

論文

小径削孔による水平ひび割れ検知に関する一検討

菊地新平*, 渡邊晋也**, 上田憲寿***, 吉村郁美***

* (一社) 日本建設機械施工協会 施工技術総合研究所 (〒417-0801 静岡県富士市大淵 3154)
 **博 (工), (一社) 日本建設機械施工協会 施工技術総合研究所 (〒417-0801 静岡県富士市大淵 3154)
 ***西日本高速道路エンジニアリング関西株式会社 (〒567-0032 大阪府茨木市西駅前町 5 番 4 号 STD 茨木ビル 7F)

RC 床版における劣化損傷には、上側の鉄筋に沿って水平ひび割れが発生することが確認されている。コンクリート内部の水平ひび割れは、砂利化や断面の剛性の低下が生じて、疲労耐久性を低下させる要因と考えられ、水平ひび割れの有無を確認することは RC 床版の維持管理上重要である。しかしながら、コンクリート内部の水平ひび割れは外観で判別することができず、水平ひび割れを検知する技術が望まれる。本論は、実際に供用されている RC 床版をアスファルト舗装上面から小径削孔調査を実施し、削孔時の各種計測項目の計測値をもとにコンクリート内部の水平ひび割れの有無について判定を実施した。その結果、おおむね水平ひび割れを検知することが可能であり、また RC 床版のコンクリートの劣化について判定できる可能性が示唆された。

キーワード：水平ひび割れ, RC 床版, 微破壊検査, 小径削孔

1. はじめに

道路橋鉄筋コンクリート床版 (以下、RC 床版と称す) は、交通荷重の繰り返し作用や塩害、凍害などの材料劣化の影響により、床版コンクリートの劣化損傷が問題となっており、高速道路会社では既設 RC 床版の取替え工事が実施されている。劣化が進行している既設 RC 床版には、水平ひび割れが生じている場合もあり¹⁾、水平ひび割れ検知技術や発生メカニズムに関する研究がなされている^{2,3)}。水平ひび割れは、RC 床版の剛性低下あるいは砂利化損傷に進展し、耐力および耐久性に影響すると考えられる。このため、水平ひび割れの検知可能な技術が求められている。一方、RC 床版内部の水平ひび割れは、外観から判断することは困難であることが多い。特に、RC 床版上面付近に発生している水平ひび割れの場合は、アスファルト舗装上からの打音点検だけでは、床版厚さ方向における水平ひび割れの位置やひび割れ幅が小さいと検出することができない場合がある。

筆者らは小径削孔を用いた微破壊調査を実施して削孔速度で検出の可能性を検討しており⁴⁾、本文では同一手法を実床版に対して行い、適用性の検討を実施した。

2. 調査概要

本調査は、高速道路にかかる橋梁の RC 床版を対象に、

表-1 に示す 8 橋 (15 径間) を対象に実施した。削孔箇所 C2 以外では各径間で 3 か所ずつ小径削孔を実施した。なお、本調査では小径削孔による調査 (以下 MDT 工法と呼ぶ) 以外にもコア採取を実施して圧縮強度試験も実施した。

表-1 調査数量

橋	径間数	径間ごとの削孔調査数	
A橋	3	A1	3
		A2	3
		A3	3
B橋	1	B1	3
C橋	3	C1	3
		C2	4
		C3	3
D橋	1	D1	3
E橋	2	E1	3
		E2	3
F橋	10	F1	3
		F2	3
		F3	3
		F4	3
		F5	3
		F6	3
		F7	3
		F8	3
		F9	3
		F10	3
G橋	1	G1	3
H橋	1	H1	3
I橋	2	I1	3
		I2	3



写真-1 MDT 工法の実施状況

3. 小径削孔による調査

小径削孔は、写真-1 に示すような小径削孔測定器を用いて実施しており、削孔には水循環式ドリルを用いている。水循環式ドリルは空気中の無負荷状態で 4mm/s の速度で、押付け力を 147N でコンクリート床版に押し当てて削孔した。ドリル径は、削孔による RC 床版に与える影響は小さくするため φ8.5mm としている。削孔深さはアスファルト舗装を含めて 200mm 程度であり、RC 床版の上側鉄筋付近に生じる水平ひび割れや砂利化などが検知できる深さとした。

削孔時の計測は、①消費電力、②削孔速度および③回転数を測定しており、削孔速度はワイヤ式変位計を用いて削孔深さを計測して式(1)にて算出した。

$$V = \frac{x_n - x_{(n-1)}}{t_n - t_{(n-1)}} \quad (1)$$

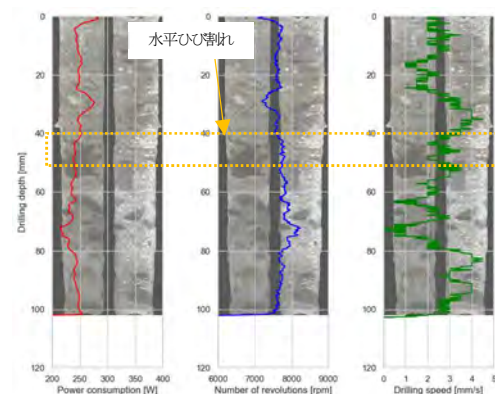
ここで、 V は削孔速度 (mm/s)、 x は削孔深さ (mm)、 t は時間 (s)、 n はサンプリング番号である。

なお、計測のサンプリング周波数は 10Hz である。また、コンクリート内部の確認として、削孔による計測後は工業用内視鏡により孔内撮影して、削孔箇所の劣化損傷の有無を確認した。

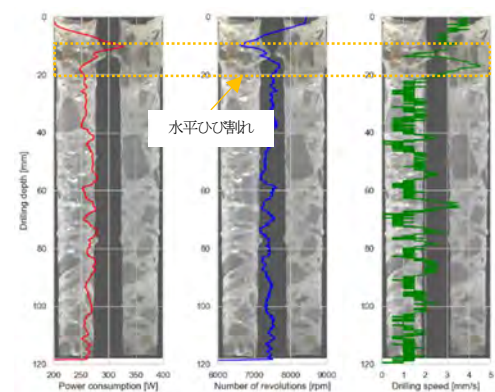
4. 調査結果

削孔時の計測結果を図-1 に示す。ここでは、代表して、工業用内視鏡にて特徴的な水平ひび割れが確認された箇所のみを示す。図-1 は縦軸が床版上面からの削孔深さ、横軸は各計測項目を示しており、左から消費電力、回転数、削孔速度を示す。なお、各曲線の背景には工業用内視鏡により撮影した動画から合成した孔内壁面画像を用いている。

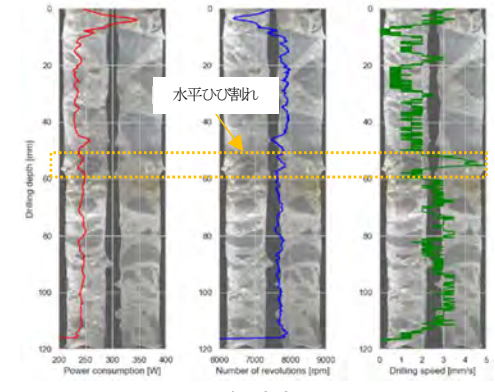
削孔速度は水平ひび割れが生じている深さで、計測値が急増していることがわかる。しかしながら、削孔箇所



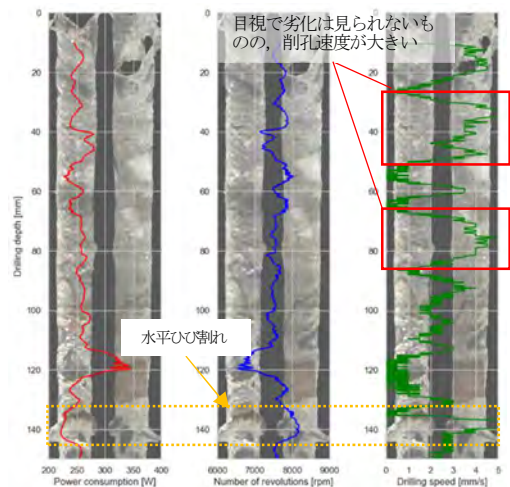
a) A1-2



b) F2-1



c) F2-2



d) G-2

図-1 小径削孔の結果

A1-2 では水平ひび割れ箇所で削孔速度の増加が見られるものの、他削孔箇所と比べて増加量は小さい。A1-2 は水平ひび割れ幅も小さく、さび汁が発生していることから、ひび割れ内に固形化したさび生成物が充填されており削孔速度が急増しなかったと考えられる。また、水平ひび割れが生じていない箇所においても、削孔速度が大きくなる現象が見られている。それは主に粗骨材が少ない箇所である。削孔速度が骨材部と比較して増加が大きいもの、変化が小さいものに分かれており、前者ではコンクリートを形成するマトリックスの材料に劣化が生じている可能性が示唆される。

消費電力と回転数ではおおむね相関関係が見られており、消費電力が増加するとき回転数は低下する。反対に消費電力が減少すると回転数は増加傾向にあることがわかる。回転数と消費電力においては、削孔速度と同様に水平ひび割れ位置にて変化はみられる箇所もあるものの、目視にて明らかに細い水平ひび割れが生じている F2-2 では変化は見られず、削孔速度よりも水平ひび割れの検出精度は低いと考えられる。

5. 水平ひび割れ検知に関する検討

調査結果から MDT 工法の削孔では、水平ひび割れ以外にも床版コンクリートのマトリックス材料の劣化を検知している可能性があり、計測値に影響を及ぼすことがわかった。これらの計測値は水平ひび割れ箇所とも類似した挙動となっており判断は難しい。しかしながら、水平ひび割れ以外の損傷も床版に対して悪影響を与えることから、床版コンクリート材料のマトリックス材料の劣化と水平ひび割れ検知の双方の劣化損傷を対象に異常検知するため本検討では、2 種類の方法で異常検知を実施した。なお、異常判定の検証にあたり、コア試験体の圧縮強度が 24N/mm^2 を下回っているものと、目視によりひび割れや脆弱部が確認されているものを異常とした。

5.1 基本統計量を用いた検討

床版コンクリートの劣化や損傷が生じている場合、計測値のばらつきや削孔速度の平均速度の上昇が想定される。このことから、消費電力や回転数、削孔速度の基本統計量を確認することとした。ここで、異常の判定基準はあらかじめ基準強度 24N/mm^2 の健全なコンクリートに対して削孔して、その際の削孔時のデータと比較を実施して劣化損傷の判定を行った。結果の一覧を表-2 に示す。

異常検知の評価は、正解率、再現率、適合率、F1 スコアにて実施しており、各項目は式(2)～(5)にて算出される。

$$\text{正解率} = \frac{TP+TN}{TP+TN+FN+FP} \quad (2)$$

$$\text{再現率} = \frac{TP}{TP+FN} \quad (3)$$

$$\text{適合率} = \frac{TP}{TP+FP} \quad (4)$$

$$\text{F1 スコア} = 2 \frac{\text{適合率} \times \text{再現率}}{\text{適合率} + \text{再現率}} \quad (5)$$

ここで、TP：異常を異常と正しく判定したケース、FN：異常を正常と誤って判定したケース、FP：正常を異常と誤って判定したケース、TN：正常を正常と正しく判定したケースである。

異常判定の結果を図-2 に示す。同図では、各計測項目を 1 種類で判定した場合と複数の計測項目により判定した結果を示している。同図中の OR は、各計測項目のいずれかでも異常と判定された場合は異常とされる。AND は各計測項目のいずれにおいても異常と判定された場合に異常と判定した。1 つの計測項目で平均値や中央値で異常判定を実施する場合、回転数と削孔速度で再現率が 0.7 以上であるものの、適合率が 0.5 未満と非常に低くなっており、誤検知が多くなる。標準偏差による異常判定を実施すると再現率は、削孔速度が 0.79、消費電力が 0.73、回転数が 0.76 と高い値で適合率では、削孔速度が 0.47、消費電力が 0.72、回転数は 0.83 という結果であり、削孔速度では適合率が低い結果となった。各項目のいずれかでも異常と判定された場合 (DPR_標_OR) は、再現率 0.73、適合率 0.87 と比較的精度よく異常検知できており、F1 スコアも 0.79 と最も高い値であった。DPR_標_OR で検知できなかった箇所 (F2-1、F2-2、F3-3、F6-1) では、いずれも水平ひび割れが生じていた。G-1 は界面はく離の疑いがあったが検出はされなかった。F6-1 については、削孔速度が基準試験体よりも早いいため、削孔速度の平均値や中央値を組み合わせることで、検出可能となった (中央値を用いた場合：再現率 0.71、適合率 0.94、平均値を用いた場合：再現率 0.71、適合率 0.91)。

本検討により、消費電力や回転数、削孔速度の 3 つの計測項目の基本統計量を確認することで、RC 床版の異常検知はおおむね可能と考えられる。ただし、水平ひび割れを誤検知しているものもあり改善が必要である。

5.2 外れ値検出手法を用いた検討

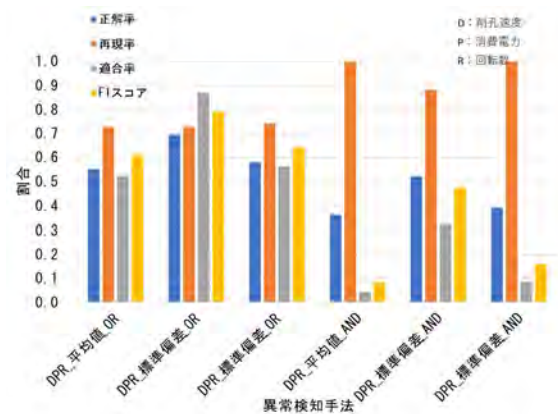
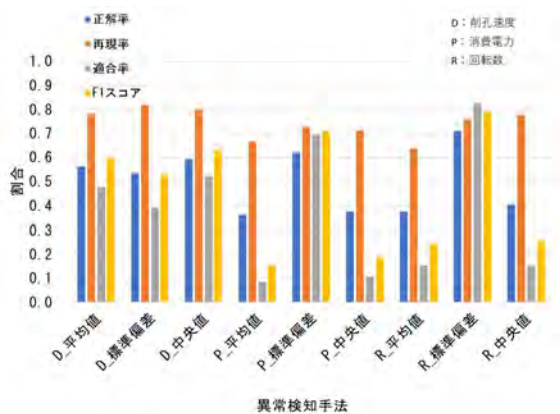
5.1 節では、孔全体の中央値や平均値、標準偏差を基準試験体の値を閾値として異常検知を実施したが、周りのコンクリートのばらつきが小さいものの水平ひび割れが生じているような箇所を誤検知して正常と判定していた。これは、孔内全体の基本統計量を比較したことにより、水平ひび割れのような孔内で局所的な損傷がとらえられなかったものと考えられる。本検討では、Z スコアおよびロバスト Z スコアを用いて孔内の相対的な評価が可能と考えられる異常検知について検討した。

・Z スコア法

ある集団内の相対的な位置を表す指標であり、正規分布を想定した手法である。Z スコアは式(6)により算出される。

表-1 削孔時の計測データの統計値一覧

橋梁	削孔箇所	最小 圧縮強度	最大 圧縮強度	目視による代表的な 損傷	削孔速度			消費電力			回転数			
					平均値	標準偏差	中央値	平均値	標準偏差	中央値	平均値	標準偏差	中央値	
A橋	径間1	A1-1	20.1	33.9	なし	1.94	1.09	1.70	242.7	14.5	246.0	7707.9	224.4	7662.3
		A1-2	20.1	33.9	水平ひび割れ	2.61	0.84	2.50	243.0	10.6	242.7	7707.9	162.4	7705.3
		A1-3	20.1	33.9	なし	2.75	1.18	2.92	252.1	12.2	252.3	7568.2	184.9	7567.6
	径間2	A2-1	19.7	29.6	なし	2.01	1.25	2.38	242.2	14.9	242.1	7617.9	216.7	7600.0
		A2-2	19.7	29.6	なし	1.49	1.04	1.28	222.0	11.0	222.8	7993.7	180.4	7973.9
		A2-3	19.7	29.6	なし	1.82	0.92	1.82	232.4	13.3	235.3	7866.8	222.7	7802.7
	径間3	A3-1	20.5	36.7	なし	2.75	1.31	3.17	263.9	14.2	263.8	7303.4	203.8	7311.0
		A3-2	20.5	36.7	なし	1.18	0.59	1.24	267.7	14.4	268.8	7416.7	197.3	7395.4
		A3-3	20.5	36.7	なし	1.47	0.79	1.25	254.9	10.5	254.0	7599.2	151.5	7613.3
B橋	径間1	B-1	31.7	34.1	なし	1.32	0.67	1.25	246.4	7.7	246.1	7748.2	112.1	7738.4
		B-2	31.7	34.1	水平ひび割れ	1.82	1.16	1.57	269.8	18.4	266.4	7417.4	235.9	7449.2
		B-3	31.7	34.1	なし	2.03	1.19	1.79	256.6	8.4	256.7	7573.6	122.1	7579.6
C橋	径間1	C1-1	28.0	43.5	なし	1.07	0.45	1.11	238.5	6.2	239.3	-	-	-
		C1-2	28.0	43.5	なし	0.93	0.43	0.91	259.4	17.7	253.6	7531.9	237.7	7600.8
		C1-3	28.0	43.5	なし	1.22	0.42	1.17	256.6	12.9	257.2	7574.8	182.2	7564.9
	径間2	C2-1	28.9	48.5	なし	1.18	0.43	1.14	243.5	8.7	241.0	7798.2	125.9	7825.5
		C2-2	28.9	48.5	なし	0.87	0.35	0.80	243.7	14.7	238.2	7829.9	213.5	7904.5
		C2-3	28.9	48.5	なし	1.44	0.50	1.43	252.0	7.1	251.7	7666.3	97.7	7668.0
	径間3	C3-1	13.7	27.8	なし	1.66	1.11	1.67	270.1	36.4	256.2	7413.0	432.2	7567.3
		C3-2	13.7	27.8	ひび割れ	2.45	1.07	2.56	297.3	27.1	285.9	7060.2	286.2	7150.2
		C3-3	13.7	27.8	脆弱部	1.61	0.74	1.57	313.9	31.3	310.2	6852.7	297.4	6866.6
D橋	径間1	D-1	27.2	29.1	なし	2.25	0.85	2.30	279.3	17.8	275.3	7301.1	211.1	7361.9
		D-2	27.2	29.1	なし	1.66	0.50	1.58	272.4	6.5	273.0	7325.7	89.6	7315.9
		D-3	27.2	29.1	なし	1.49	0.53	1.57	247.4	9.2	244.9	7696.3	124.3	7720.0
E橋	径間1	E1-1	29.6	42.8	なし	2.09	1.11	2.00	269.9	20.4	263.6	7293.0	262.7	7364.5
		E1-2	29.6	42.8	水平ひび割れ	3.18	0.95	3.33	270.6	18.1	277.0	7290.6	261.8	7192.6
		E1-3	29.6	42.8	なし	2.95	1.20	3.33	271.0	24.5	265.4	7284.3	297.6	7339.0
	径間2	E2-1	24.8	40.9	なし	1.40	0.72	1.25	249.1	11.8	249.3	7572.3	166.1	7572.1
		E2-2	24.8	40.9	なし	1.63	0.69	1.50	254.5	21.7	245.8	7512.8	303.1	7645.8
		E2-3	24.8	40.9	なし	1.36	0.52	1.25	237.6	12.7	239.0	7721.8	191.5	7704.9
	径間3	F1-1	13.2	37.5	なし	3.70	0.58	3.83	270.8	11.7	271.0	7254.9	171.1	7242.8
		F1-2	13.2	37.5	なし	3.52	0.71	3.67	258.1	9.3	257.3	7435.9	143.0	7444.7
		F1-3	13.2	37.5	なし	2.94	0.83	2.88	244.9	27.7	258.7	7640.7	457.7	7399.3
F橋	径間1	F2-1	15.8	29.4	水平ひび割れ	1.65	0.72	1.43	263.8	7.6	262.6	7413.3	113.5	7421.6
		F2-2	15.8	29.4	水平ひび割れ	2.34	0.81	2.45	239.9	6.4	241.2	7742.4	104.9	7721.5
		F2-3	15.8	29.4	なし	3.05	0.99	3.33	274.2	13.6	272.6	7239.9	180.3	7253.5
	径間2	F3-1	17.1	23.4	なし	1.33	0.88	1.05	232.6	10.8	232.7	7850.3	173.5	7840.6
		F3-2	17.1	23.4	なし	1.41	0.82	1.25	225.4	8.6	226.8	7979.4	147.0	7957.7
		F3-3	17.1	23.4	水平ひび割れ	2.16	0.99	1.96	236.9	8.1	237.5	7814.6	133.2	7795.1
	径間3	F4-1	19.0	23.4	なし	2.61	0.79	2.63	247.8	6.4	246.7	-	-	-
		F4-2	19.0	23.4	なし	1.74	1.04	1.67	238.1	12.2	237.8	-	-	-
		F4-3	19.0	23.4	なし	2.25	1.13	2.16	253.0	39.0	243.6	-	-	-
G橋	径間1	F5-1	18.8	27.8	なし	1.67	1.03	1.67	233.7	14.4	232.1	7816.0	216.5	7832.1
		F5-2	18.8	27.8	なし	2.17	1.12	2.38	244.3	9.3	246.8	7616.2	141.1	7579.2
		F5-3	18.8	27.8	なし	3.30	1.25	3.67	255.1	18.3	252.7	7472.9	262.8	7503.3
	径間2	F6-1	16.9	27.3	水平ひび割れ	3.15	0.83	3.29	251.1	7.1	253.5	7548.3	113.2	7529.2
		F6-2	16.9	27.3	水平ひび割れ	3.06	1.22	3.33	269.0	23.3	264.2	7352.5	302.5	7390.8
		F6-3	16.9	27.3	なし	2.34	0.69	2.50	236.5	4.9	235.8	7783.2	77.1	7797.1
	径間3	F7-1	22.6	38.0	なし	3.40	0.66	3.50	259.1	10.0	260.7	7460.2	154.2	7429.3
		F7-2	22.6	38.0	なし	1.86	0.85	1.80	241.6	8.8	242.8	7731.3	137.1	7713.1
		F7-3	22.6	38.0	なし	2.65	0.75	2.62	253.9	14.4	249.6	7563.4	210.3	7608.3
H橋	径間1	F8-1	31.4	32.8	なし	2.57	0.79	2.56	243.5	7.2	242.5	7682.6	108.1	7708.6
		F8-2	31.4	32.8	水平ひび割れ	2.38	0.95	2.38	249.6	11.9	246.0	7597.9	174.8	7646.4
		F8-3	31.4	32.8	なし	2.58	0.72	2.50	249.8	6.3	249.3	7608.4	96.3	7620.2
	径間2	F9-1	23.6	25.6	なし	1.53	0.83	1.43	259.5	19.9	254.1	7465.5	274.2	7546.2
		F9-2	23.6	25.6	水平ひび割れ	2.04	0.92	2.00	250.3	11.5	251.1	7576.5	166.7	7569.9
		F9-3	23.6	25.6	なし	3.11	0.93	3.25	255.7	8.4	255.4	7524.2	129.8	7520.3
	径間3	F10-1	25.4	36.3	なし	2.13	0.83	2.25	250.3	12.8	247.8	7570.0	179.0	7592.5
		F10-2	25.4	36.3	なし	2.73	1.00	2.88	256.2	14.0	254.1	7474.9	200.6	7501.3
		F10-3	25.4	36.3	なし	2.84	0.93	2.83	255.8	8.6	254.2	7474.2	118.2	7501.0
I橋	径間1	G-1	17.8	20.6	界面はく離疑い	1.95	0.80	1.83	254.0	9.9	253.8	7534.7	133.0	7553.5
		G-2	17.8	20.6	水平ひび割れ	2.33	1.30	2.27	256.1	20.2	256.1	7592.0	273.4	7581.8
		G-3	17.8	20.6	脆弱部	3.22	1.37	3.50	265.6	26.6	260.1	7521.1	319.9	7576.5
J橋	径間1	H-1	15.4	18.2	なし	2.59	1.19	2.92	252.4	10.8	251.8	7523.7	154.1	7529.3
		H-2	15.4	18.2	脆弱部	3.05	1.18	3.33	252.0	8.2	252.1	7541.2	128.6	7542.9
		H-3	15.4	18.2	ひび割れ	2.55	1.20	2.40	263.1	19.5	261.3	7393.9	258.6	7409.3
	径間2	I1-1	30.7	33.1	なし	2.23	0.88	2.16	241.5	8.9	241.2	7680.2	129.8	7684.1
		I1-2	30.7	33.1	なし	3.44	0.70	3.33	263.1	12.6	266.8	7410.0	193.3	7354.6
		I1-3	30.7	33.1	ひび割れ	3.03	1.21	3.33	251.9	10.1	250.8	7563.1	154.7	7576.0
	径間3	I2-1	20.5	28.4	なし	3.13	0.87	3.33	259.6	11.8	261.7	7424.9	172.1	7390.8
		I2-2	20.5	28.4	脆弱部	3.42	0.98	3.67	253.7	12.1	254.7	7521.7	180.6	7501.2
		I2-3	20.5	28.4	なし	2.90	0.98	3.29	289.1	41.6	273.5	7084.9	421.4	7240.2



a) 1つの計測項目で判定

b) 複数の計測項目で判定

図-2 異常判定の結果

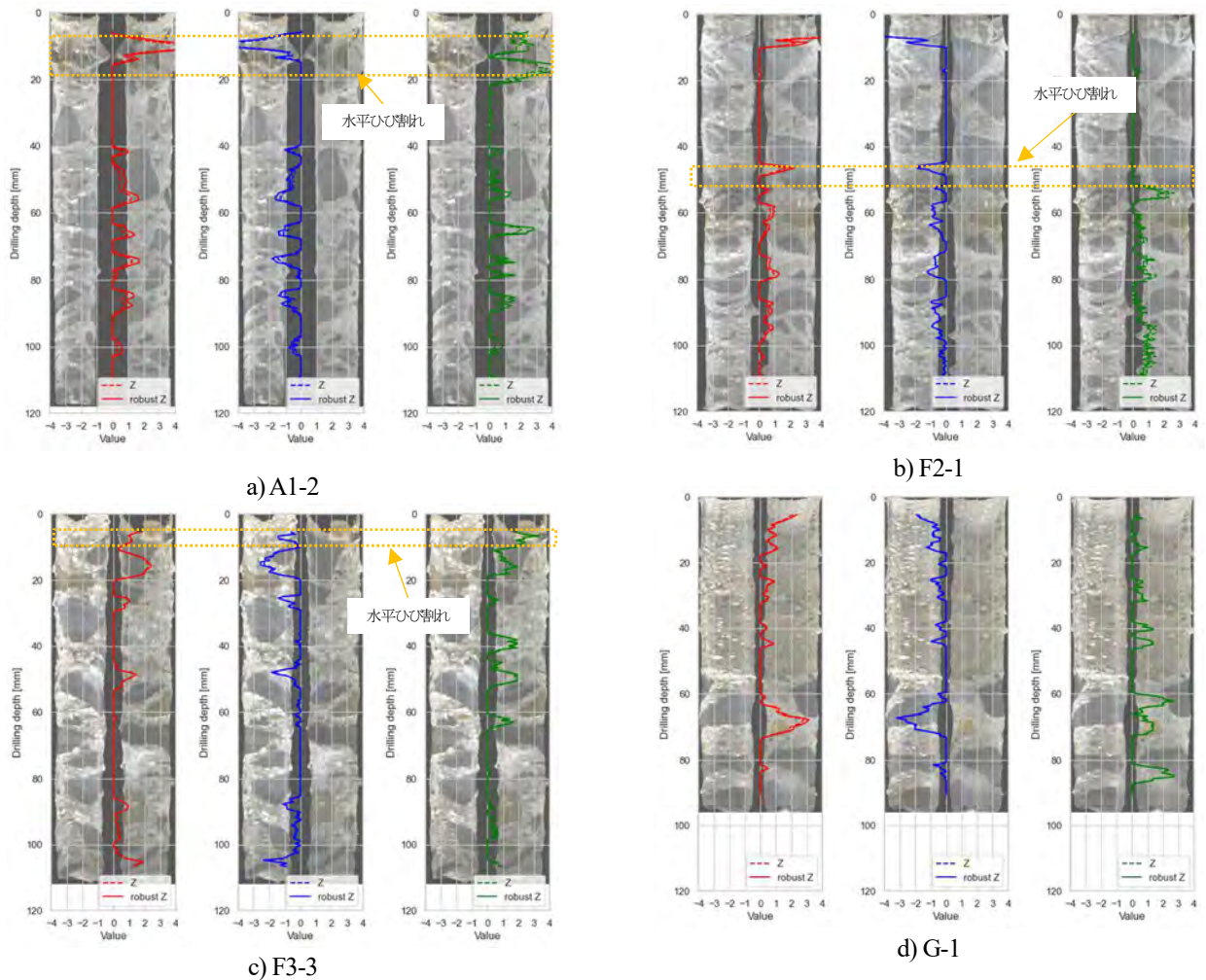


図-3 削孔深さとZスコア・ロバストZスコアの関係

$$Z = \frac{(\hat{X} - \mu)}{\sigma} \quad (6)$$

ここで、 μ : 平均値、 X : 確率変数、 σ : 標準偏差、 Z : Z スコアである。

・ロバストZスコア法

上記式の平均値を中央値、標準偏差を正規四分位範囲に置き換えて外れ値の影響を受けない指標とした手法である。下記式により算出される。

$$rZ = \frac{(\hat{X}_i - X_m)}{NIQR} \quad (7)$$

$$NIQR = \frac{QD}{0.6774\sigma} \quad (8)$$

ここで、 X_i : 測定値、 X_m : 中央値、 QD : 四分位偏差、 rZ : ロバストZスコアである。

これらの手法により各測定値を標準化し、閾値を上回る場合に異常と判定した。ここで閾値は標準正規分布の片側0.15%点にあたる ± 3.0 とした。標準化後の深さ方向に対する関係を図-3に示す。ここでは、5.1節にて健全とされた削孔箇所に対して実施した。同図より、ZスコアおよびロバストZスコアによる深さ方向の傾向は同様であった。消費電力および回転数では、目視でも異常が

確認されない箇所で大きくなる場合が確認された。削孔速度では、5.1節で検出されなかったF2-1、F3-3にて閾値を超過した箇所と水平ひび割れの一致が確認された。

F2-2についても、水平ひび割れ箇所でも値が急増しているものの閾値を超えない結果であった。水平ひび割れ幅が小さく、閾値を超過しなかったと考えられる。本調査の計測では、サンプリング周波数10Hzであるため、ひび割れが通過するタイミングを捉えきれなかったと考えられる。G-1（界面はく離が疑われる箇所）については本手法においても検知することができておらず、界面はく離の幅が小さいあるいは生じていないと考えられる。

本手法は、孔内でばらつきが大きい場合には、閾値超過が多数みられる。このことから、5.1節で示した手法と併用することで精度向上を図ることが可能であると考えられる。

6. まとめと今後の課題

本調査では、実床版に対して統計的手法により異常検知を実施した。その結果から得られた知見を下記に示す。

- ・水平ひび割れが生じている場合には、水平ひび割れをおおむね検知することが可能である。ただし、水平ひ

び割れ幅が小さい場合や水平ひび割れ内が固形物で充填されている場合には、計測値の変動が小さく検出が難しいため、計測装置ほか改善が必要である。

- ・床版コンクリート内部では、ひび割れ以外の要因でも各計測項目で計測値が大きく変動し、ばらつきが大きい場合がある。平均値や標準偏差などの統計値を 24N/mm^2 の健全コンクリートの削孔計測結果と比較することで圧縮強度が低下している箇所の判別が可能であった。このことから、MDT 工法によりコンクリートの劣化の有無を判定できる可能性が示唆された。
- ・水平ひび割れと床版コンクリートの劣化が同時に生じている場合は、異常と判定することは可能であるものの、劣化損傷の区別が難しい。
- ・基本統計量を用いて異常検知を行ったが、1 つの計測項目のみの計測値で実施するよりも複数の計測項目の計測値用いたほうが精度良く判定することができる。

本検討では、計測手法にいくつか課題があげられたが、計測センサ（削孔深さ）の精度向上、サンプリング周波数の向上などさらなる改善を行う必要がある。

参考文献

- 1) 三田村浩，澤松俊寿，岡田慎哉，角間恒，松井繁之：46 年間供用した積雪寒冷地における道路橋 RC 床版の損傷状況の調査：土木学会北海道支部論文報告集，第 69 号，部門 A-11，2013.
- 2) 中山和也，鎌田敏郎，内田慎哉，大西弘志：衝撃弾性法による道路橋 RC 床版の水平ひび割れの評価手法に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.31, No.1, 2009.
- 3) 小松代亮磨，大西弘志，岩崎正二，出戸秀明：RC 床版内部水平ひび割れの発生メカニズムに関する一考察，道路橋床版シンポジウム論文報告集，第八回，9-12, 2014.
- 4) 菊地新平，渡邊晋也，内田美生，谷倉泉：上田 Y. C. ファン（大橋義夫，村上澄男，神谷紀生共訳）：固体の力学小径削孔時の削孔速度変化を用いたコンクリート床版内部の水平ひび割れ検知技術，第 12 回道路橋床版シンポジウム論文報告集，2022.

（2024 年 7 月 12 日受付）