

(58) 移動計測車両による河川堤防高計測の検討

間野 耕司¹・井関 禎之²・森田 真一³・橘 菊生⁴・西山 哲⁵

¹正会員 株式会社パスコ 技術統括本部 (〒1556-0017 大阪市浪速区湊町 1-2-3 マルイト難波ビル 8F)
E-mail: koonua2121@pasco.co.jp

²非会員 株式会社パスコ 技術統括本部 (〒1556-0017 大阪市浪速区湊町 1-2-3 マルイト難波ビル 8F)

³正会員 株式会社パスコ 技術統括本部 (〒1556-0017 大阪市浪速区湊町 1-2-3 マルイト難波ビル 8F)

⁴正会員 株式会社パスコ パスコ総合研究所 (〒153-0043 東京都目黒区東山 2-8-10 目黒ビル別館 3F)

⁵正会員 岡山大学教授 大学院 環境生命科学研究科 (〒700-8530 岡山市北区津島 3-1-1)

本検討では、移動計測車両(Mobile Mapping System:MMS)を用いて、越水が発生する恐れが高い河川堤防の区間を把握することを目的とし、堤防高把握ための計測手法および可視化手法を整理した。河川堤防では、高架下や樹木・建物の隣接区間といった GNSS の受信不良区間が点在する。こうした河川堤防における MMS の計測精度を具体的な数値で評価するとともに、河川全体での堤防高の計測精度を確保する手法を整理した。また、MMS で得られる 3 次元データ (MMS 点群) から、数千 m 以上の長い区間における堤防高の可視化を実施した。その結果、従来手法では難しかった連続的な堤防高を 0.1m 以下の精度で把握できることが確認できた。

Key Words: continual river embankment measurement, mobile mapping system, real time kinematic-global navigation satellite system, virtual reference station-global navigation satellite system

1. はじめに

河川堤防は、洪水の氾濫を防ぐための治水構造物である。近年、集中豪雨や大雨の発生頻度が増加傾向を示しており¹⁾、その役割は益々重要になっている。鬼怒川では、平成 27 年 9 月の関東・東北豪雨により 0.2m から 0.3m 程度の越水が発生し、破堤に至った。破堤付近の約 500m 区間は、全体的に計画堤防高に比べて低い状態であったことが報告されている²⁾。兵庫県の円山川では、平成 16 年の台風 23 号に伴う豪雨により、約 30m にわたって周辺より堤防が低い区間で越水が発生し、破堤に至った³⁾。こうしたことから、河川堤防の維持管理では、計画堤防高や周辺に比べ低い区間を漏れることなく把握し、治水に必要な堤防高を維持することが求められる。

河川堤防の構造は、土砂で形成する土堤を基本とし、河口域や堤防用地が確保できない区間などで、コンクリート製のパラペット構造を有する特殊堤が取り付けられている。こうした堤防の高さを把握するには、土堤やパラペット部の天端高の計測が必要となる。その計測は、現在、数年に一度の定期縦横断測量と、年数回の堤防等河川管理施設の点検 (堤防点検) により行われている

⁴⁾。定期縦横断測量は、河川距離標を対象に 200m といった一定間隔ごとに堤防天端の高さと横断形状をトータルステーション測量や水準測量を用いて計測する場合が多い。一方、堤防点検は、局所的な変状や沈下の有無を目視で確認し、その長さや深さを巻尺などを使って計測している。しかし、定期縦横断測量は、測線間の堤防高を把握できない恐れがあり、また巻尺を使った堤防点検は、連続的に低い箇所を捉えることが難しい。

連続的に地形を捉えられる計測方法として移動計測車両(Mobile Mapping System:MMS)があり、道路周辺の地図や道路台帳図の作成に使用されている。堤防天端を走行しながら、周辺の形状を数cm程度の空間分解能で計測できる利点を活かし、MMS を堤防形状の把握に利用する取り組みが行われてきた⁶⁾。しかし、その多くは、GNSS の受信が良好な地区で MMS の適用性を評価したものであり、高架下や樹木・建物が隣接といった河川堤防で多く存在する GNSS の受信不良箇所での MMS の適用性を評価したものは少ない。そこで、本検討では、越水が発生する恐れが高い河川堤防の区間を把握することを目的とし、GNSS の受信不良箇所を含めた河川堤防での MMS 計測精度を具体的な数値で示し、帯状に長い堤

防の高さを連続的に把握する計測手法と可視化手法を整理した。

2. 本研究の着目点

平成 27 年の関東・東北豪雨に関する報告では、0.1m 程度の堤防高の違いが越流水深や越流時間に大きな影響を及ぼすことや、土囊など 0.2m 程度の水止物があれば、破堤に至らなかった可能性が報告されている⁸⁾。そこで本検討では、0.1m 以下の精度で堤防高の変化を漏れなく連続的に捉えることを目標とする。

MMS は、車両に GNSS 受信機、慣性計測装置、レーザスキャナなどの計測機器を搭載し、自己位置と姿勢を測定しながら車両周辺の三次元形状を計測できる車載レーザ計測システムである。MMS の自己位置は RTK-GNSS(Real Time Kinematic-Global Navigation Satellite System)測位結果と慣性測位結果の結合処理により決定される。一般に RTK-GNSS 測位は、固定局から MMS までの距離(基線長)が長くなるにつれ、GNSS 電波の電離層遅延などの影響により位置精度が劣化することが知られている⁹⁾。特に、带状に長い河川堤防では、固定局からの基線長が長くなりやすい。こうした地区における位置精度を確保するために、MMS 計測では、近傍に新設の固定局を設置する手法が採用されている。しかし、基線長がどの程度離れた際に私設固定局を設置するべきかを、具体的な数値で示されていない。そこで、0.1m の標高精度を確保できる基線長の距離を把握する。

この他に基線長が長くなる地区では、ネットワーク型仮想基準点(Virtual Reference Station :VRS)方式の利用が考えられる。VRS 方式とは、周囲にある複数の電子基準点等の観測データから電離層・対流圏による信号の遅延や衛星の軌道誤差の補正量を生成する技術である。MMS の近傍に仮想基準点を生成することで、固定局からの基線長を擬似的に短くできる。本検討では、その効果も確認する。

3. 実験計測

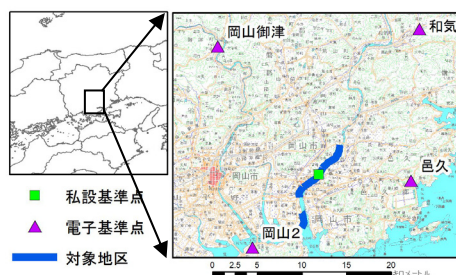


図1 対象地区

(1) 対象地区

実験計測では、岡山県の南部を流れる吉井川の 0.0~12.0km を対象地区とした。図-1 に対象区間を示す。この区間は、0~5.6km の一部区間で幅 0.2~0.6m の特殊堤が整備され、2 箇所の道路橋が跨ぐ区間と、400m 程度の樹木に覆われた GNSS の受信不良区間が存在する。

(2) 使用した MMS と計測諸元

本検討では、Nikon-Trimble 社製 MX-8 を基に、特殊堤の天端や法尻付近の計測を容易にするためにレーザスキャナの設置高さを改良した MMS を使用した。図-2 に外観を示す。この MMS は、自己位置と姿勢を測定するために、Applanix 社製 POSLV520 を採用しており、対象物の測定用に Riegl 社製のレーザスキャナ VQ450 を搭載している。計測諸元は、走行速度 20km/時、レーザ照射数 55 万発/秒、回転数 50 回転/秒とし、5m 離れた位置で、特殊堤の天端幅より細かい点間隔 0.02m を確保できる設定とした。表-2 に計測諸元をまとめる。

(3) 検証点の取得と固定局の観測

MMS で得られる 3 次元データ(MMS 点群)の位置精度を確認するために、検証点を GNSS の受信が良好な地区に 9 点、高架下や樹木に覆われた GNSS の受信が不良地区に 20 点設置した。路面にターゲットシールを設置し、その中心の位置座標を 4 級基準点測量に相当する VRS 方式の RTK 単点観測法とトータルステーション測量で取得した。使用した機器は、Nikon-Trimble 社製 NetR9、S65+, および DL-502 である。

MMS の自己位置測定に用いる固定局は、図-1 に示す 4 点の電子基準点を使用した。固定局から MMS の基線長は、4km~25km である。さらに、基線長が 4km 以下となる位置に私設基準点を設置し、GNSS 観測を行った。

4. 河川の実環境に適用できる計測手法の検討

(1) 带状に長い河川堤防を計測するための手法検討

a) 固定局からの基線長による精度への影響

日本で整備された電子基準点は、概ね 20km より短い間隔で配点されている。そこで基線長 20km までの区間



図-2 使用した MMS

表-2 MMS 計測諸元

項目	内容
走行速度	20km/h
走行箇所	堤防天端
MMS機材	Trimble MX-8改良版
自己位置測定性能	GNSS良好区間 平面位置: 0.02m、標高: 0.05m GNSS不良区間 平面位置: 0.10m、標高: 0.07m
レーザスキャナ	設置高さ 3.6(m) 照射数 55万発/秒 回転数 50回転/秒 計測精度 ±0.008m
MMS点群の点間隔	進行方向 0.11m 横断方向 0.02m (5m先)

GNSS不良地区とは、1kmまたは1分のGNSS未受信が続く区間を想定

を対象に、私設基準点と4箇所の電子基準点をそれぞれ固定局に用いたRTK-GNSS測位からMMS点群を生成し、GNSSの受信が良好な地区に設置した検証点と比較した。図-3にMMS点群と検証点の標高較差と基線長の関係を示す。この結果から、基線長が長くなるにつれ標高精度が劣化するとともに、ばらつきが大きくなる傾向が見られた。また、基線長約18kmで0.1m程度の誤差が生じる恐れがあることを確認できた。

b) VRS方式による効果の確認

私設基準点を設置した位置でVRS方式の補正を施したGNSS観測データを生成し、固定局として使用してMMS点群を作成した。図-4はVRS方式、私設基準点および電子基準点のRTK-GNSS測位により生成したMMS点群とGNSSの良好受信地区に設置した検証点の標高較差を示す。最長20kmあった基線長はVRS方式を用いることで基線長が5km以下になる。基線長が約12km以上の区間は、RTK-GNSS測位による点群に比べVRS方式の方が良好な精度を示すことが確認できる。一方、基線長が12kmより短い区間は、RTK-GNSS測位の方が良好な精度を示している。この結果から、固定局からの基線長が短い区間では、VRS方式が、実観測を用いるRTK-GNSS測位に及ばない場合があることが確認できた。

(2) GNSSの受信不良箇所における精度への影響

基線長による標高精度への影響が少ない私設基準点の解析データを用いて、GNSSの不良箇所における標高精度への影響を確認する。幅20m程度の道路高架区間と400m程度樹木に覆われた区間の周辺に、40~150mの間隔で検証点を設置し、MMS点群との標高較差を確認した。またGNSSを用いた測量では、品質を表す指標とし

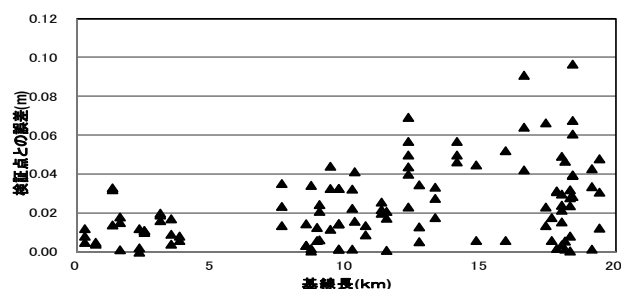


図-3 基線長と標高較差の関係

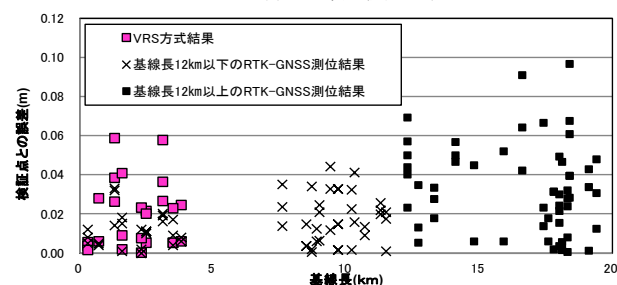


図-4 VRS方式とRTK-GNSS測位を用いたMMS点群の標高精度

てPosition Dilution of Precision(PDOP)が用いられる。本検証では、PDOPと標高較差の関係についても確認した。なお、GNSSの受信不良箇所の通過時間は、高架区間で約5秒、樹木に覆われた区間で約1分30秒であった。

図-5に高架区間、図-6に樹木に覆われた区間のPDOPと標高較差を示す。図-5は、高架通過前の標高較差が0.03m以下であったが、高架通過後150m区間にかけて0.03mから0.04mの若干大きめの較差を示した。高架通過後は百数十mの区間にかけて若干の精度劣化が生じることが確認できた。図-6では、-120m~150m付近で、PDOPが2.5以上を示し、標高較差が0.03m以上と周辺より高い値となった。しかし、125m付近ではPDOPが2.0以下を示すものの、標高較差が0.04mを示し、逆に-50m付近では、PDOPが2.5以上の値を示しているにも関わらず良好な標高精度が得られた。MMSの自己位置算出は、GNSS測位とIMU測位の結合処理を行う。結合処理による補正効果が働いたため、PDOPと標高較差に明瞭な関係を見出すことができなかったと考えられる。

自己位置測定機器のカタログスペックは、1分のGNSS未受信での標高精度が0.07mと示されている。本検証では、1分30秒の断続的なGNSSの受信不良区間でも機器スペックと同等な標高精度を確保できることが分かった。この実験計測では、河川堤防に多く存在する幅20m程度の高架部や400m程度の断続的なGNSS受信の不良区間でも、0.1mの標高精度を確保して堤防高を把握できることが確認できた。

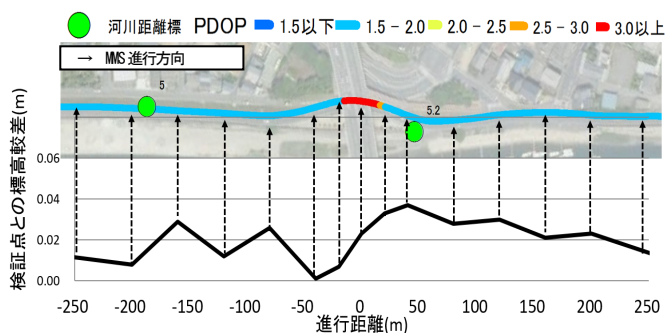


図-5 道路高架区間周辺のPDOP、検証点との標高較差

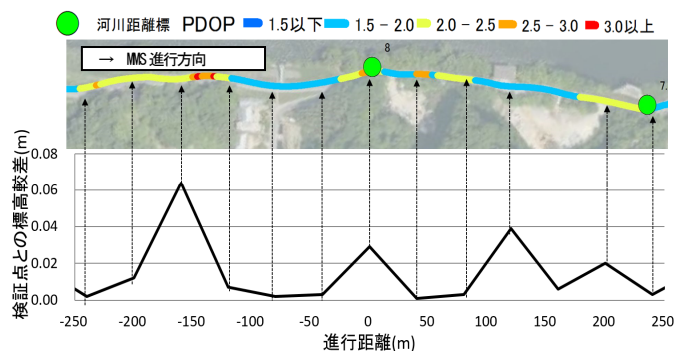


図-6 樹木に覆われた区間のPDOP、検証点との標高較差

5. MMS 点群による堤防高の可視化

(1) 手法

MMS 点群を用いて、連続的な堤防高の表現を行った。その手法は、①MMS 計測で得られる車両の自己位置軌跡データに対して、一定間隔の法線を生成する。対象地区における既往の堤防点検で確認された周辺より低い区間は、最も短いもので 5m であった。こうした区間を再現するために 2m 間隔で法線を生成する。②MMS 点群から地盤を計測した点（地盤計測点）を抽出する。この処理は、0.1m メッシュを生成し、そのメッシュに含まれる計測点で一番低い点を地盤計測点とした。③法線に対し、0.1m 間隔で頂点を生成し、その平面位置の最近傍の地盤計測点を頂点の標高として取得する。対象地区にある特殊堤で最も狭い天端幅 0.2m であった。特殊堤の堤防高を再現するために 0.1m 間隔の頂点を生成する。⑤これらの頂点から最も高い標高を抽出し、堤防高とする。最後に⑥堤防高を基に縦断面図を作成する。

(2) 適用結果

最大基線長 15km となる岡山 2 の電子基準点を固定局として MMS 点群を生成し、0.0kp から 12.0kp 区間の堤防高を算出した。その確からしさと連続的な堤防高の有効性を確認するために、200m 間隔で取得される定期縦横断面成果と比較した。その較差は、平均値 0.02m、標準偏差 0.03m、平均二乗誤差 0.04m であった。MMS 点群から得られる堤防高は、定期縦横断面成果に比べ全体的に 0.02m 程度高い値を示す結果となったが、土堤だけではなく、天端幅の狭い特殊堤でも 0.1m 以内の標高精度を確保できることが確認できた。図-7 は、特殊堤の区間が含まれる 4.2~6.8kp において、MMS 点群から作成した堤防高、定期縦横断面測量による堤防高、計画堤防高および計画高水高を重ねた縦断面図である。特殊堤の区間は 4.7~5.5kp であり、計画堤防高を満たしていないものの計画高水高を満たす暫定堤である。4.4kp や 6.6kp 付近は、約 50m の区間にかけて、計画堤防高に対しての余裕高がほとんどなく、周辺より 0.15~0.2m 程度低いことが確認できる。計画堤防高や計画高水高と現況の堤防高を容易に比較できるだけでなく、従来手法で難しかった周辺より低い区間を連続的に把握できることがら、その有効性を確認できた。

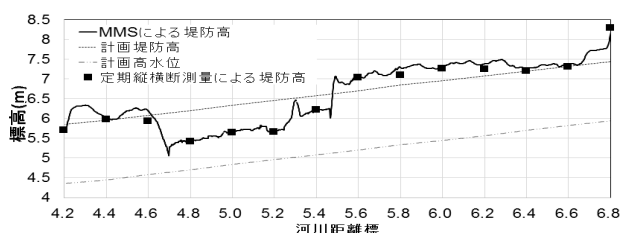


図-7 MMS による堤防高の表現

6. まとめ

本研究では、河川堤防における MMS 計測精度を具体的な数値で評価するとともに、堤防高把握ための計測手法と可視化手法を整理した。その結果、次の結論を得た。

- ・ 固定局から基線長が概ね 12km 以下の区間は RTK-GNSS 測位を、それ以上の基線長区間は VRS 方式によるネットワーク型 RTK-GNSS 測位データを固定局として解析することで、帯状に長い河川で安定した精度の堤防高を把握できる。
- ・ 実験計測では、幅 20m 程度の高架下や 400m 程度の断続的な衛星受信不良区間を含め、河川全体で 0.1m の標高精度を確保できることが確認できた。
- ・ MMS 点群による堤防高の可視化により、従来の測量で難しかった連続的な堤防高を把握できる。

今後は、本研究で検討した可視化結果から河川堤防の弱点となりうる区間を定量的に検出する手法を検討する。

謝辞：データの一部は、国土交通省中国地方整備局岡山河川事務所の業務で取得した成果を利用させて頂いた。ここに感謝の意を記す。

参考文献

- 1) 環境省：気候変動の観測・予測及び影響評価統合レポート「日本の気候変動とその影響 2012 年度版」, <http://www.env.go.jp/earth/ondanka/rep130412/report_full.pdf>, (入手 2017.5.29).
- 2) 国土交通省：鬼怒川堤防調査委員会 報告書, <<http://www.ktr.mlit.go.jp/river/bousai/index0000040.html>>, (入手 2017.5.20).
- 3) 国土交通省近畿地方整備局豊岡河川国道事務所：円山川流域委員会 第 12 回委員会資料, <<http://www.kkr.mlit.go.jp/toyooka/ryuiki/02/12inkai-siryo2-2.pdf>>, (入手 2017.12.25).
- 4) 国土交通省国土地理院：公共測量作業規程の準則, PP.11-21, 公益社団法人日本測量協会, 2016.
- 5) 国土交通省水管理 国土保全局 河川環境課：堤防等河川管理施設及び河道の点検要領, <https://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/kasen/pdf/tenken_youryou_h240517.pdf>, (入手 2016.12.20).
- 6) 東良慶, 西山哲, 石川貴一郎, 吉岡裕嗣, 島村秀樹, 大浪裕之：モバイルマッピングシステムによる河川堤防の高精度計測, 河川技術論文集, 第 20 巻, p.485-490, 2014.
- 7) 橘菊生, 間野耕司, 島村秀樹, 西山哲：河川堤防計測へのモバイルマッピングシステムの適用, 日本写真測量学会, 写真測量とリモートセンシング Vol.54, No.4, pp.166-177, 2015.
- 8) 常田賢一：平成 27 年 9 月関東・東北豪雨による破堤に伴う落掘に関する現地調査からの考察, 第 3 回地盤工学からみた堤防技術シンポジウム, I-1, 2015.
- 9) 臼井澄夫：高精度衛星測位技術と精密計測への応用, 精密工学会誌 Vol. 77, No. 4, pp.358-361, 2011.