壁及び周辺地盤の挙動について再調査³⁾するとともに、東京理科大学及び東京大学と共同で実施した室内模型実験⁴⁾及び要素試験⁵⁾から新たな知見を得ている。

本文では実験の結果に関連して、現場擁壁の調査・計測結果について報告する。

2. 側壁変位の変動

(1) 構造物と計測の概要

擁壁(対策工前)の形状、土留め・埋め戻し方法等の概略を図-1に、対策工の概略を図-2に示す。なお工区は「その5工区」と「その6工区」の2つあり、その6工区が後発である。図-2で(a)の「暫定補強」とは、仮設切梁を設置しプレロードを与えた工事を指す。(b)の「本補強」とは、暫定補強に続いて天端付近へのストラット設置、及び側壁の増厚(その5工区のみ)を施した工事を指す。

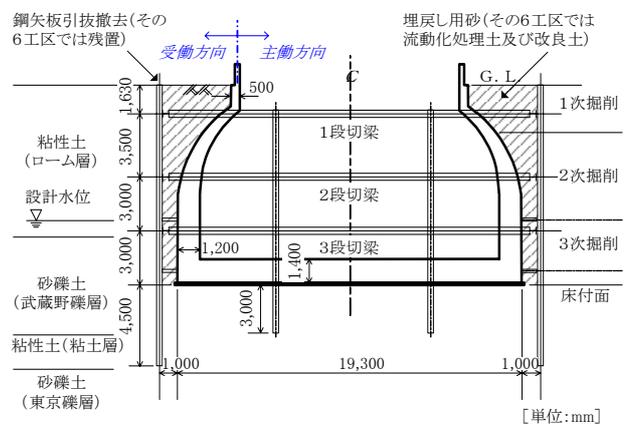
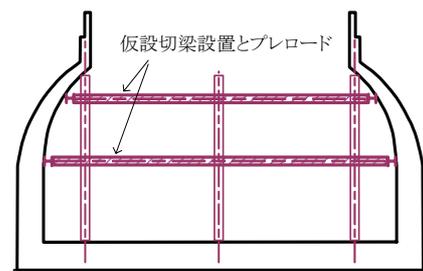
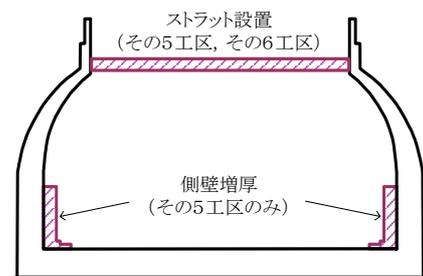


図-1 U型擁壁概略断面図(その5工区)³⁾



(a) 暫定補強(その5工区, その6工区)



(b) 本補強

図-2 対策工の概略^{3)加筆}

構造物の計測については、対策検討当初は下げ振りを用いた天端変位計測などの手動計測を行い、'99/5/10以降は図-3に示すように、側壁各部の変位、傾斜、ひずみ、近傍の気温、そして側壁背面の地下水位を自動計測した。なお本文では、側壁の天端変位「変位1」～「変位6」について、対面する2つの天端間の距離を計測した変位1及び変位6を「両側変位」と呼び、単一の天端の変位（不動点からの距離）を計測した変位2～変位4を「片側変位」と呼ぶ。以下、変位1及び変位6の数値については

1/2を乗じた片側変位相当量に関して述べる。

図-4に側壁の天端変位（変位1～変位6）、及び側壁天端近傍の気温（温度3）の経時変化を示す。

現場では当初その5工区（変位1～変位3）の躯体に変形が生じたため、後発のその6工区では図-1に示す背面对策（鋼矢板残置、流動化処理土の使用）を施した。図-4を見ると、既報¹⁾に述べたように、その5工区に比べて変位量は小さいが、その6工区（変位4～変位6）においても、主働方向への変形が進行したことが確認できる。

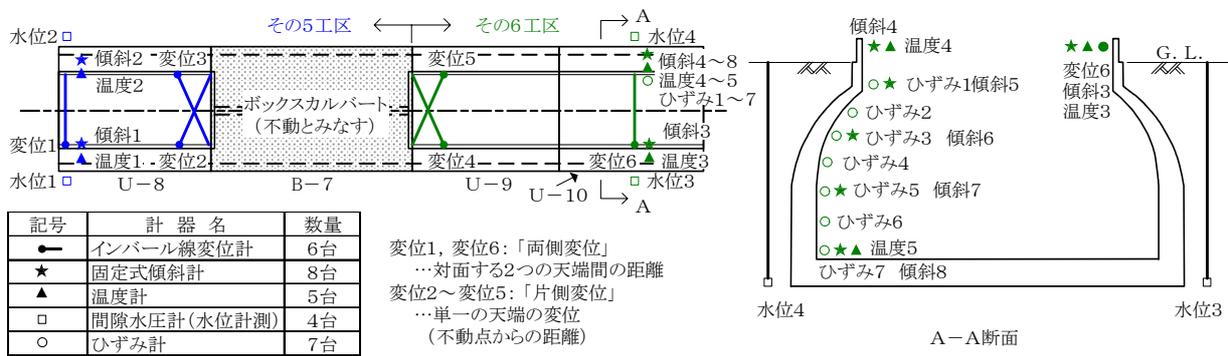


図-3 計測項目及び機器の設置位置³⁾

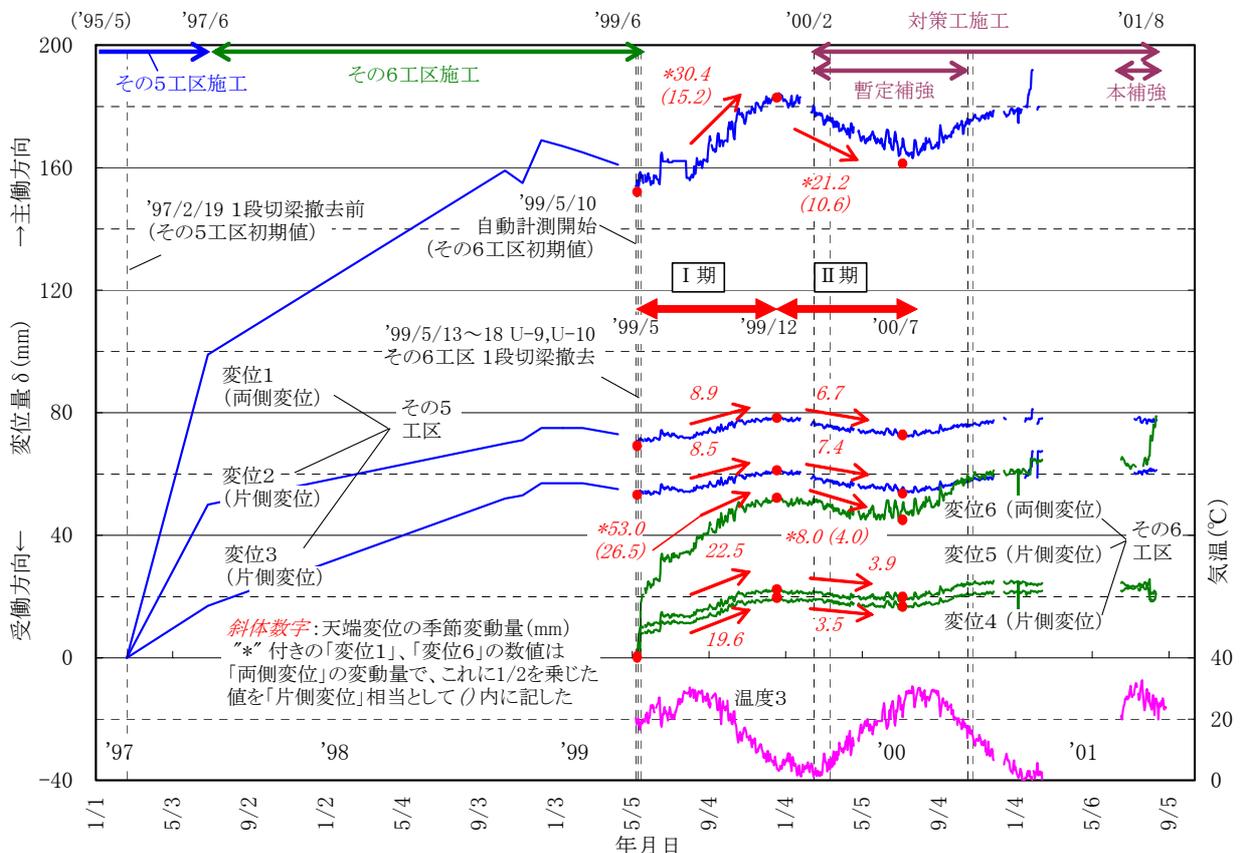


図-4 天端変位及び気温の経時変化^{3)加筆}

(2) 季節変動

既報¹⁾の段階では'99/12までの計測値を用いていたが、図-4にはその後'01/8(計測終了時)までの計測値を追加した。図-4から、気温の季節変動に伴って側壁の変位にも季節変動があったことが確認できる。

図-4に、天端変位(変位1～変位6)の季節変動の方向を矢印で示すとともに、季節変動量(夏の年間最小値と冬の年間最大値の差)を斜体数字で示した。これより、'99/5～'99/12(I期)については、その5工区(変位1～変位3)及びその6工区(変位4～変位6)の季節変動はそれぞれ8.5mm～15.2mm及び19.6mm～26.5mmであり、'99/12～'00/7(II期)については、その5工区(変位1～変位3)及びその6工区(変位4～変位6)の季節変動はそれぞれ6.7mm～10.6mm及び3.5mm～4.0mmであったことがわかる。

ただし、これら天端変位の季節変動には、気温の季節変動に対応する1年周期の変動のほか、I期ではその6工区(変位4～変位6)における1段切梁撤去時の変位(下記(3)参照)を含んでいる。またII期では、その5工区・その6工区共に'00/2以降は対策工を施工中であり、それ以前よりも変動が小さくなっていったと考えられる。

(3) 1段切梁撤去時の変位

その6工区ではI期の一部の期間に当たる'99/5/13～5/18に、躯体構築に伴い仮設1段切梁を撤去した。この前後の期間('99/5/10～5/22)における、その6工区(変位4～変位6)の天端変位を図-4から拡大して図-5に示した。なお、縦軸の変

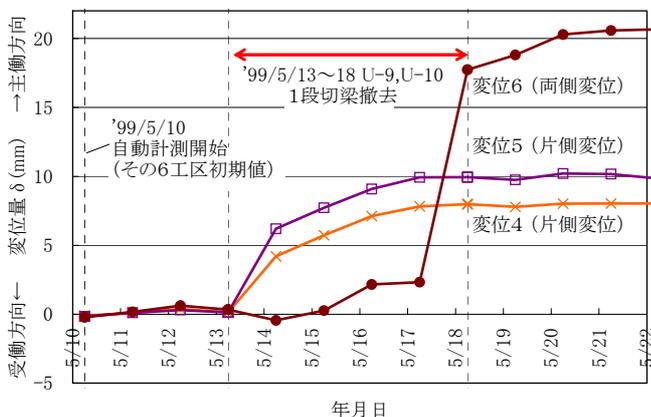


図-5 1段切梁撤去時の天端変位³⁾

位4～変位6の変位量は、1段切梁撤去前の'99/5/10を初期値としている。この期間('99/5/10～5/22)に変位4、変位5、変位6には、それぞれ8mm、10mm、10mm程度の変位が生じたことが確認できる。

1年周期の変位とは異なるこれらの変位が、図-4に記した変位4、変位5、変位6のI期の季節変動量19.6mm、22.5mm、26.5mmに占める割合はそれぞれ41%、44%、38%といずれも半量に近い。

(4) 日変動

表-1から、天端変位(変位2～変位5)の日変動量(日最大値と日最小値の差)は'99/6/1～6/20の期間では0.28mm～2.23mmの範囲であり、平均的には1mm程度であったことがわかる。

(5) 変動の種類

対策工事の影響がないI期に着目すると、上記(2)より、その5工区及びその6工区での季節変動はおよそ1cm及び2cmである。このうち、その6工区については上記(3)より、半量の1cm程度は1段切梁撤去時の変位であるから、これを差し引くと温度変化に対応する周期的な変動部分を、

$$2\text{ cm} - 1\text{ cm} = 1\text{ cm}$$

程度と考えることができる。これを踏まえて天端変位のおよその変動量(変位振幅 δ)について整理すると次のようになる(擁壁高 $H(=11\text{ m})$ で除したひずみ振幅 δ/H も併記する)。

- 季節変動(1年周期の気温変化に対応する部分)

$$\delta \doteq 1\text{ cm}$$

$$\delta/H \doteq 0.1\%$$

- 1段切梁撤去時の変位

$$\delta \doteq 1\text{ cm}$$

$$\delta/H \doteq 0.1\%$$

- 日変動(1日周期)

$$\delta \doteq 1\text{ mm}$$

$$\delta/H \doteq 0.01\%$$

表-1 天端変位の日変動³⁾

計測日('99)	変位2(mm)	変位3(mm)	変位4(mm)	変位5(mm)
6/1	1.57	1.71	1.16	1.45
6/2	1.26	1.31	1.02	1.10
6/3	0.75	0.64	0.61	0.53
6/4	0.86	0.83	0.68	0.75
6/5	1.11	1.29	0.93	1.23
6/6	1.24	1.34	0.93	1.29
6/7	1.06	1.11	0.86	1.11
6/8	1.01	1.41	0.71	1.31
6/9	1.00	1.31	0.72	1.18
6/10	1.15	0.90	0.76	0.68
6/11	1.35	1.24	0.98	1.02
6/12	1.33	1.47	1.00	1.30
6/13	1.16	1.23	0.91	1.18
6/14	1.32	1.38	0.93	1.16
6/15	1.10	1.07	0.88	0.98
6/16	1.12	1.25	0.88	1.13
6/17	1.07	1.05	0.78	0.95
6/18	2.23	2.05	1.80	2.07
6/19	0.38	0.42	0.91	0.99
6/20	0.40	0.28	0.28	0.29
平均値	1.12	1.16	0.89	1.09

* 数値は1日の最大値と最小値の差

3. 周辺地盤の変状

(1) 変状の状況

図-6に示すように、その5工区周辺の地盤では、工事前を初期値として、工事後に地表面沈下及び水平変位（測点間距離の減少）が生じていた。擁壁天端から各測点までの水平距離L（図-6より算出）及び地表面沈下量Sをそれぞれ擁壁高H（=11 m）で除して無次元化し、両者の関係を図-7に示した。図-6及び図-7中の記号①～⑭は同一の測線または測点を指す。

図-7の杭計測値（測線①～⑦）から、 $L/H=0.5$ ～1程度の擁壁付近では $S/H=0.15$ ～ 0.25 %程度の沈下が生じ、擁壁から離れるほど沈下量が小さくなる傾向が確認できる。一方、建物計測値（測点⑧～⑭）は、杭計測値のグラフよりも上の、沈下量が小さい領域にばらついている。これは、建物の基礎構造や地盤改良等の影響により沈下が小さかったため、あ

るいは計測点（叩きコンクリート等）の沈下がその下の地盤沈下に追随していなかったためと考えられる。

(2) 季節変動のサイクル数

上記(1)に述べた杭計測（測線①～⑦）、及び建物計測（測点⑧～⑭）の時期の季節変動サイクル数を想定し、下記(3)で現場計測値と実験値を対比する。

図-8に側壁の概略図を示した。その5工区の側壁変位の季節変動について次のように考えられる。

まず'97/2の躯体完成時期に、1段切梁撤に伴い主働方向への変位が生じた（図中のa）。

続いて、温度変化に伴って主働方向の変位が減少（受働方向へ戻る変位）し、'97夏に年間最小値となった（図中のb）。

その後も温度変化に伴い、主働方向の変位は'97-'98冬の年間最大値、'98夏の年間最小値を経て、'98-'99冬に年間最大値となった（図中のc）。

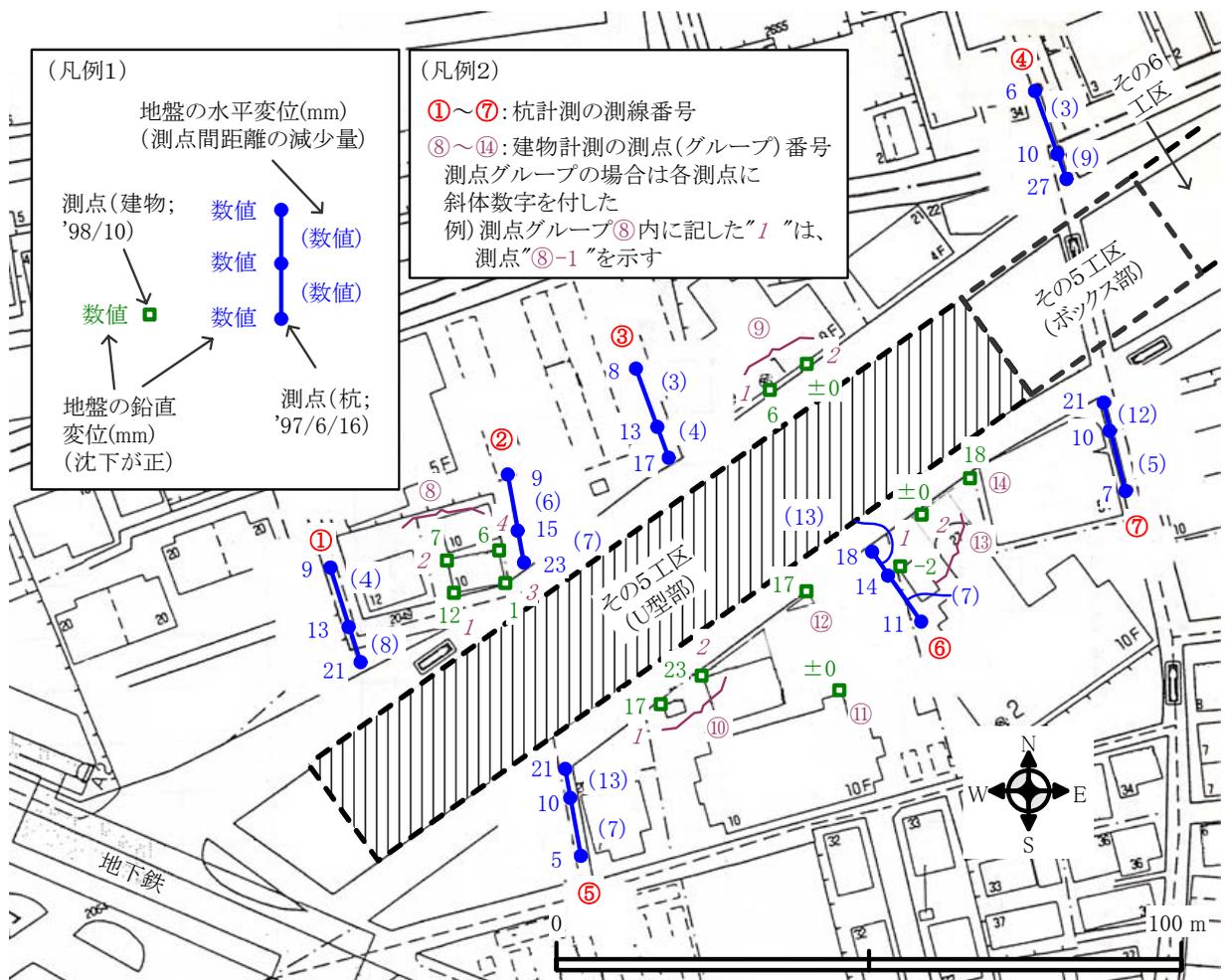


図-6 周辺地盤の変位 ^{3)加筆}

ここで、季節変動期間は1年を1サイクルとし、なおかつ今回は上記 a の1段切梁撤去時の変位が「夏→冬」(≒0.5年)相当の履歴であるとみなすと、a、b、cの時期は図-8に示したように、'97/2を初期としてそれぞれ0.5サイクル、1サイクル、2.5サイクルに相当する時期であると考えられる。

b及びcの時期を、ここでは図-4に示したII期での主働方向変位の年間最小値及び年間最大値が発生した時期と同様にそれぞれ7月及び12月であったとみなすと、'97/6/16の杭計測及び'98/10の建物計測の時期はそれぞれb及びcに近いので、季節変動にしてそれぞれ1サイクル及び2.5サイクル程度に相当する。

(3) 現場計測値と実験値の対比

図-7で記号"0"~"3-"を付した実験値のグラフは、昨年報告した室内模型実験²⁾のうち「実験1」の結果の一部を示したものである。同じ記号を用いて図-9に模型擁壁の概略図を示した。記号中の数字は擁壁の载荷サイクル数を表し、正負の符合は、「+」が擁壁を主働方向に倒した状態を、「-」が擁壁を受働方向に戻した鉛直の状態を表す。時系列順に記せば、

0 → 1+ → 1- → 2+ → 2- → 3+ → 3-

となる。なお、擁壁天端の変位振幅は $\delta = 0.5 \text{ mm}$ ($\delta/H \approx 0.1\%$ …上記2.(5)に示した季節変動相当)で、主働方向への変形を進行させない条件(擁壁を「剛体」と仮定した変位制御²⁾)であった。

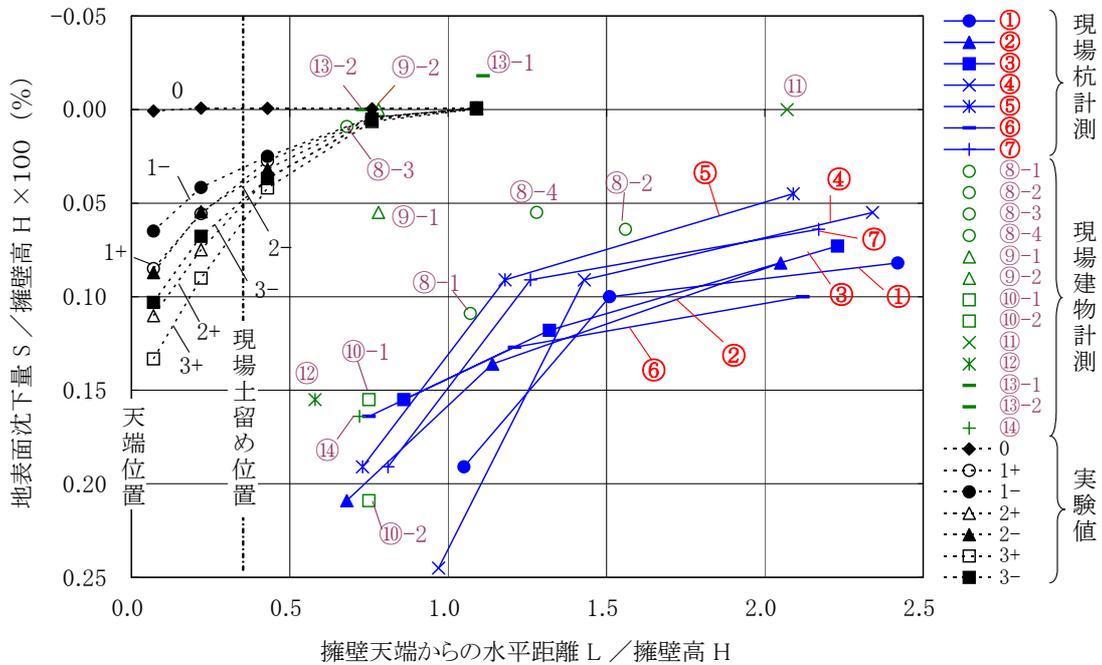


図-7 擁壁からの水平距離と地表面沈下量の関係

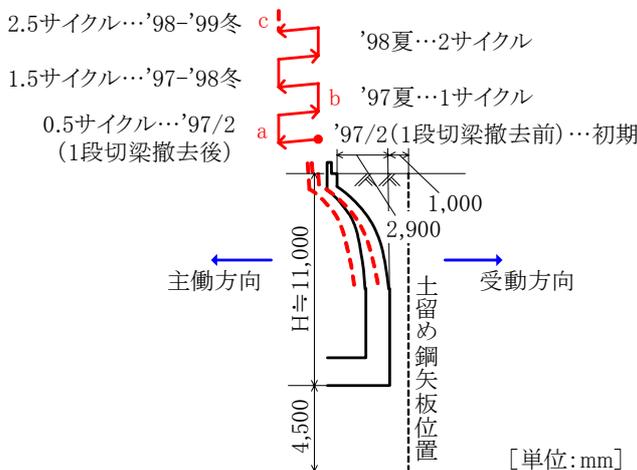


図-8 現場側壁の概略図

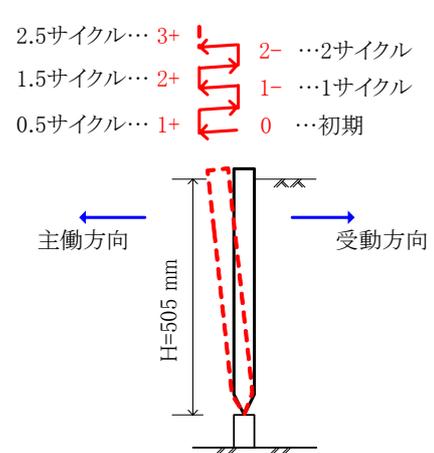


図-9 模型擁壁の概略図

図-7の実験値は、サイクル数が増加するほど、また擁壁近傍ほど沈下量が大きい傾向がある。ただし、擁壁が1+ →1- のように受働方向に変位する(鉛直に戻る)際には沈下は減少、つまり隆起した。

一方、測線①～⑦の杭計測時期は上記(2)に述べたように季節変動1サイクル程度に当たるので、サイクル数の点では実験値1-に近い。実験値1-の沈下量は擁壁近傍の測点(L/H=0.6程度)ではS/H=0.06%程度の沈下が生じている。沈下量は擁壁から離れるほど小さくなり、この傾向は測線①～⑦の杭計測と類似している。沈下量を比べると、実験値1-は測線①～⑦の杭計測値よりも小さい。同様に季節変動2.5サイクル程度に当たる測点⑧～⑭の建物計測については、上記(1)で述べたように沈下量のばら

つきが大きい、サイクル数の近い実験値3+はやはりこれら現場の測点よりも沈下量が小さい傾向にある。この原因の一つとして、現場では実験のような繰り返し変位以外の要因、例えば掘削や土留め鋼矢板引き抜きなどによる影響があると考えられる。

4. 最近の実験結果

(1) 実験内容及び結果の概要

野尻ら⁴⁾の室内模型実験(昨年報告した実験²⁾から継続中の土槽装置を用いた実験、及び新井ら⁵⁾の要素試験(新規実施の平面ひずみ試験)では新たな知見を得ている。実験内容の詳細や土圧が増加するメカニズムの考察等については文献^{4),5)}を参照されたい。ここでは結果の一部を紹介する。

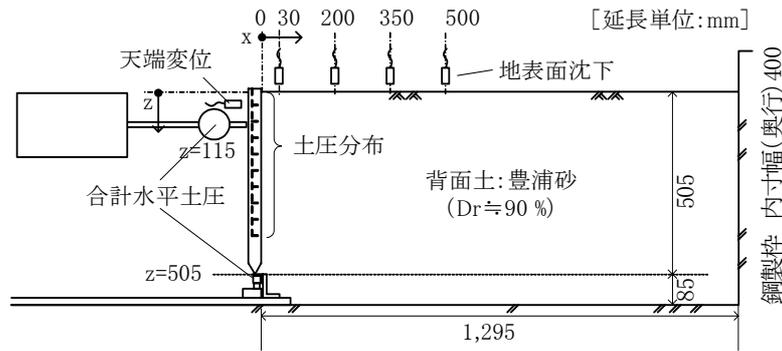
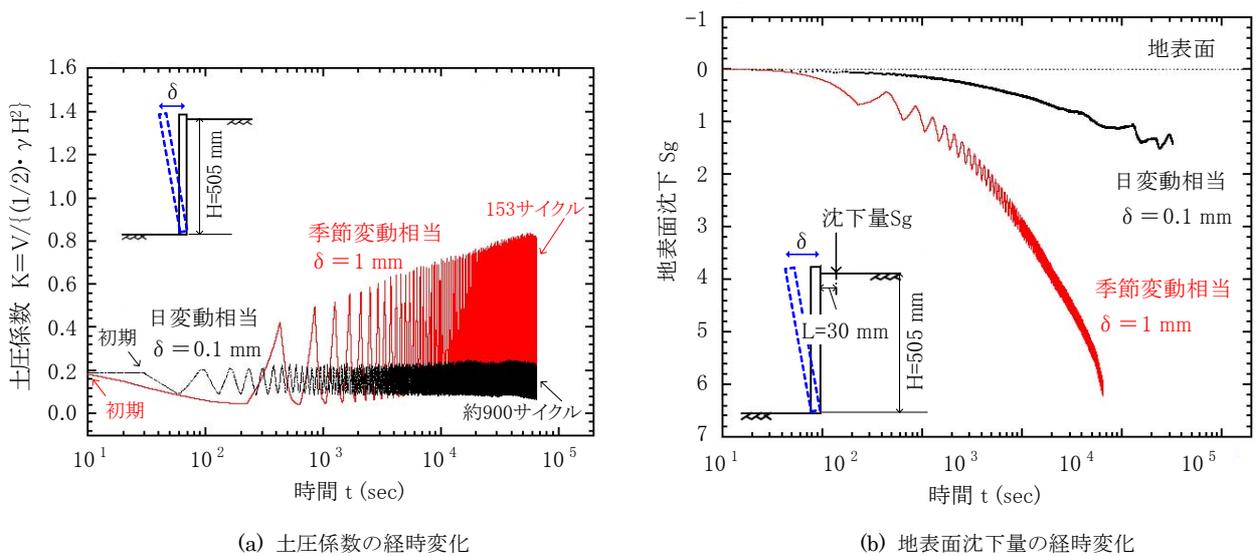


図-10 模型実験装置⁴⁾



(a) 土圧係数の経時変化

(b) 地表面沈下量の経時変化

図-11 模型実験の結果(擁壁を「剛体」と仮定したケース)^{4)加筆}

図-10は室内模型実験⁴⁾の装置の概略であり、これは文献2)の装置を一部改良したものである。図-11は擁壁の繰り返し変位振幅を現場側壁の日変動相当 ($\delta = 0.1 \text{ mm}$ 、 $\delta / H \approx 0.02 \%$) 及び季節変動相当 ($\delta = 1 \text{ mm}$ 、 $\delta / H \approx 0.2 \%$) としたケースにおける土圧係数 K (図-11 (a)) と地表面沈下量 S_g (図-11 (b)) の経時変化である。図-11から、

- ① 繰り返し変位の振幅が小さい(日変動相当) ケースでは土圧が増加しなかった
- ② 繰り返し変位の振幅が大きい(季節変動相当) ケースでは土圧が増加した
- ③ 土圧が増加したケースでは背面土が大きく沈下した

ということがわかる。なお図-11は主働方向の変形

が進行しないケース(擁壁を「剛体」と仮定したケース)の結果のみ示しているが、主働方向の変形が進行するケース(擁壁を「弾塑性体」と仮定したケース)で季節変動相当の繰り返し変位振幅を与えた場合でも、上記②及び③と同様の結果を得ている。

一方要素試験⁵⁾は、乾燥豊浦砂を用いた角柱型の供試体 ($96 \text{ mm} \times 62 \text{ mm} \times 120 \text{ mmH}$) によるひずみ制御の平面ひずみ試験である(拘束圧 30 kPa)。この試験では図-12にイメージを示したように、現場の地盤における応力の方向を 90° 回転した状況となっている。つまり、擁壁からの水平主応力(土圧)は供試体の鉛直主応力に対応し、土被り圧は供試体の水平拘束圧に対応する。

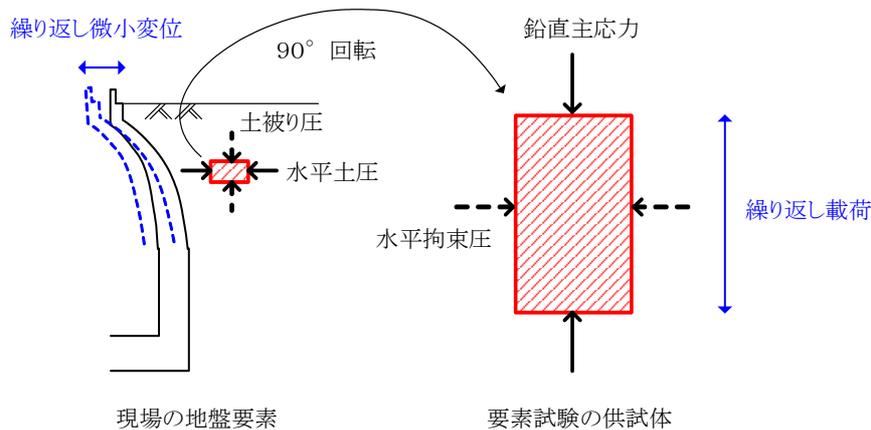


図-12 要素試験のイメージ

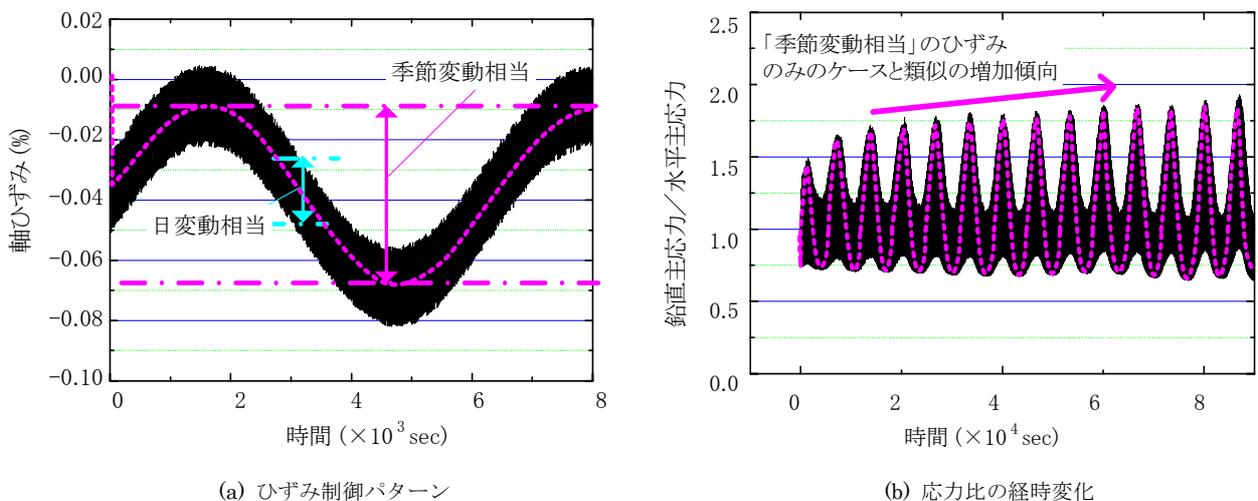


図-13 要素試験の結果(「季節変動相当」と「日変動相当」のひずみを組み合わせたケース)^{5)加筆}

図-14 で、現場擁壁 (★, ☆) と模型実験 (□, ●) のデータの位置関係を見ると、模型実験のグループは、現場擁壁の土圧推定値に対応する繰り返し変位振幅として日変動 (☆) よりも季節変動 (★) を想定した場合に近い。

5. 過去の検討内容の見直し

既報¹⁾の段階では側壁変形の要因を図-15のように分類し、各種調査の結果から、図-4(当時は'99/12までのデータ)のように側壁の主働方向への変形が進行した主たる要因は「土圧」である、すなわち、

図-16に模式的に示したように「日々の温度変化による側壁の繰り返し微小変位(当時は日変動を想定)に伴い背面土圧が増加し、側壁の主働方向への変形が進行した」ものと推定した。

上記 4. の実験結果は、上記 2. 側壁変位の変動、及び 3. 周辺地盤の変状で述べた現場の状況(側壁の季節変動、主働方向への変形進行、地表面沈下があったこと)に整合する。また、現場の側壁で繰り返し微小変位に伴い背面土圧が増加し主働方向への変形が進行した、という推定に合致するとともに、側壁変位の季節変動にも着目すべきことを示している。

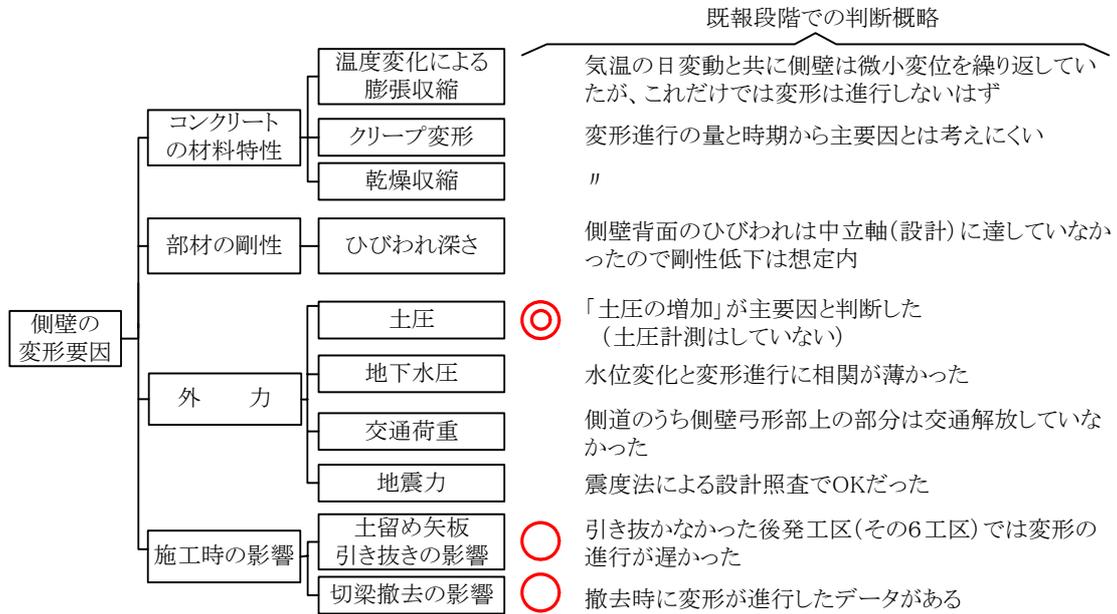


図-15 側壁変形の要因分類(当時)¹⁾加筆

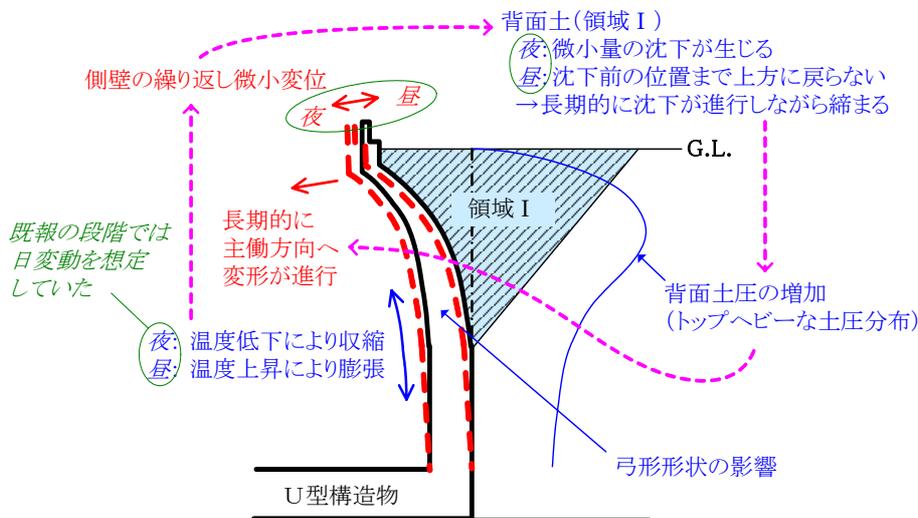


図-16 推定した現象(当時)¹⁾加筆

一方、例えば図-7 に示したような現場計測値と実験値の比較では、大まかな挙動は類似しているものの、まだ明らかでないことも多い。

今後、現象の解明を一層進めるには、以上のような現場データの更新や実験で得られた新しい知見を前提に、図-15 のような既報¹⁾の段階で分類した項目について詳細に精査を行っていく必要があると考える。

6. まとめ

現場における側壁の変位挙動には、振幅は小さいが繰り返し数が多い日変動と、振幅は大きい繰り返し数が小さい季節変動、そして1段切梁撤去に伴う大きな変位があったことを確認した。また現場周辺の地盤では、駆体工事後に地表面沈下や水平変位が生じていた。

最近の実験結果^{4),5)}から、こうした現場状況の下で、従来から推定していた背面土圧の増加現象が起り得ることが確認できたとともに、変位の季節変動が土圧増加に大きく寄与している可能性が判明した。

おわりに

今後の展望として、図-14 に示したような整理を進展させ、様々な構造や地盤条件・施工条件等の擁壁で生じる繰り返し変位や一時的な変位を定量化し、実擁壁に生じる変位と土圧増加程度の関係を表現したいと考える。

(謝辞)

本文で用いた図表類は既報¹⁾のほか、現場対応当時の資料や計測データを元に作成しており、関係各位のご尽力に感謝します。

また本文で紹介した室内模型実験⁴⁾については東京理科大学の龍岡文夫教授、平川大貴助手のご指導のもと卒論生の野尻峰広氏と笠原広智氏が、要素試験⁵⁾については東京大学の内村太郎講師のご指導のもと卒論生の新井寿和氏が主に実施された。これらの方々のご慧眼と熱意に敬意を表します。

そして現場データの解釈・整理に当たっては杉本隆男 元技術部長及び技術部 佐々木俊平主任研究員に有益な助言をいただき感謝します。

参 考 文 献

- 1) 住吉卓、山村博孝、藤本慎也、佐々木俊平 (2003) : 工事に伴う地盤問題に関する現場調査事例、平 15. 都土木技研年報、109-118
- 2) 住吉卓、山村博孝 (2004) : 擁壁の繰り返し微小変位に関する模型実験、平 16. 都土木技研年報、111-116
- 3) 住吉卓、平川大貴、野尻峰広、笠原広智、内村太郎、新井寿和、龍岡文夫 (2005) : 繰り返し微小変位に伴い変形が行ったU型擁壁の事例報告、第 40 回地盤工学研究発表会、平成 17 年度発表講演集、1743-1744
- 4) 野尻峰広、笠原広智、龍岡文夫、平川大貴、住吉卓、新井寿和、内村太郎 (2005) : 多数回の水平微小繰り返し荷を受ける擁壁の残留土圧特性、第 40 回地盤工学研究発表会、平成 17 年度発表講演集、1753-1754
- 5) 新井寿和、内村太郎、住吉卓、龍岡文夫、平川大貴、野尻峰広 (2005) : 繰り返し微小変位を受ける擁壁の裏込め土を模擬した平面ひずみ試験、第 40 回地盤工学研究発表会、平成 17 年度発表講演集、1751-1752