

16. 特殊な擁壁の変位に関する検証

Verification for Unusual Displacements of Retaining Walls

技術調査課 住吉卓、佐々木俊平、廣島実

1. はじめに

道路整備事業の一環として施工した鉄筋コンクリートU型擁壁（半地下道路トンネル）の側壁が、構築後、道路側への変形が継続して止まらないという現象が生じた。

土木技術研究所（当時）は現場調査や計測結果を検討し、変形の主要因を擁壁背面土圧の増加によるものと判断し、さらに、土圧の増加は「日変動や季節変動などの気温変化による側壁の繰返し変位に伴って生じる現象」と推察した。そして、対策工として擁壁天端へのストラット設置と側壁の増厚を提案した。この対策工施工により変形の進行は止まり、その後擁壁に変状は生じていないが、「土圧増加現象の検証」が技術課題として残った。

ここでは、土圧増加現象の発生条件やメカニズムを検証するために実施した、文献・現地調査や室内模型実験などに関する共同研究（平成 13～17 年度：東京大学、平成 15～17 年度：東京理科大学）のうち、

①擁壁の背面土圧が増加する現象

②土圧増加への対策

③擁壁の設計

について、その概要を報告するものである。

詳細は「特殊な擁壁の土圧増加と変位に関する技術資料」（平成 19 年、東京都土木技術センター）¹⁾を参照されたい。

2. 擁壁の背面土圧が増加する現象

(1) コンクリート擁壁が変形した現場事例²⁾⁻⁶⁾

現行の擁壁の設計基準⁷⁾では、通常、擁壁（盛土部擁壁）の設計土圧として主働土圧（ストラット付きU型擁壁などの場合は静止土圧）を用いている。これは、図-1 に示す線 a を想定し、通常（単調载荷の場合）、壁が主働方向に移動すると土圧は主働土圧に向かって減少するという考え方である。

多くの場合、主働土圧を用いて設計し、構造物の

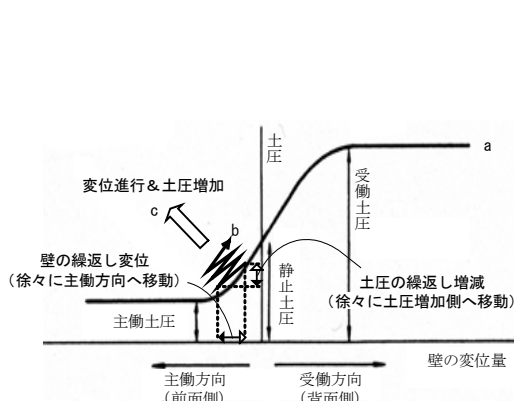


図-1 壁の変位と土圧

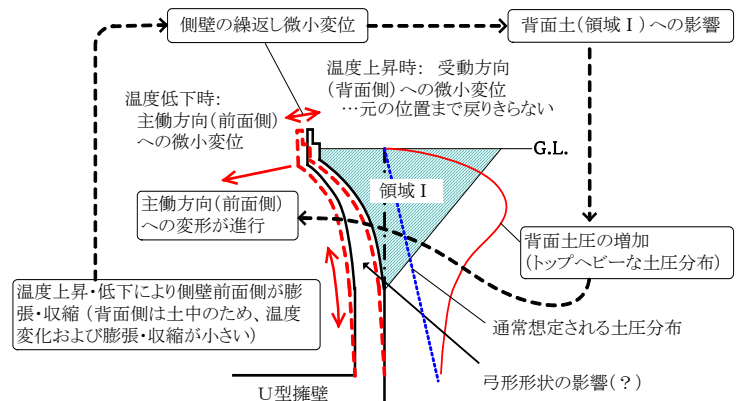


図-2 土圧が増加する現象の推定

損傷等の問題は生じていないと考えられる。しかし、側壁に強制的な繰返し変位が生じる擁壁では、側壁の変位が徐々に進行しながら背面土圧が増加することがある。

側壁が弓形にオーバーハングした断面形状のU型コンクリート擁壁で、側壁の主働方向（前面側）への変形が進行した事例では、各種要因の検討結果から、設計想定外の土圧の増加が生じたものと判断した。すなわち、「気温変化に伴う側壁の繰返し変位により土圧が増加する」現象が主要因であると推定した。この現象の模式図を図-2に示す。

これを図-1に当てはめると、次のようになる。

①気温の季節変動や日変動に伴って壁に「受働方向～主働方向」の繰返し変位が生じる（繰返し範囲は徐々に主働方向に移動する）のに対応して、②土圧は繰返し増減する（繰返し範囲は徐々に土圧増加側に移動する）。つまり（変位，土圧）の値は、模式的には線bのようなジグザグの経路を取り、壁が主働方向への変形が進行しながら土圧が増加する（矢印c）。

(2) 実験による検証^{3), 4), 6), 8)-12)}

模型実験、および土の要素試験を実施した研究により、図-2のように推定した現象が実際に生じ得ることが検証された。

すなわち、模型擁壁の繰返し変位振幅（土要素の繰返しひずみ振幅）を変えて実験したところ、振幅

が大きいほど土圧が大きく増加し、また、繰返し変位を与えつつ擁壁の主働方向への残留変位を徐々に増加させるケースでも、土圧が増加することが判明した。

模型実験の結果の一部を図-3に示す。ここでは、側壁変位の季節変動（振幅大）が、日変動（振幅小）に比べて、土圧増加に大きく寄与していることがわかる。また、土圧が大きく増加したケース（季節変動相当）では背面土が大きく沈下しており、土が高密度化したと考えられる。

(3) インテグラル橋における橋台背面の土圧増加

1) インテグラル橋とは

インテグラル橋とは、図-4(b)に示すような、支承・伸縮装置を排して床版に結合された橋台（インテグラルアバット）を有する橋梁であり、1930年代初頭には米国の道路橋で採用され、各国に広まった¹³⁾。

図-4(a)に示す一般の橋では、床版の熱膨張・収縮による影響を支承・伸縮装置で吸収し、橋台への応力伝達や橋台の変位が抑制されるが、図-4(b)のインテグラル橋では、床版に結合されたインテグラルアバットが、橋軸方向に変位や傾斜をすることが大きな特徴である。なお基礎構造は、ここでは単列の杭基礎を示したが、フーチング基礎などの場合もある。

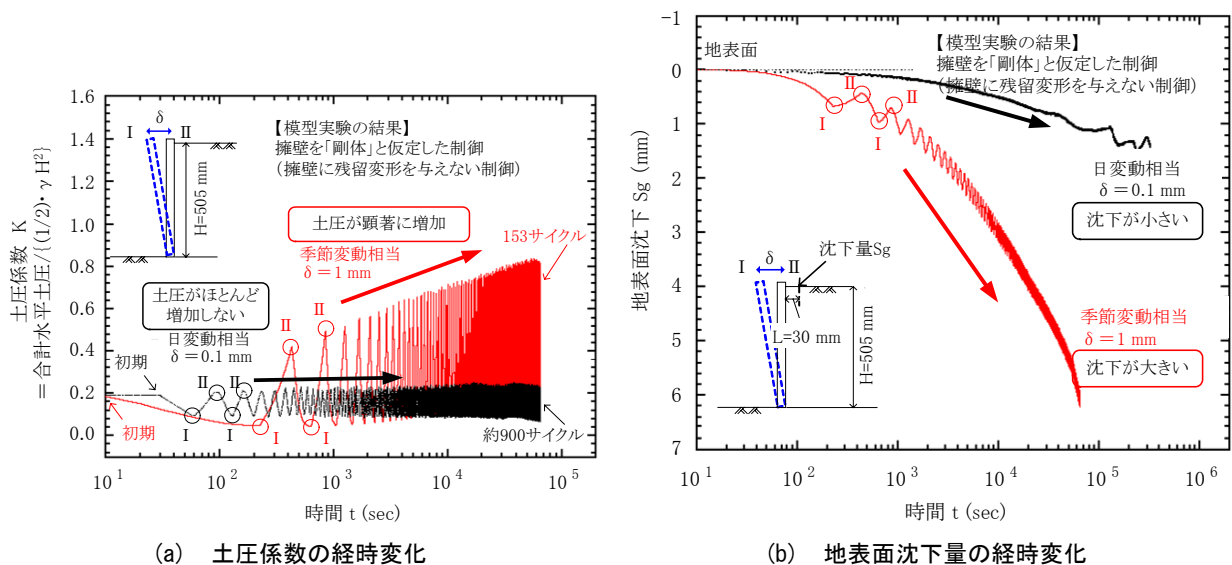


図-3 模型実験の結果

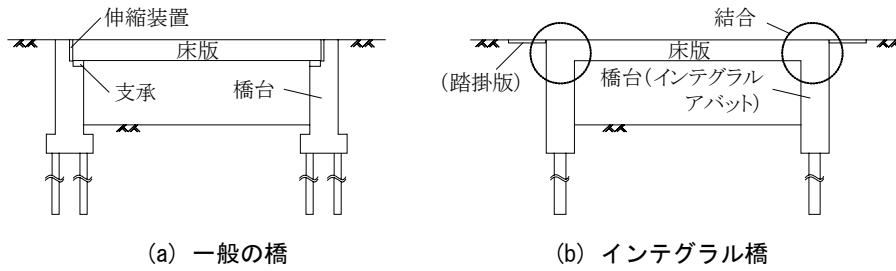


図-4 一般の橋とインテグラル橋の比較

2) インテグラル橋の橋台における土圧の増加

インテグラル橋では、床版の熱膨張・収縮に起因する橋台（インテグラルアバット）の繰返し変位に伴って背面土圧が増加することが、欧米で広く認識されている。近年の研究^{13),14)}では、土圧が増加する現象を「ラチェッティング」であるとし、現象の理解や定量化が進展している。

「ラチェッティング」とは次のような現象である。気温の季節変動による床版の熱膨張・収縮に伴い、橋台は冬に前面側、夏に背面側に変位する。橋台の背面地盤に土楔を想定すると、土楔は前面側変位時（冬）に沈下し、背面側変位時（夏）に完全には回復しない。この変位の繰返しに伴って、土圧は夏に大きくなり、しかも年々増加する。

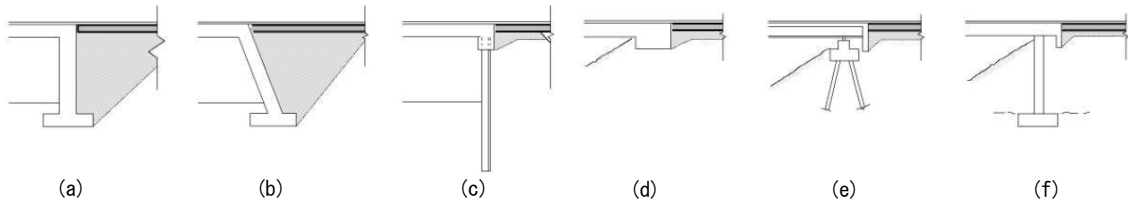
この現象を図-2の擁壁に当てはめると、橋台を擁壁に、床版の膨張・収縮を側壁前面部の膨張・収縮に置き換えて同様に説明できる。

3) インテグラル橋の設計土圧

米国、英国、カナダなどではインテグラル橋の設計基準が整備されており¹⁵⁾、米国39州のアンケート調査結果¹⁶⁾によると、設計土圧には、受働土圧（33%）、受働土圧・主働土圧の組合せ（18%）、主働土圧（8%）、その他の組合せ・手法（26%）が採用されている。統一的な手法はないが、主働土圧の採用は少数派で、土圧増加を考慮している州が多い。ここでは、土圧増加を設計方法に反映した例として、英国の要領 BA42/96¹⁷⁾におけるインテグラル橋の土圧の取り扱いを紹介する。

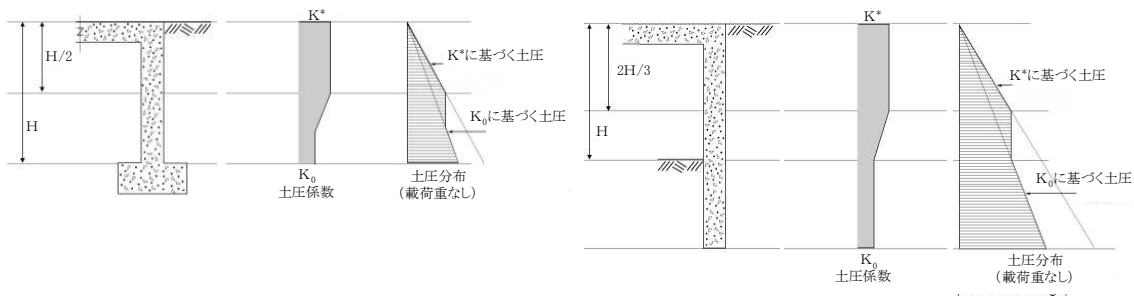
この要領¹⁷⁾では、インテグラルアバットは図-5に示すように分類され、土圧分布形状は構造形式別に算出される値 K^* を考慮して定める。

例えば Frame abutment では、壁面摩擦 δ を $\phi' / 2$ とすると、受働土圧係数 K_p 、背面土の保持高さ H 、橋台天端の熱膨張・収縮による変位量 d



(a)&(b) Frame abutments, (c) Embedded abutments, (d) Bank pad abutments, (e)&(f) End screen abutments

図-5 インテグラルアバットの種類¹⁸⁾



(a) Frame abutments の土圧分布

(b) Embedded Wall abutments の土圧分布

図-6 インテグラルアバット背面の土圧分布の例¹⁸⁾を和訳

土圧増加による壁体損傷の可能性が低くなると考えられる。

上記②の例としては、インテグラル橋の設計方法の提案¹³⁾がある(図-9)。橋台背面の直近の裏込めには弾性EPSジオフォームを用い、さらに背面を、自立性の高い、ジオシンセティックスによる補強土盛土やEPSブロックによる軽量盛土(軟弱地盤の場合)とするものである。これにより、床版の熱膨張・伸縮や橋台の移動が確保(拘束による構造への負担が軽減)され、かつEPSジオフォームが一種の伸縮装置として働くので、さらに背面の補強土盛土・軽量盛土では、橋台の繰返し変位による土圧増加や地表面沈下が生じにくくなる。その効果は、数値解析で確認され、弾性EPSジオフォームを用いない補強土盛土・軽量盛土のみのケースについては実構造物でも認められている。

上記③に関しては、設計土圧を割り増すなどの対策が挙げられる。図-7の対策工²⁾⁻⁶⁾では土圧係数 $K=1$ を想定した(当初設計では $K=0.3$)。インテグラル橋においては、上記2.(3)に示したように、英国の要領BA42/96¹⁷⁾では K^* なる値を考慮し静止土圧以上の設計土圧を想定しており、米国でも土圧増加を想定している例が多いようである¹⁶⁾。

また図-10は、重力式橋台橋梁(通常の橋)、インテグラル橋、小橋台を持つジオシンセティックス補強土橋梁、橋台をジオシンセティック補強土壁としたインテグラル橋(一体GRS橋梁)、の4通りの

橋梁が比較検討された振動台実験¹⁸⁾の装置の例である。この実験により、一体GRS橋梁の工費・工期、維持管理、耐震性における優位性が確認されており、適切な土圧増加対策がなされたインテグラル橋などの構造物が、耐震性など他の機能においても有利となることを示唆していると考えられる。

さらに、施工事例が少ない、あるいは現行の擁壁の設計基準類で想定していない、特殊な形状・寸法等を採用するに当たっては、繰返し変位による影響を複数の手法で確認し、安全性を照査することが必要である。

4. 擁壁の設計

側壁の繰返し変位によって背面土圧が増加すると、躯体が損傷し、また、背面地盤の沈下などの変状が発生する可能性がある。そのため、擁壁の設計に当たり、側壁の繰返し変位による土圧増加が生じる恐れのある場合は、対策を検討する必要がある。

国内の地盤に築造される各種の擁壁における、実際の繰返し変位状況、および変位と土圧増加の関係については、十分に検証・定量化されていないのが現状である。欧米で普及しているインテグラル橋についても、我が国では、オモタイ川橋およびナイベコシナイ川橋(いずれも北海道)¹⁹⁾や、西浜陸橋(兵庫県)²⁰⁾などで採用事例はあるが、一般には普及していないこともあり、土圧増加を定量的に反映した基準は整備されていない現状にある。

表-1 繰返し変位検討の参考情報

	仕様等	繰返し変位の振幅 δ 等	土圧増加の有無等
現場擁壁事例	<ul style="list-style-type: none"> 擁壁高さ$H \approx 11$ m コンクリートU型擁壁 側壁が弓形にオーバーハングした断面形状 	日変動と季節変動が重なった、側壁の繰返し変位が実測された <ul style="list-style-type: none"> 日変動 $\delta \approx 1$ mm, $\delta/H \approx 0.01$ % 季節変動 $\delta \approx 1$ cm, $\delta/H \approx 0.1$ % 	現場計測等に基づく要因検討から、土圧増加を主要因として側壁の主働方向への変形が進行したと判断された。土圧係数 $K=1$ まで土圧が増加することを想定し、対策工を施した。
模型実験	<ul style="list-style-type: none"> 擁壁高さ$H \approx 50$ cm 土槽実験 背面土は豊浦砂(空気乾燥状態) 	実施ケース <ul style="list-style-type: none"> ① $\delta \approx 0.1$ mm, $\delta/H \approx 0.02$ % ② $\delta \approx 0.25$ mm, $\delta/H \approx 0.05$ % ③ $\delta \approx 0.5$ mm, $\delta/H \approx 0.1$ % ④ $\delta \approx 1$ mm, $\delta/H \approx 0.2$ % ⑤ $\delta \approx 1.5$ mm, $\delta/H \approx 0.3$ % ⑥ $\delta \approx 2.5$ mm, $\delta/H \approx 0.5$ % 	①では土圧がほとんど増加しなかった。②~⑥では土圧が増加した。 δ が大きくなり、繰返しサイクル数が大きいほど土圧が大きく増加した。
BA42/96	橋梁床版の長さが60 mまでで、直橋から斜角が 60° までの斜橋には、通常、インテグラル橋を採用する。	各橋台(インテグラルアバット)の繰返し変位量が ± 20 mm($\delta = 40$ mm相当)を超えない場合に本要領を適用できる。	インテグラルアバットの構造別に K^* なる値を考慮して土圧分布形状を想定し、土圧増加に対応している。

繰返し変位の検討では、当面、上記 2. に述べた変位振幅の現場実測値、模型実験の結果、英国の要領 BA42/96¹⁷⁾の適用条件等を示した表-1 が参考になる。

なお、通常仕様の擁壁については、これまで現行基準類による設計がなされており、施工実績も多く、土圧増加による躯体損傷の報告も特にない。しかし、外力の作用条件によっては、側壁の繰返し変位に起因して躯体や地盤の軽微な変状が生じている可能性もあり、それとは気づかれずに個別の維持補修がなされていることも考えられる。今後、躯体の損傷防止や、合理的・経済的な擁壁設計のために、現場擁壁での天端変位などの経時的な計測データの集積が望まれる。

5. おわりに

以上、U型擁壁の土圧増加と変位に関する一連の調査・開発成果を述べてきた。さらに、その対策や擁壁設計の注意事項にも触れた。

本文が、今後の擁壁の設計土圧に関する検討に寄与すれば幸いである。

最後に、現場調査や現場計測、資料提供にご協力いただいた建設事務所の関係各位、並びに、共同研究でご指導いただいた東京理科大学の龍岡文夫教授・平川大貴助手、東京大学の内村太郎助教授、また、インテグラル橋に関する文献を紹介していただいた(独)土木研究所の小林篤司氏に、紙面をかりて感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 東京都土木技術センター(2007)：特殊な擁壁の土圧増加と変位に関する技術資料、平 19. 東京都土木技術センター資料
- 2) 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
- 3) 杉本隆男、住吉卓、廣島実 (2003)：地盤の破壊現象と土留め・山留め工の計画と選定、基礎工、Vol. 31、No. 4、21-25、2003. 4
- 4) Sugimoto, T., Sumiyoshi, T., Sasaki, S., Hiroshima, M. and Yamamura, H. (2003)：Increasing Earth Pressure by Cyclic Displacement of Wall, Geotechnical Engineering in Urban Construction (Proceedings of the Sino-Japanese Symposium on Geotechnical Engineering), 189-196, CISMGE-JGS, 2003. 10
- 5) 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)：繰返し微小変位に伴い変形が進行したU型擁壁の事例報告、第40回地盤工学研究発表会、No. 872、2005. 7
- 6) 住吉卓 (2005)：繰返し微小変位に伴い変形が進行したU型擁壁の挙動、平 17. 都土木技研年報、69-78
- 7) 日本道路協会(1999)：道路土工 [擁壁工指針]
- 8) 住吉卓、佐々木俊平、山村博孝、杉本隆男 (2002)：擁壁の繰返し微小変位に伴う背面土圧の挙動、平 14. 都土木技研年報、165-174
- 9) 住吉卓、山村博孝、藤本慎也、内村太郎、龍岡文夫 (2004)：擁壁の繰返し微小変位と背面土圧、土木学会第 59 回年次学術講演会、491-492、2004. 9
- 10) 住吉卓、山村博孝 (2004)：擁壁の繰返し微小変位と背面土圧に関する模型実験、平 16. 都土木技研年報、111-116
- 11) 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返し载荷を受ける用へ樹の残留土圧特性、第 40 回地盤工学研究発表会、No. 877、2005. 7
- 12) 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、No. 876、2005. 7
- 13) Horvath, J. S. (2004)：Integral-Abutment Bridges: A Complex Soil-Structure Interaction Challenge, Geotechnical Engineering for Transportation Projects (Proceedings of GEO-TRANS 2004)、Volume One, Geotechnical Special Publication No. 126, ASCE, 460-469, 2004. 7
- 14) England, G. L., Tsang, C. M. and Bush, D. I. (2000)：Integral Bridge - A fundamental approach to the time-temperature loading problem, Thomas Telford, London, UK
- 15) 土木研究センター、新日本製鐵 (2004)：インテグラル橋の計画ガイドライン (案) (鋼桁編)、2004. 3
- 16) Maruri, R. F. and Petro, S. (2005)：Integral Abutments and Jointless Bridges (IAJB) 2004 Survey Summary, Integral Abutments and Jointless Bridges (IAJB) 2005 (The 2005-FHWA conference), 12-29, 2005. 3
- 17) The Highway Agency (2003)：The Design of Integral Bridges, BA 42/96 Amendment No. 1, Design Manual for Roads and Bridges, 2003. 5
- 18) 相澤宏幸、野尻峰広、平川大貴、錦織大樹、笹田泰雄、龍岡文夫、渡辺健治、館山勝 (2006)：補強・無補強盛土からなる各種橋梁形式の構造・工程及び性能の比較、ジオシンセティクス論文集、国際ジオシンセティクス学会日本支部、Vol. 21、175-182
- 19) 太田哲司、田村陽司、中村元 (1999)：インテグラルアバット橋の設計・施工、橋梁と基礎、152-153、1999. 8
- 20) 道下恭博、櫻井信彰、本間宏二、渡部弘明、平田尚、藤川敬人 (2001)：インテグラル複合ラーメン橋 (西浜陸橋) の設計と施工、橋梁と基礎、11-18、2001. 2