

XỬ LÝ SỐ LIỆU LƯỚI QUAN TRẮC LÚN CÔNG TRÌNH DỰA TRÊN HIỆU TRỊ ĐO GIỮA HAI CHU KỲ QUAN TRẮC

Phạm Đình Dương^{1*}, Bùi Quang Tuấn¹

¹Trường Đại Học Thành Đông

*Tác giả liên hệ: duongpositive@gmail.com

TÓM TẮT

Quan trắc lún công trình là công tác trắc địa có độ chính xác cao, nhằm xác định sự thay đổi cao độ của các điểm mốc trong quá trình công trình chịu tác động của tải trọng, điều kiện địa chất và môi trường. Để đảm bảo độ tin cậy và tính khách quan của kết quả, công tác quan trắc cần được thực hiện đồng bộ từ khâu thiết kế mạng lưới, đo đạc ngoại nghiệp đến xử lý số liệu nội nghiệp, đòi hỏi người thực hiện có chuyên môn trắc địa vững và hiểu rõ đặc điểm công trình. Lưới quan trắc biến dạng là lưới đo lặp, trong đó vị trí và sơ đồ lưới được giữ ổn định qua các chu kỳ nhằm đảm bảo khả năng so sánh. Trên cơ sở đó, phương pháp bình sai hiệu trị đo giữa hai chu kỳ liên tiếp được áp dụng để xác định độ lún các điểm mốc. Phương pháp này giúp giảm khối lượng tính toán, hạn chế sai số và nâng cao độ chính xác. Kết quả nghiên cứu cho thấy phương pháp có tính khả thi cao và hiệu quả trong thực tiễn quan trắc lún công trình.

Từ khóa: Quan trắc lún, bình sai hiệu trị đo, lưới quan trắc biến dạng, chu kỳ quan trắc, trắc địa công trình.

PROCESSING MONITORING NETWORK DATA OF STRUCTURAL SETTLEMENT BASED ON MEASUREMENT DIFFERENCES BETWEEN TWO OBSERVATION CYCLES

ABSTRACT

Structural settlement monitoring is a high-precision geodetic task aimed at determining changes in the elevations of monitoring points during the period when a structure is affected by loads, geological conditions, and environmental factors. To ensure the reliability and objectivity of the results, the monitoring process must be implemented in a coordinated manner, from network design and field measurements to data processing, requiring practitioners to possess solid geodetic expertise and a thorough understanding of structural characteristics. Deformation monitoring networks are repetitive measurement networks in which the configuration and positions of observation points are maintained consistently across monitoring cycles to ensure comparability of results. Based on this principle, the adjustment of measurement differences between two consecutive monitoring cycles is applied to determine settlement values. This method reduces computational workload, limits errors associated with separate cycle processing, and improves accuracy. Experimental results confirm that the proposed method is feasible and effective for practical structural settlement monitoring.

Keywords: Settlement monitoring; adjustment of observation differences; deformation monitoring network; observation cycle; engineering surveying.

Ngày nhận bài: 20/12/2025 Ngày nhận bài sửa: 31/12/2025 Ngày duyệt đăng bài: 06/01/2026

1. PHẦN MỞ ĐẦU

Để đánh giá chính xác giá trị lún của công trình, việc tổ chức và thực hiện quan trắc cần được tiến hành một cách khoa học, hệ thống và

tuan thủ chặt chẽ các yêu cầu kỹ thuật của công tác trắc địa độ chính xác cao. Quan trắc lún công trình không chỉ là quá trình đo đạc đơn thuần, mà là chuỗi các hoạt động liên hoàn gồm: thiết kế mạng lưới quan trắc, thực hiện đo đạc thực địa, xử lý số liệu nội nghiệp và đánh giá kết quả biến dạng. Mỗi giai đoạn đều có vai trò quan trọng và có ảnh hưởng trực tiếp đến độ tin cậy của kết quả cuối cùng. Trong đó, để bảo đảm độ chính xác và độ tin cậy của công tác quan trắc lún, ba yếu tố quan trọng nhất cần được quan tâm đồng bộ là: thiết kế mạng lưới quan trắc hợp lý, sử dụng máy móc thiết bị hiện đại có độ chính xác cao, và lựa chọn phương pháp xử lý số liệu phù hợp. Ba yếu tố này có mối quan hệ chặt chẽ, hỗ trợ lẫn nhau, trong đó phương pháp xử lý số liệu được xem là khâu quyết định để phản ánh đúng bản chất của quá trình lún và biến dạng công trình. Một mạng lưới quan trắc được thiết kế tối ưu sẽ giúp giảm thiểu sai số tích lũy trong các chu kỳ đo và tạo điều kiện thuận lợi cho việc xử lý số liệu. Việc lựa chọn các mốc chuẩn, điểm đo, cũng như bố trí tuyến đo hợp lý giúp đảm bảo độ ổn định của hệ thống, tăng khả năng lặp lại của phép đo và giảm thiểu ảnh hưởng của các yếu tố ngoại cảnh. Song song với đó, việc áp dụng thiết bị trắc địa hiện đại như máy thủy chuẩn độ chính xác cao giúp tăng chất lượng của phép đo, đảm bảo sai số ngẫu nhiên được khống chế trong phạm vi cho phép.

Tuy nhiên, dù có mạng lưới và thiết bị tốt, nếu phương pháp xử lý số liệu không phù hợp với đặc trưng của mạng lưới quan trắc thì kết quả cuối cùng vẫn có thể thiếu chính xác hoặc không phản ánh đúng bản chất của hiện tượng lún. Do đó, việc lựa chọn phương pháp bình sai số liệu là một yếu tố hết sức quan trọng. Trong quan trắc lún công trình, đặc điểm nổi bật của hệ thống đo đạc là lưới quan trắc đo lặp, nghĩa là các phép đo được thực hiện nhiều lần tại cùng một mạng lưới trong các chu kỳ khác nhau. Sơ đồ lưới thường được giữ nguyên qua các chu kỳ quan trắc, chỉ thay đổi trị đo do sự biến dạng thực tế của công trình. Đặc điểm này

cho phép áp dụng phương pháp bình sai theo hiệu các trị đo giữa hai chu kỳ quan trắc để xử lý số liệu. Thay vì bình sai độc lập từng chu kỳ, phương pháp này tập trung vào phân tích sai khác giữa các trị đo tại hai thời điểm liên tiếp, từ đó rút ra sự thay đổi độ cao thực tế của các điểm quan trắc. Việc sử dụng hiệu trị đo mang lại nhiều lợi ích quan trọng. Trước hết, nó làm giảm đáng kể ảnh hưởng của sai số hệ thống, vốn thường xuất hiện do những yếu tố như điều kiện nhiệt độ, áp suất khí quyển, sai số do thiết bị hoặc sự ổn định của mốc cơ sở. Vì các yếu tố hệ thống này có tính lặp lại qua các chu kỳ, nên khi lấy hiệu trị đo, phần lớn chúng bị triệt tiêu, giúp kết quả phản ánh trung thực hơn về biến dạng thực tế.

Ngoài ra, phương pháp bình sai hiệu trị đo còn có khả năng giảm thiểu ảnh hưởng của sai số trong trị đo gốc. Ở các phương pháp bình sai thông thường, sai số của chu kỳ đầu tiên thường được giữ nguyên và ảnh hưởng đến toàn bộ kết quả về sau. Tuy nhiên, khi chỉ xét đến hiệu giữa hai chu kỳ, sai số của số liệu gốc ban đầu được loại trừ, giúp tăng độ ổn định và độ tin cậy của giá trị lún tính toán. Điều này đặc biệt quan trọng đối với các công trình có chu kỳ quan trắc kéo dài, vì sai số tích lũy trong thời gian dài có thể làm sai lệch đáng kể kết quả nếu không được xử lý đúng cách. Phương pháp bình sai hiệu trị đo không chỉ có ưu thế về độ chính xác mà còn mang lại hiệu quả cao trong tính toán và tổ chức xử lý dữ liệu. Do không cần bình sai riêng rẽ từng chu kỳ, khối lượng tính toán giảm đáng kể, thời gian xử lý được rút ngắn, trong khi vẫn đảm bảo độ tin cậy cao. Điều này cho phép ứng dụng hiệu quả trong các dự án quan trắc quy mô lớn, nơi có nhiều điểm quan trắc và dữ liệu đo đạc được thu thập định kỳ liên tục. Để áp dụng phương pháp này một cách hiệu quả, cần xây dựng quy trình xử lý số liệu và thuật toán tính toán hợp lý. Trước hết, dữ liệu đo gốc từ các chu kỳ phải được kiểm tra, loại bỏ các trị đo bất thường. Sau đó, hiệu trị đo giữa hai chu kỳ được tính toán và đưa vào hệ thống bình sai theo mô hình

toán học phù hợp. Kết quả bình sai được phân tích, so sánh và đánh giá để xác định chính xác giá trị lún, cũng như xu hướng biến dạng của công trình theo thời gian. Bên cạnh các ưu điểm, phương pháp bình sai hiệu trị đo cũng có những yêu cầu kỹ thuật khắt khe. Để kết quả đạt độ tin cậy cao, cần đảm bảo rằng sơ đồ lưới và các điểm mốc trong các chu kỳ quan trắc được giữ nguyên tuyệt đối, các điều kiện đo đạc phải tương đồng, và thiết bị sử dụng phải có độ ổn định cao. Ngoài ra, người xử lý số liệu cần hiểu rõ nguyên lý của bình sai gián tiếp và các yếu tố ảnh hưởng đến sai số để có thể hiệu chỉnh, kiểm tra và đánh giá kết quả một cách chính xác. Thực tế đã cho thấy, khi áp dụng đúng quy trình và nguyên tắc, phương pháp bình sai hiệu trị đo mang lại kết quả rất tốt trong việc đánh giá biến dạng lún công trình. Độ chính xác của giá trị lún được nâng cao, các sai số hệ thống được giảm thiểu đáng kể, và kết quả thu được có độ tin cậy cao hơn so với các phương pháp truyền thống. Ngoài ra, việc sử dụng phương pháp này cũng giúp phát hiện nhanh các dấu hiệu bất thường trong chuyển dịch lún, hỗ trợ đắc lực cho công tác giám sát, cảnh báo và đảm bảo an toàn cho công trình trong quá trình khai thác sử dụng.

Tóm lại, để đánh giá chính xác giá trị lún của công trình, ngoài việc xây dựng mạng lưới quan trắc tối ưu và sử dụng thiết bị đo đạc hiện

đại, việc lựa chọn phương pháp xử lý số liệu phù hợp đặc biệt là phương pháp bình sai hiệu trị đo là yếu tố quyết định chất lượng và độ tin cậy của kết quả quan trắc. Phương pháp này không chỉ phù hợp với bản chất của mạng lưới đo đạc mà còn giúp loại bỏ các ảnh hưởng sai số không mong muốn, phản ánh đúng thực tế biến dạng công trình theo thời gian. Đây là hướng tiếp cận có tính thực tiễn cao, phù hợp với điều kiện quan trắc lún công trình tại Việt Nam hiện nay.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

Giả sử trong 2 chu kỳ (kí hiệu là chu kỳ 1 và 2) mạng lưới quan trắc được bình sai dựa trên điểm gốc là các điểm khống chế cơ sở đã được xử lý và cao độ không đổi giữa các chu kỳ quan trắc. Đối với mạng lưới quan trắc được bình sai theo phương pháp hiệu trị đo giữa hai chu kỳ. Ta chọn độ cao gần đúng của các mốc ở các chu kỳ đều giống nhau là H_i^0 , ẩn số là hiệu độ cao của các điểm mốc tương ứng sau bình sai của hai chu kỳ. Giả sử chu kỳ 1 có số hạng tự do của các đoạn chênh cao là l_i^1 , trọng số là p^1 . Chu kỳ 2 có số hạng tự do là l_i^2 , trọng số là p^2 . Bình sai theo phương pháp gián tiếp thông thường chọn độ cao của các mốc quan trắc sau bình sai làm ẩn số. Chu kỳ một ta có hệ phương trình số hiệu chỉnh:

$$a_i \delta h_1^1 + b_i \delta h_2^1 + \dots + t_i \delta h_t^1 + l_i^1 = v_i^1 \tag{2.1}$$

Ở chu kỳ 2 ta có phương trình số hiệu chỉnh:

Với: $a_i \delta h_1^2 + b_i \delta h_2^2 + \dots + t_i \delta h_t^2 + l_i^2 = v_i^2 \tag{2.2}$

$$l_i^1 = (H_n^0 - H_m^0) - h_{\delta o}^i \tag{2.3}$$

$$l_i^2 = (H_n^0 - H_m^0) - h_{\delta o}^i \tag{2.4}$$

Hiệu của (2.1) và (2.2) ta được:

$$a_i (\delta h_1^2 - \delta h_1^1) + b_i (\delta h_2^2 - \delta h_2^1) + \dots + t_i (\delta h_t^2 - \delta h_t^1) + l_i^2 - l_i^1 = v_i^2 - v_i^1 \tag{2.5}$$

Hiệu của (2.3) và (2.4) ta được:

$$H_i^2 = H_0^i + \delta h_i^2 \tag{2.7}$$

$$l_i^2 - l_i^1 = -(h_{\delta o}^{i2} - h_{\delta o}^{i1}) = \Delta h_i \tag{2.6}$$

Độ cao sau bình sai của các mốc lún ở chu kỳ 2:

$$H_i^2 = H_0^i + \delta h_i^2 \tag{2.8}$$

Độ cao sau bình sai của các mốc lún ở chu kỳ 1:

Hiệu chênh cao hai chu kỳ của các mốc tương ứng sau bình sai

$$s_i = H_i'' - H_i' = \delta h_i'' - \delta h_i' \quad (2.9)$$

Phương trình (2.36) được viết lại:

$$A = \begin{pmatrix} a_1 & b_1 & \dots & t_1 \\ a_2 & b_2 & \dots & t_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_n & b_n & \dots & t_n \end{pmatrix}_{n \times n}$$

Ma trận của (2.10) được viết:

$$V = AS + L \quad (2.11)$$

Bình sai (2.10) với điều kiện ràng buộc

$$[p \Delta v^2] = \min \quad (2.12)$$

Do trọng số của hai chu kỳ khác nhau nên ma trận trọng số tương đương của phương trình (2.10) được tính như sau:

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{p} &= \frac{1}{p'} + \frac{1}{p''} \\ \text{hoặc } p &= \frac{p' \cdot p''}{p' + p''} \end{aligned} \right\} \quad (2.13)$$

Hệ

$$\left. \begin{aligned} \text{Ký hiệu: } R &= A^T P A \\ b &= A^T P L \end{aligned} \right\} \quad (2.14)$$

Phương trình chuẩn có dạng ma trận:

$$R.S + b = 0 \quad (2.15)$$

Giải (2.15) ta được nghiệm:

$$S = -R^{-1} \cdot b = -R^{-1} \cdot A^T P L \quad (2.16)$$

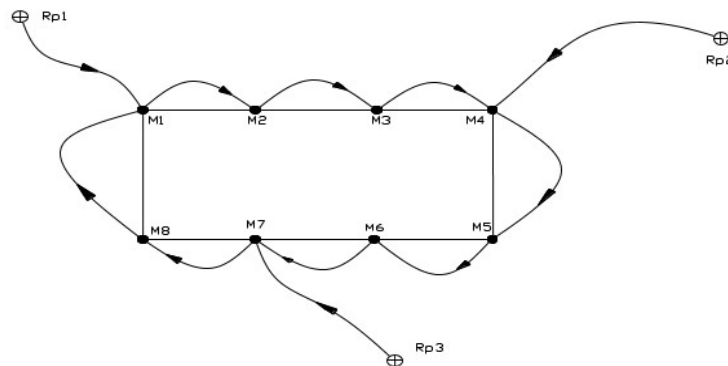
$$a_i s_1 + b_i s_2 + \dots + t_i s_i + \Delta h_i = \Delta v_i \quad (2.10)$$

Trong (2.10) ẩn số là hiệu độ cao của các mốc quan trắc tương ứng sau bình sai của hai chu kỳ. Hệ phương trình (2.10) được viết lại dưới dạng ma trận

$$S = \begin{pmatrix} s_1 \\ s_2 \\ \dots \\ s_t \end{pmatrix}_{t \times 1} \quad L = \begin{pmatrix} \Delta h_1 \\ \Delta h_2 \\ \dots \\ \Delta h_p \end{pmatrix}_{n \times 1} \quad V = \begin{pmatrix} \Delta v_1 \\ \Delta v_2 \\ \dots \\ \Delta v_p \end{pmatrix}_{n \times 1}$$

3. THỰC NGHIỆM BÌNH SAI LƯỚI QUAN TRẮC LÚN THEO HIỆU TRỊ ĐO

Xử lý một mạng lưới quan trắc lún công trình quan trắc của tòa nhà 9 tầng tại trường Cao đẳng công nghiệp và Xây dựng, phường phường Đông- Uông bí- Quảng Ninh với đồ hình quan trắc đưa ra trên hình (3.1). Mạng lưới gồm 3 điểm gốc cơ sở (Rp1, Rp2, Rp3) và 8 điểm quan trắc (M1, M2, M3, M4, M4, M5, M6, M7, M8). Trong lưới có 11 đoạn chênh cao, số liệu đo hai chu kỳ và các hiệu chênh cao được đưa ra trong bảng (3.1). Kết quả tính toán xử lý đưa ra trong bảng (3.6), số liệu tính toán đã được so sánh đối chứng với bình sai tách biệt và cho thấy phù hợp nhận định từ phần khảo sát lý thuyết. Trong đó mốc cơ sở: Rp1=5(m), Rp2=4.55(m), Rp3=4.222(m), các mốc này được bình sai và hiệu chỉnh giữa các lần quan trắc để đảm bảo có cao độ không đổi giữa các chu kỳ quan trắc.



Hình 1. Sơ đồ lưới

Nguồn: Tác giả tổng hợp

Bảng 1. Số liệu đo các chu kỳ và hiệu trị đo

Số TT	Ký hiệu đoạn đo		Chênh cao đo chu kỳ 1 (m)	Số trạm đo chu kỳ 1	Chênh cao đo chu kỳ 2 (m)	Số trạm đo chu kỳ 2	Hiệu trị đo (mm)
	Đầu	Cuối					
1	N1	N2	0.3548	2	0.3543	4	-0.5
2	N2	N3	-0.2155	4	-0.2152	3	0.3
3	N3	N4	0.4215	3	0.421	5	-0.5
4	N4	N5	0.3649	6	0.3654	4	0.5
5	N5	N6	-0.6408	1	-0.6403	3	0.5
6	N6	N7	0.3187	5	0.3184	2	-0.3
7	N7	N8	0.2344	3	0.2335	6	-0.9
8	N8	N1	-0.8356	2	-0.8352	4	0.4
9	Rp1	N1	1.2502	4	1.2455	3	-4.7
10	Rp2	N4	2.2606	6	2.2572	4	-3.4
11	Rp3	N7	2.6305	3	2.6269	6	-3.6

Nguồn: Tác giả tự xây dựng và tính toán.

Bảng 2. Hệ phương trình số hiệu chỉnh

Số TT	Hệ phương trình số hiệu chỉnh								l	Trọng số p
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)		
1	-1.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.50	0.167
2	0.0	-1.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.30	0.143
3	0.0	0.0	-1.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.50	0.125
4	0.0	0.0	0.0	-1.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.50	0.100
5	0.0	0.0	0.0	0.0	-1.0	1.0	0.0	0.0	0.50	0.250
6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-1.0	1.0	0.0	-0.30	0.143
7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-1.0	1.0	-0.90	0.111
8	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-1.0	0.40	0.167
9	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-4.70	0.143
10	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-3.40	0.100
11	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	-3.60	0.111

Nguồn: Tác giả tự xây dựng và tính toán

Bảng 3. Hệ phương trình chuẩn

0.476	-0.167	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.167	-0.522
	0.310	-0.143	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.126
		0.268	-0.125	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.105
			0.325	-0.100	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.453
				0.350	-0.250	0.00	0.00	0.00	-0.075
					0.393	-0.143	0.00	0.00	0.168
						0.365	-0.111	-0.343	
							0.278	-0.167	
									6.055

Nguồn: Tác giả tự xây dựng và tính toán

Bảng 4. Hệ phương trình khử

0.690	-0.242	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.242	-0.756
	0.501	-0.285	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.116	-0.616
		0.432	-0.289	0.00	0.00	0.00	-0.077	-0.163

			0.491	-0.204	0.00	0.00	-0.045	-1.017
				0.555	-0.450	0.00	-0.017	-0.508
					0.436	-0.328	-0.017	-0.139
						0.508	-0.230	-0.765
							0.380	-1.752
								0.337

Nguồn: Tác giả tự xây dựng và tính toán

Bảng 5. Ma trận nghịch đảo

4.610	3.732	2.708	1.536	1.609	1.638	1.688	3.442
	7.747	5.432	2.786	2.266	2.057	1.693	2.916
		8.611	4.245	3.032	2.547	1.698	2.304
			5.912	3.908	3.106	1.704	1.603
				8.910	6.912	3.414	2.331
					8.434	4.099	2.622
						5.296	3.131
							6.917

Nguồn: Tác giả tự xây dựng và tính toán

Bảng 6. Tính vec tơ nghiệm và đánh giá độ chính xác

SỐ TT	Độ lún S (mm)	Sai số trung phương ms (mm)
M1	-4.284	0.417
M2	-4.504	0.541
M3	-3.877	0.570
M4	-4.04	0.473
M5	-3.641	0.580
M6	-3.196	0.565
M7	-3.592	0.447
M8	-4.607	0.511

Nguồn: Tác giả tự xây dựng và tính toán

3. NHẬN XÉT VỀ KẾT QUẢ BÌNH SAI HIỆU TRỊ ĐO

Như vậy, có thể nhận thấy rằng việc bình sai kết hợp hai chu kỳ quan trắc thông qua hiệu trị đo đã chứng minh được tính chính xác và hiệu quả khi so sánh với phương pháp bình sai tách biệt từng chu kỳ rồi mới tính toán tham số độ lún của công trình. Kết quả thu được từ hai phương pháp này là tương đương nhau, qua đó khẳng định rằng phương pháp bình sai hiệu trị đo là một hướng tiếp cận hoàn toàn khả thi trong xử lý số liệu lưới quan trắc lún. Về bản chất, phương pháp này cho phép khai thác tối đa mối quan hệ chặt chẽ giữa các chu kỳ đo, giúp giảm thiểu tác động của sai số ngẫu nhiên cũng như sai số hệ thống trong phép đo độ cao. Điều đó không chỉ đảm bảo tính nhất quán của

kết quả mà còn phản ánh đúng xu hướng chuyển dịch thực tế của công trình trong từng giai đoạn quan trắc. Một ưu điểm nổi bật khác của phương pháp bình sai hiệu trị đo là việc xử lý số liệu không đòi hỏi phải biết giá trị chính xác của các điểm gốc. Thay vào đó, yêu cầu quan trọng nhất là phải duy trì tính ổn định lâu dài của hệ thống điểm mốc trong suốt quá trình quan trắc. Điều này rất có ý nghĩa trong thực tiễn, bởi tại nhiều công trình xây dựng, việc xác định lại hoặc kiểm tra giá trị cao độ của toàn bộ hệ thống mốc chuẩn theo chu kỳ thường tốn kém và khó khả thi. Khi sử dụng hiệu trị đo, chỉ cần các mốc chuẩn không bị thay đổi độ cao thì kết quả bình sai sẽ đảm bảo độ chính xác. Ngoài ra, phương pháp này giúp loại trừ ảnh hưởng của sai số hệ thống và sai số số liệu gốc, nhờ đó việc đánh giá độ chính xác sẽ có

độ tin cậy cao hơn. Điều này đặc biệt quan trọng trong các công trình có yêu cầu nghiêm ngặt về độ lún như nhà cao tầng, cầu lớn hoặc các công trình hạ tầng có thời gian sử dụng dài. Tuy nhiên, bên cạnh những ưu điểm kể trên, phương pháp bình sai hiệu trị đo cũng tồn tại một số hạn chế kỹ thuật cần được lưu ý trong thực hành. Cụ thể, đồ hình lưới quan trắc trong các chu kỳ phải được duy trì hoàn toàn đồng nhất, nghĩa là vị trí của các điểm đo, số lượng mốc và cấu trúc mạng lưới không được thay đổi trong suốt quá trình quan trắc. Nếu có sự thay đổi, lúc đó hiệu trị đo sẽ không còn đồng nhất, làm mất đi khả năng triệt tiêu các sai số hệ thống, từ đó ảnh hưởng đến độ chính xác của kết quả bình sai. Trong thực tế, việc bảo đảm điều kiện này không phải lúc nào cũng dễ dàng do nhiều yếu tố như biến dạng địa hình, tác động của môi trường, hoặc sự hư hỏng của mốc đo. Vì vậy, cần có biện pháp tổ chức kỹ thuật phù hợp như gia cố mốc quan trắc, bố trí dự phòng các điểm bổ sung và thực hiện kiểm định định kỳ để duy trì tính ổn định hình học của mạng lưới. Trên cơ sở khảo sát và phân tích tác động của các nguồn sai số trong quá trình quan trắc lún công trình, có thể rút ra một số kết luận mang tính tổng quát như sau:

- Thứ nhất, các sai số số liệu gốc và sai số hệ thống sẽ không làm thay đổi kết quả tính toán độ lún của công trình, với điều kiện các sai số này có giá trị ổn định trong toàn bộ quá trình quan trắc. Nói cách khác, nếu sai số hệ thống tồn tại nhưng không biến động giữa các chu kỳ đo, chúng sẽ bị triệt tiêu khi tính hiệu trị đo. Điều này giải thích vì sao phương pháp bình sai hiệu trị đo lại mang tính ổn định cao hơn so với các phương pháp truyền thống. Tuy nhiên, để đạt được điều đó, trong thực tế cần áp dụng các giải pháp đồng bộ: lựa chọn thiết bị đo có độ chính xác cao, thực hiện quy trình đo đạc đúng kỹ thuật, giảm thiểu ảnh hưởng của điều kiện môi trường và đảm bảo tính ổn định của hệ thống điểm gốc qua nhiều chu kỳ. Ngoài ra, khâu xử lý nội nghiệp cũng cần được

thực hiện cẩn thận, áp dụng đúng mô hình toán học nhằm hạn chế tối đa sai số phát sinh trong quá trình bình sai.

- Thứ hai, phương pháp bình sai kết hợp hai chu kỳ quan trắc thông qua hiệu trị đo như đã được trình bày trong nghiên cứu này cho kết quả sát với thực tế biến dạng của công trình và hoàn toàn có thể ứng dụng trong xử lý số liệu lưới quan trắc lún tại các dự án xây dựng. Tổng hợp lại, phương pháp bình sai hiệu trị đo giữa hai chu kỳ quan trắc là một hướng nghiên cứu có tính khoa học và ứng dụng cao, vừa đảm bảo tính chính xác, ổn định, vừa đơn giản hóa quy trình xử lý số liệu. Kết quả nghiên cứu không chỉ khẳng định tính đúng đắn của phương pháp mà còn mở ra khả năng hoàn thiện quy trình chuẩn trong quan trắc lún công trình, góp phần nâng cao chất lượng đánh giá và an toàn cho các công trình xây dựng trong thực tế.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Lê Đức Tình (2012). *Nghiên cứu giải pháp nâng cao hiệu quả công tác quan trắc biến dạng công trình ở Việt Nam*. Thư viện Quốc gia Việt Nam.
- Lê Đức Tình (2017). Ứng dụng phương pháp bình sai hiệu trị đo để xử lý lưới quan trắc chuyển dịch ngang công trình. *Tạp chí Khoa học Kỹ thuật Mỹ – Địa chất*.
- Lê Đức Tình, & Trần Thùy Linh (2011). Khảo sát phương pháp quan trắc biến dạng công trình theo hiệu trị đo. *Tạp chí Khoa học Kỹ thuật Mỹ – Địa chất*, 34, 64–67.
- Trần Khánh, & Nguyễn Quang Phúc (2010). *Quan trắc chuyển dịch và biến dạng công trình*. Hà Nội: Nhà xuất bản Giao thông Vận tải.
- Trần Khánh, & Nguyễn Văn Hùng (2008). Phân tích độ ổn định các điểm mốc lưới cơ sở quan trắc chuyển dịch ngang công trình thủy điện ở Việt Nam. *Tạp chí Trắc địa và Chụp ảnh Hàng không*, 5, 33-38