

自然電位法による鉄筋腐食診断技術に関する
共同研究報告書

平成19年1月

独立行政法人土木研究所
技術推進本部構造物マネジメント技術チーム
日本構造物診断技術協会

Copyright © (2007) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Chief Executive of P.W.R.I.

この報告書は、独立行政法人土木研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、独立行政法人土木研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

自然電位法による鉄筋腐食診断技術に関する共同研究報告書

独立行政法人土木研究所

技術推進本部構造物マネジメント技術チーム

主席研究員	渡辺 博志
主任研究員	古賀 裕久
研究員	中村 英佑
交流研究員	松塚 忠政 ¹⁾
交流研究員	小松原 健 ²⁾

日本構造物診断技術協会

理事・技術委員長	松村 英樹
副委員長	内田 明
〃	竹田 哲夫 ¹⁾
〃	日紫喜 剛啓 ³⁾
技術委員	中村 雅之
〃	渡辺 寛 ¹⁾
研究委員	井川 一弘
〃	青山 敏幸 ³⁾
〃	秋山 暉
〃	貝原 巨利 ¹⁾
〃	川合 徳男
〃	柴田 浩司
〃	柴田 信宏
〃	鈴木 宏信
〃	高橋 功
〃	田代 賢吉
〃	橋 修
〃	田中 千尋 ⁴⁾
〃	樋口 正典
〃	峰村 富夫
〃	山口 光俊 ⁵⁾

¹⁾ 2006 年 3 月まで, ²⁾ 2005 年 4 月より 2006 年 3 月まで,
³⁾ 2006 年 4 月より, ⁴⁾ 2006 年 9 月まで, ⁵⁾ 2006 年 10 月から

要 旨

構造物マネジメント技術チームと日本構造物診断技術協会は、自然電位法を用いたコンクリート構造物の鉄筋腐食診断技術の精度をより正確なものとするを目的として、共同研究を行った。本報告書では、実構造物を対象とした現地測定および供試体を用いた模擬実験の結果を報告するとともに、これらの結果を踏まえた上で「塩害環境下にあるコンクリート橋の自然電位測定方法(案)」を提案する。

キーワード： コンクリート構造物, 自然電位法, 鉄筋腐食, 塩害

目次

第Ⅰ部 序論.....	1
1. はじめに.....	3
2. 自然電位法の測定原理.....	4
3. 既往文献の概要と本研究の目的.....	7
3.1 腐食判定基準の提案例.....	7
3.2 実構造物の測定例.....	8
3.3 自然電位法の実用化にあたっての問題点.....	10
3.4 本研究の目的.....	11
参考文献.....	12
第Ⅱ部 実構造物の測定結果.....	15
1. 調査の目的.....	17
2. 調査の概要.....	19
2.1 対象橋梁.....	19
2.2 調査時期と天候.....	24
2.3 自然電位と塩化物イオン濃度の測定方法.....	24
2.4 付着塩分量の調査と圧縮強度試験.....	26
3. 調査結果.....	27
3.1 目視調査の結果.....	27
3.2 自然電位と塩化物イオン濃度、鉄筋腐食の関係.....	28
3.3 測定時の気象条件が自然電位に与える影響.....	36
3.4 湿潤時間の違いによる自然電位の変化.....	39
3.5 導通の確認方法.....	41
3.6 測定値の補正方法.....	43
3.7 測定点間隔の設定方法.....	50
3.8 はつり位置での自然電位の測定結果.....	54
3.9 付着塩分量の測定結果.....	56
4. 実構造物の調査結果のまとめ.....	58
参考文献.....	60
第Ⅲ部 供試体の測定結果.....	61
1. 暴露供試体の定期測定.....	63
1.1 実験の目的.....	63
1.2 実験の概要.....	64
1.3 実験結果と考察.....	68
1.4 暴露供試体の定期測定結果のまとめ.....	78
2. 暴露供試体の長期継続測定.....	79
2.1 実験の目的.....	79
2.2 実験の概要.....	79
2.3 測定結果と考察.....	81
2.4 暴露供試体の長期継続測定結果のまとめ.....	86
3. 気温の変化と自然電位の関係.....	87
3.1 実験の目的.....	87
3.2 実験の概要.....	87
3.3 測定結果と考察.....	89

4. 塩化物イオン濃度の差に起因するマクロセル腐食と自然電位の関係.....	91
4.1 実験の目的.....	91
4.2 実験の概要.....	91
4.3 結果および考察.....	93
4.4 測定結果のまとめ.....	102
第IV部 測定方法の提案.....	103
塩害環境下にあるコンクリート橋の自然電位測定方法（案）.....	105
付録.....	111

目次
 1
 2
 3
 4
 5
 6
 7
 8
 9
 10
 11
 12
 13
 14
 15
 16
 17
 18
 19
 20
 21
 22
 23
 24
 25
 26
 27
 28
 29
 30
 31
 32
 33
 34
 35
 36
 37
 38
 39
 40
 41
 42
 43
 44
 45
 46
 47
 48
 49
 50
 51
 52
 53
 54
 55
 56
 57
 58
 59
 60
 61
 62
 63
 64
 65
 66
 67
 68
 69
 70
 71
 72
 73
 74
 75
 76
 77
 78
 79
 80
 81
 82
 83
 84
 85
 86
 87
 88
 89
 90
 91
 92
 93
 94
 95
 96
 97
 98
 99
 100
 101
 102
 103
 104
 105
 106
 107
 108
 109
 110
 111
 112
 113
 114
 115
 116
 117
 118
 119
 120
 121
 122
 123
 124
 125
 126
 127
 128
 129
 130
 131
 132
 133
 134
 135
 136
 137
 138
 139
 140
 141
 142
 143
 144
 145
 146
 147
 148
 149
 150
 151
 152
 153
 154
 155
 156
 157
 158
 159
 160
 161
 162
 163
 164
 165
 166
 167
 168
 169
 170
 171
 172
 173
 174
 175
 176
 177
 178
 179
 180
 181
 182
 183
 184
 185
 186
 187
 188
 189
 190
 191
 192
 193
 194
 195
 196
 197
 198
 199
 200
 201
 202
 203
 204
 205
 206
 207
 208
 209
 210
 211
 212
 213
 214
 215
 216
 217
 218
 219
 220
 221
 222
 223
 224
 225
 226
 227
 228
 229
 230
 231
 232
 233
 234
 235
 236
 237
 238
 239
 240
 241
 242
 243
 244
 245
 246
 247
 248
 249
 250
 251
 252
 253
 254
 255
 256
 257
 258
 259
 260
 261
 262
 263
 264
 265
 266
 267
 268
 269
 270
 271
 272
 273
 274
 275
 276
 277
 278
 279
 280
 281
 282
 283
 284
 285
 286
 287
 288
 289
 290
 291
 292
 293
 294
 295
 296
 297
 298
 299
 300
 301
 302
 303
 304
 305
 306
 307
 308
 309
 310
 311
 312
 313
 314
 315
 316
 317
 318
 319
 320
 321
 322
 323
 324
 325
 326
 327
 328
 329
 330
 331
 332
 333
 334
 335
 336
 337
 338
 339
 340
 341
 342
 343
 344
 345
 346
 347
 348
 349
 350
 351
 352
 353
 354
 355
 356
 357
 358
 359
 360
 361
 362
 363
 364
 365
 366
 367
 368
 369
 370
 371
 372
 373
 374
 375
 376
 377
 378
 379
 380
 381
 382
 383
 384
 385
 386
 387
 388
 389
 390
 391
 392
 393
 394
 395
 396
 397
 398
 399
 400
 401
 402
 403
 404
 405
 406
 407
 408
 409
 410
 411
 412
 413
 414
 415
 416
 417
 418
 419
 420
 421
 422
 423
 424
 425
 426
 427
 428
 429
 430
 431
 432
 433
 434
 435
 436
 437
 438
 439
 440
 441
 442
 443
 444
 445
 446
 447
 448
 449
 450
 451
 452
 453
 454
 455
 456
 457
 458
 459
 460
 461
 462
 463
 464
 465
 466
 467
 468
 469
 470
 471
 472
 473
 474
 475
 476
 477
 478
 479
 480
 481
 482
 483
 484
 485
 486
 487
 488
 489
 490
 491
 492
 493
 494
 495
 496
 497
 498
 499
 500
 501
 502
 503
 504
 505
 506
 507
 508
 509
 510
 511
 512
 513
 514
 515
 516
 517
 518
 519
 520
 521
 522
 523
 524
 525
 526
 527
 528
 529
 530
 531
 532
 533
 534
 535
 536
 537
 538
 539
 540
 541
 542
 543
 544
 545
 546
 547
 548
 549
 550
 551
 552
 553
 554
 555
 556
 557
 558
 559
 560
 561
 562
 563
 564
 565
 566
 567
 568
 569
 570
 571
 572
 573
 574
 575
 576
 577
 578
 579
 580
 581
 582
 583
 584
 585
 586
 587
 588
 589
 590
 591
 592
 593
 594
 595
 596
 597
 598
 599
 600
 601
 602
 603
 604
 605
 606
 607
 608
 609
 610
 611
 612
 613
 614
 615
 616
 617
 618
 619
 620
 621
 622
 623
 624
 625
 626
 627
 628
 629
 630
 631
 632
 633
 634
 635
 636
 637
 638
 639
 640
 641
 642
 643
 644
 645
 646
 647
 648
 649
 650
 651
 652
 653
 654
 655
 656
 657
 658
 659
 660
 661
 662
 663
 664
 665
 666
 667
 668
 669
 670
 671
 672
 673
 674
 675
 676
 677
 678
 679
 680
 681
 682
 683
 684
 685
 686
 687
 688
 689
 690
 691
 692
 693
 694
 695
 696
 697
 698
 699
 700
 701
 702
 703
 704
 705
 706
 707
 708
 709
 710
 711
 712
 713
 714
 715
 716
 717
 718
 719
 720
 721
 722
 723
 724
 725
 726
 727
 728
 729
 730
 731
 732
 733
 734
 735
 736
 737
 738
 739
 740
 741
 742
 743
 744
 745
 746
 747
 748
 749
 750
 751
 752
 753
 754
 755
 756
 757
 758
 759
 760
 761
 762
 763
 764
 765
 766
 767
 768
 769
 770
 771
 772
 773
 774
 775
 776
 777
 778
 779
 780
 781
 782
 783
 784
 785
 786
 787
 788
 789
 790
 791
 792
 793
 794
 795
 796
 797
 798
 799
 800
 801
 802
 803
 804
 805
 806
 807
 808
 809
 810
 811
 812
 813
 814
 815
 816
 817
 818
 819
 820
 821
 822
 823
 824
 825
 826
 827
 828
 829
 830
 831
 832
 833
 834
 835
 836
 837
 838
 839
 840
 841
 842
 843
 844
 845
 846
 847
 848
 849
 850
 851
 852
 853
 854
 855
 856
 857
 858
 859
 860
 861
 862
 863
 864
 865
 866
 867
 868
 869
 870
 871
 872
 873
 874
 875
 876
 877
 878
 879
 880
 881
 882
 883
 884
 885
 886
 887
 888
 889
 890
 891
 892
 893
 894
 895
 896
 897
 898
 899
 900
 901
 902
 903
 904
 905
 906
 907
 908
 909
 910
 911
 912
 913
 914
 915
 916
 917
 918
 919
 920
 921
 922
 923
 924
 925
 926
 927
 928
 929
 930
 931
 932
 933
 934
 935
 936
 937
 938
 939
 940
 941
 942
 943
 944
 945
 946
 947
 948
 949
 950
 951
 952
 953
 954
 955
 956
 957
 958
 959
 960
 961
 962
 963
 964
 965
 966
 967
 968
 969
 970
 971
 972
 973
 974
 975
 976
 977
 978
 979
 980
 981
 982
 983
 984
 985
 986
 987
 988
 989
 990
 991
 992
 993
 994
 995
 996
 997
 998
 999
 1000

第 I 部 序論

1. はじめに

塩害環境下にあるコンクリート構造物を合理的に維持管理していくためには、鉄筋腐食による劣化損傷がコンクリート表面に顕在化する前にその兆候を把握し、適切な対策を施すことが重要である。劣化損傷がコンクリート表面に現れた後に何らかの対策を講じた場合、補修や補強に要するコストが増加するだけでなく、構造物の性能を再び健全な状態に戻すことが極めて困難となるためである。従来から行われている目視観察に基づく定期的な点検は、構造物表面に現れた劣化損傷を観察しその経年変化を追跡することを目的としたものであり、コンクリート表面に顕在化していない鉄筋腐食の予兆を発見し対策を講じるといった予防保全的な視点に立つものではない。このため、塩害の作用を受けるコンクリート構造物の合理的な維持管理を行うためには、コンクリート内部の鉄筋の腐食状態を把握することのできる非破壊検査手法を併用していくことが効果的と考えられる。

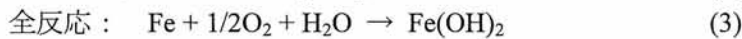
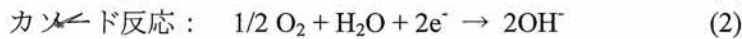
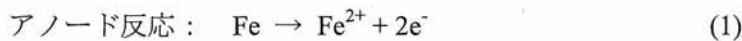
自然電位法は、コンクリート内部の鉄筋腐食を推定する際に、最も一般的に用いられている検査手法である。ASTM の規格¹⁾に加えて、土木学会規準²⁾としても測定方法が定められており、コンクリート構造物の鉄筋腐食度診断技術として積極的に活用されることが期待されている。その一方で、自然電位法には、未だ不明な点も残されており、実構造物の鉄筋の腐食状態を推定するために多用されるほどの信頼性は得られていない。この原因としては、例えば、ASTM の規格では鉄筋腐食度の判定基準が示されているものの、得られた測定値によってはこの判定基準のみでは鉄筋腐食の判定を下すことが困難な範囲が含まれていること、また、この判定基準を適用しても最終的な判断を専門家の解釈に委ねざるを得ない場合があることなどが考えられる。

こうした状況を踏まえ、本報告書では、自然電位法を用いた鉄筋腐食診断技術の精度をより正確なものとするために、実構造物を対象とした現場測定ならびに供試体を用いた模擬実験を実施し、自然電位法の適切な測定方法とこれを用いた鉄筋腐食診断方法について検討した。また、これらの試験結果を精査した上で、塩害環境下にあるコンクリート橋の自然電位測定方法(案)を提案した。

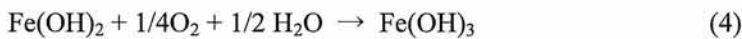
2. 自然電位法の測定原理

健全なコンクリートは、セメントの水和反応によって生成した水酸化カルシウムにより強いアルカリ性(pH12程度)を示す。コンクリート内部の鉄筋は、この強アルカリにより表面に不動態被膜が形成されて保護されている。従って、適切な施工が行われたひび割れのないコンクリート構造物では、鉄筋腐食は問題とならない。ところが、塩害環境下でコンクリート内部に塩化物イオンが浸透して鉄筋位置まで到達すると、不動態被膜が破壊され鉄筋腐食が生じる。

図-1.1に、鉄筋の腐食機構を示す。図-1.1において、アノード(陽極)部での反応とカソード(陰極)部での反応が同時に進行することにより、鉄筋腐食が進展する。これを化学反応式で示すと、式(1)~(3)のようになる。



上記の反応により生じた水酸化第一鉄(Fe(OH)₂)は、溶存酸素(H₂O + O₂)の供給により、式(4)の反応を生じて二酸化第二鉄(Fe(OH)₃)の赤錆となる。



このように、コンクリート内部における鉄筋の腐食は電気化学反応に基づいて進行するため、腐食状態の変化に伴い鉄筋の電位も変化することが知られている。健全なコンクリートは強アルカリ性を示し、内部の鉄筋が不動態化しているため、-100~-200mV:CSEの電位を示すが、腐食が進行すると電位は卑な方向へ変化する³⁾。自然電位法は、こうした鉄筋腐食と電位の関係を利用し、鉄筋の電位を測定することによって腐食状態を推定する方法である。

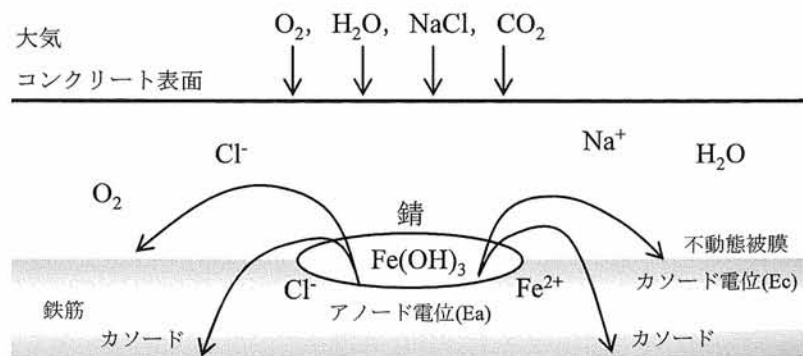


図-1.1 鉄筋の腐食機構

鉄筋の腐食反応と電位の変化は、アノード分極曲線とカソード分極曲線によっても説明することができる^{4), 5), 6), 7)}。図-1.2, 1.3にアノード分極曲線とカソード分極曲線の模式図を示す。これらの分極曲線は、鉄に強制的に電流を流して得られるものであり、図-1.2は塩分を含む環境中の分極曲線、図-1.3は塩分を含まない環境中の分極曲線を表している。カソード分極曲線は塩分の有無に関わらずほぼ同一の直線となるが、アノード分極曲線は塩分の有無により異なる形状となる。

両図のアノード分極曲線とカソード分極曲線との交点の電位は、いずれも鉄筋の自然電位と腐食電流を示すものである。図-1.3の自然電位 E'_{corr} は不動態化域にあり、ごく微小な腐食電流 i'_{corr} では鉄筋腐

食は起こらない。一方、これが図-1.2のように腐食域にある場合には、アノード部となる鉄筋表面から腐食電流 i_{corr} が流出し、その自然電位 E_{corr} に応じた鉄筋腐食が生じる。アノード部から流出した腐食電流は、同じ電流だけカソード部へ流入するため、アノード反応とカソード反応は同じ速度で進展する。ここでは、塩分を含む環境中の鉄筋の腐食電流の方が大きく、塩分を含まない環境中の鉄筋よりも速い速度で腐食が進展することとなる。

アノード・カソード間の腐食電流量は、両者間の電位差とそれぞれの接地抵抗の大小によって決定される。ただし、コンクリート中の鉄筋では、アノード・カソード間の電流の流出入する面積を厳密に特定することが困難なため、これらを容易に算定することはできない。また、アノード分極曲線およびカソード分極曲線の勾配は、塩化物イオン濃度や溶存酸素の多少で変化するため、これに伴い鉄筋の自然電位も変わることとなる。この結果、鉄筋の置かれる腐食環境の違いにより、異なる自然電位が測定されることとなる。

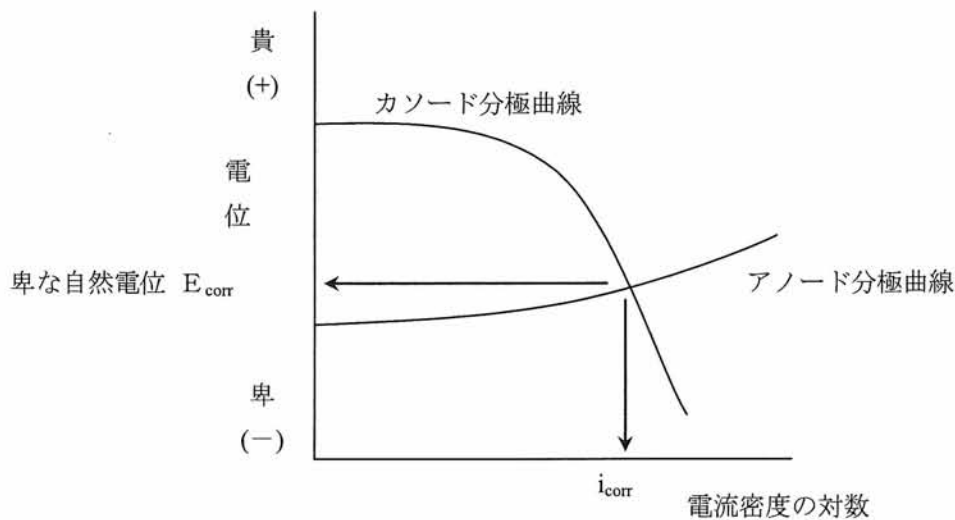


図-1.2 塩分を含む環境中のアノード・カソード分極曲線の模式図

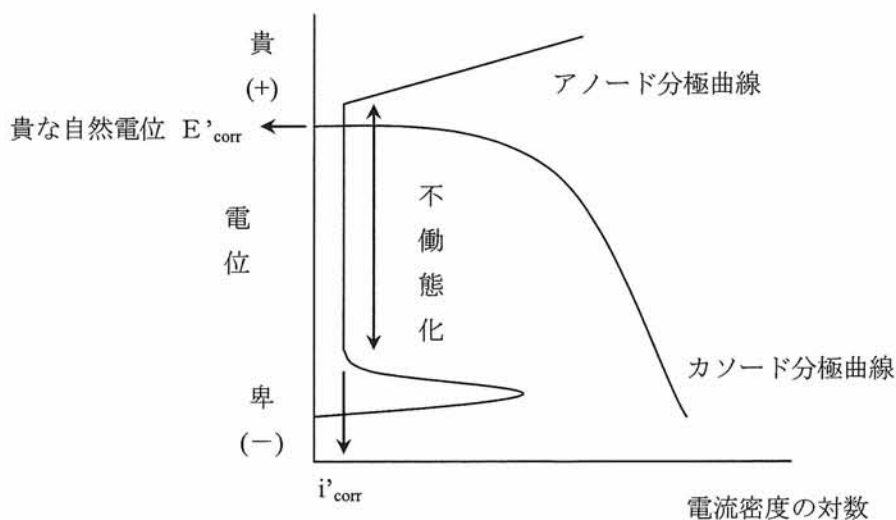


図-1.3 塩分を含まない環境中のアノード・カソード分極曲線の模式図

自然電位の測定には、一般に、図-1.4に示す照合電極と電位差計が用いられている²⁾。

照合電極は、飽和硫酸銅電極、飽和カロメル電極、飽和塩化銀電極、鉛電極などの種類がある。適切な保守管理がなされ、使用時の環境の影響を受けにくく比較的安定した電極電位を示す電極であれば、いずれを使用しても良いとされている。

また、電位差計は、内部抵抗が $100\text{M}\Omega$ 以上のものを使用することが推奨されている。これは、計器の内部抵抗が小さい場合、測定時に計器内を流れる微小電流により分極が生じ測定対象となる鉄筋の電位の変化を引き起こすことや、かぶりコンクリートの抵抗が高い場合に生じるIRドロップ(電圧降下)により測定誤差が生じることを避けるためである。

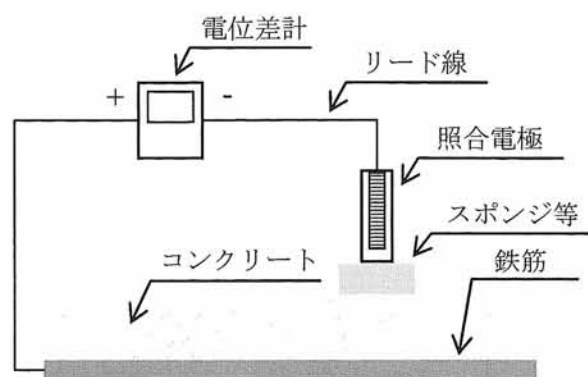


図-1.4 測定装置の概要

3. 既往文献の概要と本研究の目的

3.1 腐食判定基準の提案例

自然電位法は、1950年代に Stratfull⁸⁾によりコンクリート床版橋の鉄筋腐食の調査に利用され始めた。その後、高速道路の床版橋の測定結果などを踏まえ、ASTM C 876 (Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Reinforcing Steel in Concrete)¹⁾として測定方法が制定された。ここでは、表-1.1 に示すように、コンクリート中の鉄筋の腐食状態を自然電位の範囲と腐食確率で推定することとしている。

表-1.1 ASTM C 876 の腐食判定基準

自然電位 E(mV:CSE)	腐食確率
$E > -200$	90%以上の確率で腐食なし
$-200 \geq E > -350$	不確定
$-350 \geq E$	90%以上の確率で腐食あり

BS 7361⁹⁾では、Figgら¹⁰⁾の提案に基づき、表-1.2 に示すように、コンクリート中の鉄筋の腐食状態を自然電位の範囲と鉄筋腐食の可能性で推定することとしている。しかし、ASTM C 876 と BS 7361 で採用された腐食判定基準は、自然電位が $-200 \sim -350$ mV:CSE となった場合に腐食確率を「不確定」もしくは腐食の可能性を「50%」と判定することとなっており、実質的には評価を避けている。

表-1.2 BS 7361 の腐食判定基準

自然電位 E(mV:CSE)	腐食の可能性
$E > -200$	5%
$-200 \geq E > -350$	50%
$-350 \geq E$	95%

一方、わが国では、1983年に日本コンクリート工学協会編集の「海洋コンクリート構造物の防食指針(案)」¹¹⁾において、自然電位法の測定規準と測定例が紹介されている。また、1988年に旧建設省による建設省総合技術開発プロジェクト¹²⁾において、測定に用いる電位差計や照合電極、コンクリートを湿潤させる溶液の種類など測定方法について広範な検討が行われた。ここでは、自然電位の測定値と鉄筋の腐食面積率の関係から表-1.3 に示す判定基準を提案しているが、自然電位の測定値がマクロセル腐食による分極の影響を受けるため、自然電位の絶対値のみから正確な鉄筋腐食の推定を行うことが困難であることを指摘している。このため、ここで提案された腐食判定基準も自然電位が $-200 \sim -300$ mV:CSE となった場合の評価を避けたものとなっており、より正確な鉄筋腐食の診断を行うためには、自然電位の分布などから比較的卑な電位を示す箇所を選定し、実際に鋼材の腐食の程度を目視観察することを推奨している。

表-1.3 旧建設省技術総プロの腐食判定基準

自然電位 E(mV:CSE)	腐食の判定
$E \geq -200$	腐食が生じていない
$-200 \geq E > -300$	腐食が生じている場合と腐食が生じていない場合がある
$-300 \geq E$	腐食が生じている

その後、2000年に土木学会規準として、「コンクリート構造物における自然電位測定方法(JSCE-E-601-2000)」²⁾が制定されたが、ここでは腐食判定基準については明記されておらず、表-1.1, 1.2の腐食判定基準を参考として用いても良いとしている。

「非破壊試験を用いた土木コンクリート構造物の健全度診断マニュアル」¹³⁾(以下、健全度診断マニュアル)では、自然電位法を実構造物の健全度診断に適用する際の課題として、ASTM C 876とBS 7361の腐食判定基準に評価を避けた範囲があることを指摘し、鉄筋腐食の生じた供試体の自然電位と腐食状態の関係から表-1.4に示す腐食判定基準を提案している。ここでは、自然電位を100mVごとに区分し、ASTM C 876とBS 7361で評価を避けた-200~-350mV:CSEの範囲の自然電位に対しても判定を行えるようにしている。しかしながら、文献12)で指摘されているように、実構造物においてマクロセル腐食が生じている場合には、分極により鉄筋本来の自然電位とは異なった値が測定されるため、このような細分化された判定基準により妥当な評価が得られるかどうかについては疑問が残される。

表-1.4 健全度診断マニュアルの腐食判定基準

自然電位 E(mV:CSE)	鋼材の腐食しやすさ
$-350 \geq E$	大
$-250 \geq E > -350$	やや大
$-150 \geq E > -250$	軽微
$E > -150$	なし

3.2 実構造物の測定例

3.2.1 諸外国での測定例

米国では、実構造物を対象とした自然電位の測定は1950年代にStratfull⁸⁾により開始され、1970年代にはFHWAにより海水の飛来塩分および凍結防止剤による塩害の作用を受けた473橋の自然電位を測定した事例が報告されている¹⁴⁾。ここでは、目視調査でひび割れや剥離が確認されていない場合においても-350mV:CSEよりも卑な自然電位が測定され鉄筋腐食が確認された橋梁が多くあり、目視調査で健全と診断された橋梁のうち約40%で-350mV:CSEよりも卑な自然電位が測定されたことが報告されている。

その後、米国では、Clemena¹⁵⁾によりコンクリート橋における自然電位の測定方法について詳細な検討が行われている。ここでは、ASTM C 876で推奨されている測定点の間隔が過大なために局所的な腐食鉄筋腐食が発見できないことを懸念し、実際のコンクリート床版橋の測定結果から500mm程度が適切であると提案している。また、自然電位の測定結果が測定時の気温や湿度によって変動することを確認し、鉄筋の腐食状態を推定する際には個別の自然電位の測定値ではなく等電位線図を用いるべきとの指摘を行っている。

オセアニア地域で策定が進められているAUSTROADSにおいても、自然電位方法の測定方法について検討が行われている¹⁶⁾。ここでは、ASTM C 876の腐食判定基準が実際の鉄筋の腐食状況と一致しないことがあり、貴な自然電位が測定された箇所でも腐食が生じていることがあるなど、測定結果を誤解する危険性があることを自然電位法の問題点として指摘している。一方で、等電位線図を用いれば自然電位の分布傾向から腐食部分を特定できることや測定の簡易さなどから、自然電位法の有効性も示している。

Bernardら¹⁷⁾は、オーストラリアの塩害の作用を受けるコンクリート橋の自然電位を8ヶ月間にわたって計60回測定し、自然電位がコンクリートの含水状態などの影響を受けて大きく変動したことを報告している。また、コンクリート表面の湿潤時間を変化させた場合の自然電位の測定も行い、湿潤時間を長くすると自然電位が卑に変化することを指摘している。

Elsenerら¹⁸⁾は、スイスのコンクリート構造物の自然電位の測定結果に基づき、測定値をASTM C 876の腐食判定基準に照らして腐食の評価を行うのではなく、等電位線図のように自然電位の分布傾向を精

査して鉄筋腐食の生じている箇所を推定することを推奨している。また、Elsener¹⁹⁾は、自然電位の測定値がコンクリートの含水状態、塩化物イオン濃度、気温、コンクリートの中性化、かぶりの影響を受けるため、構造物ごとに腐食の生じている鉄筋の示す自然電位が異なることを指摘した上で、断面補修や脱塩工法、再アルカリ化工法を用いて補修したコンクリート構造物に対する自然電位法の適用可能性を検討している。これらの検討結果を踏まえ、RILEM TC 154-EMC²⁰⁾では、コンクリート構造物での自然電位の測定方法とその活用方法について整理している。ここでは、測定時の気温やコンクリートの含水状態などの違いにより自然電位の測定値が変動すること、局所的に塩化物イオンが鉄筋位置まで浸透してマクロセル腐食が形成されている場合には正確な測定値が得られないことなどを理由として、ASTM C 876 の腐食判定基準を用いて自然電位の絶対値のみから鉄筋腐食の評価を行うと誤った結論を導く可能性があることを指摘している。また、腐食箇所を検出するためには等電位線図を活用することを推奨し、これを塩化物イオン濃度測定用のコア採取にも活用できることを提案している。

3.2.2 国内の測定例

わが国でも、実構造物を対象とした自然電位の測定例や測定方法の検討結果が報告されており、概要を整理すると以下ようになる。

土木研究所資料第 2770 号²¹⁾では、廃橋となった旧板貝橋と旧洞川橋の塩害による劣化状態を調査する際に、自然電位の測定を実施している。ここでは、飽和カロメル電極を用い、桁の主鉄筋の自然電位を測定している。この結果、コンクリート表面に剥離や錆汁が発生している位置と卑な自然電位を示した位置が一致したこと、海側と山側の桁および桁の側面と底面では異なる自然電位が測定されたことを報告している。

土木研究所資料第 3791 号²²⁾では、新橋の架け替えにより撤去された旧榊橋 P2 橋脚と旧芦川橋 A1 橋台を対象とした自然電位の測定やはつり調査などの結果が報告されている。塩害の作用を受けていない旧榊橋 P2 橋脚では、建設時のものと思われる表面的な浮き錆が鉄筋表面で確認され、自然電位の測定値は-350mV:CSE よりも貴となっている。一方、海岸線から約 40m の距離にあり上部工では塩害による損傷が確認された旧芦川橋 A1 橋台は、部分的に孔食を伴う激しい腐食が生じており、自然電位の測定値も-350mV:CSE よりも卑となっている。すなわち、ここでの調査結果は、自然電位の測定結果がコンクリート内部の鉄筋の腐食状態と概ね一致することを示すものと考えられる。

共同研究報告書第 269 号²³⁾でも、新橋の架け替えにより撤去された旧暮坪陸橋 P3 橋脚と旧芦川橋 G1 桁の自然電位の測定結果やはつり調査の結果などが報告されている。旧暮坪陸橋 P3 橋脚は、コンクリート表面に鉄筋腐食による劣化損傷は顕在化しておらず、はつり調査でも鉄筋にはごく表面的な腐食が生じている状態であった。自然電位は、概ね-250mV よりも貴であり、鉄筋の腐食状況と一致する結果が得られている。一方、旧芦川橋 G1 桁は、鉄筋の一部で孔食が生じ、全体的には点錆程度の腐食が生じていた。これを反映し、自然電位は、主に端部で-350mV:CSE よりも卑な値が測定され、中央部では概ね-350mV:CSE よりも貴な値が測定された。

葛目ら²⁴⁾は、塩害による劣化損傷の確認された橋脚と PC 桁の外観観察と自然電位の測定結果を比較し、外観上鉄筋腐食が予想される箇所では-300mV:CSE よりも卑な電位が測定されたことを報告している。また、はつり調査も併せて実施し、鉄筋腐食の進行が予測される箇所では等電位線の間隔が狭くなっていることを指摘している。

山本ら²⁵⁾は、供試体の測定結果から、自然電位が卑になるほど鉄筋の腐食面積率が増加するとしながらも、マクロセル腐食が生じた場合に ASTM C 876 の腐食判定基準のみでは必ずしも適切な判定が下せないことを指摘し、特にこの傾向が実構造物では顕著となることを懸念している。また、断面修復を行う前後の実橋梁の自然電位を測定した結果、修復後に修復部がカソード、未修復部がアノードとなり、両部間の電位勾配が大きくなるために腐食が著しく進展することを指摘している。

橋ら²⁶⁾は、内陸部に位置する RC 床版橋の自然電位を測定し、測定値にはコンクリートの水分量と中性化、塩化物イオン濃度が影響を及ぼすため、可能な範囲でこれらの試験を自然電位と併用すべきとの指摘を行っている。

足立ら²⁷⁾は、主に中性化による鉄筋腐食が懸念される関西地域の 2 ヶ所の高欄を対象として、10 年間

に渡り自然電位の測定を行っている。この結果、自然電位はコンクリートの温度と相関関係にあり温度が高いほど卑な電位が測定されたこと、散水終了後の自然電位は徐々に貴に変化したことを報告している。また、10年間の継続的な測定では約100~300mVの差が生じ、対象とした構造物が主に中性化の劣化作用を受けていたため、塩害による鉄筋腐食を想定したASTM C 876の腐食判定基準と実際の鉄筋の腐食状態は必ずしも合致しなかったと結論づけている。

横田²⁸⁾は、建設後36年経過したRC造開水路側壁の自然電位と鉄筋の腐食状態との関係を示し、ASTM C 876の鉄筋腐食判定基準のように絶対値のみで鉄筋腐食を判定することが必ずしも妥当でないことを指摘している。

渡辺²⁹⁾は、RC擁壁の自然電位を測定し、目視による外観調査結果と比較している。この構造物は、竣工後17年を経過し、塩害の作用を受けた結果、鉄筋腐食によるひび割れ、かぶりコンクリートの剥離や剥落が確認されたものであり、自然電位の卑な位置が外観損傷の現れた箇所と一致したことを報告している。

小日山³⁰⁾は、RC栈橋の自然電位を測定し、はつり調査による鉄筋の腐食状態との比較を行っている。この結果、測定部位によっては、ASTM C 876の腐食判定基準で不確定と判定される箇所においても、鉄筋腐食が生じていたことを報告している。

森川³¹⁾は、東海道新幹線スラブ下面の自然電位を測定している。ここでも、文献4)の方法で補正電位を測定しているが、補正前後で鉄筋腐食の疑われる結果は得られなかったため、対象構造物が健全であったと結論付けている。

古原³²⁾は、市街地内に位置する高架橋のスラブ下面の自然電位を測定している。この構造物は、昭和25年に竣工され、中性化深さが鉄筋のかぶり以上に達しており、目視検査では多数のひび割れや浮き、剥落が確認されている。ここでは、文献4)に示されている方法で測定された補正電位を用いると、自然電位の測定結果が目視検査から判定される鉄筋腐食度と概ね一致したことを示している。ただし、鉄筋のはつり調査は行っておらず、目視検査から想定される鉄筋腐食との比較に留まっている。

3.3 自然電位法の実用化にあたっての問題点

上記で示した自然電位法に関連する既往の調査結果を踏まえると、自然電位法の実用化にあたって改善すべき問題点として、以下の項目が考えられる。

(1) 自然電位法を用いた腐食判定方法

一般に、自然電位による腐食判定基準としては、ASTM C 876の判定基準が最も広く使用されている。しかし、既往の文献では、ASTM C 876の判定基準が必ずしも実構造物の鉄筋の腐食状態と一致しないことやこの判定基準には不確定と判定される自然電位の範囲があることなどから、このままでは実構造物の診断に適用できないことが指摘されていた。とりわけ、マクロセル腐食による分極の影響を受けた場合には自然電位が本来の値から変化するため、自然電位の絶対値のみを用いて判定を下すことが困難となることが指摘されていた。このため、マクロセル腐食が自然電位に及ぼす影響を明確にし、実構造物における鉄筋腐食判定方法を設定する必要がある。

(2) 自然電位の測定値の変動とその発生原因

既存の文献では、測定時の気温、コンクリートの含水状態や中性化などにより、自然電位の測定値が変動することが報告されていた。従って、測定値の変動の範囲とその発生原因を明確にすることが必要である。

(3) 維持管理における自然電位法の活用方法

既存の文献の大部分では、既に劣化損傷が構造物表面に現れた構造物を対象とし、表面の劣化損傷と自然電位の測定結果が概ね一致することを指摘していた。冒頭に述べたように、構造物表面に塩害による劣化損傷が顕在化した後では、補修に要するコストが増加するだけでなく、構造物の性能を再び健全な状態に戻すことが極めて困難となる。予防保全的な視点からコンクリート構造物の維持管理を行うた

めには、表面に劣化損傷が顕在化する前に、鉄筋腐食の予兆を把握することが必須である。このため、供用からある程度の年月が経過し、塩害の作用を受けているものの構造物表面に劣化損傷が現れていない構造物において自然電位法を適用し、鉄筋腐食や塩化物イオンの浸透状況との関係を明らかにすることが必要である。

3.4 本研究の目的

これらの問題点を踏まえ、本研究では、自然電位法を用いた鉄筋腐食の診断技術の精度をより正確なものとするために、実構造物を対象とした現地測定ならびに供試体を用いた模擬実験を実施し、自然電位の適切な測定方法とこれを用いた鉄筋腐食診断方法について検討することを目的とした。

実構造物の現地測定では、塩害環境下で供用中の鉄筋腐食による劣化損傷の顕在化していないコンクリート橋を対象とし、測定時の気象条件や湿潤時間、照合電極の違いなどが自然電位の測定結果に及ぼす影響を検討した。また、自然電位の測定結果と塩化物イオン濃度、鉄筋の腐食状況の関係を考察し、自然電位法を用いた鉄筋腐食診断方法について検討した。

供試体を用いた模擬実験では、土木研究所内に暴露中の供試体、熱電対を埋設した供試体、アノード部とカソード部を分離し人工的にマクロセル腐食を再現できる供試体などの自然電位を測定し、気象条件やマクロセル腐食が自然電位の測定結果に与える影響を考察した。

また、これらの実験結果を精査した上で、塩害環境下にあるコンクリート橋の自然電位測定方法(案)を提案した。

参考文献

- 1) ASTM C 876-91(Reapproved 1999) : Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete, Annual Book of ASTM Standards, Vol. 03.02, pp.457-462, 1999
- 2) 土木学会：コンクリート構造物における自然電位測定方法(JSCE-E601-2000), 鉄筋腐食・防食および補修に関する研究の現状と今後の動向(その 2)-コンクリート委員会腐食防食小委員会(2 期目)報告-, コンクリート技術シリーズ 30, pp.248-256, 2000
- 3) 小林豊治, 米澤敏男, 出頭圭三：鉄筋腐食の診断, コンクリート構造物の耐久性診断シリーズ 3, 森北出版, p.242, 1993
- 4) 建設省土木研究所材料施工部コンクリート研究室, 日本構造物診断技術協会：コンクリート構造物の健全度診断技術の開発に関する共同研究報告書 -コンクリート構造物の非破壊検査マニュアル-, 共同研究報告書第 106 号, p.168, 1994
- 5) 独立行政法人土木研究所技術推進本部構造物マネジメント技術チーム, 日本構造物診断技術協会：コンクリート構造物の鉄筋腐食診断技術に関する共同研究報告書 -自然電位法・分極抵抗法による鉄筋腐食診断-, 共同研究報告書第 294 号, p.84, 2003
- 6) 腐食防食協会：腐食・防食ハンドブック, p.916, 2000
- 7) 大即信明ほか：塩害(I), コンクリート構造物の耐久性シリーズ, 技報堂出版, p.158, 1986
- 8) R. F. Stratful : The Corrosion of Steel in a Reinforced Concrete Bridge, Corrosion, pp.43-48, Vol.13, No.3, 1957
- 9) British Standard Institution : BS 7361 : Part 1 : 1991, p.112, 1991
- 10) J. W. Figg, A. F. Marsden : Development of inspection techniques for reinforced concrete: a state of the art survey of electrical potential and resistivity measurements for use above water level, Offshore Technology Report OTH 84 205, p.66, 1985
- 11) 日本コンクリート工学協会：海洋コンクリート構造物の防食指針(案), pp.123-133, 1983
- 12) 建設省：コンクリートの耐久性向上技術の開発報告書<第一編>, 建設省総合技術開発プロジェクト, pp.97-108, 1988
- 13) 独立行政法人土木研究所, 日本構造物診断技術協会：非破壊試験を用いた土木コンクリート構造物の健全度診断マニュアル, 技報堂出版, p.216, 2003
- 14) J. R. Van Daveer : Techniques for Evaluating Reinforced Concrete Bridge Decks, ACI Journal, pp.697-704, December, 1975
- 15) G. G. Clemena : Benefits of measuring half-cell potentials and rebar corrosion rates in condition surveys of concrete bridge decks (final report), Virginia Transportation Research Council, p.52, 1992
- 16) AUSTRROADS : Monitoring of steel corrosion in concrete, p.82, 2000
- 17) E.S. Bernard, M. Karlaftis : Reliability of half-cell potential measurements, Proceedings third International Conference on Concrete Under Sever Conditions, pp.1769-1776, 2001
- 18) B. Elsener, H. Bohni : Potential Mapping and corrosion of steel in concrete, Corrosion Rates of Steel in Concrete, ASTM STP 1065, pp.143-156, 1990
- 19) B. Elsener : Half-cell potential mapping to assess repair work on RC structures, Construction and Building Materials, Vol.15, pp.133-139, 2001
- 20) RILEM TC 154-EMC : 'Electrochemical Techniques for Measuring Metallic Corrosion', Recommendations Half-cell potential measurements - Potential mapping on reinforced concrete structures, Materials and Structures, Vol.36, pp.461-471, 2003
- 21) 建設省土木研究所：コンクリート橋の塩害に関する実橋詳細調査, 土木研究所資料第 2707 号, p.79, 1988
- 22) 国土交通省土木研究所材料施工部コンクリート研究室：非破壊検査を用いたコンクリート構造物の健全度調査 -旧榊橋・旧芦川橋下部構造調査結果-, 土木研究所資料第 3791 号, p.67, 2001
- 23) 国土交通省土木研究所材料施工部コンクリート研究室, 日本構造物診断技術協会：コンクリート構造物の鉄筋腐食診断技術に関する共同研究報告書 -実構造物に対する適用結果-, 共同研究報告書第

269号, 2001

- 24) 葛目和宏, 宮川豊章: 自然電位測定による鉄筋腐食の調査, 非破壊検査, Vol.34, No.10, pp.756-760, 1985
- 25) 山本悟, 井川一弘, 寺田剛, 坂本浩行, 片脇清士: 自然電位測定によるコンクリート中の鉄筋の腐食診断, コンクリート構造物の耐久性診断に関するシンポジウム論文集, pp.67-72, 1988
- 26) 橘吉宏, 作田孝行, 前田研一, 富澤光一郎, 梶川康男: RC床版橋の自然電位法による鉄筋腐食検査と適用性に関する考察, コンクリート構造物の耐久性診断に関するシンポジウム論文集, pp.91-96, 1988
- 27) 足立幸郎, 宮川豊章, 関惟忠, 小林茂広: 自然電位・分極抵抗法による鉄筋腐食現地追跡調査, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.17, No.1, pp.1243-1248, 1995
- 28) 横田優: 建設後36年経過したRC造開水路側壁の腐食モニタリング結果について, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.1, pp.185-190, 1998
- 29) 渡辺直樹, 伊藤祐二, 青景平昌, 鎌田正孝: 自然電位法によるRC構造物の鉄筋腐食調査, 土木学会年次学術講演会講演概要集第5部, Vol.42, pp.398-399, 1987
- 30) 小日山定, 石井幸生, 佐藤誠, 久米英輝: RC栈橋における鉄筋腐食量と鉄筋自然電位の現地測定結果, 土木学会年次学術講演会講演概要集第5部, Vol.44, pp.602-603, 1989
- 31) 森川昌司, 大脇規孝, 堤要二, 筑摩栄: 東海道新幹線のコンクリート構造物における非破壊鉄筋腐食診断, 土木学会年次学術講演会講演概要集第5部, Vol.53, pp.600-601, 1998
- 32) 古原隆, 瀬野康弘, 大橋潤一, 住田裕紀: 市街地における鉄道高架橋への自然電位法の適用性について, 土木学会年次学術講演会講演概要集第5部, Vol.54, pp.640-641, 1999

第Ⅱ部 実構造物の測定結果

1. 調査の目的

自然電位法は、コンクリート中の鉄筋腐食を推定する方法として最も一般的に使用されており、既に土木学会でも「コンクリート構造物における自然電位測定方法(JSCE-E-601-2000)」(以下、土木学会規準)¹⁾として測定方法が定められている。しかし、実構造物における測定方法や測定結果の利用方法は、必ずしも明確にされていない点も残されており、実構造物への適用に即した測定方法を定めることが必要と考えられる。ここでは、実際に塩害環境下にあるコンクリート橋の自然電位を測定することにより、実構造物における自然電位の測定方法を検討することを目的とした。具体的には、以下の(1)~(7)について重点的に検討した。

(1) 自然電位法による鉄筋腐食の推定方法

塩害環境下のコンクリート構造物では、コンクリート表面に鉄筋腐食に起因すると疑われる錆汁やひび割れが顕在化していない場合においても、コンクリート内部で鉄筋腐食が進行している可能性がある。既設コンクリート構造物の維持管理を合理的に行うためには、コンクリート表面に鉄筋腐食による劣化損傷が現れる前に、鉄筋腐食の兆候を発見することが重要である。

このため、塩害環境下で供用中の鉄筋腐食による劣化損傷が現れていないコンクリート構造物を対象として、自然電位法による鉄筋腐食診断方法について検討した。

(2) 自然電位法による塩化物イオン濃度測定位置の選定方法

一般に、塩化物イオン濃度の測定位置は、目視調査の結果に基づいて選定されている。しかし、目視調査結果のみに基づいて塩化物イオン濃度の測定位置を選定した場合、コンクリート表面に鉄筋腐食に起因すると疑われる錆汁やひび割れが顕在化していない構造物では、必ずしも構造物の代表値となる測定位置を選定することができるとは言えない。

そこで、自然電位法の測定結果を参考とすることで、塩化物イオン濃度測定用の試料採取位置を選定することが可能か検討した。

(3) 測定時の気象条件が自然電位に与える影響

鉄筋の腐食速度には気温や湿度が影響を与えることが指摘されている。このため、測定時の気象条件により自然電位の測定結果も変化する可能性がある。

夏季と冬季の自然電位の測定結果を比較し、測定時の気象条件が自然電位に与える影響を検討した。

(4) 湿潤時間の違いによる自然電位の変化

土木学会規準では、測定前に30分間程度の湿潤時間を確保することで容易な測定が可能となるとしている。ところが、排水処理が適切になされている構造物ではコンクリートが乾燥状態にあることもあり、安定した測定値を得るためには湿潤時間を長くするなどの対処も必要と考えられる。また、土木学会規準では、湿潤後1時間以内に測定を終えることが望ましいとしているが、実構造物の測定では厳密に湿潤時間を管理することが困難な場合もある。

そこで、湿潤時間を30分以上とした場合の測定結果と、逆に30分間の湿潤後に乾燥させた場合の測定結果から、湿潤時間の違いによる自然電位の変化を検討した。

(5) 導通の確認方法

供試体を用いた模擬実験等では、コンクリート中の鉄筋の導通を確認する必要はない。しかし、実構造物の測定では、測定範囲が極めて広く、鉄筋の電氣的な連続性、すなわち導通の有無を事前に確認する必要がある。

このため、電位差計を用いた簡易な導通の確認方法の適用可能性について検討した。

(6) 測定値の補正方法

土木学会規準では、異なる照合電極による自然電位の測定値を相互比較可能とするために、測定値を25℃の飽和硫酸銅電極基準の電位に換算することとし、これに用いる換算式を示している。

ここでは、この換算式による補正結果と、第Ⅲ部で述べるキャリブレーション^Aによる測定値の補正結果を比較し、測定値の補正方法を検討することとした。

(7) 測定点間隔の設定方法

供試体の測定と比較して、実構造物の測定では測定範囲が極めて広くなり、測定に要する時間と手間が大幅に増える。簡易に実構造物の測定を行うためには、測定点の間隔を広げる等の対処が必要となる。しかし、測定点の間隔を広くすると、局所的な鉄筋腐食を把握できなくなる危険性も高まる。

そこで、簡易かつ正確に自然電位を測定するための測定点間隔の設定方法について検討した。

A 測定に使用する照合電極の電極電位を、より信頼性の高い他の照合電極の電極電位基準で事前に計測しておき、測定に使用する照合電極の理論値に対するずれを確認する。測定終了後、この値を用いて測定値を補正する方法である。詳細な方法については、第Ⅲ部で述べる。

2. 調査の概要

2.1 対象橋梁

新潟県内に位置する脇谷川橋と歌高架橋の2橋梁を対象とした。塩害環境下で長期間供用されているにも関わらず、コンクリート表面に鉄筋腐食による劣化損傷が顕在化していない構造物への自然電位法の適用方法を検討するため、鉄筋腐食による錆汁や剥離が顕在化していない構造物を選定した。

以下に、これらの概要を示す。

(1) 脇谷川橋(RC床版橋, 1963年架設)

図-2.1~2.4に、脇谷側橋の状況を示す。

脇谷川橋は、橋長約7mのRC床版橋であった。海岸線との距離が近く、海水の飛沫による塩化物イオンの供給量は豊富であったと思われる。また、山側と海側では、雨水により水分が直接供給される状態であった。配筋図は紛失していたが、電磁波レーダ法による鉄筋探査結果から、200mm間隔で縦方向と横方向に鉄筋が配置されていることがわかった。

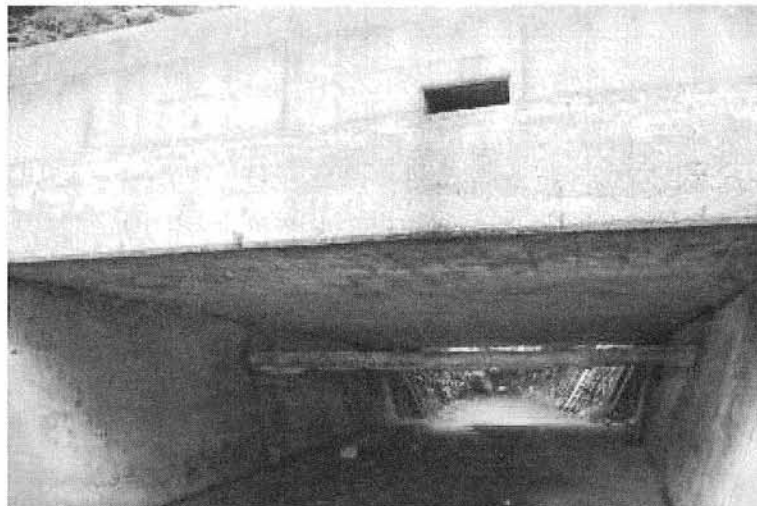


図-2.1 脇谷川橋の外観



図-2.2 海岸線との距離

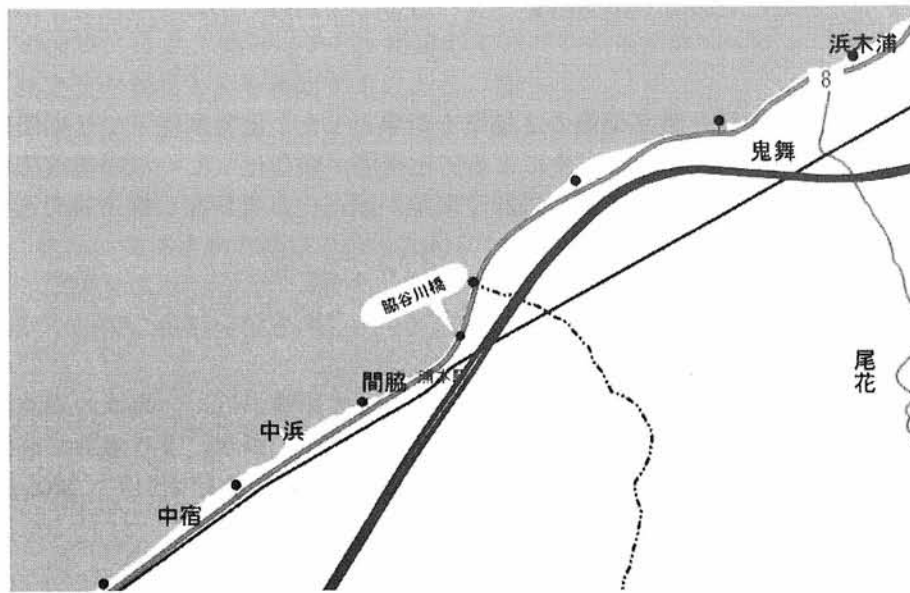


図-2.3 脇谷川橋の位置図

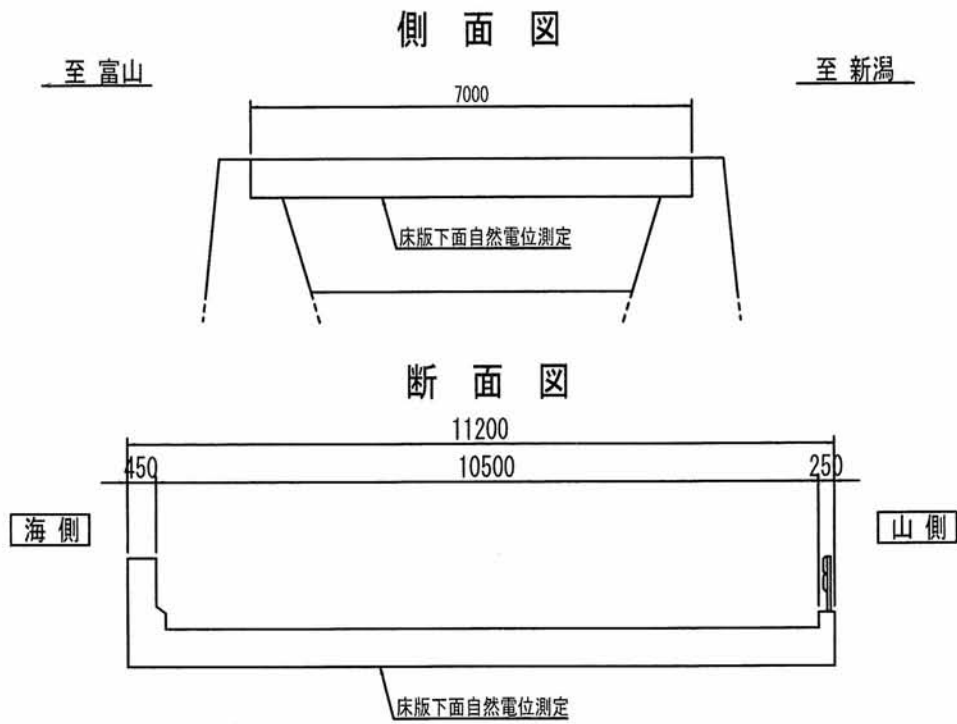


図-2.4 脇谷川橋の側面・断面図

(2) 歌高架橋(PC ポステン T 桁橋, 1975 年)

図-2.5~2.10 に, 歌高架橋の状況を示す.

歌高架橋は, 32 径間 991.6m の PC ポストテンション T 桁橋であった. 径間によっては激しい鉄筋腐食が生じており, 表面被覆後の再劣化によりかぶりコンクリートが剥離している箇所も見受けられた. 測定は, コンクリート表面に劣化損傷が現れていない富山側の第 1 径間で, 海側から 2 番目の桁で行った. 表面的な劣化がほとんど生じていない原因は, 隣接する親不知ピアパーク(1988 年開業)や高速道路が海水や海風による塩分の飛来を防いできたためと思われる.



図-2.5 測定対象径間

ニ

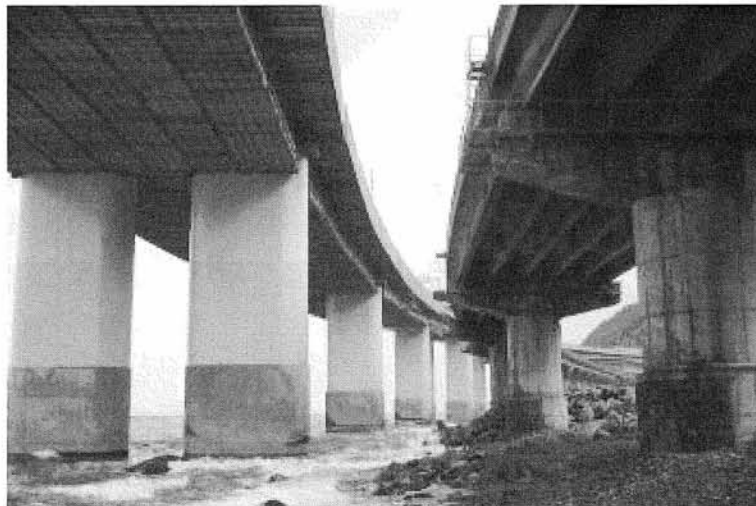


図-2.6 海に面した径間(右側)

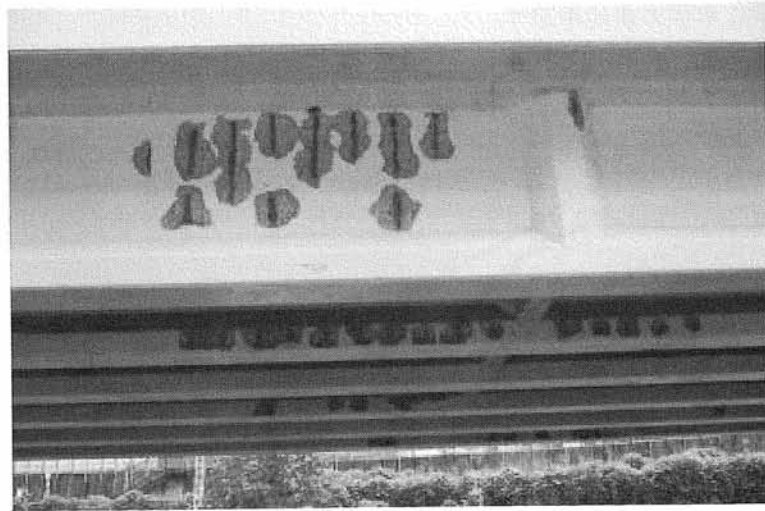


図-2.7 再劣化した径間



図-2.8 測定対象径間と隣接する施設

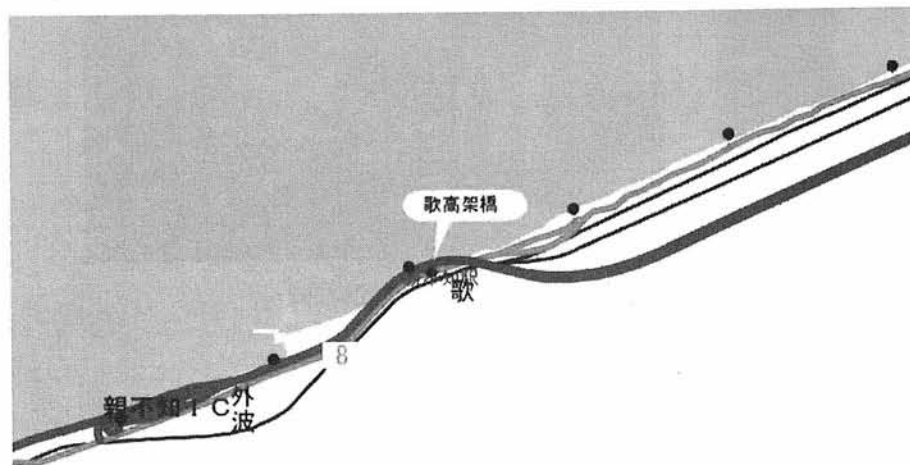
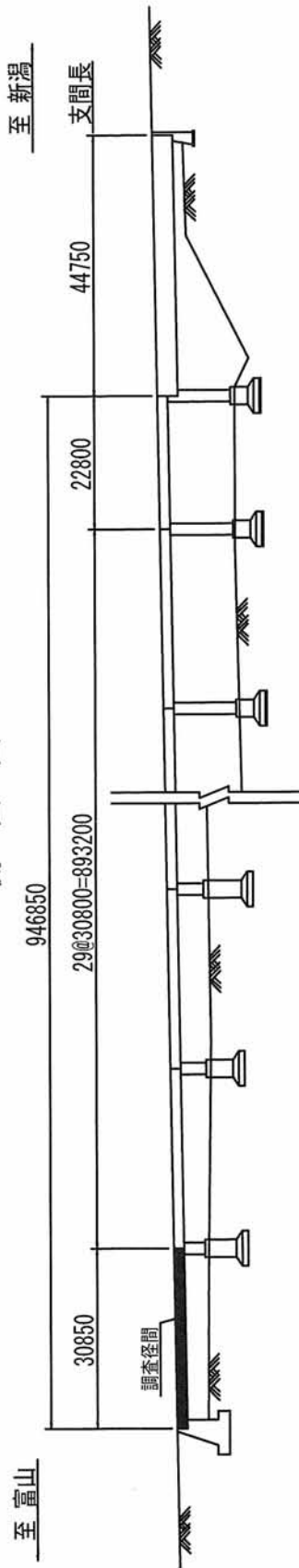
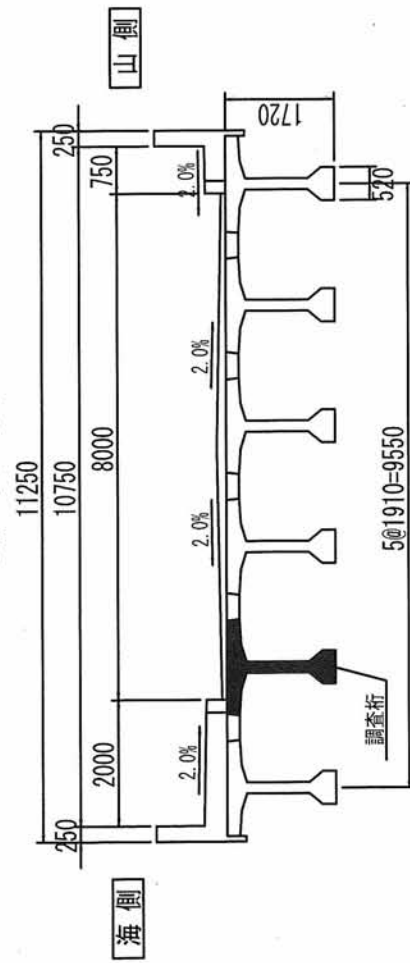


図-2.9 歌高架橋の位置図

側面図



断面図



桁断面図

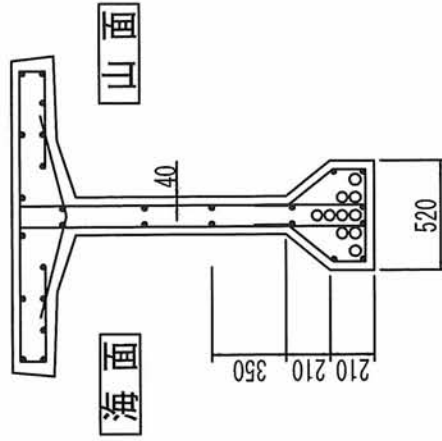


図-2.10 歌高架橋の断面・側面図

2.2 調査時期と天候

冬季の測定は、2005年12月7日に歌高架橋、8日に脇谷川橋で実施した。測定時の天候は雨であり、気温は約6℃であった。

また、夏季の測定は、2006年8月9日に脇谷川橋、10日に歌高架橋で実施した。測定時の天候は晴であり、気温は約30℃であった。

2.3 自然電位と塩化物イオン濃度の測定方法

今回の調査では、以下の手順で各橋梁の自然電位を測定し、比較的卑な自然電位を示した箇所では塩化物イオン濃度測定用の小径コア(φ25mm)を採取した。また、最も卑な自然電位を示した箇所のかぶりコンクリートをはつり、鉄筋の腐食状態の目視観察を行った。なお、自然電位の測定前にコンクリート中の鉄筋の電気的な連続性を確認するために各橋梁3ヶ所で鉄筋を露出させたため、ここでも塩化物イオン濃度測定用の小径コア(φ25mm)を採取し、鉄筋の目視観察を行った。このため、塩化物イオン濃度測定用の小径コア採取を計5ヶ所、鉄筋の腐食状態の目視観察を計4ヶ所で行った。

自然電位測定点の罫書き、はつり位置、小径コア採取位置等の概略図を付図-1, 2に示す。

(1) 測定前の目視調査

- ① 自然電位測定前に、構造物の外観を目視観察した。
- ② ひび割れ、剥離、錆汁など、外観の状態と自然電位の測定結果について考察することとした。

(2) 測定点の罫書き

- ① 測定点を鉄筋のほぼ直上とするため、配筋図と電磁波レーダ法による鉄筋探査結果を参考とした。
- ② 脇谷川橋では、縦方向と横方向に鉄筋が200mm間隔で配置されていたため、200mmの格子状に測定点を設けた(付図-1)。
- ③ 歌高架橋では、せん断補強鉄筋が300mm間隔で配筋されたため、概ねこの直上で測定を行えるように、橋軸方向には300mm間隔で測定点を設けた。また、一断面あたりでは、ウェブで4点、下フランジで5点の計9点に測定点を設けた(付図-2)。
- ④ 罫書きには、墨壺、マジック、チョークを使用して測定点をコンクリート表面に記した。

(3) 導通の確認

- ① 図-2.11に示すように、任意に選定した複数の位置で鉄筋をはつり出し、鉄筋同士の電位差を測定することにより、導通の確認を行った。
- ② 脇谷川橋、歌高架橋、それぞれ3ヶ所で鉄筋を露出させ、導通の確認を行った。
- ③ 脇谷川では、WS(海側)、WC(中央)、WM(山側)の3ヶ所、歌高架橋では、UT(富山側)、UC(中央)UN(新潟側)の3ヶ所とした(付図-1, 2)。
- ④ 導通の確認と同時に、各位置における鉄筋の腐食状態を目視で確認した。また、はつり前に塩化物イオン濃度測定用の小径コア(φ25mm)を2個ずつ採取した。

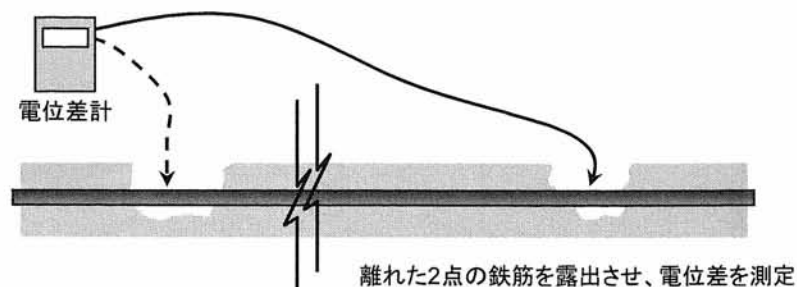


図-2.11 導通の確認方法の概略

(4) コンクリートの湿潤

- ① 散水器を用いてコンクリート表面に散水した。
- ② 湿潤時間は30分間とした。この間、コンクリート表面が乾燥する度に断続的に散水を行った。
- ③ 湿潤時間の違いによる自然電位の変化を検討するため、部分的に湿潤時間を長くする箇所を設けて測定を行った(付図-1, 2)。
- ④ 逆に、測定を終えるまでの目安となる時間を検討するため、30分間の湿潤後にコンクリート表面を乾燥させる箇所も設けて測定を行った(付図-1, 2)。

(5) 測定装置の準備と測定値の補正

- ① 測定に使用する照合電極は、飽和塩化銀電極(Nk法)、鉛電極(Nh法)、飽和硫酸銅電極(Fj法)、飽和硫酸銅電極(Db法)の4つとし、いずれも適切に保守管理がなされているものとした。
- ② 電位差計は、いずれも感量が1mV以下のものを使用した。
- ③ 照合電極の汚染を避けるため、上記の照合電極の順番で測定を行うこととした。
- ④ 測定対象面積が広いので、測定面を6面に分割し、湿潤開始時刻をずらすなどして1面ずつ6回に分けて自然電位の測定を行った(付表-1, 2)。
- ⑤ 照合電極間の測定値の差とその補正方法を検討するため、2種類の補正方法で測定結果の補正を行った。ひとつは換算式を用いる方法、もうひとつは飽和塩化カリウム水溶液中でカロメル電極との電極電位の差を測定してキャリブレーションを行う方法(第Ⅲ部で詳述)とした。

(6) 塩化物イオン濃度測定用の小径コアの採取

- ① 橋梁全体の自然電位の測定結果を参考として、卑な電位を示した位置を2ヶ所選択し、塩化物イオン濃度測定用の小径コアを2個ずつ採取した。
- ② 脇谷川橋、歌高架橋のかぶりが約40mmであったため、塩化物イオン濃度の測定は、コンクリート表面から深さ40mmまでを10mmごとにスライスし、電位差滴定法(JIS A 1154)²⁾により行った。φ25mmの小径コア1本では、電位差滴定法用の試料としては不足するため、各位置で採取した2個分の試料を混ぜて測定を行った。
- ③ 各位置で採取した小径コアにフェノールフタレイン溶液を噴霧し、中性化深さの測定も併せて実施した。

(7) 鉄筋の腐食状態の目視観察

- ① 橋梁全体の自然電位の測定結果を参考として、最も卑な電位を示した1ヶ所を選択してかぶりコンクリートをはつり、鉄筋の腐食状態を目視観察した。
- ② 導通確認を行った3ヶ所でも鉄筋の腐食状態を目視観察し、任意に選定した位置と自然電位の測定結果から選定した位置の鉄筋の腐食状態を比較した。

2.4 付着塩分量の調査と圧縮強度試験

ここでは、自然電位の測定と、その結果を参考にして実施する塩化物イオン濃度の測定と鉄筋の腐食状態の目視観察を重点的に行うことを目的としたが、簡易に実施することのできる以下の調査も併せて行うこととした。

(1) 付着塩分量調査

- ① 自然電位の測定前に、ガーゼでコンクリート表面を拭き取り、海岸から飛来して橋梁表面に付着している塩化物イオン量を測定した。
- ② ガーゼを用いた付着塩分量測定用の試料の採取方法については、鋼道路橋塗装便覧³⁾に準拠した。
- ③ この結果を自然電位や塩化物イオン濃度の測定結果と比較した。

(2) 小径コアとテストハンマーによる圧縮強度試験

- ① 小径コア採取位置において、採取前にテストハンマーによる強度推定を行った。
- ② 塩化物イオン濃度の測定用に採取した小径コアのうち、測定に用いない部分を使用して圧縮強度試験を行った。
- ③ 小径コアとテストハンマーによる圧縮強度試験から得られる結果を比較した。

3. 調査結果

3.1 目視調査の結果

(1) 脇谷川橋

付図-3 に、脇谷川橋の目視調査結果を示す。

海側と山側に橋軸方向のひび割れが確認されたが、鉄筋腐食とは無関係のものと思われた。また、錆汁は確認されなかった。

中央部では、ジャンカが多く確認され、コンクリートの品質は必ずしも良いとは言えない。

中央部(測線 V と W の間)に打ち継ぎ目が確認されたが、発生原因は明らかでない。

(2) 歌高架橋

付図-4 に、歌高架橋の目視調査結果を示す。

桁下にコンクリート表面が変色している位置が多くあった。

目立った損傷はなかったが、新潟側海面の下フランジにかぶりコンクリートの浮きによるひび割れ(0.3mm)が確認された。ただし、この部分は桁の最も端部に位置していたため、測定対象範囲には含まれていない。

錆汁等、鉄筋が腐食していると疑われるような表面の変状は、確認されなかった。

3.2 自然電位と塩化物イオン濃度、鉄筋腐食の関係

(1) 脇谷川橋

図-3.1 に、2006年夏の湿潤30分間後の飽和塩化銀電極での測定結果を示す。ここでは、塩化物イオン濃度を測定するための小径コアの採取位置と、鉄筋位置での塩化物イオン濃度の測定結果も示している。また、自然電位の測定結果は、換算式を用いて25°Cの飽和硫酸銅電極基準の電位に補正している。

なお、脇谷川橋と歌高架橋において、コンクリート・モルタル水分計による測定前のコンクリート表面の水分量は5.0~8.0%であった。

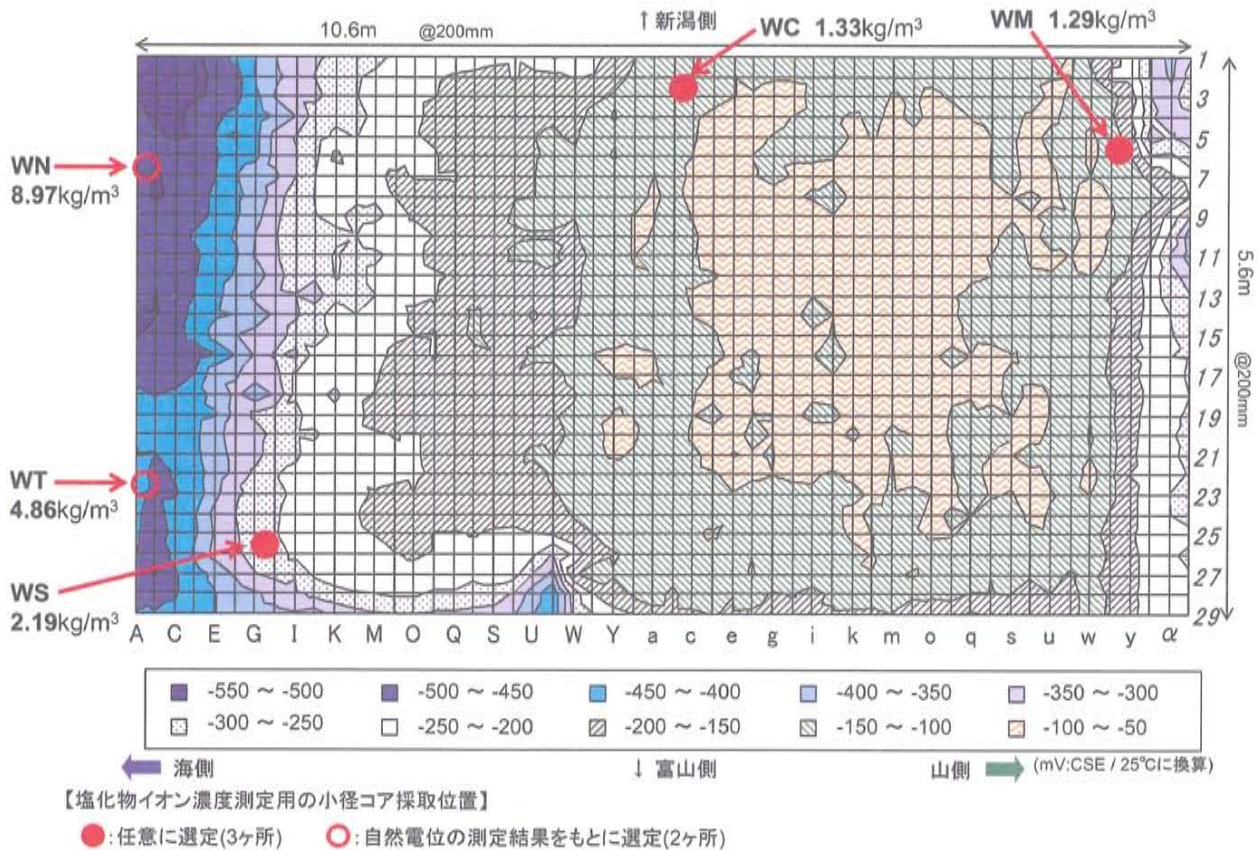


図 3-1 脇谷川橋の自然電位測定結果と鉄筋位置の塩化物イオン濃度

自然電位は、海側と山側の一部で卑な値が測定され、中央部で貴な値が測定された。特に、海側では-450mVよりも卑な電位が測定されたため、激しい腐食環境にあると考えられる。

塩化物イオン濃度の測定のため、鉄筋の導通確認のため任意に選定した3ヶ所(海側(WS)、中央(WC)、山側(WM))と、自然電位の測定結果で卑な電位を示した2ヶ所(WT(富山側)、WN(新潟側))から小径コアを採取した。この結果、卑な自然電位が測定された位置ほど、鉄筋位置の塩化物イオン濃度が高くなっていたことが確認できる。

海側は、海岸との距離が近いために塩化物イオンが多量に供給され、他と比べて厳しい腐食環境にあったため卑な電位が測定されたと考えられる。また、海側と山側など橋梁の端部では、雨水が直接橋梁に降りかかる環境にあり、中央部と比べて鉄筋腐食が生じやすい環境にあったと考えられる。

図-3.2 に、脇谷川橋の含有塩化物イオン量と中性化深さの測定結果を示す。WC, WM, WN では、外部からの塩化物イオンの侵入がフィックの拡散方程式に従うと仮定して推定した表面塩化物イオン量 C_0 と見かけの拡散係数 D_e 、初期塩化物イオン量 C_i の推定結果も示す。

どの位置でも、中性化により、中性化層よりも内部に塩化物イオン濃度が凝縮している。

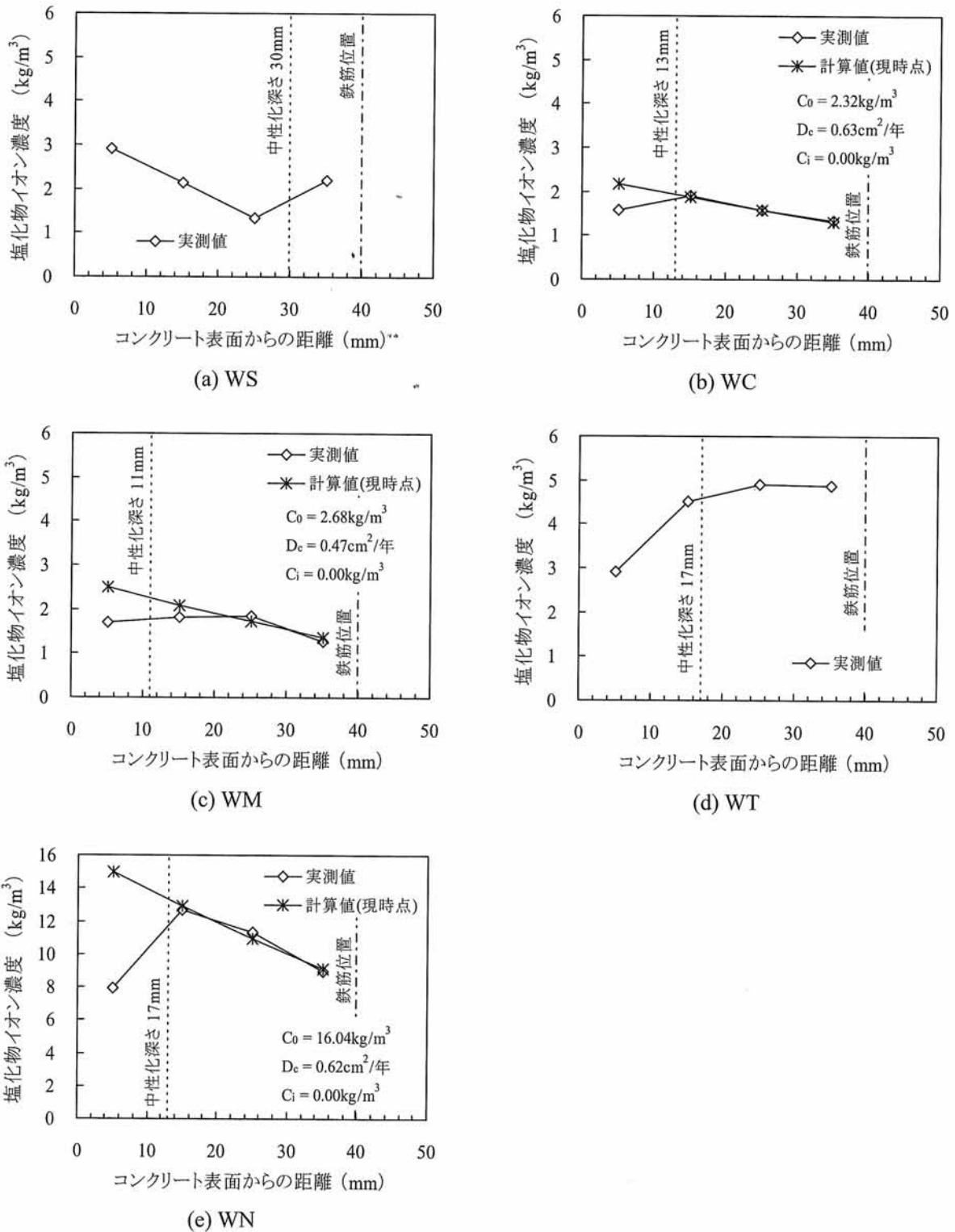
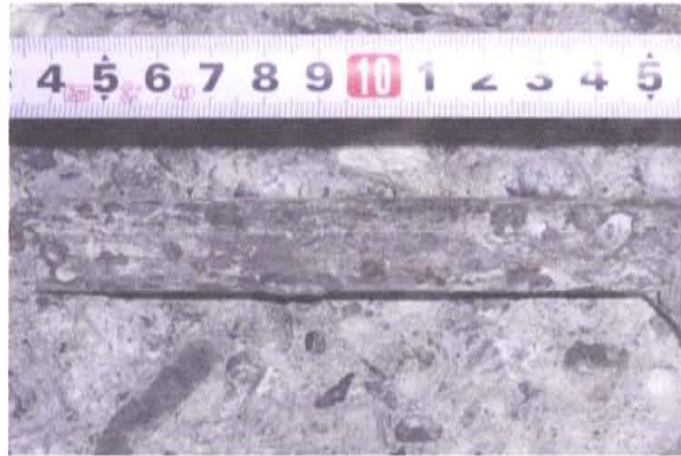


図-3.2 脇谷川橋の塩化物イオン濃度の測定結果

鉄筋の導通確認を実施した WS, WC, WM と、自然電位が最も卑な値を示した WN で、鉄筋の腐食状態を観察した。図-3.3 に、各はつり位置の鉄筋の腐食状態を示す。全てのはつり位置において腐食が確認されたが、いずれも表面的なものであり、腐食速度が速く即座に耐荷性能に悪影響を及ぼすような激しいものではなかった。



(a) WS



(b) WC



(c) WM

図-3.3 脇谷川橋の鉄筋の腐食状態(次ページへ続く)



(d) WN

図-3.3 脇谷川橋の鉄筋の腐食状態(前ページからの続き)

脇谷川橋の測定結果によると、自然電位の測定結果を参考にすることで、鉄筋位置の塩化物イオン濃度が高く、腐食が進んでいると疑われる位置を塩化物イオン濃度測定用の試料採取位置として選定することができたと考えられる。特に、自然電位が -350mV よりも卑な値を示したWTとWNでは、鉄筋位置の塩化物イオン濃度が 2.5kg/m^3 よりも大きくなっていった。

しかし、実際に鉄筋の腐食状態を目視観察すると、全てのはつり位置で同程度のごく表面的な腐食が生じていただけで、自然電位が卑な位置ほど激しい腐食が生じているといったことは確認できなかった。この原因は、自然電位の測定値が、あくまでも鉄筋の置かれた環境が腐食環境にあるか否かを示す指標であり、鉄筋腐食の程度や速度までを示すものではないことを反映したためとみられる。すなわち、WTやWNで測定された卑な自然電位は、この周辺の鉄筋位置に高濃度の塩化物イオンが浸透し厳しい腐食環境になっていたことを反映したものであり、必ずしもWTやWN周辺の鉄筋の腐食速度が速く著しい腐食が生じているといったことを示したものではないと考えられる。

一方、WC周辺では $-50\sim-150\text{mV}$ 、WS周辺とWM周辺では $-150\sim-350\text{mV}$ の自然電位が測定され、ASTM C 876⁴⁾の判定基準に従えば、これらの位置で腐食が生じていると判定される可能性は低い。しかし、WC、WS、WMの鉄筋位置の塩化物イオン濃度は腐食発生限界塩化物イオン濃度とされる $1.2\sim 2.5\text{kg/m}^3$ の間にあり、鉄筋表面には軽微な腐食が生じていた。これは、WS、WC、WM周辺では、ある程度の塩化物イオン濃度が鉄筋位置まで浸透し、鉄筋には軽微な腐食が生じていたものの、これらの鉄筋が激しい腐食環境にはなかったことが原因と考えられる。

また、WMの自然電位は、WMとWCの塩化物イオン濃度の差がほぼ同程度にも関わらず、WCよりも卑な値を示した。これは、WMが、WCと比較して雨水等により水分が供給されやすく、腐食が生じやすい環境にあったことを反映したためと考えられる。

(2) 歌高架橋

図-3.4 に、2006年夏の湿潤30分間後の飽和塩化銀電極での測定結果を示す。ここでも、塩化物イオン濃度を測定するための小径コアの採取位置と、鉄筋位置での塩化物イオン濃度の測定結果も示している。なお、自然電位の測定結果は、換算式を用いて25°Cの飽和硫酸銅電極基準の電位に補正している。

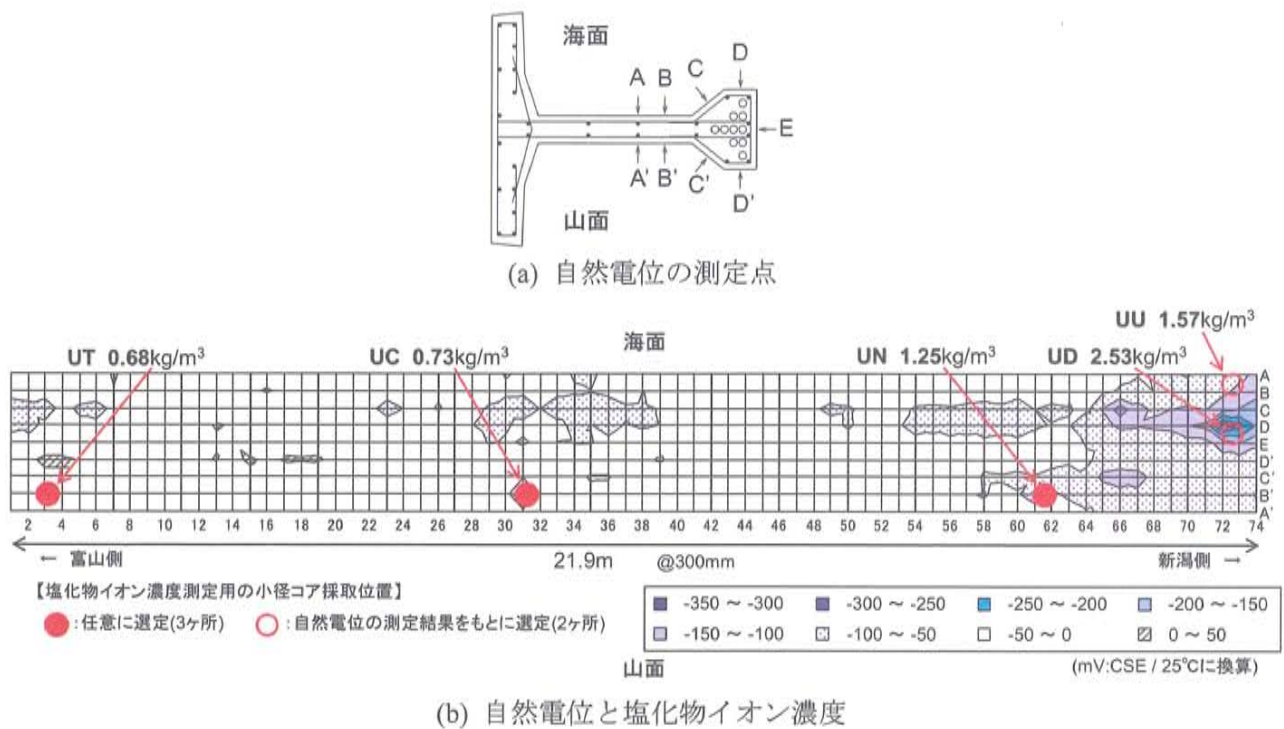


図-3.4 歌高架橋の自然電位測定結果と鉄筋位置の塩化物イオン濃度

自然電位は、新潟側の海面の下フランジ(UD)で約-320mV となり、局所的に卑な電位が測定された。これ以外は全て-250mV よりも貴な電位が測定された。この卑な電位を示した新潟側海面の下フランジは、目視調査で図-3.5 に示すかぶりコンクリートの浮きが確認された箇所に隣接する位置であり、鉄筋腐食の生じている可能性が高いと推察された。

自然電位の測定結果を踏まえ、最も卑な自然電位を示した富山側の海面の下フランジ(UD)と、この上部のウェブ(UU)において、塩化物イオン濃度測定用の小径コアを採取した。自然電位と鉄筋位置の塩化物イオン濃度の測定結果を比較すると、最も卑な自然電位が測定された UD では 2.53kg/m³ と最大の塩化物イオン濃度が測定された。脇谷川橋と同様に、歌高架橋でも自然電位が卑な位置ほど鉄筋位置の塩化物イオン濃度が大きい傾向にあることを確認することができた。



図-3.5 富山側海面の下フランジの浮き

図-3.6に、歌高架橋の含有塩化物イオン量と中性化深さの測定結果を示す。UT, UC, UNでは、外部からの塩化物イオンの侵入がフィックの拡散方程式に従うと仮定して推定した表面塩化物イオン量 C_0 と見かけの拡散係数 D_c 、初期塩化物イオン量 C_i の推定結果も示す。なお、ここでは、表面からの距離方向の塩化物イオン濃度の差が小さいため、見かけの拡散係数の信頼性はそれほど高くない。

山面(UT, UC, UN)ではコンクリート内部ほど塩化物イオン濃度は小さくなっているが、海面(UD, UU)ではで中性化層よりも内部に塩化物イオンが凝縮されていることがわかる。

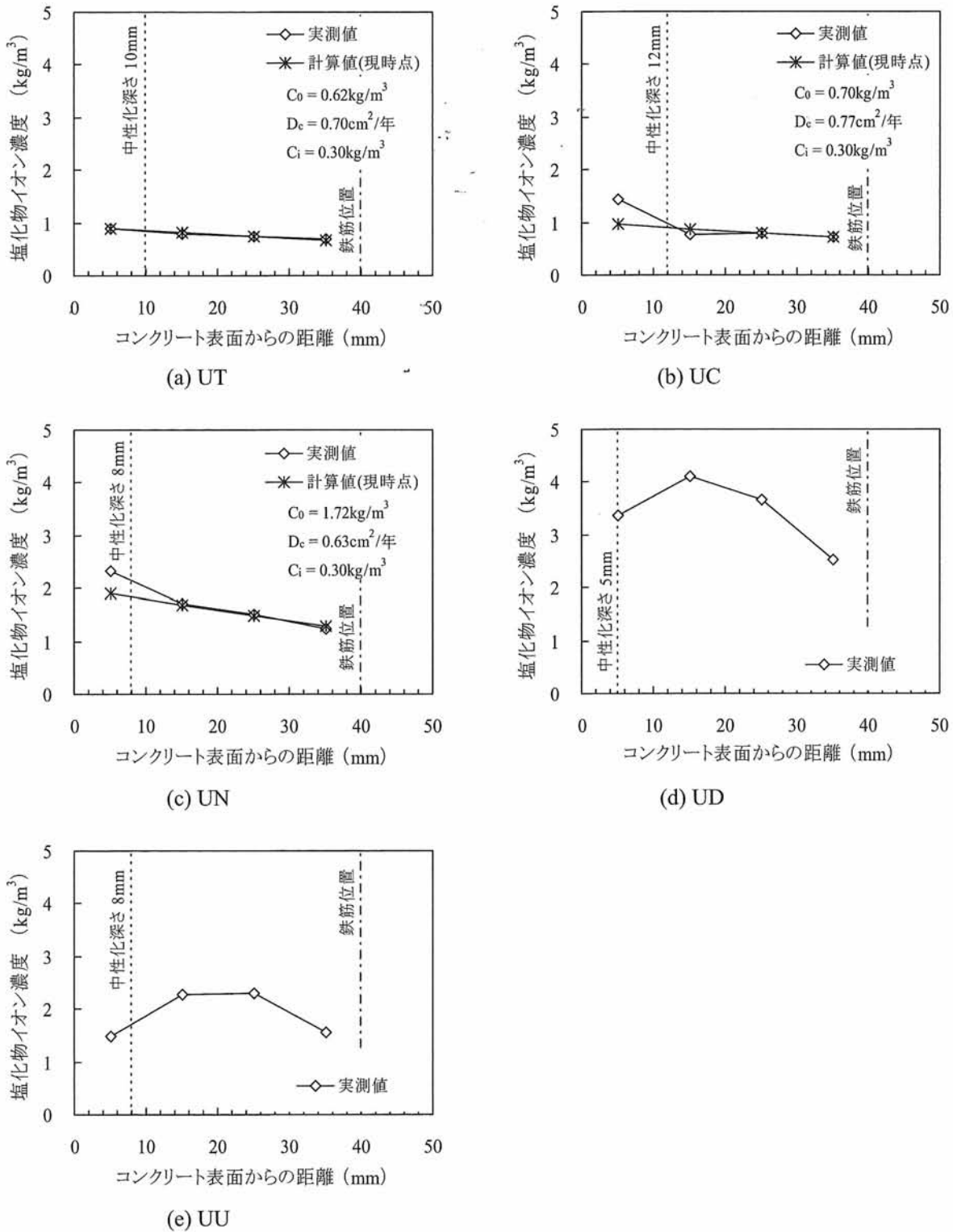


図-3.6 歌高架橋の塩化物イオン濃度の測定結果

鉄筋の導通確認を実施した UT, UC, UN と、自然電位が最も卑な値を示した UD で、鉄筋の腐食状態を観察した。図-3.7 に、各はつり位置の鉄筋の腐食状態を示す。

UT, UC, UN では鉄筋腐食は生じていなかった。一方で、自然電位が約-320mV と最も卑な値を示し、鉄筋位置の塩化物イオン濃度も 2.53kg/m^3 と最も大きい UD では鉄筋腐食が生じていた。

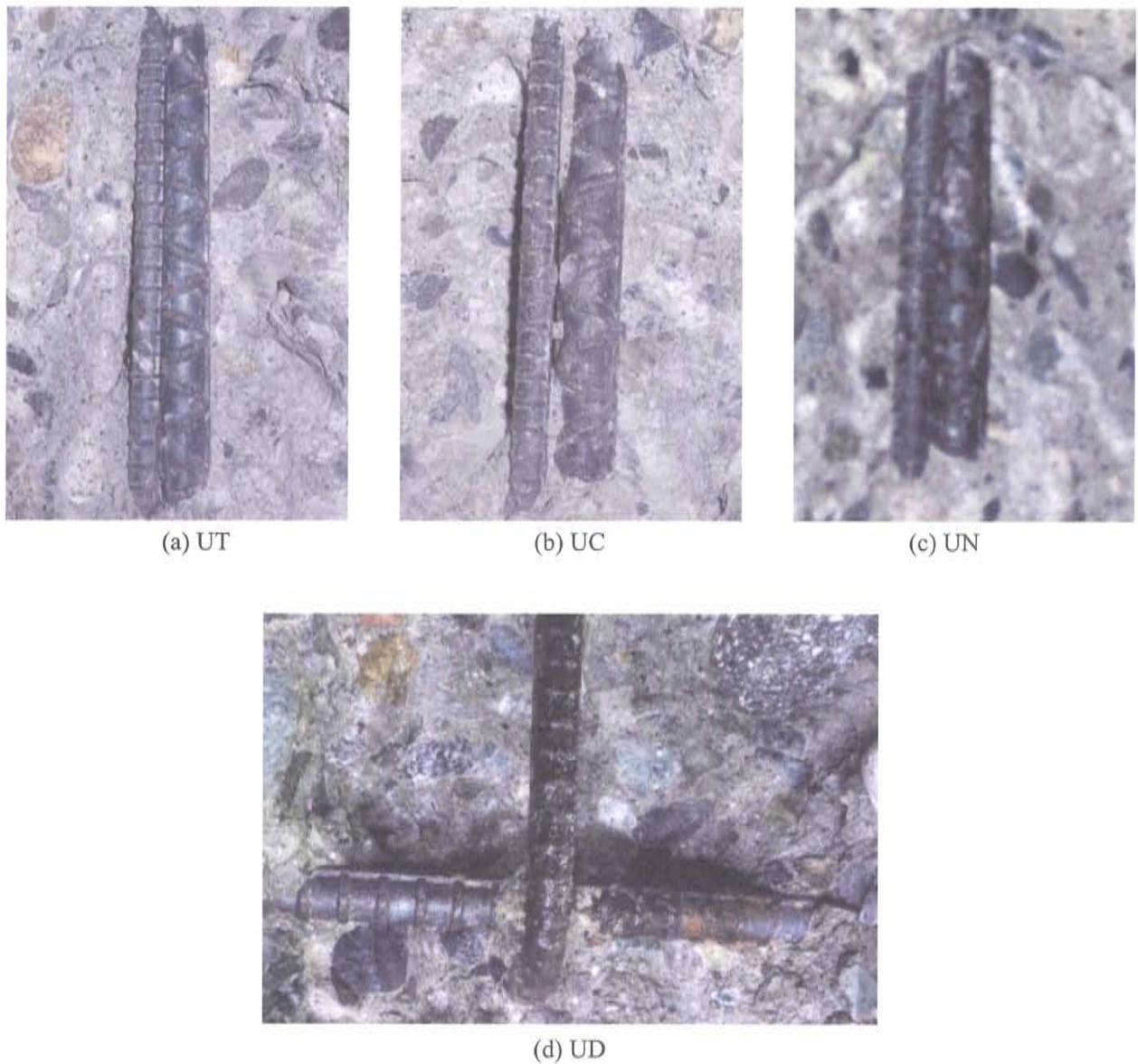


図-3.7 歌高架橋の鉄筋の腐食状態

歌高架橋の測定結果では、自然電位の測定結果を参考にすることで、鉄筋位置の塩化物イオン濃度が最も大きく、鉄筋腐食の生じている位置を特定することができたと考えられる。しかしながら、鉄筋腐食の生じていた UD 周辺の自然電位は約-320mV であり、ASTM C 876 の腐食判定基準では「不確定」と判定される。この原因は、UD 周辺の腐食部がアノード部となってマクロセル腐食を形成していたため、本来は卑な自然電位が分極の影響を受けて貴な値となったためと考えられる。このため、図-3.4 のように等電位線図を用いて自然電位の分布傾向を可視化することで、局所的に卑な自然電位を示した位置を抽出し、鉄筋腐食を発見することが可能であった。

一方、自然電位が-250mV よりも貴な値を示した位置では、鉄筋腐食は生じていなかった。UN では、鉄筋位置の塩化物イオン濃度が 1.2kg/m^3 以上であったが、自然電位の測定値は-250mV よりも貴であり、

目視観察でも鉄筋腐食が生じていないことを確認した。鉄筋位置の塩化物イオン濃度が 1.2kg/m^3 以上であっても、鉄筋が腐食状態になく腐食が生じていない場合には、自然電位は比較的貴な電位を示すと考えられる。

図-3.8 に、鉄筋位置の塩化物イオン濃度と、試料採取位置における自然電位の関係を示す。これまでに記した通り、両橋梁において、自然電位が卑になるほど、鉄筋位置の塩化物イオン濃度が高くなることが確認できる。

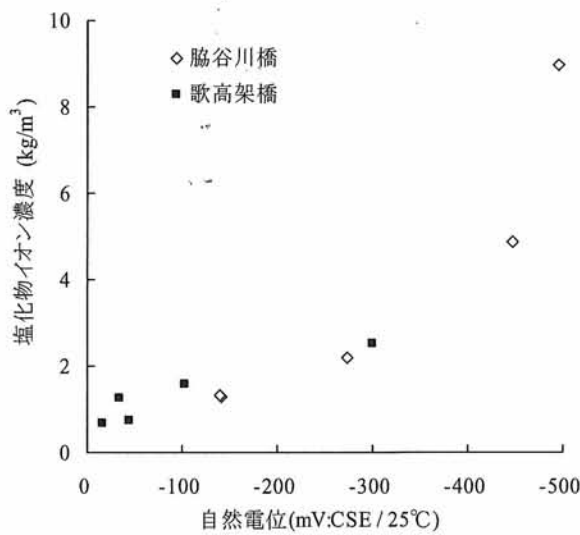
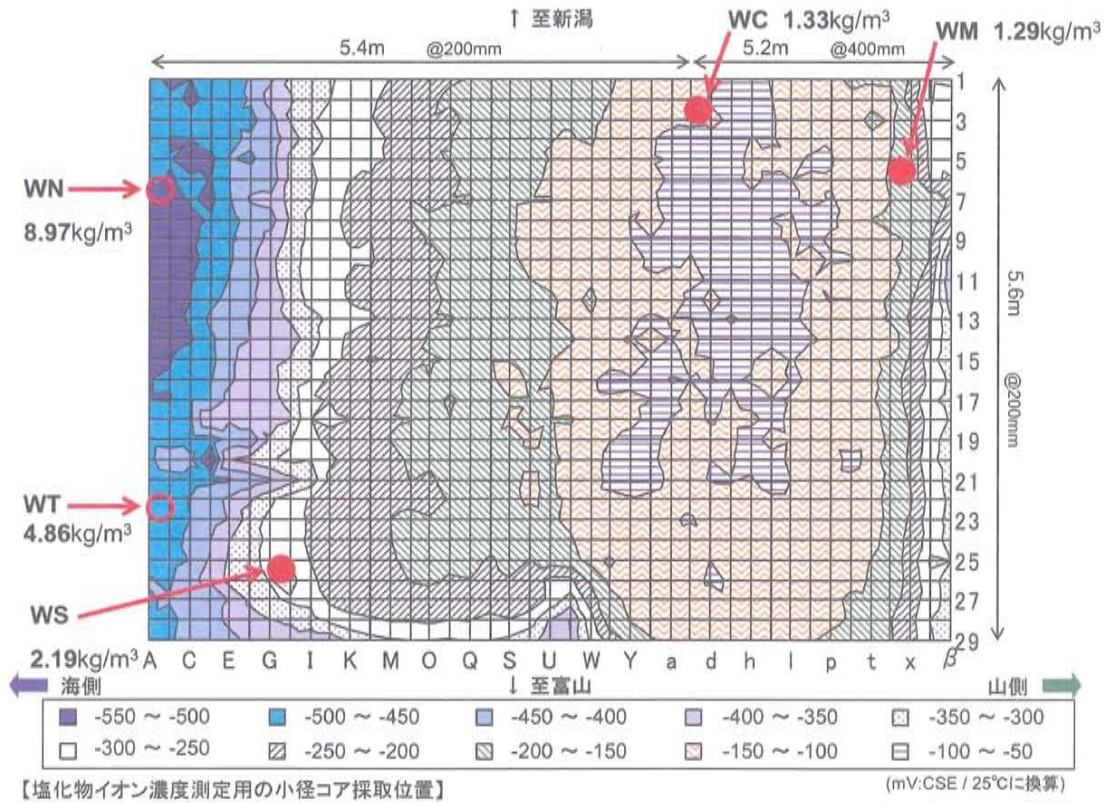


図-3.8 自然電位と塩化物イオン濃度の関係

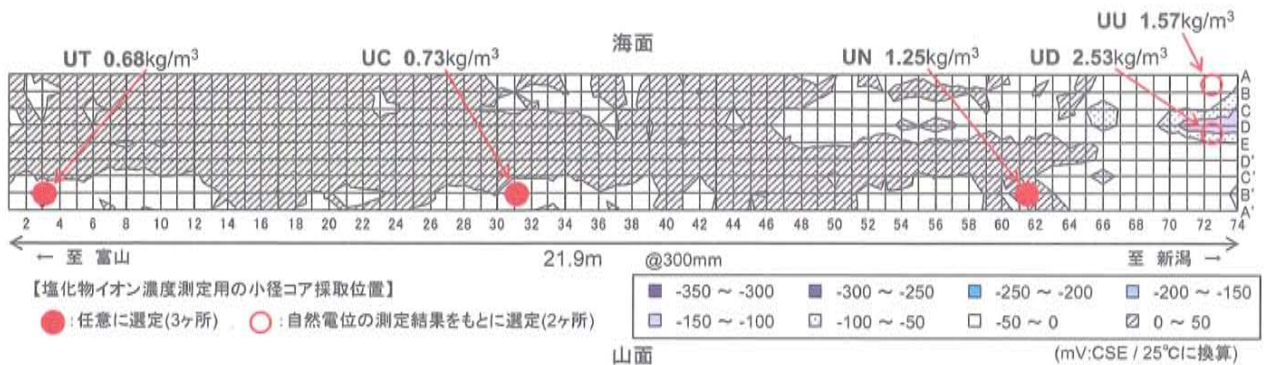
3.3 測定時の気象条件が自然電位に与える影響

測定時の季節により気温や湿度も異なるため、鉄筋の置かれる腐食環境も変化し、自然電位の測定結果にも影響が生じると考えられる。そこで、冬季と夏季の測定結果を比較することにより、測定時の気象条件が自然電位の測定結果に及ぼす影響を検討する。

図-3.9に、各橋梁の冬季の自然電位の測定値を示す。ここでも、換算式を用いて25°Cの飽和硫酸銅電極の電位に換算している。脇谷川橋では海側で卑な電位が測定され、歌高架橋では新潟側の海面の一部で卑な電位が測定されている。図-3.1, 3.4と比較すると、卑な電位が測定された位置は冬季と夏季で等しく、測定時の季節に関わらず、ほぼ同様の傾向の測定結果が得られている。しかし、全体的に、夏季よりも冬季の方が貴な電位が測定されていることがわかる。



(a) 脇谷川橋



(b) 歌高架橋

図-3.9 冬季の自然電位測定結果

冬季と夏季の測定値の違いを詳細に比較するため、図-3.10 に各橋梁の自然電位の測定値を測線ごとに示す。ここでは、湿潤時間 30 分後の飽和塩化銀電極での測定結果のうち、最も卑な自然電位が測定されはつり調査を実施した箇所を含む測線の測定値を示す。脇谷川橋では測線 7，歌高架橋では測線 D とした。なお、これ以降のグラフでは、参考のため ASTM C 876 の腐食判定基準も併記する。

冬季と夏季の測定結果を比較すると、どちらの橋梁も電位の分布傾向は季節に関わらずほぼ同様であるが、夏季の方が卑な電位を示していることがわかる。また、橋梁全体での平均値を比較すると、脇谷川橋では 42mV，歌高架橋では 38mV，すなわち平均で約 40mV ほど自然電位が卑になっていた。

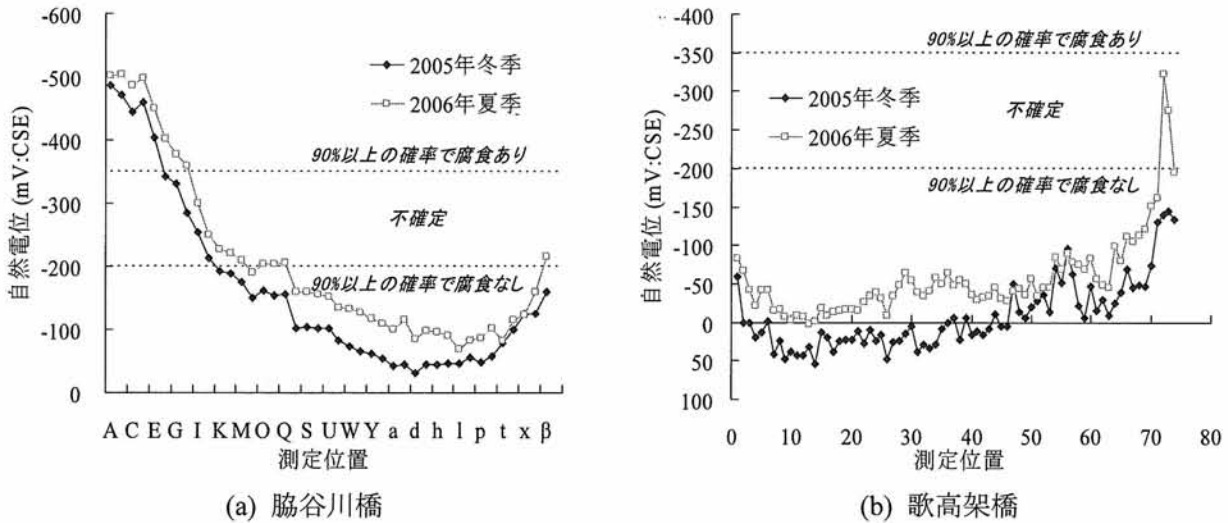


図-3.10 冬季と夏季の自然電位の違い

図-3.11 に、各橋梁の冬季と夏季の測定結果を累積頻度図で整理して比較する。累積頻度は、各自然電位測定値の測定点数を電位の貴なものから順に累積し、全体に占める割合を算出することで自然電位の分布状態を示すものである。これによると、どちらの橋梁も、夏季の方が冬季と比べて卑な自然電位の割合が大きいことがわかる。

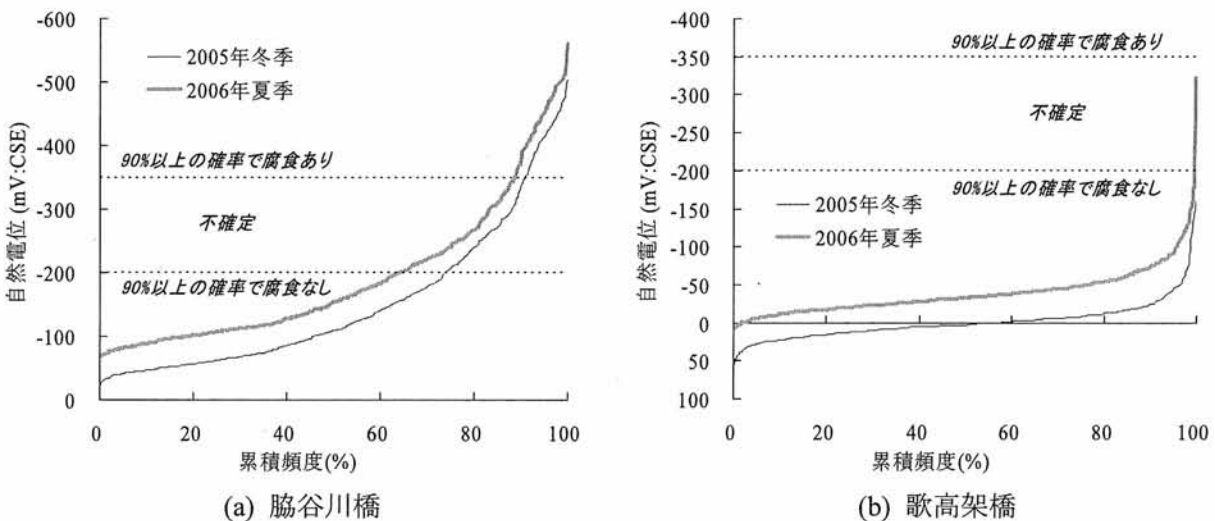


図-3.11 冬季と夏季の累積頻度図の比較

図-3.12 に、夏季の自然電位の測定値と冬季と夏季の自然電位の差を示す。どちらも冬季と夏季の自然電位の差と夏季の自然電位の R^2 値は小さく、これらに相関関係があるとは考えにくい。このため、冬季と夏季では、測定される自然電位の大小や鉄筋の腐食傾向に関わらず、全体的に測定値が変化したと考えられる。

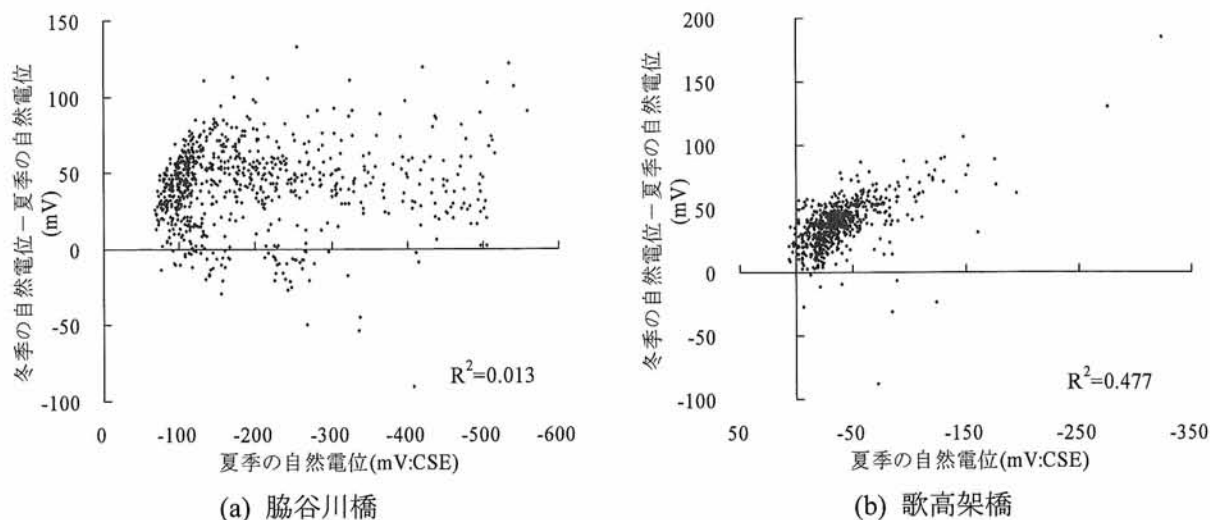


図-3.12 夏季の自然電位と冬季と夏季の差

図-3.13 に、冬季と夏季の自然電位の関係を示す。冬季と夏季の測定値は相関関係にあり、夏季の方が冬季と比較して全体的に約 40mV ほど卑化したことがわかる。

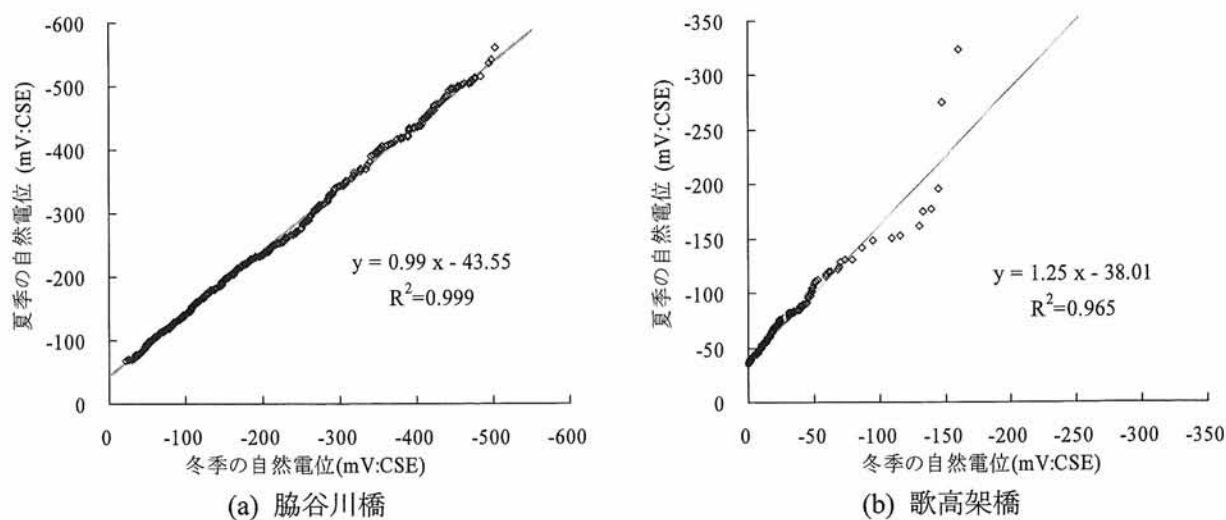


図-3.13 冬季と夏季の自然電位の関係

3.4 湿潤時間の違いによる自然電位の変化

過去の供試体の測定結果⁵⁾では、30分程度の湿潤時間で自然電位の値が概ね落ち着く傾向にあることが報告されている。また、こうしたことを踏まえ、土木学会規準では自然電位測定前のコンクリートの湿潤時間を30分以上確保するよう定めている。しかし、排水処理が適切になされている構造物などではコンクリートが極めて乾燥した状態にあるため、測定値が安定するまでに湿潤時間を長く設けることが必要な場合もあると考えられる。また、コンクリートの湿潤開始後から測定を終えるべき目安となる時間についても検討を加えておくことが必要と思われる。

ここでは、各橋梁の湿潤時間を30分以上とした場合の自然電位の変化と、逆に30分の湿潤後に乾燥させた場合の自然電位の変化から、湿潤時間と測定終了の目安となる時間を検討する。

図-3.14に、脇谷川橋の湿潤開始後30分、60分、90分、210分の4回、歌高架橋の湿潤開始後30分、60分、90分、180分の4回の測定結果を示す。脇谷川橋では測線6、歌高架橋では測線Dについて、飽和硫酸銅電極を用いた夏季の測定値を示す。

湿潤時間を長くするに伴って測定値は徐々に卑に変化し、最終的には両橋梁とも約50mVほど電位が卑となった。また、この傾向は、電位が概ね-200mVよりも貴な値が測定される位置で顕著であった。

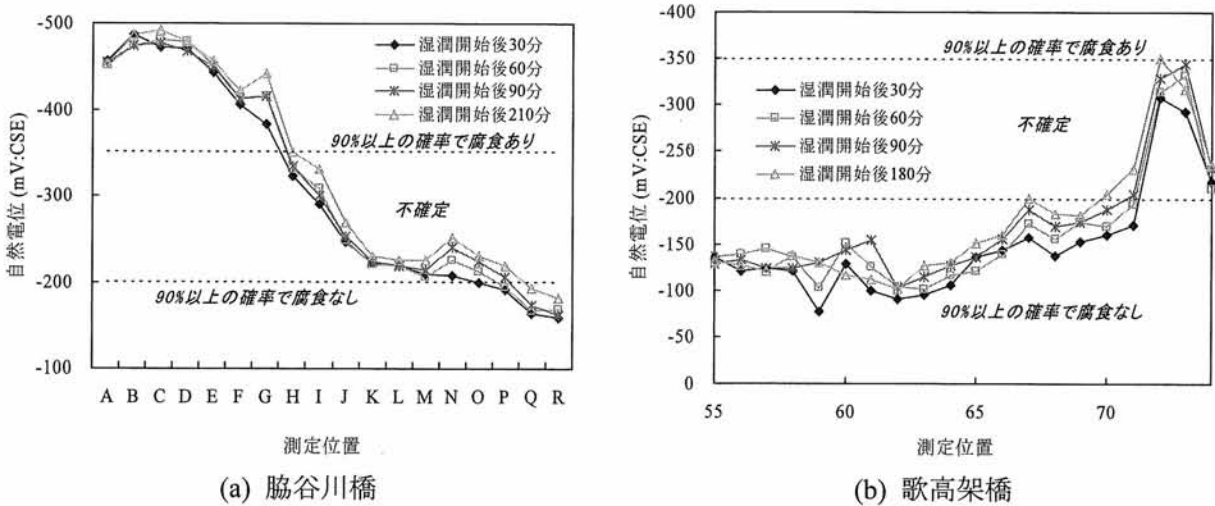


図-3.14 湿潤時間を長く設けた場合の自然電位の変化

次に図-3.15 に、脇谷川橋の湿潤開始後 30 分、湿潤終了後 30 分、60 分、180 分の 4 回、歌高架橋の湿潤開始後 30 分、湿潤終了後 30 分、60 分、120 分の 4 回の測定結果を示す。脇谷川橋では測線 13、歌高架橋では測線 C について、硫酸銅電極の夏季の測定値を示す。

脇谷川橋では、電位が概ね-400mV よりも卑な箇所では湿潤終了後の乾燥時間を長くしても電位はほとんど変化しなかったが、これ以外の箇所では、乾燥時間を長くすると電位が貴に変化する位置が多く、平均で約 30mV ほど貴となった。ただし、乾燥後の自然電位は、湿潤終了後 30 分で概ね安定し、乾燥後 180 分が経過してもほとんど変化しなかった。一方、歌高架橋では、乾燥時間の違いにより測定値に約 50mV の変動が生じた。

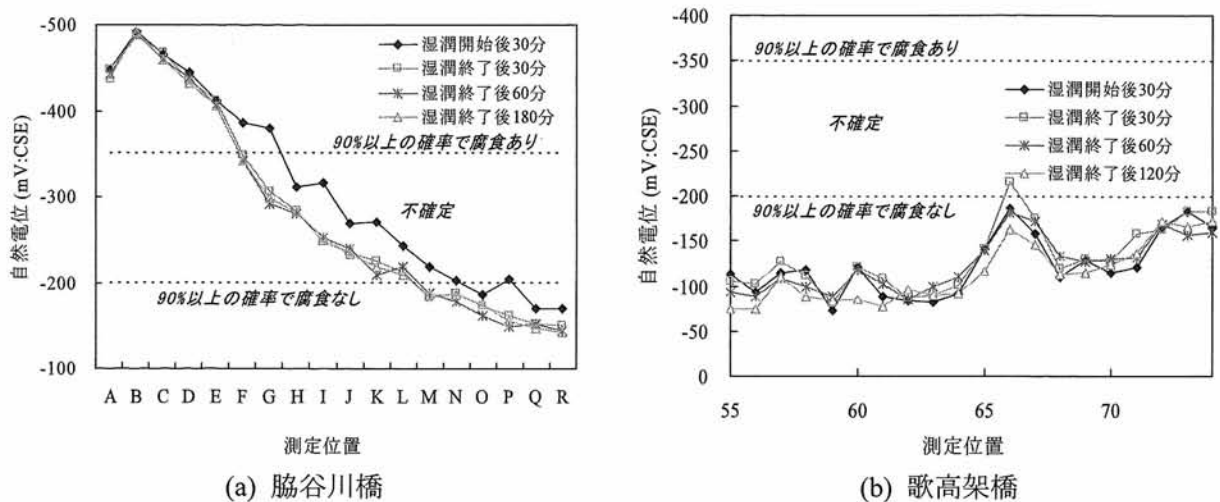


図-3.15 30 分間の湿潤後に乾燥させた場合の自然電位の変化

コンクリートの湿潤時間を長くすると、自然電位の比較的貴な箇所を中心として、測定値が平均で約 50mV ほど卑に変化した。一方、湿潤後の乾燥時間を長くすると、こちらも自然電位の比較的貴な箇所では、最大で 100mV ほど自然電位の測定値が変動した。このため、湿潤時間ならびに湿潤後の乾燥時間を長くすると、測定値の変動が大きくなると考えられる。また、湿潤時間を長くした場合よりも湿潤後の乾燥時間を長くした場合の測定値の変動が大きいことから、自然電位の測定を開始した後もコンクリート表面に断続的に散水し、湿潤状態を保つことが必要である。

また、湿潤時間の違いにより測定値が変化したが、全体的な自然電位の分布傾向としては湿潤時間や乾燥時間を変化させても概ね等しい結果が得られていることから、ここでの測定値の変動は、鉄筋腐食の発生位置を特定する際に支障となるようなものではないと言える。

以上のことを踏まえると、実構造物の自然電位を測定する際のコンクリートの湿潤時間としては 30 分間を確保すれば良いと考えられる。また、30 分間の湿潤後に自然電位の測定を開始した後は、コンクリート表面を乾燥させないために断続的に散水することが必要であるが、無用に湿潤時間を長くすることも避けなければならない。このためには、事前に測定範囲を分割して、湿潤開始時刻をずらすなどの対策を行うことも有効である。

3.5 導通の確認方法

導通の確認は、はつり出した鉄筋にリード線を接続し、鉄筋間の電位差を測定することにより行った。また、導通があることを確認した上で、異なる位置の鉄筋に接続したリード線を自然電位の測定に利用した場合の測定結果への影響も検討した。

鉄筋の導通確認の方法については、各規準により様々な方法が提案されている。ASTM C 876 では、導通確認の必要性を指摘しているが、離れた位置の鉄筋の抵抗を測定することを指摘しているのみで具体的な数値は示していない。英国 Concrete Society の文献⁶⁾では抵抗が 1Ω 以下、英国 TRRL の文献⁷⁾では電位差が 20mV 以下もしくは抵抗が 1Ω 以下であれば、鉄筋の導通がとれているとしている。土木学会の電気化学的防食工法 設計施工指針(案)⁸⁾では、直流電圧計により各鋼材間の電位差を測定し、電位差が 1mV 程度以下であれば電氣的導通は確保されているとしている。また、測定結果が 1mV を上回った場合には、交流抵抗計により測定を行い測定結果が 0Ω 程度で安定していれば導通が確保されていると判断してよいとしている。

図-3.16 に、導通確認のために測定した電位差をリード線接続位置ごとに示す。脇谷川橋では、WS と WC の間の電位差が 0.2mV と低いため導通を確認できたが、WM との間の電位差が 4mV と大きく導通がとれていない可能性があった。このため、WM は自然電位の測定には用いず、WS と WC を用いて自然電位の測定を行うこととした。一方、歌高架橋では、異なる位置の鉄筋間の電位差が極めて小さく、3ヶ所とも導通がとれていたと考えられる。

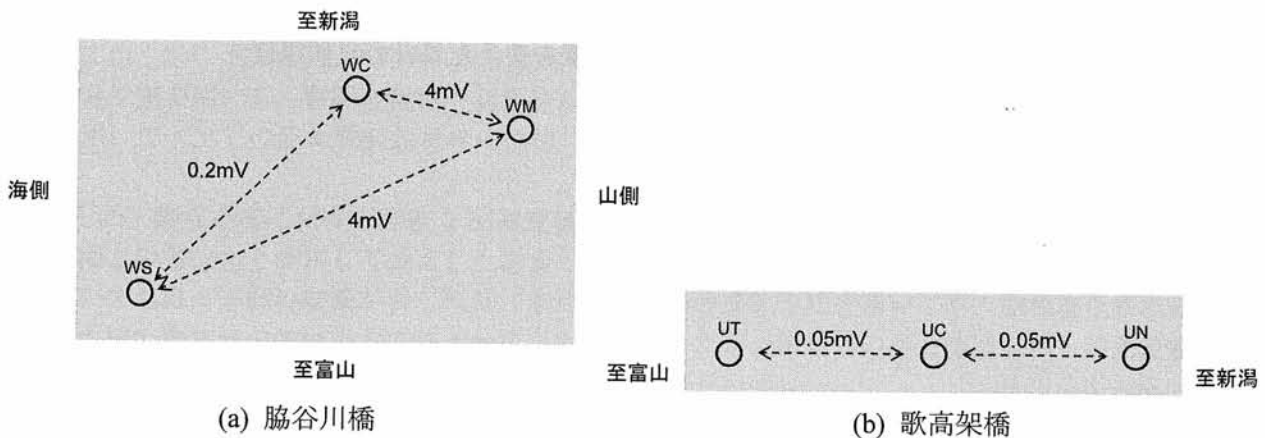


図-3.16 導通の確認結果

図-3.17 に、リード線の接続位置を変えた場合の自然電位の測定結果を示す。接続位置を変えても自然電位の差は約 20mV 以内に収まっており、鉄筋の導通がとれている場合には、どの位置の鉄筋を用いても測定結果にはほとんど影響がないと考えられる。

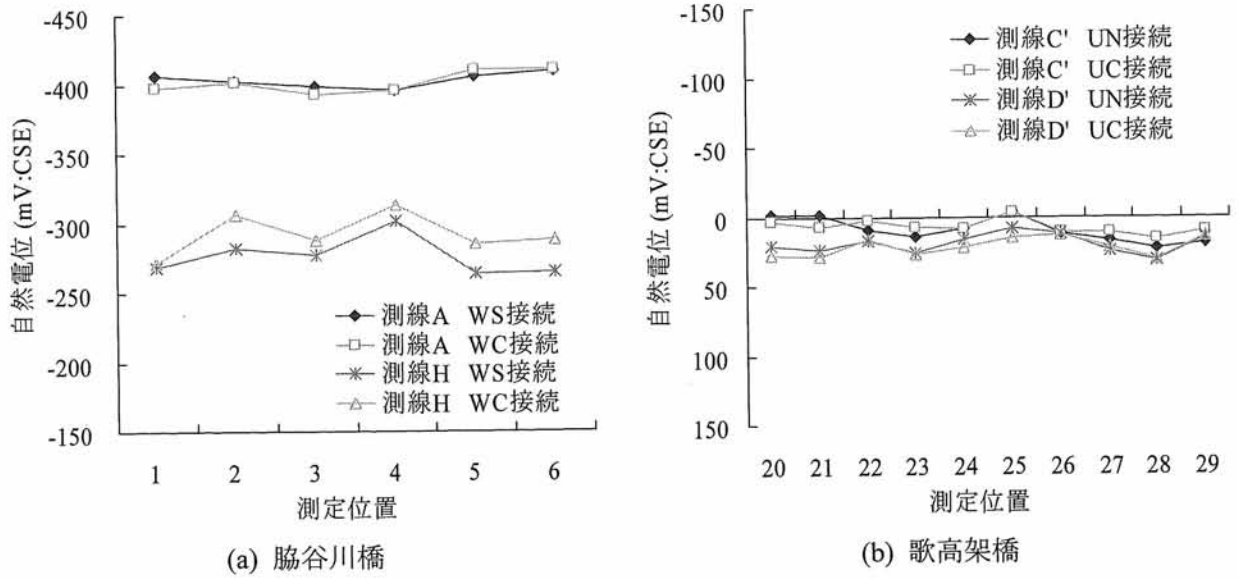


図-3.17 リード線を接続する位置を変えた場合の自然電位

3.6 測定値の補正方法

実構造物の測定において、異なる種類の照合電極を使用した場合の測定値の補正方法を検討するため、飽和塩化銀電極(Nk法)、鉛電極(Nb法)、飽和硫酸銅電極(Fj法)の3種類の照合電極による測定結果を比較する。各照合電極の詳細は、第Ⅲ部を参照されたい。補正方法としては、25℃の飽和硫酸銅電極の電位に換算する以下の2つの方法を検討することとした。なお、ここで着目する測定値の差とは、異なる種類の照合電極を使用して同一の構造物を測定した際に生じる測定値の差を意味するものである。

(1) 表-3.1の土木学会規準による換算式を用いる方法

表-3.1 照合電極の種類と照合電極電位

照合電極の種類	自然電位 E (mV:CSE) 25℃ 飽和硫酸銅電極換算
飽和硫酸銅電極	$0+0.9 \times (t-25)$
飽和カロメル電極	$-74-0.66 \times (t-25)$
飽和塩化銀電極	$-120-1.1 \times (t-25)$
鉛電極	$-799+0.24 \times (t-25)$

t: 測定時の気温(℃)

(2) 飽和塩化カリウム水溶液中で飽和カロメル電極との電位差を測定し、この電位差を用いてキャリブレーションを行う方法

具体的には、まず、飽和塩化カリウム水溶液内で、飽和カロメル電極と各照合電極の電位差を測定し、得られた電位差を用いて、各照合電極の測定値を飽和カロメル電極の電位に換算する。次に、表-3.1の補正式を用いて、25℃の飽和硫酸銅電極の電位に換算する。詳細については、第Ⅲ部を参照されたい。

図-3.18に、脇谷川橋における測線7の測定値の補正結果を示す。換算式で補正した場合と、飽和カロメル電極との電位差を測定して補正した場合の結果には、ほとんど差が無く、ここではどちらの補正方法を用いてもほぼ同様の結果が得られた。また、どちらの補正方法を用いても、飽和塩化銀電極と飽和硫酸銅電極の測定値の差は平均で約10mV以内に収まったが、鉛電極の測定値はこれらの測定値よりも平均で約150mVほど卑な値を示した。

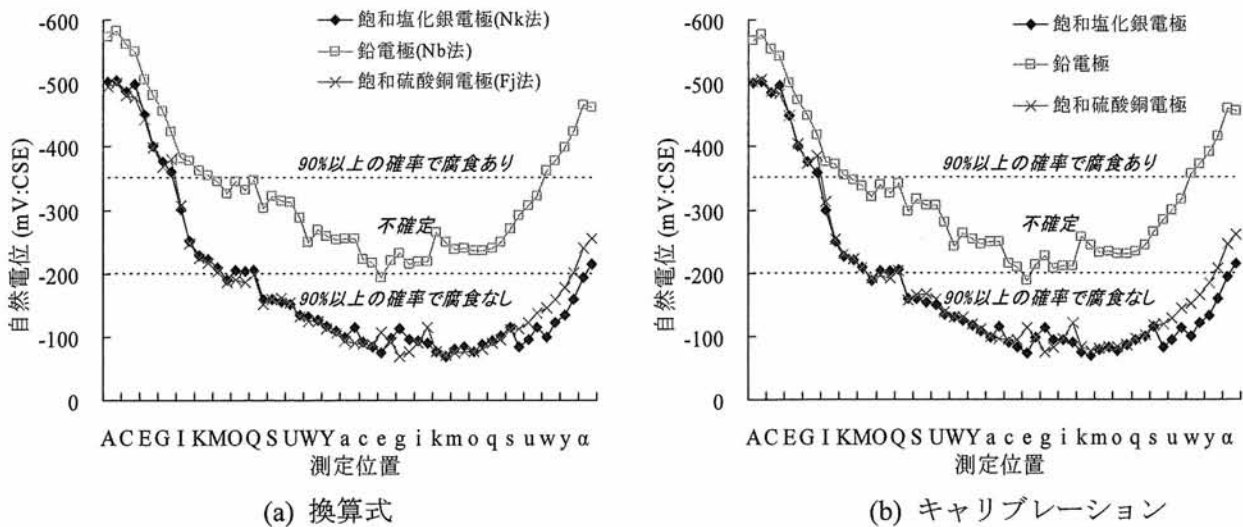


図-3.18 複数の照合電極を用いた場合の自然電位(脇谷川橋)

図-3.19 に、歌高架橋における測線 D の測定値の補正結果を示す。飽和塩化銀電極と鉛電極の測定結果は補正方法に関わらずほぼ同様の結果を示したが、飽和硫酸銅の測定結果は換算式で補正した方が約 20mV 貴な値となった。このため、換算式を用いた場合では、飽和硫酸銅電極の測定値は飽和塩化銀電極の測定値に近く、飽和カロメル電極との電位差を測定してキャリブレーションを行った場合では、飽和硫酸銅電極の測定値は鉛電極の測定値に近くなった。結果として、各照合電極間の測定値の差は平均で約 50mV であった。

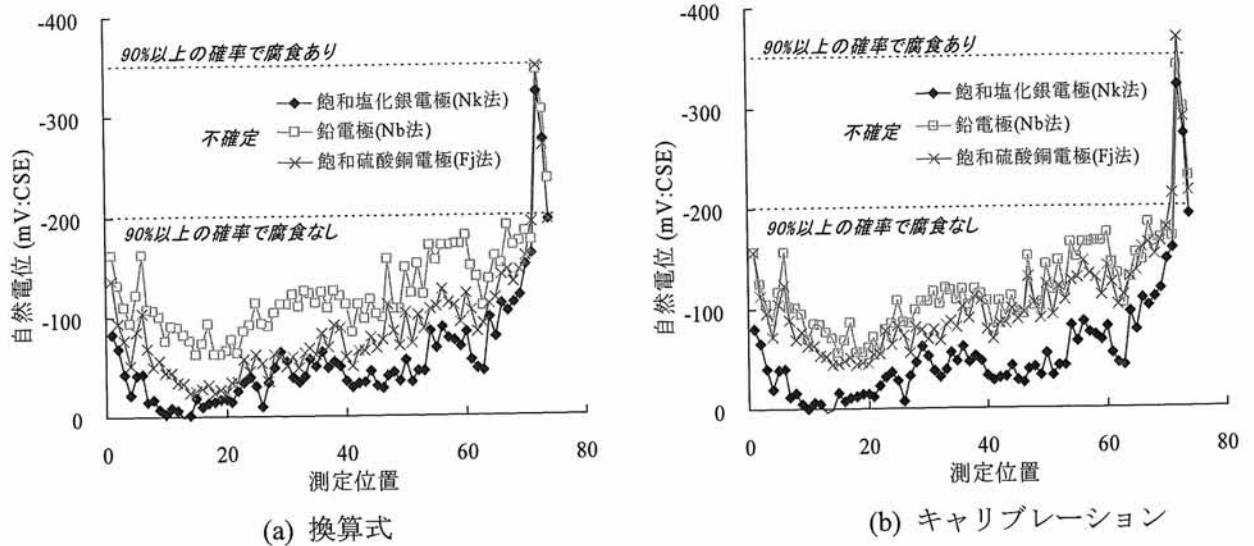
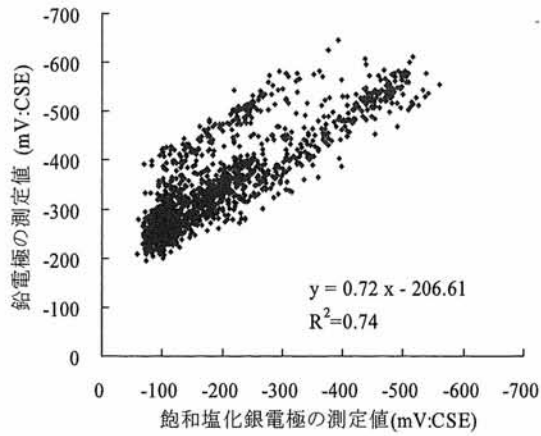


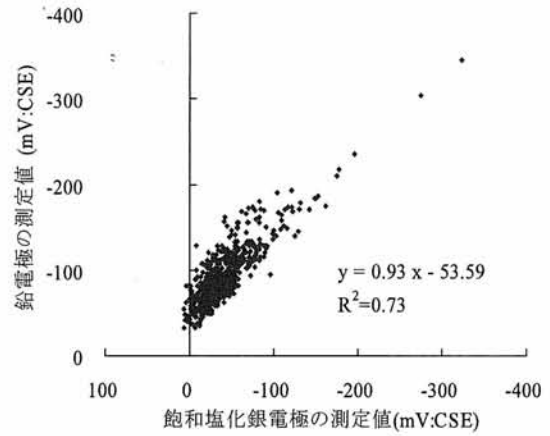
図-3.19 複数の照合電極を用いた場合の測定結果(歌高架橋)

上記の測定値の補正結果を比較すると、電位が比較的卑な値を示した箇所では測定値の差が小さくなり、電位が比較的貴な値を示した箇所では測定値の差が大きくなる傾向にあるように読み取れる。また、複数の照合電極を用いて測定を行った場合、脇谷川橋では平均で約 150mV、歌高架橋では平均で約 50mV の差が生じていた。ただし、各照合電極による電位の分布形状を精査すると、脇谷川橋では両端部、歌高架橋では測定位置 70~74 で比較的卑な電位が測定されるなど、ほぼ同様の結果が得られていることがわかる。また、換算式を用いて補正を行っても、飽和カロメル電極との電位差を測定して補正を行っても、測定値の差が縮小することはなかった。これらのことを踏まえると、測定値の補正方法としては、上記で検討したどちらの方法を用いてもほぼ同様の結果が得られるものと考えられる。

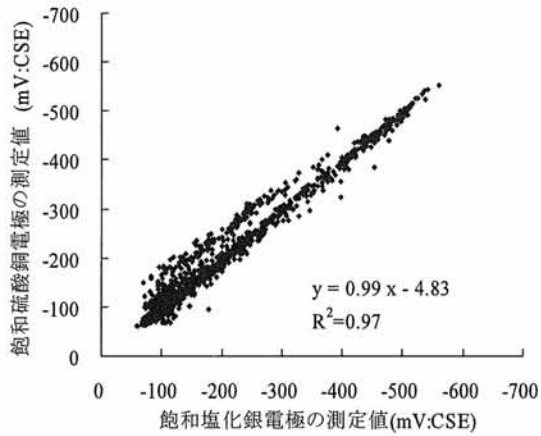
また、図-3.20, 21 に各照合電極による全測定値を補正方法ごとに比較して示す。この結果から、各照合電極による測定値には差があるものの、補正方法に関わらず、全体的には相関関係にあることがわかる。しかし、歌高架橋では各照合電極による測定値に相関性があることが容易に認められる一方で、脇谷川橋では各照合電極の測定値が 2 本の直線で近似できるように思われるが、現時点では原因は不明である。



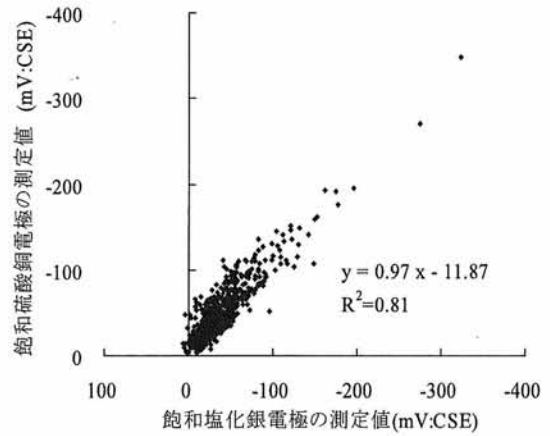
(a) 飽和塩化銀電極と鉛電極(脇谷川橋)



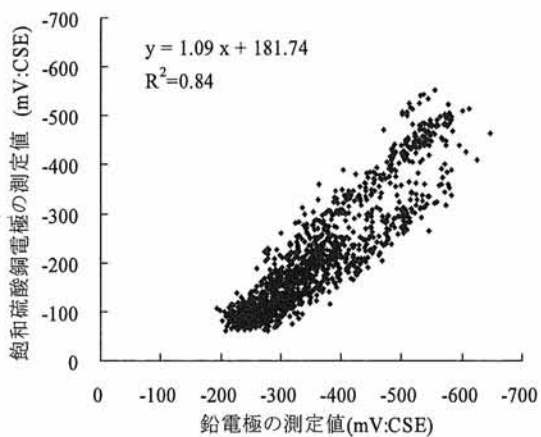
(d) 飽和塩化銀電極と鉛電極(歌高架橋)



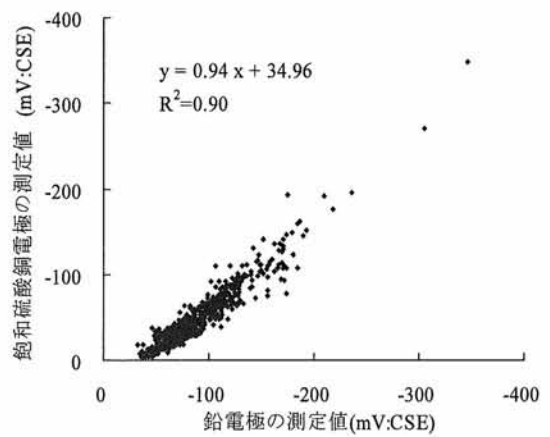
(b) 飽和塩化銀電極と飽和硫酸銅電極(脇谷川橋)



(e) 飽和塩化銀電極と飽和硫酸銅電極(歌高架橋)

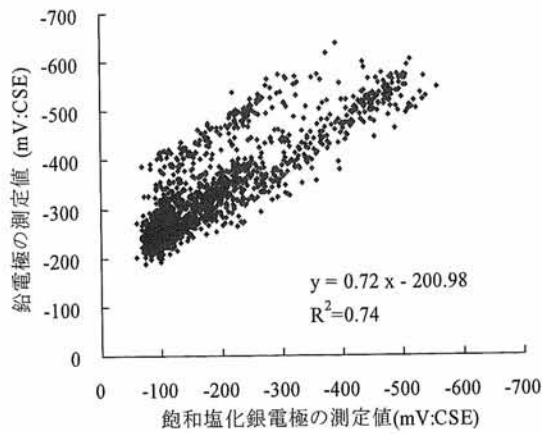


(c) 鉛電極と飽和硫酸銅電極(脇谷川橋)

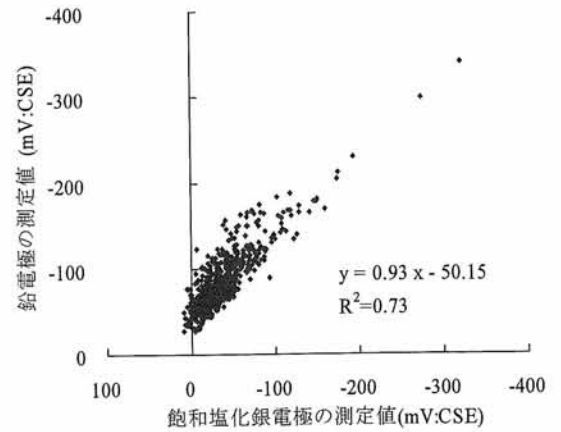


(f) 鉛電極と飽和硫酸銅電極(歌高架橋)

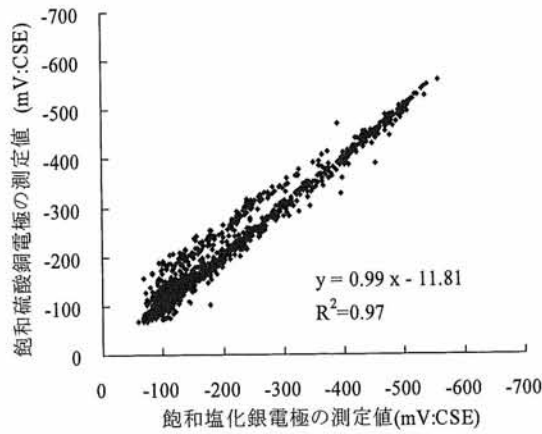
図-3.20 各照合電極による測定値の比較(換算式)



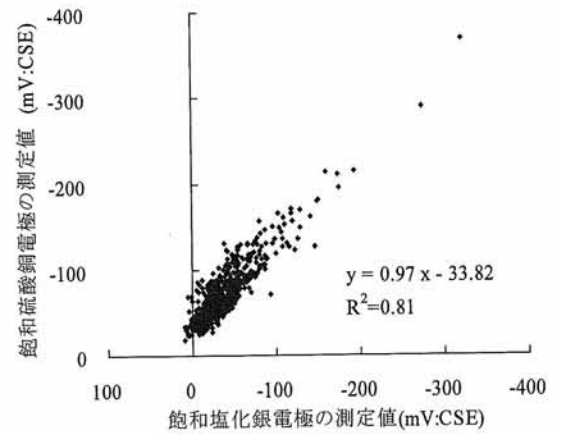
(a) 飽和塩化銀電極と鉛電極(脇谷川橋)



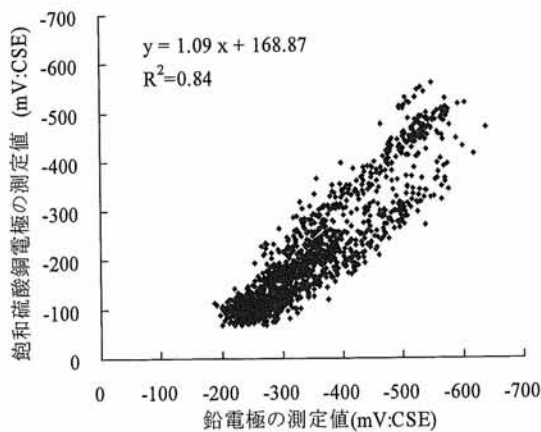
(d) 飽和塩化銀電極と鉛電極(歌高架橋)



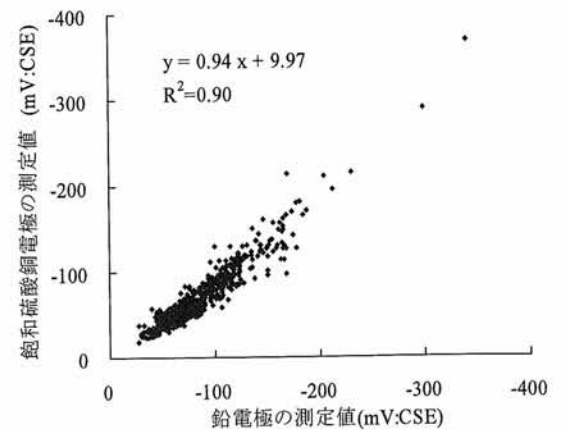
(b) 飽和塩化銀電極と飽和硫酸銅電極(脇谷川橋)



(e) 飽和塩化銀電極と飽和硫酸銅電極(歌高架橋)

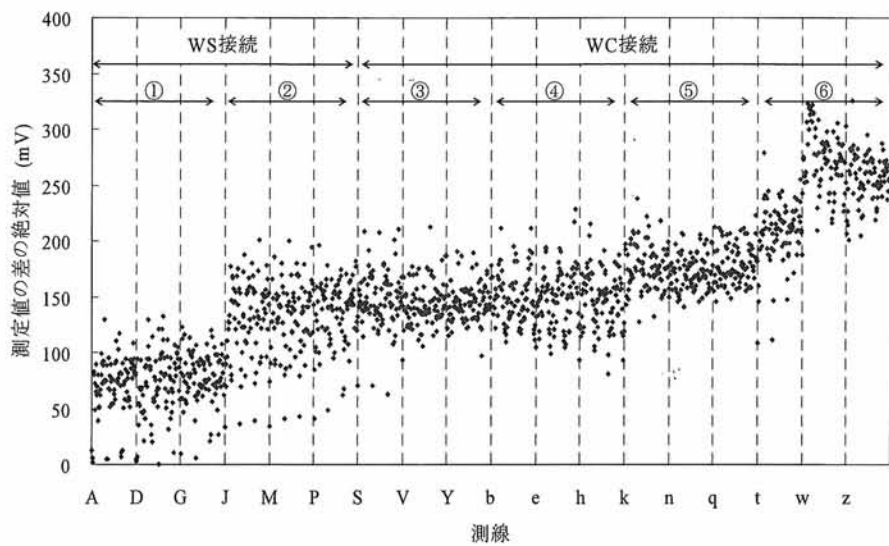


(c) 鉛電極と飽和硫酸銅電極(脇谷川橋)

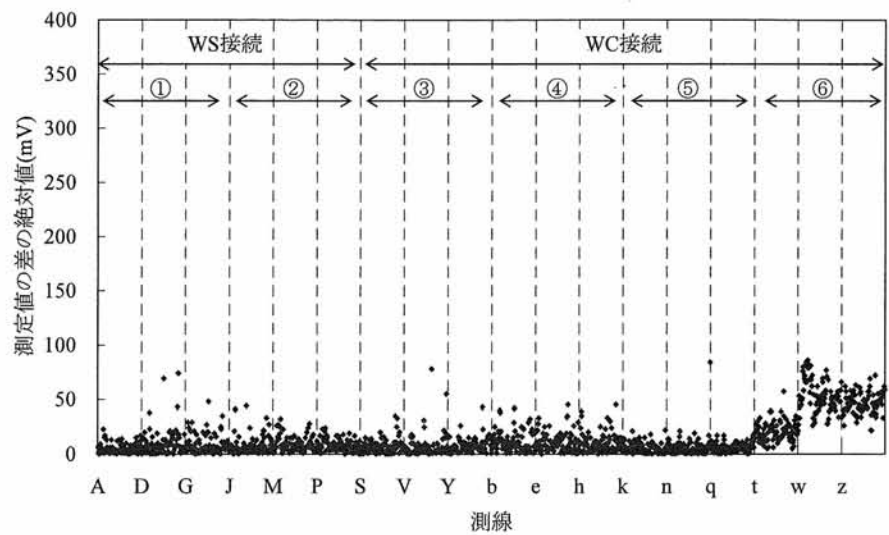


(f) 鉛電極と飽和硫酸銅電極(歌高架橋)

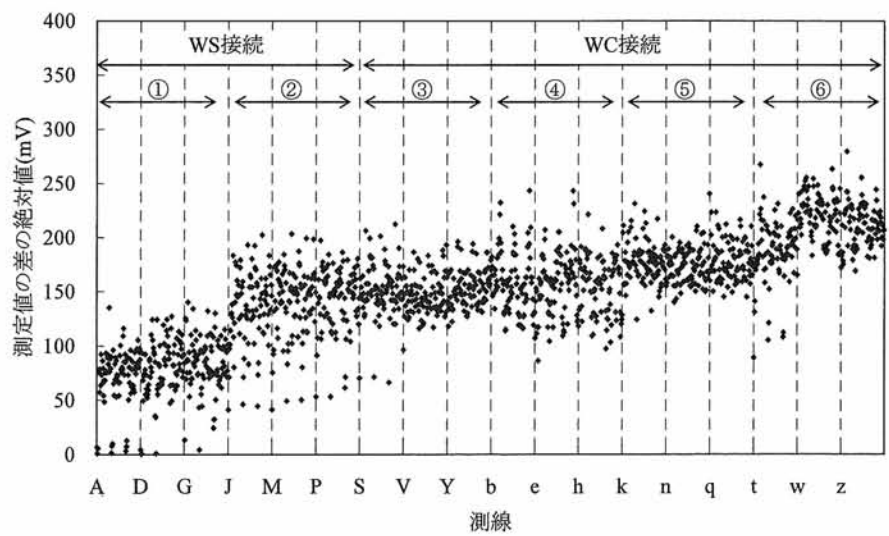
図-3.21 各照合電極による測定値の比較(キャリブレーション)



(a) 飽和塩化銀電極と鉛電極の差

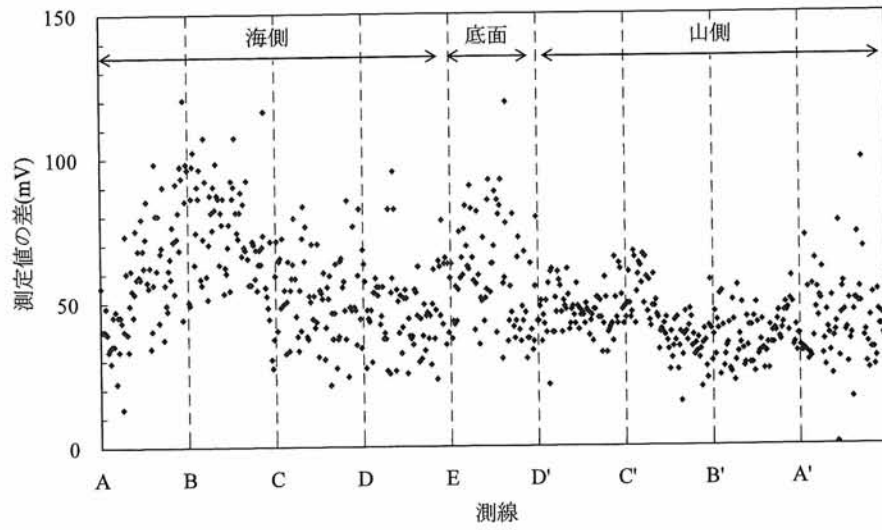


(b) 飽和塩化銀電極と飽和硫酸銅電極の差

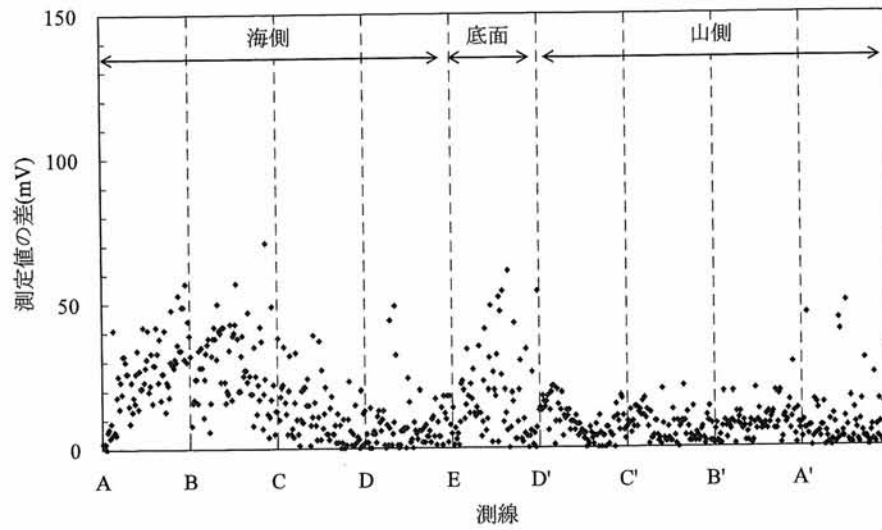


(c) 鉛電極と飽和硫酸銅電極の差

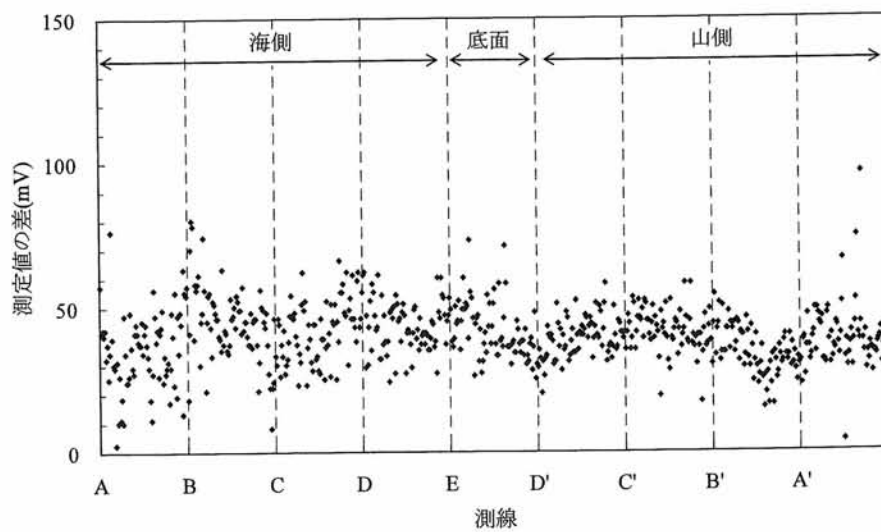
図-3.22 脇谷川橋の測線ごとの照合電極間の測定値の差



(a) 飽和塩化銀電極と鉛電極の差



(b) 飽和塩化銀電極と飽和硫酸銅電極の差



(c) 鉛電極と飽和硫酸銅電極の差

図-3.23 歌高架橋の測線ごとの照合電極間の測定値の差

測定値に差が生じる原因を詳細に検討するため、図-3.22, 23 に照合電極間の測定値の差を測線ごとに示す。脇谷川橋では、測定範囲を分割し湿潤開始時刻をずらして測定を開始したため、この測定順序を①～⑥で示している。また、脇谷川橋の測定値については、測定用に用いたリード線の接続位置も併記している。

脇谷川橋の測定値の差は、海側の測線 A に近いほど測定値の差が小さく、山側の測線 z に近いほど測定値の差が大きくなる傾向が認められ、特に飽和塩化銀電極と鉛電極、鉛電極と飽和硫酸銅電極の間でこの傾向が顕著に現れている。脇谷川橋では WS と WC の 2ヶ所のリード線接続位置を測定に使用したが、接続位置の違いにより測定値の差が変動する傾向は読み取れない。一方で、測定値の差の大きさを測定順序①～⑥で比較すると、飽和塩化銀電極と鉛電極、鉛電極と飽和硫酸銅電極の測定値の差は①で約 100mV、②～④で約 150mV、⑤で約 200mV、⑥で約 250mV と徐々に大きくなる様子が読み取れる。また、飽和塩化銀電極と飽和硫酸銅電極の測定値の差は、①～⑤までは概ね 50mV 以内に収まっていたものが、⑥で急増している。いずれの測定値の差においても、⑥における測線 w より山側の測定値の差が特に大きくなっている。

先に示した導通の確認結果によると、測線 w よりも山側の範囲には WM が位置しており、ここでは WS や WC との電位差が大きく導通がとれていなかった可能性がある。このことを踏まえると、測線 w より山側で測定値の差が大きくなった原因のひとつは、測線 w よりも山側の鉄筋の導通がとれていなかったためである可能性が高い。なお、飽和塩化銀電極と鉛電極、鉛電極と飽和硫酸銅電極の測定値の差が①～⑥にかけて徐々に大きくなった原因は、現時点では明確でない。

参考のため、図-3-24 に、冬季における脇谷川橋の測定値の差を測線ごとに示す。すると、ここでは夏季のように山側で測定値の差が急に大きくなるといったことは確認できない。ここでは測定順序①～③にかけて測定値の差が徐々に大きくなり、④～⑥では測定値の差が約 200mV に留まっている。

これに対し、図-3.23 に示すように歌高架橋の測定結果では、山側の測線 A'～D'において海側の測線 A～D、底面 E よりも測定値の差が僅かに小さくなる傾向にあるが、全体的には脇谷川橋のような明確な傾向は確認できない。

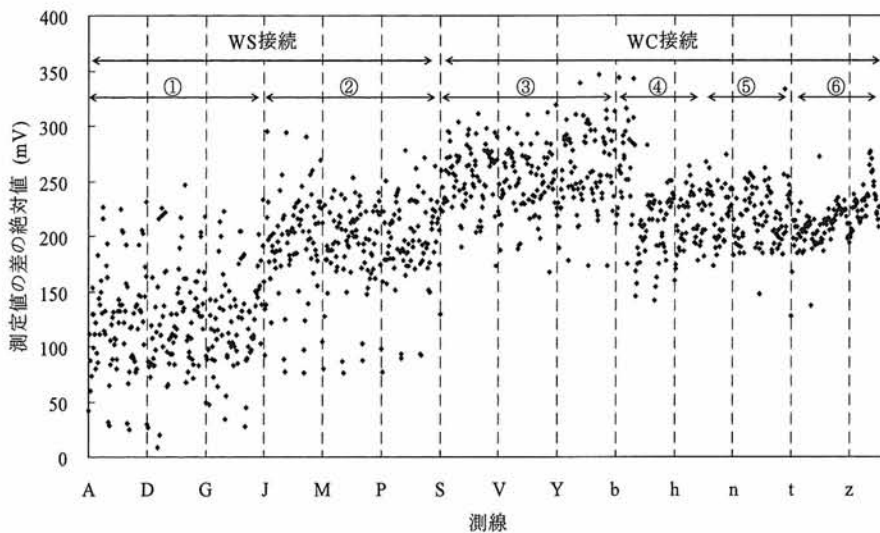


図-3.24 脇谷川橋の測線ごとの飽和塩化銀電極と鉛電極の測定値の差(冬季)

3.7 測定点間隔の設定方法

実構造物の測定では、供試体の測定と比べて測定範囲が極めて広がるため、測定に要する時間と手間が大幅に増えることとなる。このため、測定点を減らすなどして、対象とする構造物の鉄筋腐食の傾向を効率的に把握することが必要である。しかし、塩害環境下にある橋梁では飛来する塩化物イオンが部材位置によって異なるため、鉄筋位置の塩化物イオン濃度が不均一となり、局所的に腐食が生じる可能性がある。測定点の間隔を広く設定すると、こうした局所的な腐食位置を特定できないことなどの問題が生じる。

既存の自然電位の測定規準では、それぞれ異なる測定点間隔の設定方法を定めている。

土木学会規準では、構造物の種類や大きさ、気象条件、マクロセルの形成等を考慮して決める必要があるが、一般的には100~300mmで十分としている。また、測定点はできるだけ鉄筋の直上とすることが望ましいとしている。

ASTM C 876 では、特に決められた測定間隔はないが、広すぎても狭すぎても良くないと記述し、橋梁の床版では1.2mで十分とし、格子状もしくはランダムに測定点を設定して良いとしている。測定点の間隔は、激しい腐食が生じている場所において、隣接する測定値の差が150mV以上ある場合に狭める必要があるとし、一般的には100mV以上の差がある場合には狭めた方が良いと指摘している。

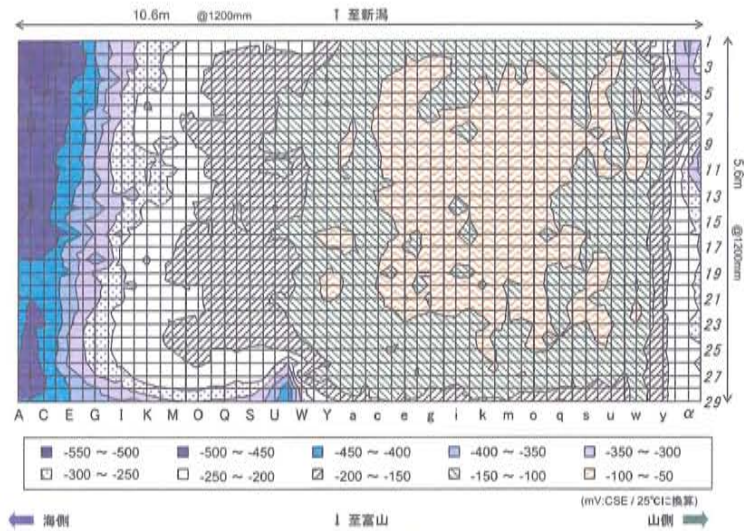
また、英国 TRRL の文献では、自然電位の測定間隔は橋梁に生じている腐食の種類に依存するとし、中性化による劣化が疑われる橋梁では1m×1m以下の格子状、塩害など局所的な劣化が疑われる橋梁では0.2×0.2mの格子状での測定を提案している。また、隣接する測定値の差が100mVを超える場合には、格子を小さくすることを推奨している。英国 Concrete Society の文献でもこれと同様の指摘がある。

今回の測定では、鉄筋の直上に測定点を設けることを原則として、200~300mmで測定点間隔を設定した。脇谷川橋では、200mm間隔で格子状に鉄筋が配置されていたため、200mm間隔の格子状で測定点を設けた。歌高架橋では、300mm間隔でせん断補強鉄筋が配置されていたため300mm間隔で測定点を設け、1断面当たりウェブと下フランジに9点の測定点を設けた。なお、鉄筋の配置は、配筋図とRCレーダの鉄筋探査結果を参考とした。

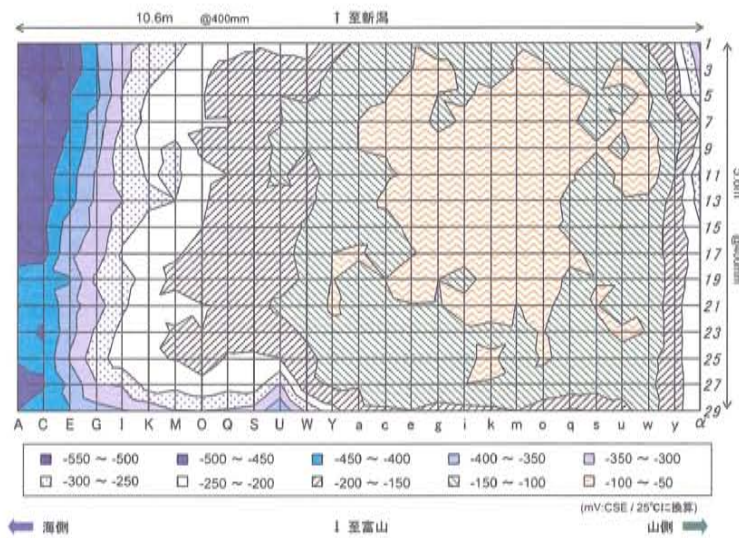
既に、3.1に記したように、脇谷川橋や歌高架橋では、塩害により生じた鉄筋腐食による錆汁やかぶりコンクリートの剥離は確認されなかったが、脇谷川橋では海側に橋軸方向のひび割れ、歌高架橋では測定対象範囲外ではあるが新潟側の海面の一部でコンクリートの浮きが確認された。これらの箇所は、図-3.1、4の自然電位の測定結果において、比較的卑な電位が測定された位置と一致した。このため、鉄筋腐食によるものと思われる劣化損傷であっても、コンクリート表面に何らかの劣化損傷が見受けられた際には、鉄筋腐食の発生を疑い、測定点を狭く設定することを検討することが必要である。また、橋梁周辺の地理条件等も勘案し、経験的に塩化物イオンの供給量が多い箇所や鉄筋腐食が生じやすいと疑われる場合(例えば、海岸線からの距離が近い場合や融雪剤の散布が多い場合など)には、測定間隔を狭めることを適宜検討する必要があると考えられる。なお、測定点を狭く設定するほど詳細な電位の分布を把握することが可能となるが、測定点は鉄筋の直上となることを原則として定めれば良いため、鉄筋間隔よりも狭く測定点を設定する必要はない。

具体的に測定点間隔を変えた場合の測定結果を比較検討するため、図-3.25、26に、測定点間隔を変えた場合の脇谷川橋と歌高架橋の測定結果を示す。ここでは、2006年夏の飽和塩化銀電極による測定結果を用いている。

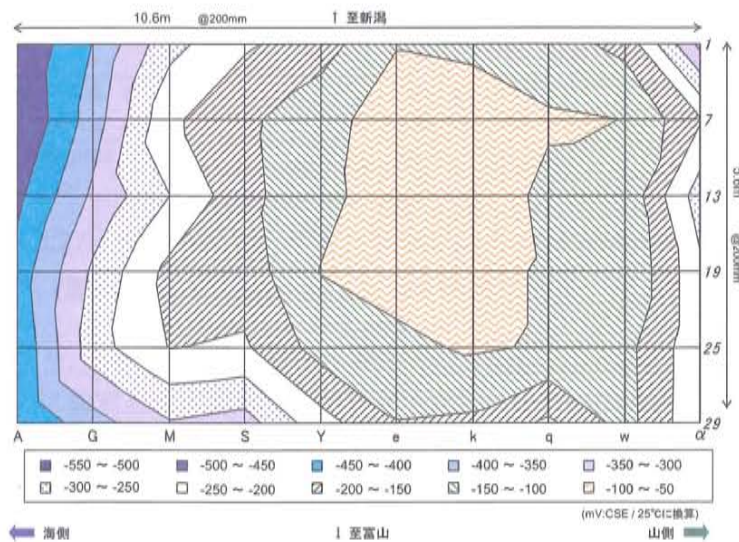
両橋梁の測定結果から、測定間隔を広くすると、詳細な電位の分布状態を把握することは困難となるものの、おおよその分布傾向を示すことは可能であることがわかる。例えば、脇谷川橋には海側と山側に自然電位の卑な箇所があり、歌高架橋には新潟側に自然電位の卑な箇所があるといった傾向を把握することができる。しかし、歌高架橋では局所的に-300mVよりも卑な電位を示した箇所があり、測定点間隔を1200mmまで広くすると、こうした局所的な鉄筋腐食を特定することが困難となる可能性がある。



(a) 200mm 間隔で測定した場合



(b) 400mm 間隔で測定した場合



(c) 1200mm 間隔で測定した場合

図-3.25 測定点間隔を変えた場合の結果(脇谷川橋)

図-3.27 に、測定点間隔を変えた場合の歌高架橋の測線 D の測定値を示す。測線 D は、局所的に-300mV よりも卑な値が測定され、鉄筋腐食が確認された箇所を含む測線である。

測定点間隔を 300mm もしくは 600mm に設定した場合、測定位置 72, 73 で卑な自然電位が測定されており、局所的な鉄筋腐食を特定することは可能と考えられる。ところが、測定間隔を 1200mm まで広げると、測定位置 74 で他よりも卑な自然電位が測定されたことは確認できるが、これは ASTM C 876 の腐食判定基準に従えば、「90%の確率で腐食なし」と判定される可能性が高い。このため、今回の測定結果の範囲内では、測定間隔を 1200mm まで広げた場合には、局所的な腐食を特定することが困難となる可能性が高まると考えられる。ここで示した結果は、測定点の取り方による部分が大きいものの、測定間隔を広くした場合に局所的な鉄筋腐食を特定できなくなる可能性を示すものである。

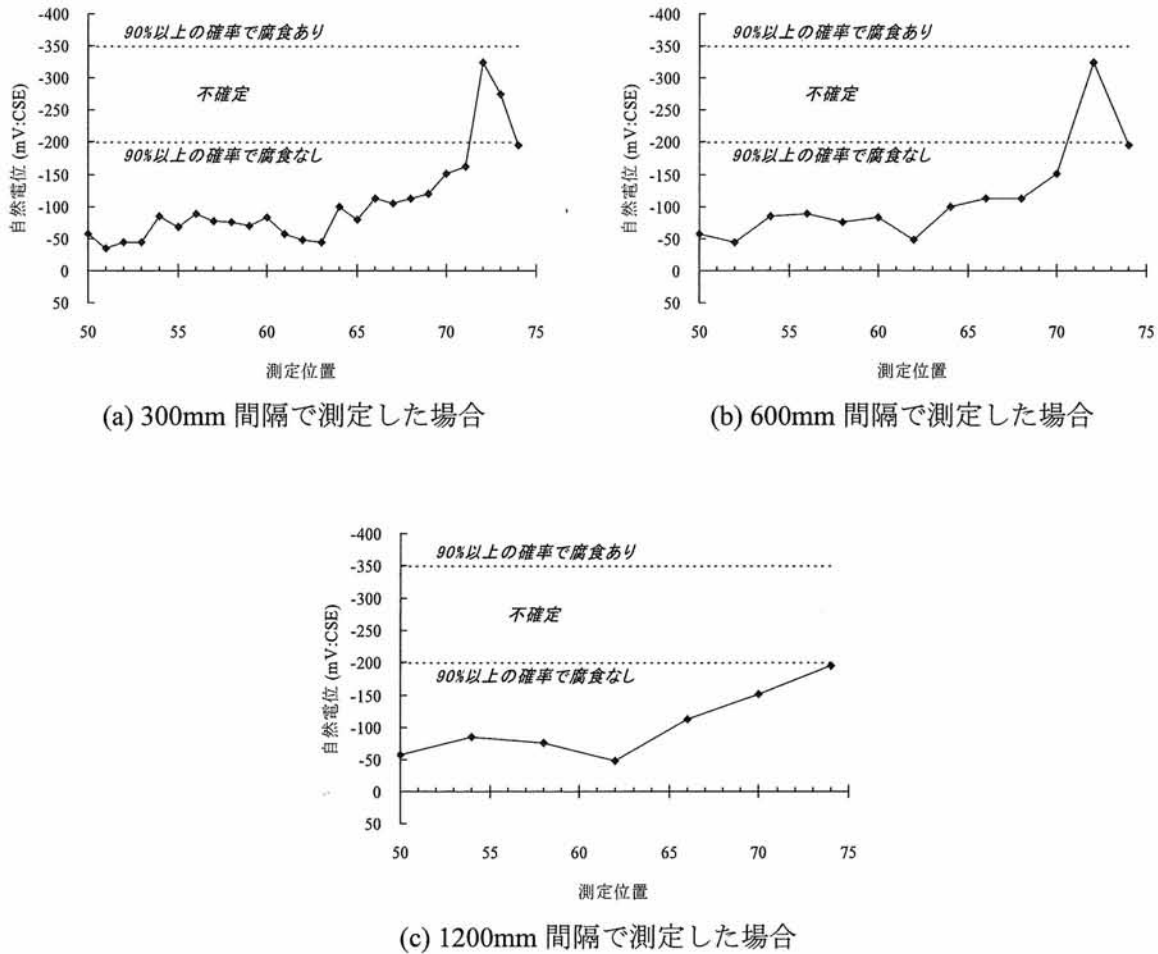


図-3.27 測定点間隔を変えた場合の結果(歌高架橋の測線 D)

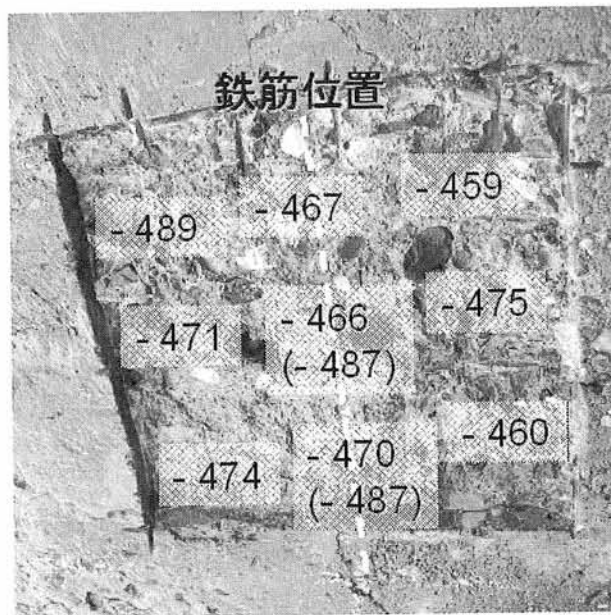
上記の結果を踏まえると、測定点間隔を設定する際には、配筋図や非破壊検査による鉄筋探査結果を参考として、鉄筋の直上に測定点を設定することが望ましい。また、測定点間隔を広くすると塩害環境下にある橋梁では局所的な鉄筋腐食を把握することが困難となるため、鉄筋の配筋間隔もしくは 300mm 程度を目安として測定点間隔を設定することが必要と考えられる。

3.8 はつり位置での自然電位の測定結果

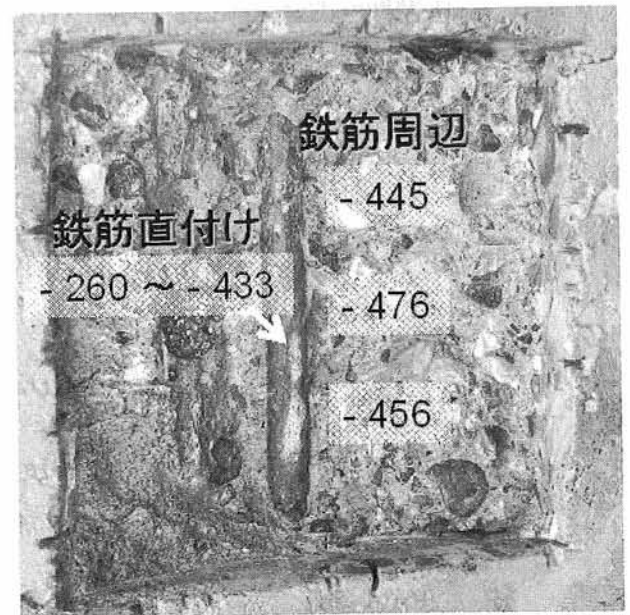
脇谷川橋と歌高架橋では、自然電位が最も卑な値を示した箇所で、鉄筋の腐食状態を調査するためにかぶりコンクリートをはつり、鉄筋の腐食状態を目視観察した。この際、かぶりコンクリートの有無による自然電位の変化を把握することを目的として、かぶりコンクリートのはつりの前後で自然電位を測定した。

図-3.28 に、脇谷川橋のはつり前後の飽和硫酸銅電極による自然電位の測定結果を示す。はつり前、かぶりコンクリートの一部はつり後、鉄筋露出後の3回で自然電位を測定した。はつり前は、30分湿潤後の通常自然電位の測定値である。かぶりコンクリートの一部はつり後は、かぶりコンクリートを表面から約10mmのみ切り取り、湿潤後に自然電位を測定したものである。鉄筋露出後は、かぶりコンクリートを全てはつり取り、鉄筋に照合電極を直付けした場合と鉄筋周辺のコンクリートに照合電極を押し当てて測定した場合の測定値である。なお、鉄筋露出後の測定値は、かぶりコンクリートを取り除いた後の値であるため鉄筋の腐食環境がはつり前とは異なっていること、鉄筋に照合電極を直接接触させているため必ずしも正確な自然電位が測定できているとはいえないことなどから、ここでは参考データとして示している。

はつり前、かぶりコンクリートの一部はつり後の測定結果を比較すると、電位の変化は約20mV以内に収まっており、かぶりコンクリートのはつりに関わらず電位は-450mV前後の卑な値を示した。また、露出させた鉄筋に照合電極を直接接触させて電位を測定すると、接触させた鉄筋の位置により電位は-260から-433mVの不安定な値を示し、落ち着くことはなかった。



(a) はつり前および一部はつり後の自然電位



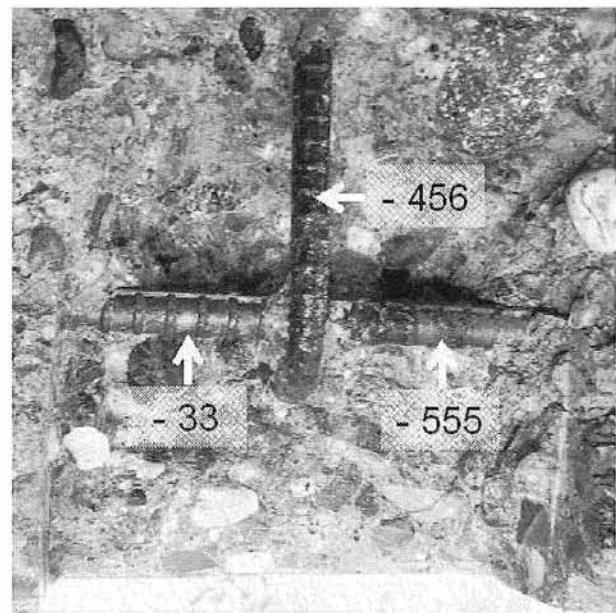
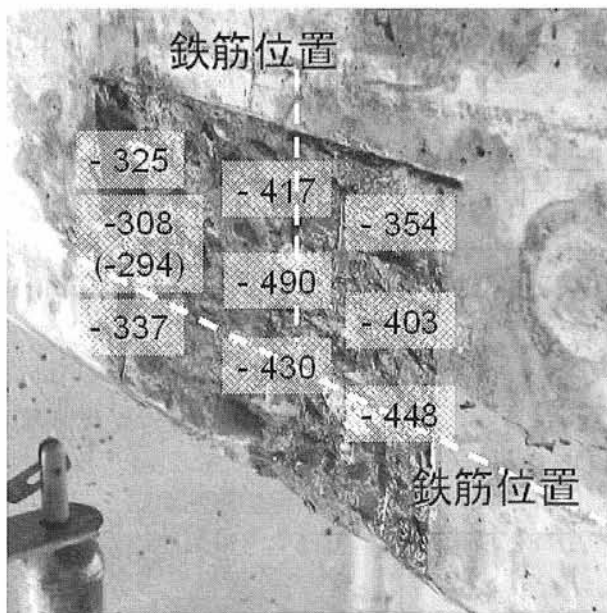
(b) 鉄筋周辺および直付け時の自然電位

※ (a)の括弧内は、かぶりコンクリートはつり前の測定値

図-3.28 かぶりコンクリートはつり前後の自然電位

図-3.29 に、歌高架橋のはつり前後の飽和硫酸銅電極による自然電位の測定結果を示す。ここでも、はつり前、かぶりコンクリートの一部はつり後、鉄筋露出後の 3 回で自然電位を測定した結果を示す。測定方法は脇谷川橋と同様である。

はつり前と一部はつり後を比較すると、ここでも測定値の変化はほとんどなかった。また、露出させた鉄筋に照合電極を直接接触させて電位を測定すると、目視で腐食が確認された部分では -450mV よりも卑な値となったが、腐食が生じていない部分では -33mV と貴な値が測定された。この位置は、一部はつり後の電位が -337mV を示した箇所とほぼ一致しており、かぶりコンクリートの削除前後で自然電位が大きく変化した。この原因は、かぶりコンクリートをはつり取る前は、かぶりコンクリートを通じてマクロセル腐食が形成され腐食が生じていない箇所でも比較的卑な電位が測定されたが、かぶりコンクリートをはつり取ることにより、鉄筋の腐食環境がはつり前とは異なったためと考えられる。



(a) はつり前および一部はつり後の自然電位

(b) 鉄筋周辺および直付け時の自然電位

※ (a)の括弧内は、かぶりコンクリートはつり前の測定値

図-3.29 かぶりコンクリートはつり前後の自然電位

両橋梁から採取した小径コアにフェノールフタレイン溶液を噴霧した結果では、どちらも概ね 10mm の深さまで中性化が進行していた。ここでは、約 10mm の厚さのかぶりコンクリートをはつり取った後に、フェノールフタレイン溶液を噴霧して中性化層を全て削除したことを確認した上で、自然電位を測定した。この結果、はつりの前後において、自然電位の測定値はほとんど変化しなかった。既往の研究では、かぶりコンクリートが中性化している場合に貴な自然電位が測定されることが報告されているが、今回の測定結果の範囲では、そのような結果は得られなかった。

3.9 付着塩分量の測定結果

表-3.2, 3.3 に、ガーゼ法による付着塩分量調査の結果を示す。比較のため、表面塩化物イオン量 C_0 、鉄筋位置の塩化物イオンの濃度の結果も示す。

脇谷川橋、歌高架橋、どちらの橋梁においても、付着塩分量と表面塩化物イオン量、鉄筋位置の塩化物イオン濃度との間に、明確な相関関係はみられない。しかし、脇谷川橋では、歌高架橋の3倍以上の付着塩分量が測定されており、海水が直接飛来する環境に位置している脇谷川橋で多くの塩分がコンクリート表面に付着していたことがわかる。

付着塩分量の測定は、ガーゼでコンクリート表面の塩分を拭き取ることにより試料を採取するため、コンクリートの凹凸などの影響を受け、試料採取時に誤差が生じる可能性が高い。このため、付着塩分量の調査結果は、試料採取位置のおおよその飛来塩分量の目安を得る場合などには有効と考えられる。

表-3.2 脇谷川橋の付着塩分量

	WS	WC	WM
付着塩分量 (mg/m^2)	12.0	8.8	10.4
表面塩化物イオン量 $C_0(\text{kg}/\text{m}^3)$	—	2.32	2.68
鉄筋位置塩化物イオン濃度 (kg/m^3)	2.19	1.33	1.29

表-3.3 歌高架橋の付着塩分量

	UT	UC	UN
付着塩分量 (mg/m^2)	3.0	1.8	1.3
表面塩化物イオン量 $C_0(\text{kg}/\text{m}^3)$	0.62	0.70	1.72
鉄筋位置塩化物イオン濃度 (kg/m^3)	0.68	0.73	1.25

3.10 小径コアとテストハンマーによる圧縮強度試験結果

図-3.30 に、小径コアによる圧縮強度試験の結果を示す。

脇谷川橋では、塩化物イオン濃度の高かった海側で強度が低くなっている。一方、歌高架橋では、コア採取位置によってばらつきがあり、位置による強度の偏りなどは確認されなかった。

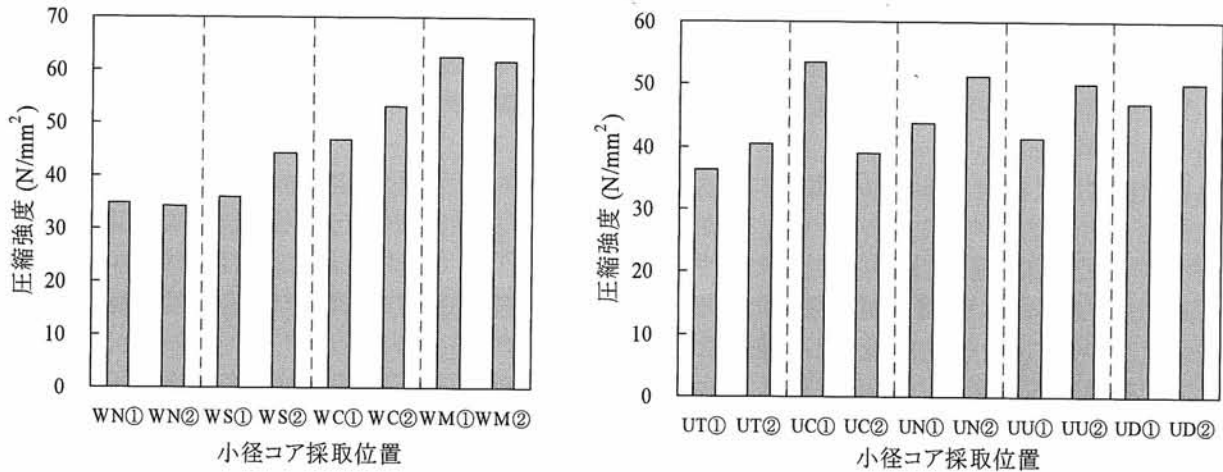


図-3.30 小径コアによるコンクリート圧縮強度試験結果

図-3.31 に、テストハンマーによる圧縮強度の推定結果を示す。

小径コアを用いた測定結果では、脇谷川橋では海側ほど強度が低下していたが、テストハンマーの強度推定結果では測定位置に関わらずほぼ同程度であった。また、歌高架橋では、テストハンマーによる推定結果は、小径コアの測定結果を過大に評価する傾向にあった。

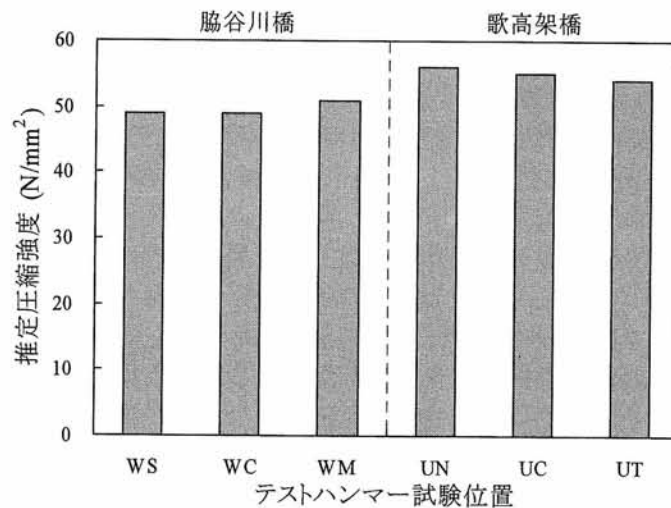


図-3.31 テストハンマーによる圧縮強度推定結果

4. 実構造物の調査結果のまとめ

ここでは、実際に塩害環境下にあるコンクリート橋の自然電位を測定することにより、実構造物における自然電位の測定方法ならびに測定結果の活用方法について検討を行った。今回の測定の範囲内で得られた知見を以下にまとめる。

(1) 自然電位と鉄筋腐食、塩化物イオン濃度の関係

塩害環境下で供用中の表面に鉄筋腐食に起因すると疑われる錆汁やひび割れが顕在化していないコンクリート橋を対象として、自然電位の測定結果と鉄筋の腐食状態、鉄筋位置の塩化物イオン濃度の関係について検討を行った。

脇谷川橋では、海側で卑な自然電位が測定される傾向にあり、卑な測定値を示した箇所ほど鉄筋位置の塩化物イオン濃度が高くなっていた。しかし、自然電位の測定値や塩化物イオン濃度に関わらず、全てのはつり位置の鉄筋表面に同程度のごく表面的な腐食が生じていた。これは、自然電位の測定値が、あくまでも鉄筋周辺の環境が腐食環境にあるか否かを示す指標であり、鉄筋の腐食速度や腐食の程度までを示すものではないことを反映したためとみられる。

一方、歌高架橋では、自然電位の最も卑な電位を示した位置のみで、鉄筋位置の塩化物イオン濃度が 2.5kg/m^3 を超え、鉄筋腐食が生じていた。コンクリート表面に鉄筋腐食に起因すると疑われる劣化損傷が現れていない構造物においても、全体の自然電位の分布傾向を精査し最も卑な自然電位を示した箇所を選定することにより、コンクリート内部の鉄筋腐食の位置を特定することができたと考えられる。しかし、この周囲の自然電位の測定値は約 -320mV:CSE であり、ASTM C 876 の判定基準では「不確定」と判定される。これは、腐食部がアノード部となってマクロセル腐食が形成され、分極の影響を受けて本来は卑な自然電位が貴に変化したためと考えられる。従って、自然電位の測定結果から鉄筋の腐食位置を推定する際には、既存の判定基準に加えて、自然電位の分布傾向を十分に精査することが重要と考えられる。

(2) 測定時の気象条件が自然電位に与える影響

冬季と夏季の自然電位の測定値を比較した結果、夏季の方が冬季よりも平均で約 40mV 卑な電位が測定された。ただし、測定された自然電位の分布傾向は、冬季と夏季でほぼ同様のものではなかった。

(3) 湿潤時間の違いによる自然電位の変化

コンクリートの湿潤時間を 30 分以上にすると、測定値が平均で約 50mV ほど卑に変化した。逆に、30 分湿潤後にコンクリートを乾燥させると、最大で 100mV ほど自然電位が貴に変化した。このため、湿潤時間ならびに湿潤後の乾燥時間を長くすると、測定値の変動が大きくなると考えられる。また、湿潤時間を長くした場合よりも湿潤後の乾燥時間を長くした場合の測定値の変動が大きいことから、自然電位の測定を開始した後もコンクリート表面に断続的に散水し、湿潤状態を保つことが必要である。ただし、自然電位の分布としては湿潤時間や乾燥時間を変化させてもほぼ同様の結果が得られていることから、ここでの測定値の変動は、鉄筋の腐食位置を推定する際に支障となるようなものではないと考えられる。実構造物の測定にあたっては、事前に測定範囲を分割して湿潤開始時刻をずらすなどして、測定箇所によって大幅に湿潤時間が異なるようにする配慮が必要である。

(4) 導通の確認方法

互いに離れた位置の鉄筋を露出させ、鉄筋間の電位差を測定することにより、導通の確認を行った。脇谷川橋の 1ヶ所では、 4mV と若干高め電位差が測定されたこと、この地点を含む一定範囲では照合電極間の測定値の差が大きくなったことなどから、導通がとれていない可能性がある。このため、導通を確認する際には、電位差が 1mV 程度以下であることを確認する必要があると考えられる。歌高架橋では、互いに離れた位置の鉄筋間の電位差が極めて小さく、3ヶ所とも導通がとれていたと考えられる。

また、リード線の接続位置を変えた場合の自然電位の測定値の差は約 20mV 以内に収まっており、鉄

筋の導通がとれていれば、どの位置の鉄筋にリード線を接続しても自然電位の測定結果には影響がないと考えられる。

(5) 測定値の補正方法

異なる種類の照合電極を用いた場合の測定値を 25℃の飽和硫酸銅電極の電位に補正する方法として、換算式と飽和塩化カリウム水溶液内で飽和カロメル電極との電位差を測定してキャリブレーションを行う方法を検討した。今回の測定結果の範囲では、どちらの補正方法を用いても、脇谷川橋では平均で約 150mV、歌高架橋では平均で約 50mV、測定値に差が生じていた。また、どちらの補正方法を用いてもほぼ同様の自然電位の分布が得られたこと、各照合電極による測定値は互いに高い相関関係にあることなどから、どちらの補正方法を用いても自然電位の分布傾向としては概ね同様の結果が得られると考えられる。

(6) 測定点間隔の設定方法

実構造物の測定では測定範囲が極めて広くなり測定に要する時間と手間が大幅に増えるため、効率的に測定を行うための測定点間隔の設定方法を検討した。この結果、測定点の間隔を広くしてもおおその自然電位の分布傾向を把握することはできるが、局所的な鉄筋腐食を特定することが困難となる可能性が高いことが示された。特に歌高架橋ではごく一部で鉄筋腐食が生じており、測定点間隔を広くすると、これを把握できないことも起こり得た。

実構造物における測定点の設定は、配筋図や非破壊検査による鉄筋探査結果を参考とし、原則として鉄筋の直上に測定点を設定することが望ましい。測定点間隔は、鉄筋の配筋間隔もしくは 300mm 程度を目安として測定点間隔を設定することが必要である。

(7) はつり位置での自然電位の測定結果

鉄筋の腐食状態を目視観察する際、かぶりコンクリートのはつり前、一部はつり後、鉄筋露出後の 3 回の自然電位を測定した。既存の報告では、かぶりコンクリートが中性化している場合に貴な自然電位が測定されることが報告されているが、今回の測定結果の範囲では、はつり前と一部はつり後の鉄筋の自然電位の変化は約 20mV 以内でしかなかった。

(8) 自然電位法による鉄筋腐食の推定方法

(2), (3), (5)の結果を踏まえると、自然電位の測定値は様々な要因により変動すると考えられるが、いずれにしても全体的な分布傾向としては概ね等しい結果が得られると言える。従って、自然電位法を用いて鉄筋の腐食状態を推定する際、塩化物イオン濃度の測定やはつり調査の実施箇所を選定する際には、ASTM C 876 等の腐食判定基準にとられることなく、等電位線図などを用いて自然電位の分布傾向を十分に精査することが必要である。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート構造物における自然電位測定方法(JSCE-E601-2000), 鉄筋腐食・防食および補修に関する研究の現状と今後の動向(その2)-コンクリート委員会腐食防食小委員会(2期目)報告-, コンクリート技術シリーズ 30, pp.248-256, 2000
- 2) 土木学会・日本規格協会：JIS A 1152:2003 硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンの試験方法, 2005年制定 コンクリート標準示方書(規準編) JIS 規格集, pp.429-438, 2005
- 3) 日本道路協会, 鋼道路橋塗装便覧, pp.143, 1990.6
- 4) ASTM C 876-91(Reapproved 1999) : Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete, Annual Book of ASTM Standards, Vol. 03.02, pp.457-462, 1999
- 5) 独立行政法人土木研究所技術推進本部構造物マネジメント技術チーム, 日本構造物診断技術協会：コンクリート構造物の鉄筋腐食診断技術に関する共同研究報告書ー自然電位法・分極抵抗法による鉄筋腐食診断ー, 共同研究報告書第 294 号, p.84, 2003
- 6) The Concrete Society : Electrochemical tests for reinforcement corrosion, Technical Report No.60, p.32, 2004
- 7) Transport and Road Research Laboratory : The half-cell potential method of locating corroding reinforcement in concrete structures, Application Guide 9, p.30, 1991
- 8) 土木学会：電気化学的防食工法設計施工指針(案), コンクリートライブラリー107, pp.80, 2001

第Ⅲ部 供試体の測定結果

1. 暴露供試体の定期測定

1.1 実験の目的

RC 供試体を用いた自然電位の測定結果は、既に数多くの事例が報告されている。しかしながら、長期間にわたり同一の供試体を対象として、供試体の材齢や季節変化が自然電位に与える影響や、複数の照合電極を使用した場合の測定値の差などについては十分な検討が行われていない。

ここでは、2002年7月に製作したRC供試体の自然電位を継続的に測定し、以下のことを明らかにすることを目的とした。

(1) 材齢や測定時の季節による自然電位の変化

供試体の材齢や測定時の季節により自然電位の測定値も変化することが予測されるため、3年間にわたり夏季と冬季の2回を基本として測定を行い、材齢や季節と自然電位の関係について考察した。

(2) 複数の照合電極を用いた際の測定値の差と補正方法

飽和塩化銀電極、鉛電極、飽和硫酸銅電極の3種類の照合電極を用いた場合の測定結果を比較検討した。具体的には、異なる種類の照合電極を用いた場合の測定値の差および補正方法について検討を行った。

なお、ここで用いた供試体の製作直後の測定結果等の詳細については、共同研究報告書第294号「コンクリート構造物の鉄筋腐食診断技術に関する共同研究報告書 -自然電位法・分極抵抗法による鉄筋腐食診断-」にまとめられている。

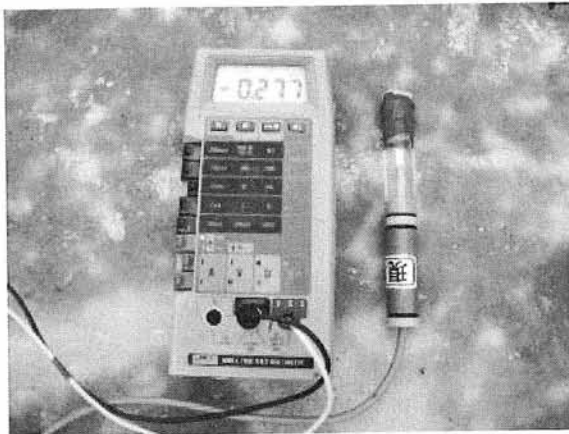
1.2 実験の概要

1.2.1 測定装置

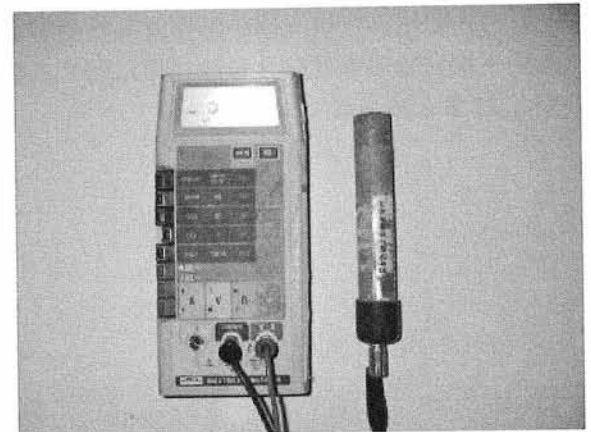
表-1.2.1 に、使用した測定装置の一覧を示す。複数の照合電極を用いた際の測定誤差と補正方法を検討するため、4つの測定装置を使用して測定を行った。いずれも現場での携帯が容易であり、実構造物での測定に適している。各測定装置は照合電極と電位差計で構成され、鉄筋からのリード線を電位差計のプラス端子、照合電極からのリード線を電位差計のマイナスを接続し、照合電極をコンクリート表面の測定点に押し当てて測定を行うものである。照合電極は、飽和塩化銀電極、鉛電極、飽和硫酸銅電極の3種類である。図-1.2.1 に、各測定装置の照合電極と電位差計を示す。

表-1.2.1 使用した測定装置

名称	照合電極 [記号]	溶液 [記号]
Nk法	飽和塩化銀電極 [Ag/AgCl]	飽和塩化カリウム [KCl]
Nh法	鉛電極 [Pb/PbO]	飽和水酸化カルシウム [Ca(OH)2]
Fj法	飽和硫酸銅電極 [Cu/CuSO4]	飽和硫酸銅 [CuSO4]
Db法	飽和硫酸銅電極 [Cu/CuSO4]	飽和硫酸銅 [CuSO4]



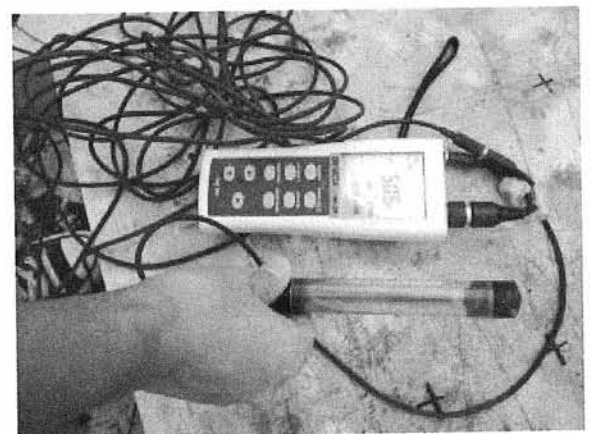
(a) Nk 法



(b) Nh 法



(c) Fj 法



(d) Db 法

図-1.2.1 測定装置

1.2.2 測定概要

表-1.2.2 に、測定概要をまとめる。測定は、夏季と冬季の年2回を基本とした。夏季の気温は23℃以上、冬季の気温は11℃以下であった。

供試体製作直後の H14 夏と H16 夏の測定は、実験棟内で行った。その後、2004 年 11 月に供試体を土木研究所内のコンクリート暴露試験場へ移設し、これ以降の測定は屋外で行った。図-1.2.2 に、供試体の暴露状況を示す。

また、自然電位測定前の供試体の湿潤時間は 10、30、60 分とし、供試体表面に散水後、ウエスで覆うことによりコンクリートを湿潤させた。図-1.2.3 に、供試体の湿潤状況を示す。

表-1.2.2 測定概要

測定時期	H14夏	H16夏	H16冬	H17夏	H17冬	H18夏
日付	2002年8月	2004年8月31日	2005年1月6日	2005年8月25日	2006年3月29日	2006年7月25日
気温	33℃	23℃	3℃	29℃	11℃	26℃
環境	屋内	屋内	屋外	屋外	屋外	屋外
湿潤時間	10, 30, 60分	30, 60分	30, 60分	30分	10, 30, 60分	30, 60分
Nk法	○	○	○	○	○	○
Nh法	-	○	○	○	○	○
Fj法	○	○	-	○	○	○
Db法	-	-	○	○	○	○



図-1.2.2 供試体の暴露状況



図-1.2.3 供試体の湿潤状況

1.2.3 供試体の概要

供試体の形状を図-1.2.4に示す。測定に用いた供試体は、A供試体とB供試体の2種類である。A供試体は、水セメント比や塩化物イオン濃度、かぶりが異なる鉄筋の自然電位を測定することを目的とし、B供試体は、塩化物イオン濃度が異なるコンクリート中でマクロセル腐食が形成した鉄筋の自然電位を測定することを目的として製作されたものである。

A供試体に用いたコンクリートの水セメント比は、55%および70%である。コンクリート中の塩化物イオン濃度は、 0kg/m^3 と 9kg/m^3 である。A供試体は寸法が同規格の供試体4体であり、供試体名はA-(水セメント比)-(塩分量)とした。

B供試体は、水セメント比55%のコンクリートを用い、塩分を含有するコンクリートと含有しないコンクリートを打ち重ねたものである。B1供試体は水平方向に塩化物イオン濃度が異なる環境中に鉄筋がある場合、B2供試体は1本の鉄筋が塩化物イオン濃度の異なる環境中にある場合、B3供試体は深さ方向に塩化物イオン濃度が異なる環境中に鉄筋がある場合を想定している。B1供試体とB3供試体では、塩化物イオン濃度の異なるコンクリートの鉄筋同士を短絡させることにより、マクロセル腐食が形成される。

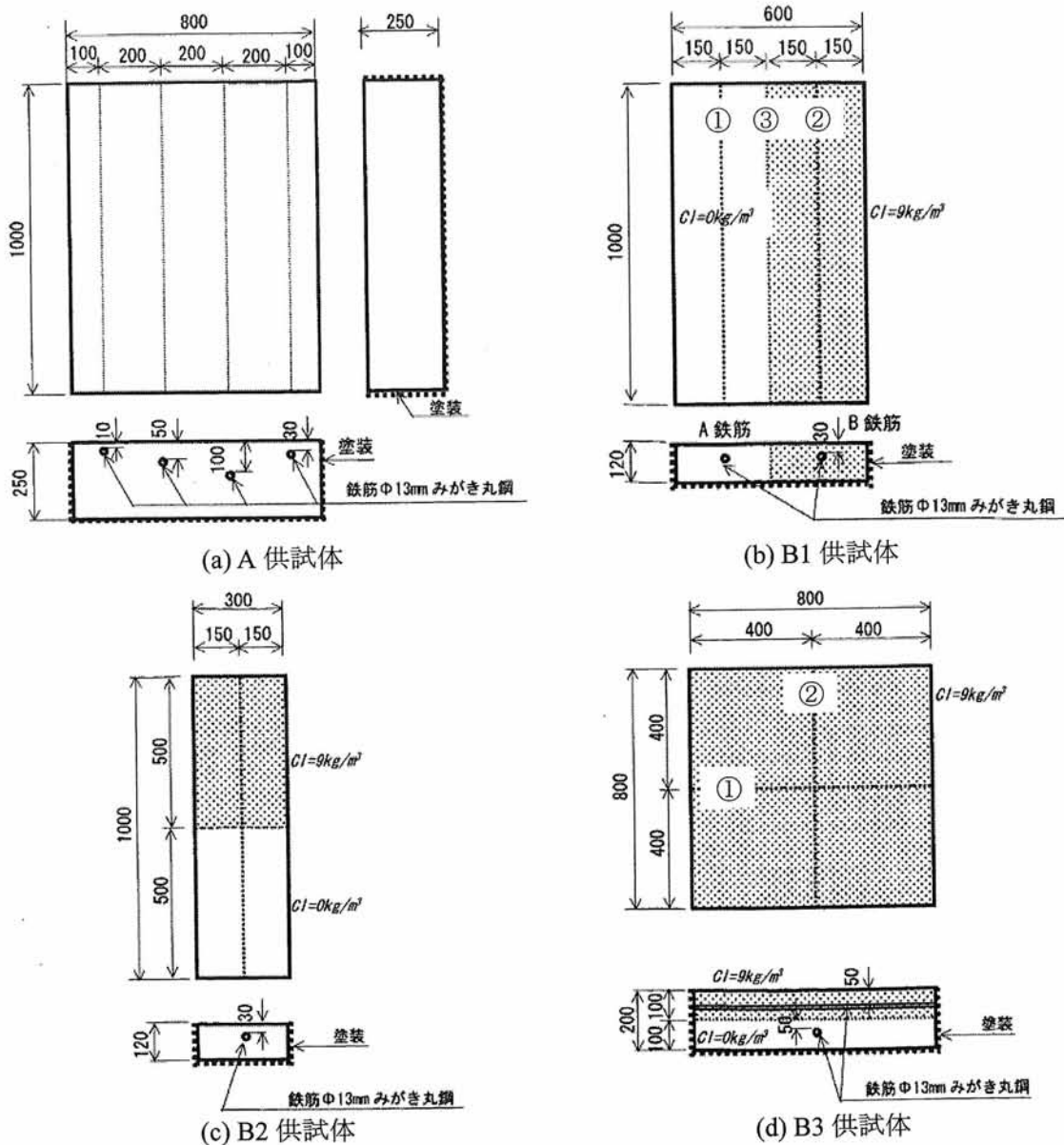
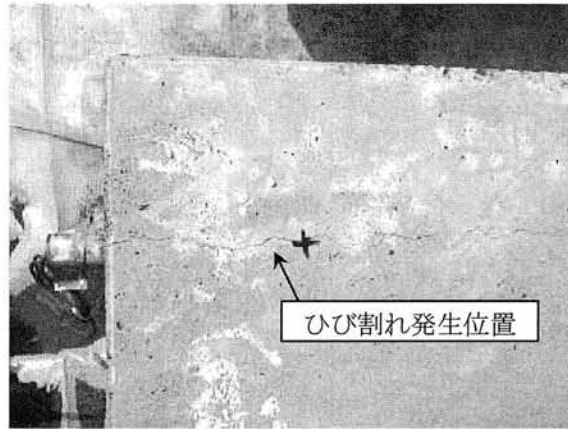


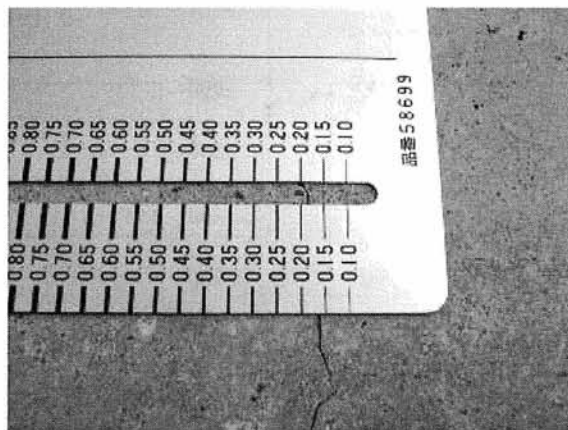
図-1.2.4 供試体の形状

1.2.4 暴露後の供試体の外観変状

屋外暴露約1年後のH17冬の測定の際、A-55-9、A-70-9供試体のかぶり10mmの鉄筋直上に鉄筋方向にひび割れが生じていることを確認した。どちらも、ひび割れ幅は、約0.2mmであった。図-1.2.5に、ひび割れの状況を示す。



(a) ひび割れ



(b) ひび割れ幅

図-1.2.5 ひび割れの状況

1.3 実験結果と考察

1.3.1 A 供試体の測定結果

1.3.1.1 材齢や季節による自然電位の変化

図-1.3.1 に、A 供試体の測定結果を示す。ここでは、全 6 回の測定時の湿潤時間 30 分後の飽和塩化銀電極による測定結果を示す。これ以後、A 供試体の測定値は、各鉄筋の直上 5 点での平均値を用いる。

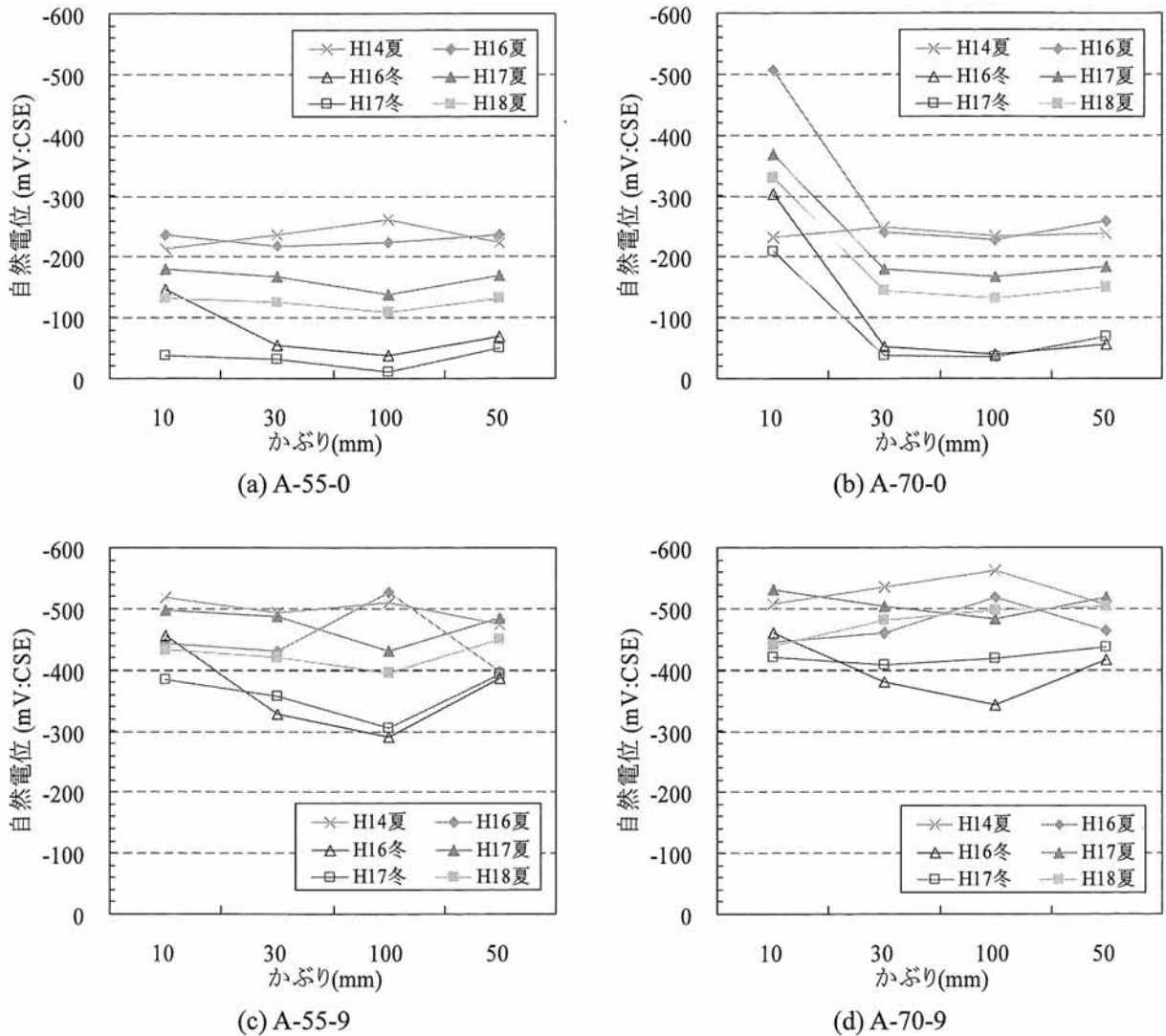


図-1.3.1 A 供試体の自然電位

測定値に差があるものの、塩化物イオン濃度の高い供試体では、 -300mV よりも卑な電位が測定された。ただし、A-70-0 供試体では、H16 夏以降の測定において、かぶり 10mm の鉄筋が同供試体の他の鉄筋と比べて卑な電位を示した。これは、かぶりが小さく水セメント比が高いために、中性化による鉄筋腐食が生じていたことが原因と推察される。

夏季と冬季の測定値を比較すると、冬季よりも夏季の方が約 100mV ほど卑な電位が測定された。これは、夏季の気温の上昇により鉄筋が腐食しやすい環境に置かれたためと考えられる。また、夏季の測定値同士を比較すると、若干ではあるが、塩分を含まない供試体では材齢が増えるほど貴な電位が測定された。しかし、夏季と冬季の測定値の差の方が大きく、自然電位に与える影響は材齢よりも季節変化による気温の方が大きいと考えられる。

また、屋外暴露後の H16 冬以降の測定では、かぶりの厚い鉄筋ほど貴な電位が測定された。

1.3.1.2 湿潤時間の違いによる自然電位の変化

図-1.3.2 に、湿潤時間を 30 分、60 分と変化させた場合の A-55-0 供試体と A-55-9 供試体の測定結果を示す。ここでも塩化銀電極による測定結果を示す。

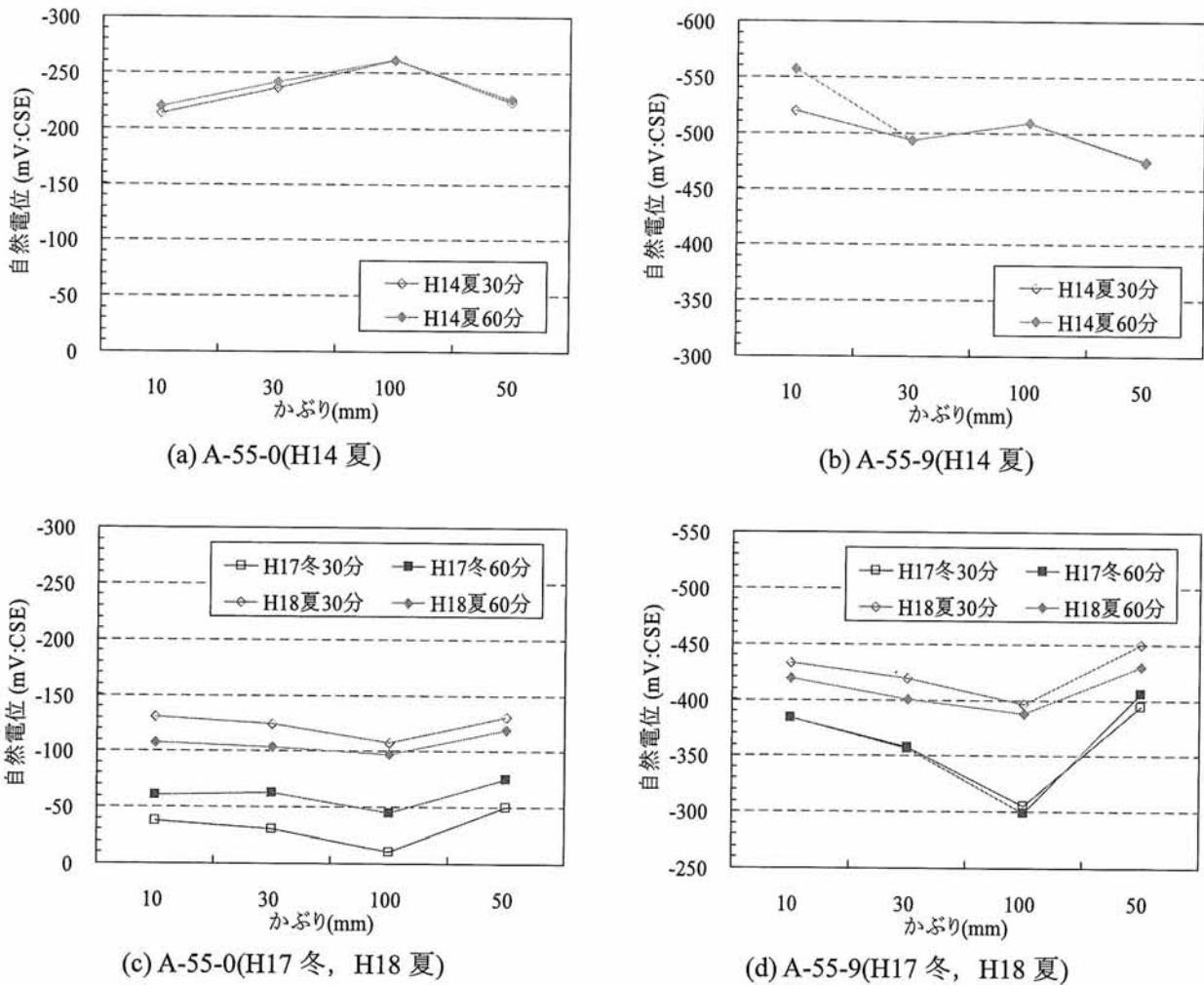


図-1.3.2 湿潤時間を変化させた場合の自然電位

供試体製作直後の H14 夏の測定では、A-55-9 供試体のかぶり 10mm の鉄筋を除けば、各供試体の電位は湿潤時間を 30 分から 60 分としてもほとんど変化しなかった。一方で、H17 冬と H18 夏の測定では、湿潤時間を長くすると、平均で 20mV ほど測定値が変化した。材齢が増え屋外に暴露された供試体では、湿潤時間を変化させた場合の測定値の変化が大きくなると考えられる。ただし、ここでの電位の変化は、鉄筋の腐食度の推定結果が異なるほど大きいものではないため、湿潤時間を 30 分以上確保すれば鉄筋の自然電位は適切に測定できると考えられる。

また、湿潤時間を 10 分として測定を試みたが、電位差計の測定値が安定せず、適切な測定を行うことができなかった。湿潤時間を 30 分以上とすると、電位の読み値が不安定になることはなく、適切に測定を行うことができた。

以上のことから、自然電位測定時のコンクリート表面の湿潤時間としては、30 分を確保することが望ましいと考えられる。

1.3.1.3 複数の照合電極を用いた場合の自然電位

図-1.3.3 に、H17 冬の複数の照合電極による測定結果を示す。ここでは、湿潤時間 30 分における 4 つの照合電極の測定結果を示す。なお、各照合電極による測定値は、表-1.3.1 の換算式を用いて 25°C の飽和硫酸銅電極の電位に換算したものである。

表-1.3.1 照合電極の種類と照合電極電位

照合電極の種類	自然電位 E (mV:CSE) 25°C 飽和硫酸銅電極換算
飽和硫酸銅電極	$0+0.9 \times (t-25)$
飽和カロメル電極	$-74-0.66 \times (t-25)$
飽和塩化銀電極	$-120-1.1 \times (t-25)$
鉛電極	$-799+0.24 \times (t-25)$

t: 測定時の気温(°C)

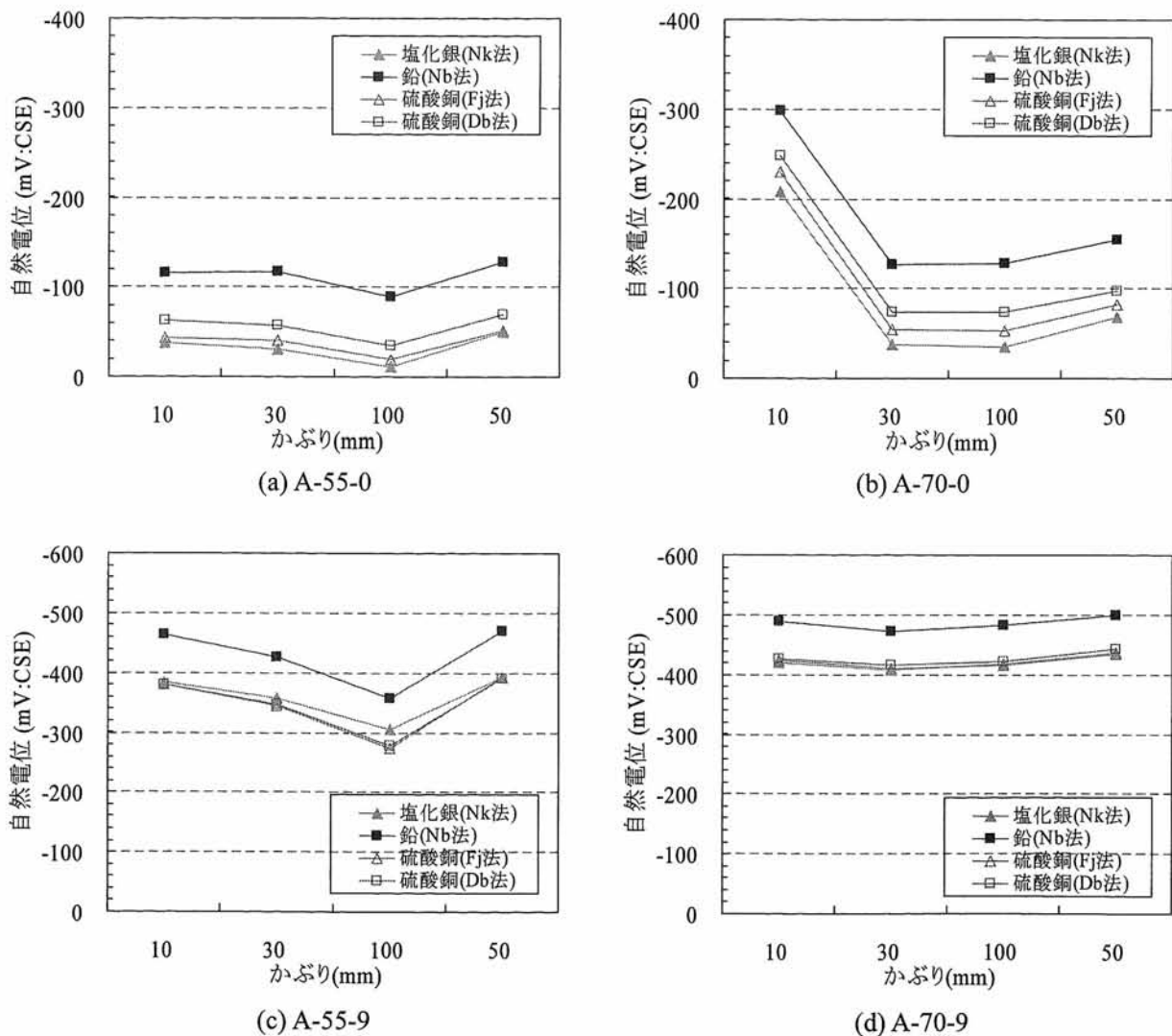


図-1.3.3 複数の照合電極による自然電位(H17 冬)

塩化銀電極と硫酸銅電極との間の測定誤差は、平均で 20mV 以内に収まっており、塩分を含んでいない供試体で大きくなった。一方、鉛電極による測定値は、これらよりも約 80mV ほど卑になった。

同様に、図-1.3.4 に、H18 夏の複数の照合電極による測定結果を示す。ここでも、4つの照合電極による測定値を表-1.3.1の換算式を用いて25°Cの飽和硫酸銅電極の電位に換算したものを示している。

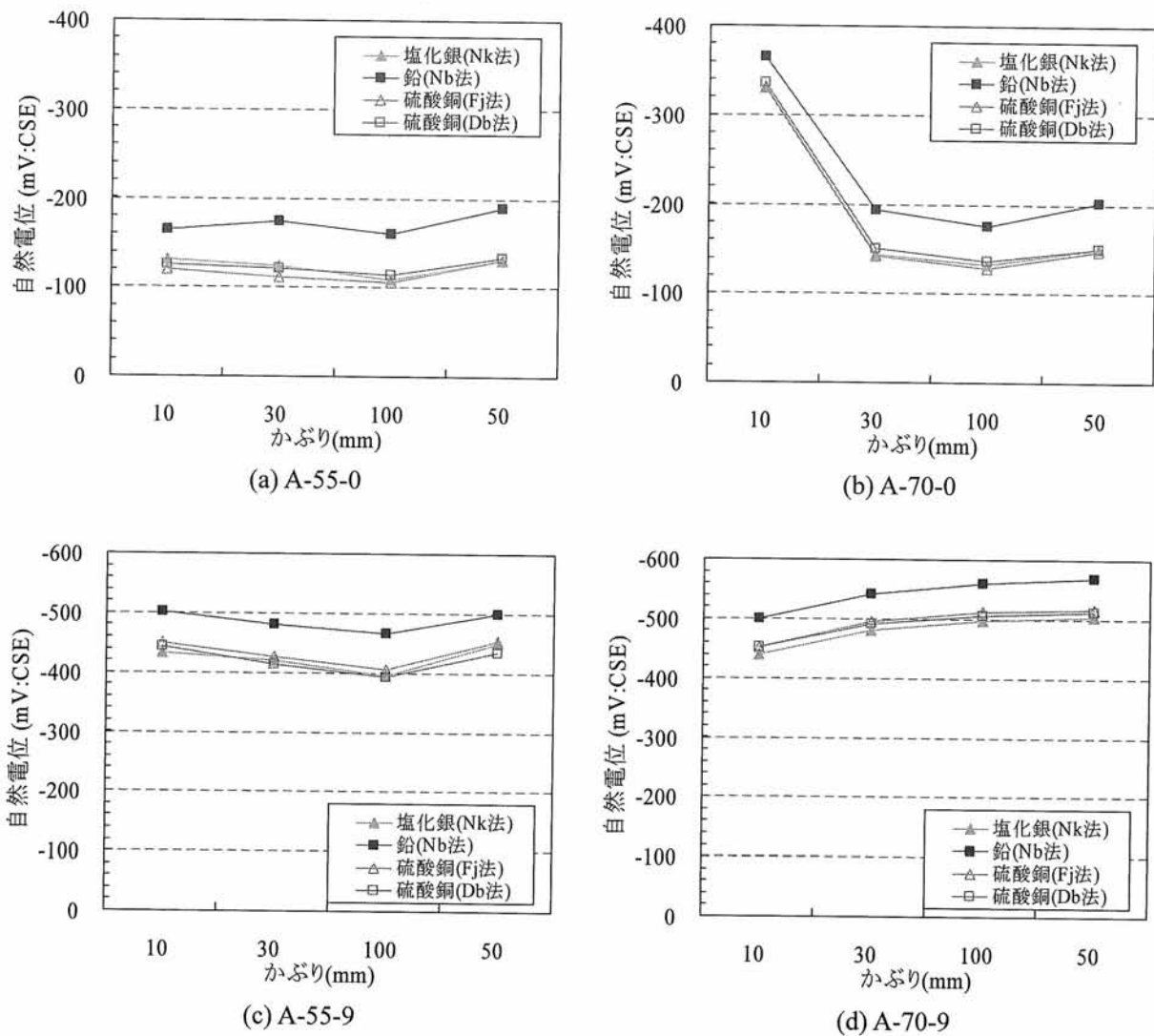


図-1.3.4 複数の照合電極による自然電位(H18 夏)

塩化銀電極と硫酸銅電極の測定値の誤差は、10mV以内に収まった。一方で、鉛電極による測定値は、他の電極と比較して平均で60mVほど卑な値となった。冬季と比べて、夏季の方が、測定誤差が小さくなる傾向にある。

以上の結果から、表-1.3.1の換算式を用いて複数の照合電極の測定値を25°Cの飽和硫酸銅電極の電位に換算した場合、用いる照合電極により平均で60~80mVの測定値の差が生じることがわかる。しかし、各照合電極の測定値は、塩分を多量に含んだ供試体やA-70-0供試体のかぶり10mmの鉄筋で卑な値を示すなど、全体の傾向としてはほぼ同様の結果となっている。このため、用いた照合電極の種類により測定に差が生じるものの、鉄筋腐食の判定を困難にするほどではないと考えられる。

1.3.1.4 測定値の補正方法の検討

ここまでで示した測定結果は、複数の照合電極による測定値を相互比較可能とするために、表-1.3.1の換算式を用いて25°Cの飽和硫酸銅電極の電位に換算したものである。換算式を用いた結果、各照合電極の測定結果に60~80mV程度の差が生じることがわかった。

このため、上記の補正式に加えて、図-1.3.5に示すように、飽和塩化カリウム水溶液内で飽和カロメル電極と各照合電極の電位差を測定し、この電位差を用いて測定値のキャリブレーションを行う方法を検討する。この手順は以下の通りである。

- ① 飽和塩化カリウム水溶液内で、飽和カロメル電極と各照合電極の電位差を測定する。
- ② 測定した電位差の値を用いて、各照合電極の測定値を飽和カロメル電極の値に換算する。
- ③ 表-1.3.1の補正式を用いて、②の値を25°Cの飽和硫酸銅電極の電位に換算する。

なお、ここで使用した飽和カロメル電極は、通常は現場測定用としては使用せず、基準用の照合電極として屋内で適切に保守管理されたものである。

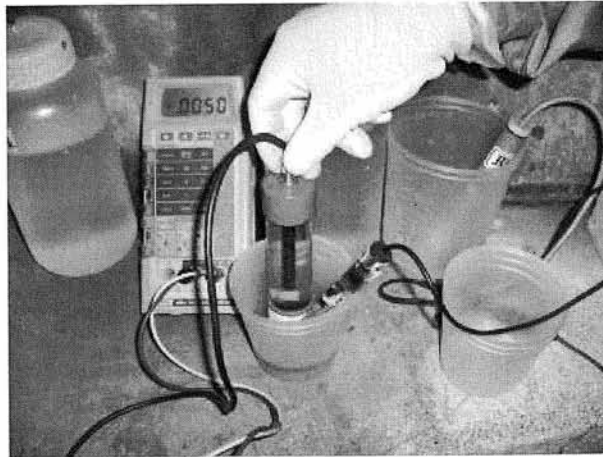
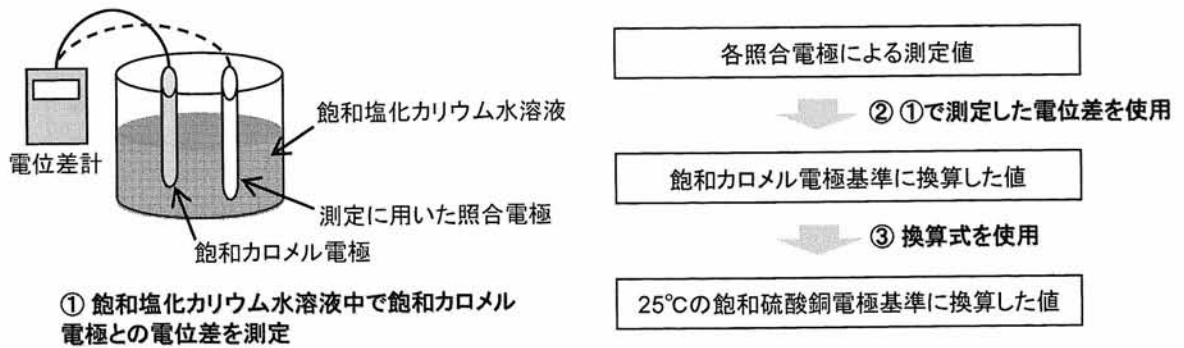


図-1.3.5 キャリブレーションの作業状況

表-1.3.2に、各照合電極と飽和カロメル電極との電位差を示す。ここでは、H18夏の測定時にキャリブレーションを行うために測定した各照合電極と飽和カロメル電極との電位差、換算式より求められる25°Cの各照合電極と飽和カロメル電極との電位差を示している。

ここで示されているように、実際の測定に用いた照合電極の電極電位は、換算式から得られる25°Cの飽和カロメル電極との電位差と比べると8~50mVの差を有している。図-1.3.3、図-1.3.4に示したように、換算式を用いた場合では平均で60~80mVの測定値の差が生じていた。すなわち、換算値を用いた場合の測定値の差には、測定時に避けることのできない測定者間の測定誤差も含まれているが、表-1.3.2に示すように各照合電極の示す電極電位が換算式で想定されている理想状態から乖離していたことに起因する部分も大きいと考えられる。換算式は、25°Cの理想状態における各照合電極の電極電位の値を

もとにして作成されたものであり、ここで提案したキャリブレーション方法は、実際の測定に使用した各照合電極固有の電極電位を飽和カロメル電極との電位差として測定し、これを用いて測定値の補正を行うものである。このため、換算式では考慮することのできない実際に使用した照合電極固有の電極電位のずれを補正することが可能である。

また、ここでは基準用電極として飽和カロメル電極を使用したがる、この電極には水銀化合物が使用されるため、最近ではあまり使用されていない。適切に保守管理された他の種類の照合電極(例えば、飽和塩化銀電極)であれば、原理的に代用は可能である。

なお、表-1.3.2 に示したように、実際の自然電位の測定に使用する照合電極の電極電位は、必ずしも照合電極本来の電極電位と一致するとは言えない。このため、照合電極の保守管理は適切に行う必要があり、定期的に他の照合電極と電極電位を比較するなどして常に状態を確認することが望ましい。照合電極の電極電位のずれが大きい場合などには、照合電極を更新することが必要である。

表-1.3.2 各照合電極の飽和カロメル電極との電位差

名称	照合電極 [記号]	H18夏の測定時の 飽和カロメル電極との電位差	換算式における25°Cの 飽和カロメル電極との電位差
Nk法	飽和塩化銀電極 [Ag/AgCl]	-38	-46
Nh法	鉛電極 [Pb/PbO]	-675	-725
Fj法	飽和硫酸銅電極 [Cu/CuSO ₄]	+56	+74
Db法	飽和硫酸銅電極 [Cu/CuSO ₄]	+58	+74

図-1.3.6 に、表-1.3.2 の数値を用いてキャリブレーションを行う場合の具体例を示す。ここでは、H18夏の飽和塩化銀電極による測定値が-200mV の場合を取り上げている。まず、この測定値を表-1.3.2 の測定時の飽和カロメル電極との電位差-38mV を用いて補正する。すると、換算値として、-238mV が得られる。これは、実際に使用した飽和塩化銀電極の有する電極電位から得られた飽和カロメル電極基準の鉄筋の自然電位である。最終的には、換算式を用いてこれを飽和硫酸銅電極基準に換算するため、-313 $(-238 - 74 - 0.66 \times (26 - 25))$ mV となる。一方、換算式を用いた場合には、-321 $(-200 - 120 - 1.1 \times (26 - 25))$ mV となる。このため、僅か 8mV であるが、換算式を用いた場合とキャリブレーションを用いた場合の補正結果は異なることとなる。

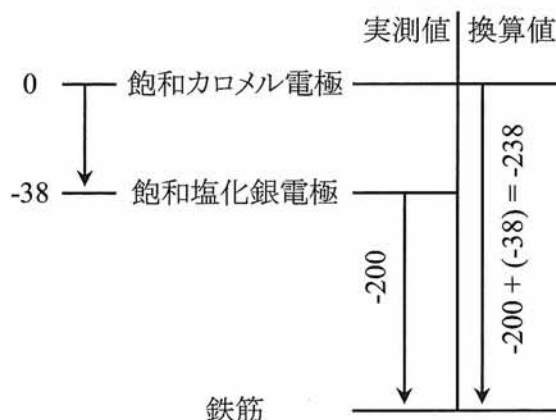


図-1.3.6 キャリブレーションの模式図

図-1.3.7に、H18夏の複数の照合電極による測定結果をキャリブレーションにより25°Cの飽和硫酸銅電極に換算した結果を示す。

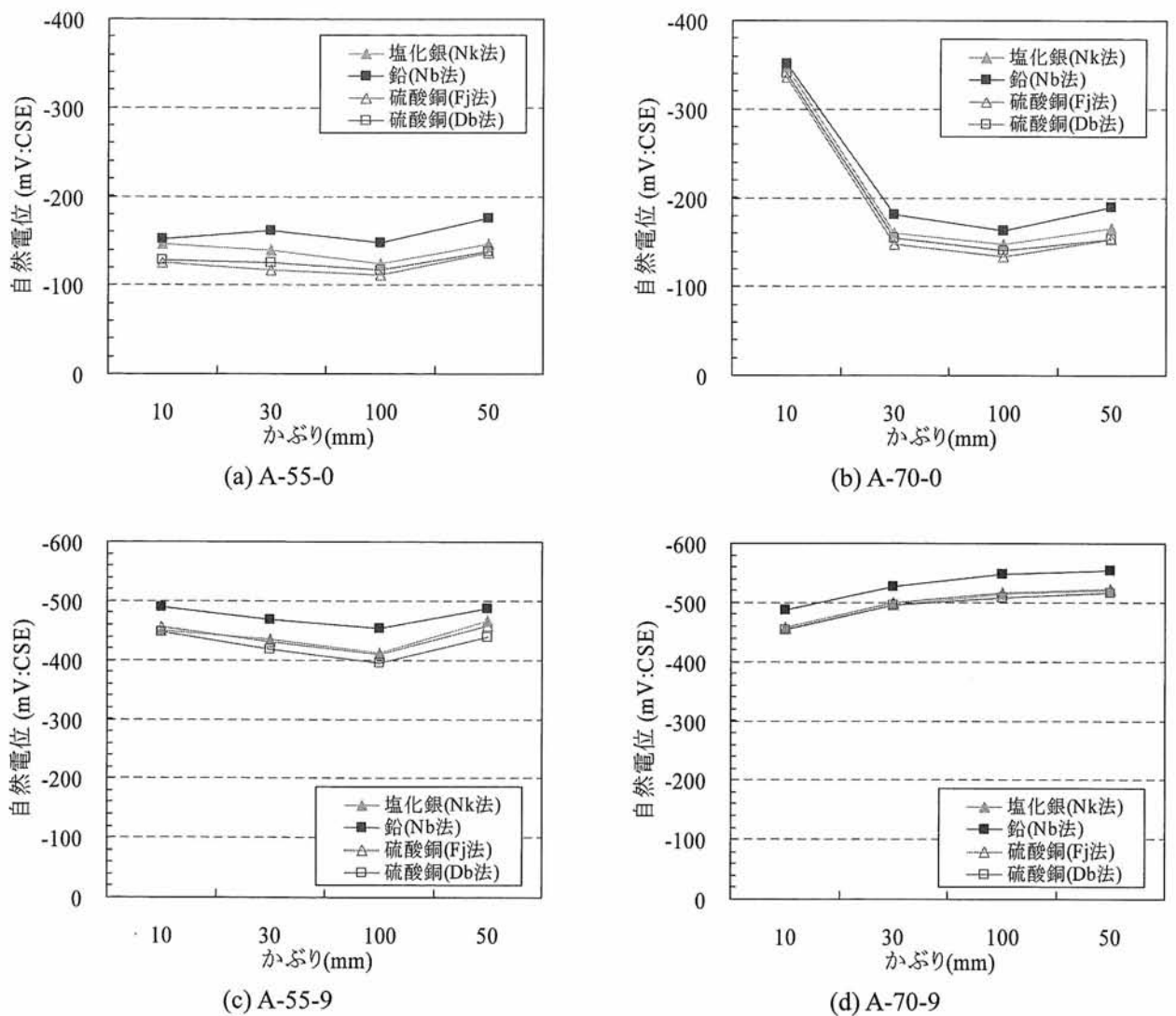


図-1.3.7 キャリブレーションにより換算した自然電位

上記のキャリブレーションを行うと、鉛電極を含めた全照合電極の誤差が平均で約40mVに収まり、換算式を用いた場合と比べて測定値の差が小さくなった。依然として約40mVの測定誤差が生じているものの、ここでも塩化物イオン濃度の高い供試体とA-70-0供試体のかぶり10mmの鉄筋で卑な電位が示されており、鉄筋腐食の判定に影響を与えるほどの差ではないと考えられる。

換算式を用いた場合とキャリブレーションにより換算を行った場合の結果を比較すると、後者の方が測定値の差は小さくなることが示された。しかし、換算式を用いた結果からも鉄筋腐食の傾向は十分に把握することが可能であるため、どちらの方法を用いて測定値の換算を行っても正確な鉄筋腐食度の推定は可能と考えられる。

ただし、照合電極の保守管理は適切に行うことが重要であり、測定前には他の照合電極との電位差を測定するなどして電極電位を確認することが必要である。万一、電極電位にずれが生じている場合には、電極を更新するなどの対応を講じることが必要である。

1.3.2 B 供試体の測定結果

ここでは、B 供試体の測定結果を示す。これらは、湿潤時間 30 分後の飽和塩化銀電極による測定結果であり、換算式を用いて 25°C 飽和硫酸銅電極の電位に換算している。

1.3.2.1 B1 供試体の測定結果

図-1.3.8 に、飽和塩化銀電極による B1 供試体の測定結果を示す。ここでは、夏季と冬季の測定結果を比較するため、H17 冬と H18 夏の測定結果を示す。

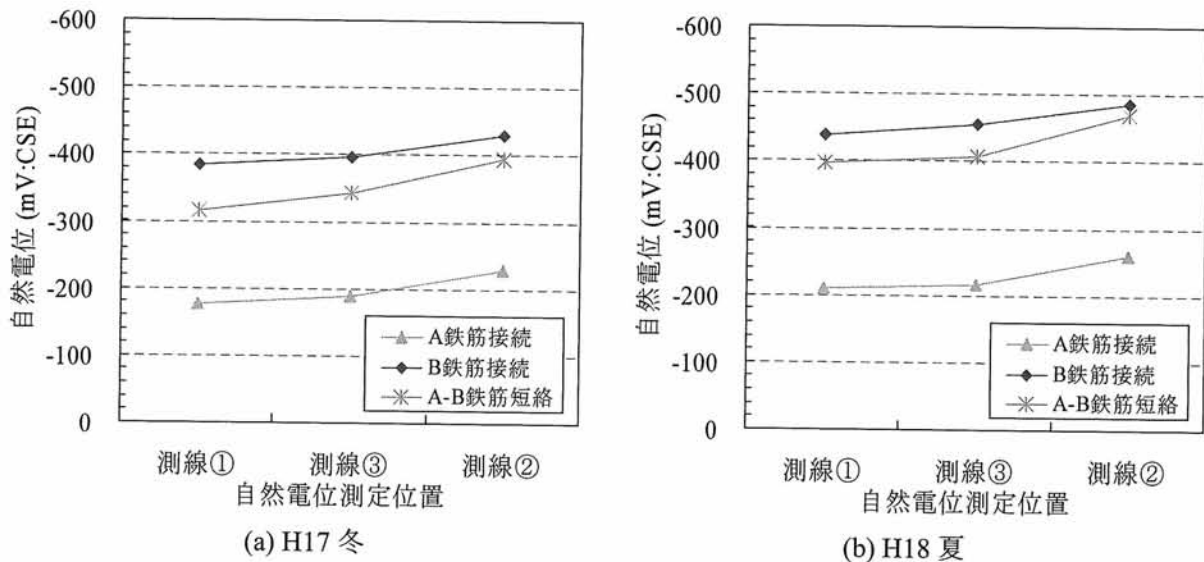


図-1.3.8 B1 供試体の自然電位

A 供試体と同様に、B1 供試体でも、夏季の方が冬季よりも卑な電位が測定された。また、気温や材齢に関わらず、A 鉄筋と B 鉄筋の短絡時には、マクロセル腐食の形成による分極の影響を受け、塩分を練り混ぜていないコンクリート中の A 鉄筋の直上である測線②でも卑な電位が測定された。このため、ある程度の材齢を経た供試体においても、分極により電位がシフトするため、正確な自然電位を測定するためには、なるべく鉄筋の直上で測定を行うことが望ましいと考えられる。

1.3.2.2 B2 供試体の測定結果

図-1.3.9 に、暴露前後の B2 供試体の測定結果を示す。材端からの距離 10~50mm は塩化物イオン濃度 9kg/m^3 の塩分を練り混ぜたコンクリート、材端からの距離 50~90mm は塩分を練り混ぜていないコンクリートが用いられている。このため、B2 供試体では、1 本の鉄筋の両側でマクロセル腐食が形成されている。

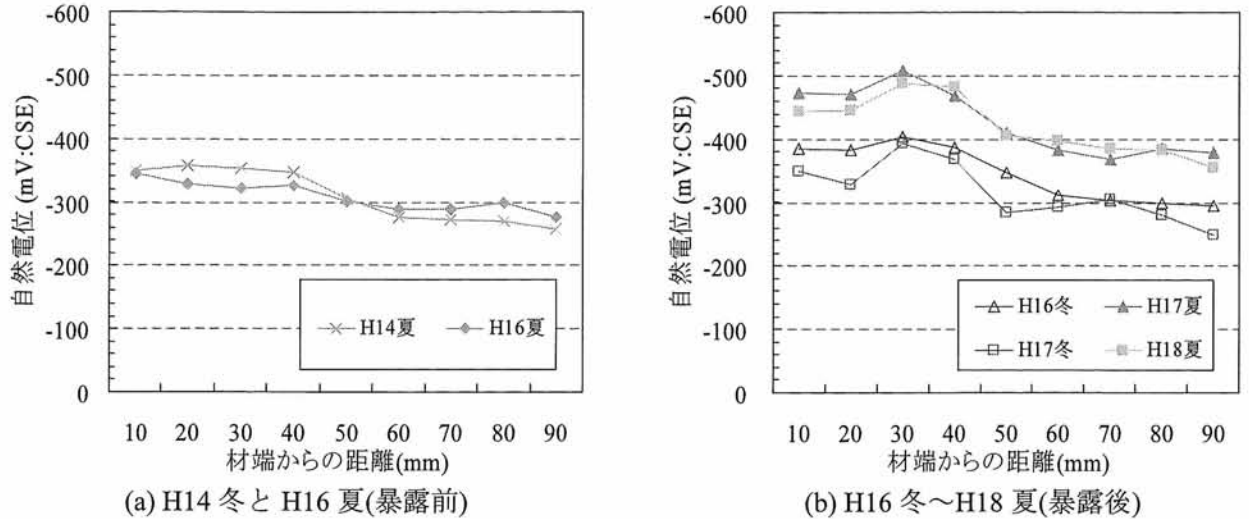


図-1.3.9 B2 供試体の自然電位

供試体の材齢が増えても、マクロセルの形成による分極の影響を受け、塩分を含まない 50~90mm の部分でも -300mV ほどの比較的卑な電位が測定された。また、暴露後では冬季よりも夏季の方が卑な電位を示した。

暴露前後の測定結果を比較すると、室内で測定を行った H14 夏と H16 夏では、塩分を含む部分と含まない部分の測定値の差が小さく、両部分の電位がほぼ水平にプロットされている。一方で、供試体を屋外に暴露した後の H16 冬以降の測定結果では、特に塩分を含む部分において測定値が場所によって異なり、暴露前のように測定値が水平にプロットされていない。これは、供試体を屋外に暴露することにより、同一の塩化物イオン濃度を練り混ぜたコンクリート中に埋設された鉄筋であっても、鉄筋の部位により腐食の進展状況が異なってきたためと考えられる。

1.3.2.3 B3 供試体の測定結果

図-1.3.10 に、B3 供試体の測定結果を示す。ここでは、夏季と冬季の測定結果を比較するため、H17 冬と H18 夏の測定結果を示す。

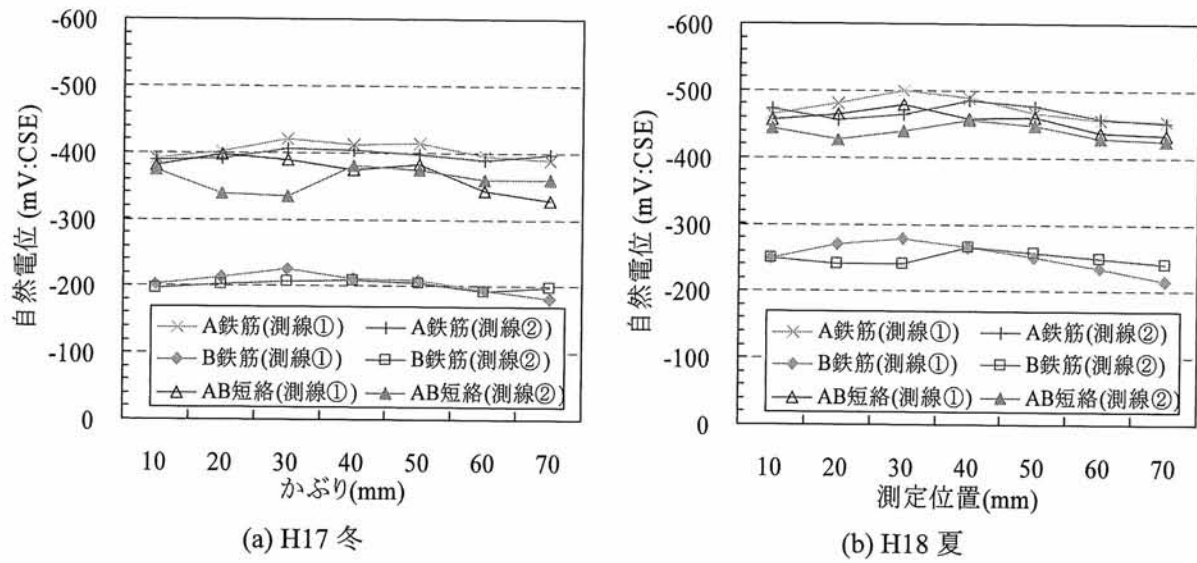


図-1.3.10 B3 供試体の自然電位

これまでと同様に、全体的に、冬季よりも夏季の方が卑な電位を示した。また、気温や材齢に関わらず、A鉄筋とB鉄筋の短絡時には、マクロセル腐食の形成による分極の影響を受け、塩分を含んでいないコンクリート中の鉄筋の直上でも卑な電位が測定された。

1.4 暴露供試体の定期測定結果のまとめ

2002年7月に製作し、2004年11月から暴露試験を実施しているRC供試体の自然電位を複数の照合電極を用いて定期的に測定し、(1)材齢と季節変化が自然電位に与える影響、(2)複数の照合電極を用いた際の測定誤差と補正方法について検討した。今回の実験の範囲内で得られた結果を以下にまとめる。

1.4.1 A 供試体の測定結果

- (1) 塩分を含まない供試体では、材齢が増えるほど貴な電位が測定される傾向にあった。しかし、夏季と冬季の測定値を比較すると、夏季の方が約100mVほど卑な電位が測定されており、これは材齢による変化よりも遙かに大きい値であった。このため、自然電位の測定値には、材齢よりも測定時の気象条件の与える影響の方が大きいと考えられる。
- (2) 湿潤時間を10分間とした場合、電位差計の測定値が不安定となり適切な測定を行うことができなかつた。これを30分間とすると、測定値が安定し、適切に測定を行うことができた。さらに湿潤時間を60分間に延ばすと、30分間の測定値からの変化は平均で20mVほどであった。よって、A供試体の測定結果の範囲内では、自然電位の測定前の湿潤時間として30分間を確保することが必要と考えられる。
- (3) 複数の照合電極を使用した場合、換算式を用いて測定値を25°Cの飽和硫酸銅電極の電位に換算すると、冬季では、飽和塩化銀電極と飽和硫酸銅電極の間に平均で約20mV、鉛電極と他の照合電極の間に平均で約80mVの差が生じていた。一方、夏季の測定では差が縮小し、飽和塩化銀電極と飽和硫酸銅電極の間に平均で約10mV、鉛電極と他の照合電極の間に平均で約60mVの差が生じていた。
- (4) 飽和塩化カリウム水溶液中で飽和カロメル電極と各照合電極の電位差を測定することにより測定値のキャリブレーションを行うと、上記の測定値の差が、平均で約20mV改善することが示された。しかし、どちらの換算方法を用いても測定値の傾向はほぼ同様のものが得られたため、使用した照合電極や換算方法の違いにより鉄筋腐食の推定結果が大きく異なることはないと考えられる。ただし、照合電極の保守管理は適切に行う必要があり、定期的に他の照合電極と電極電位を比較するなどして状態を確認することが必要である。
- (5) 自然電位は測定時の気温や使用した照合電極の種類の影響を受けるが、得られた測定値から読みとられる鉄筋腐食の傾向はほぼ同様であり、鉄筋腐食を概ね妥当に推定することができると考えられる。ただし、自然電位の測定結果から鉄筋の腐食の有無を判定する際には、測定値の差異を発生させる原因を十分に踏まえておくことが重要である。

1.4.2 B 供試体の測定結果

- (1) ある程度の材齢を経た供試体においても、マクロセル腐食の形成に伴う分極により電位がシフトするため、正確な自然電位を測定するためには、なるべく鉄筋の直上で測定を行うことが望ましいと考えられる。
- (2) 同一の塩化物イオン濃度を練り混ぜたコンクリート中に埋設された鉄筋であっても、一定期間の暴露試験を行うと、鉄筋の部位により腐食の進展状況が異なってくるため、自然電位の測定値に差が生じると考えられる。

2. 暴露供試体の長期継続測定

2.1 実験の目的

これまでに示した実構造物と暴露供試体の測定結果では、測定時の気象条件等により、自然電位が変動することを確認した。これらの結果によれば、冬季よりも夏季の方が卑な自然電位が測定される傾向にあった。

ここでは、同一供試体の自然電位を概ね週2度の頻度で長期間にわたって測定し、自然電位の測定値の変動とその発生原因について検討することとした。なお、自然電位の測定は、2006年5月から2007年1月まで約9ヶ月間継続した。

2.2 実験の概要

2.2.1 測定概要

照合電極は、飽和硫酸銅電極を用いた。測定前の供試体の湿潤時間は30分間とし、ウェスで供試体表面を覆い湿潤させた。測定は全て同一技術者によって行われ、午前7時から午前12時の間に開始・完了した。自然電位の測定結果とともに、測定時の気温、相対湿度、測定4時間前からの降雨量を記録した。雨天の場合は、供試体表面が既に濡れた状態で測定を行った。

2.2 供試体の概要

測定に使用した供試体は、図-1.2.4に示したA供試体と図-2.2.1~2.2.4に示す塩分供給方法の異なる供試体の2種類である。A供試体は、A-50-0、A-70-0、A-50-9、A-70-9の4体である。

塩分供給方法の異なる供試体は、コンクリート練り混ぜ時に塩分を加えた供試体とコンクリートの打設・養生後に塩分を別途供給した供試体であり、以下の(1)~(4)の4種類とした。これらは、寸法10×10×40cm、コンクリートの水セメント比55%の供試体である。また、径13mmのみがき丸鋼を供試体中心に埋設したため、かぶりは43.5mmである。なお、自然電位測定後に、塩分供給方法の異なる供試体は解体し、鉄筋の腐食状況を目視観察した。

(1) 初期塩練混型：打設時に初期塩化物イオン濃度として0, 0.6, 1.2, 2.5, 5kg/m³を練混ぜた。打設・養生後、約10ヶ月間室内に安置した後に屋外暴露を開始し、自然電位を測定した。

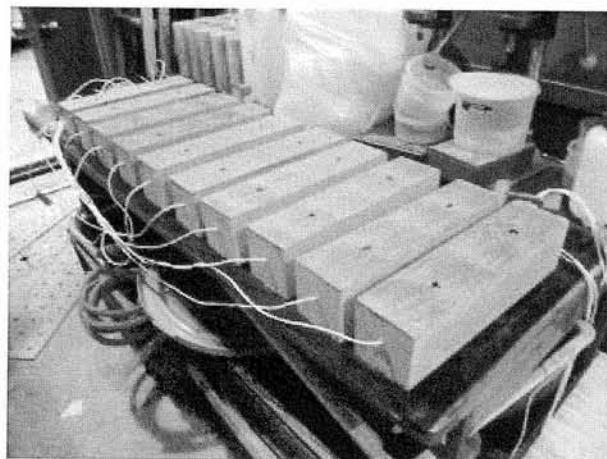


図-2.2.1 初期塩練混型の供試体

(2) プール型： 供試体上面に濃度 10%の塩水を溜め、隔週で乾燥と湿潤を繰り返した。

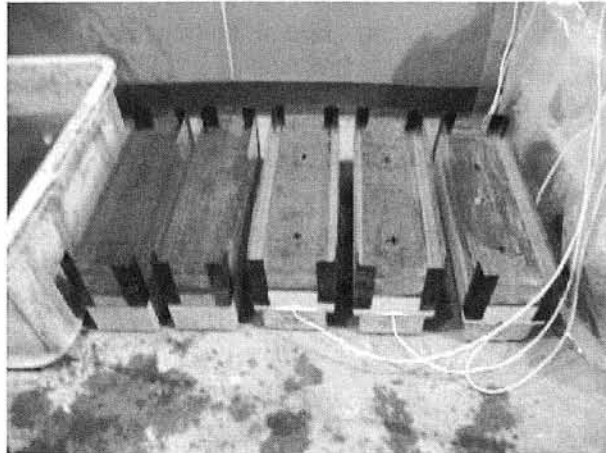


図-2.2.2 プール型の供試体

(3) 浸漬型： 濃度 10%の塩水に供試体を浸漬し、隔週で乾燥と湿潤を繰り返した。



図-2.2.3 浸漬型の供試体

(4) 噴霧型： 週に 5 日のペースで、霧吹きを使用して濃度 10%の塩水を噴霧した。

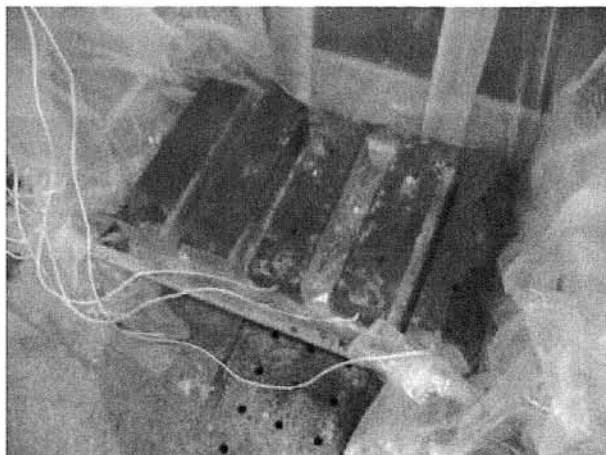


図-2.2.4 噴霧型の供試体

なお、(2)~(4)の供試体は、約 10 ヶ月にわたり塩分の供給を行った。その後、屋外に暴露し、自然電位の測定を開始した。

2.3 測定結果と考察

図-2.3.1～2.3.4 に、A 供試体の自然電位の測定結果を示す。A 供試体は、2006 年 5 月中旬に測定を開始し、2007 年 1 月中旬まで(測定開始日から累積で 242 日目まで)測定を継続した。グラフ中の破線は、測定 4 時間以内に 10 分間雨量で 0.5mm 以上の降雨があったことを示している。

A-55-0 供試体は、かぶりの大小の関わらず 4 本の鉄筋の測定値の差は最大で約 80mV であり、平均すると約 30mV の範囲に収まっていた。これに対して、A-70-0, A-55-9, A-70-9 供試体では、かぶり 10mm の鉄筋の自然電位の変動が大きく、4 本の鉄筋の測定値の差を平均すると A-55-9 供試体で約 90mV, A-70-0 供試体で約 190mV, A-70-9 供試体で約 90mV となり、A-50-9 供試体よりも同一供試体内における鉄筋の測定値の差が大きくなった。特に A-70-0 供試体で測定値の差が大きくなった原因は、かぶり 10mm の鉄筋がコンクリートの中性化によって腐食している可能性が高く、他の鉄筋よりも卑な自然電位が測定されたためと推察される。

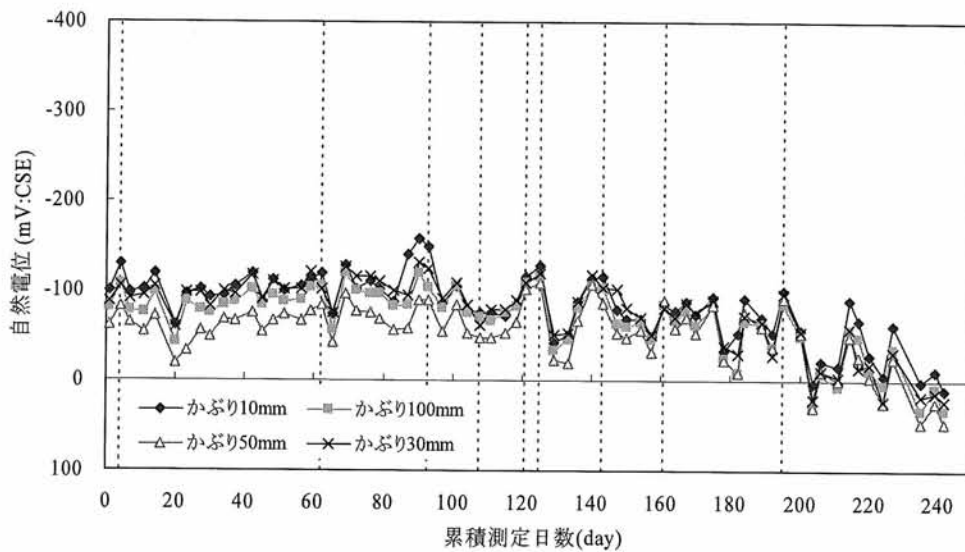


図-2.3.1 A-55-0 の測定結果

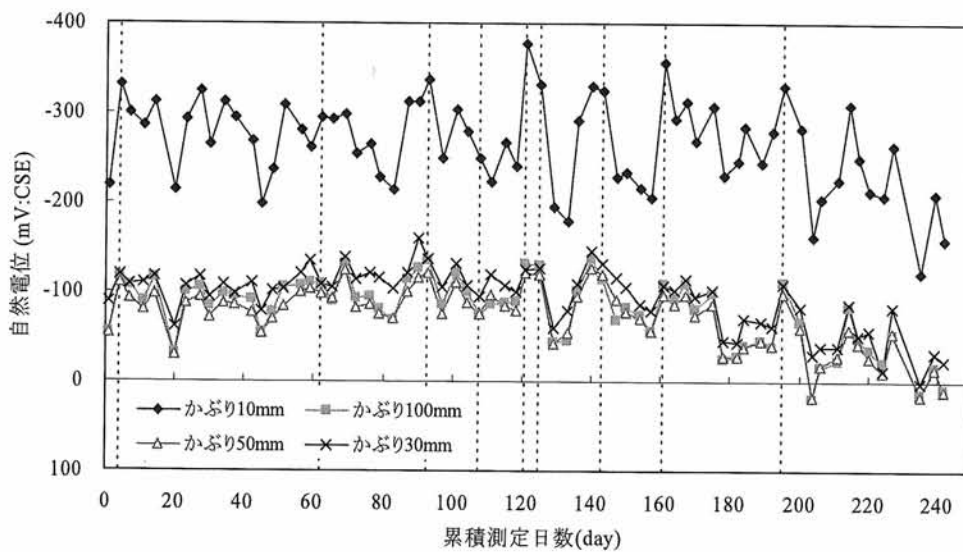


図-2.3.2 A-70-0 の測定結果

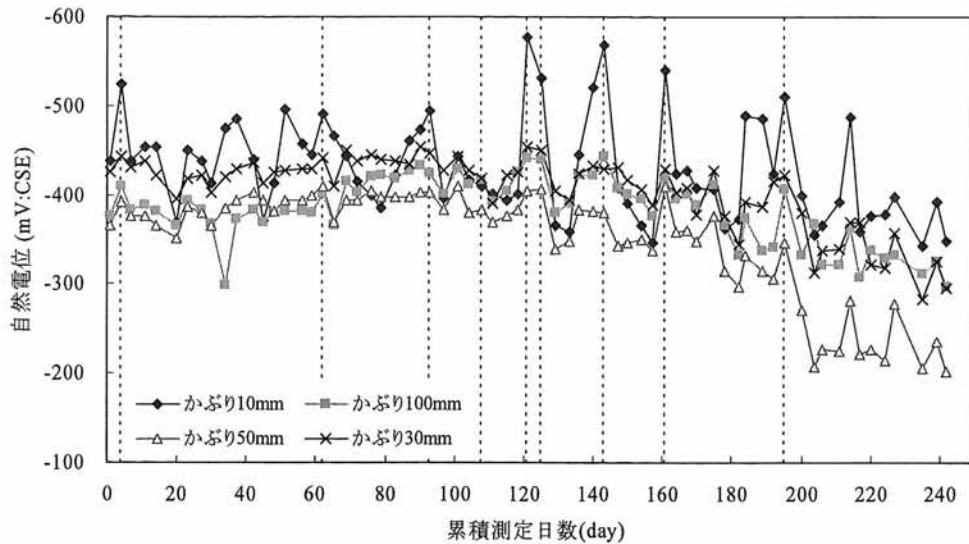


図-2.3.3 A-55-9 の測定結果

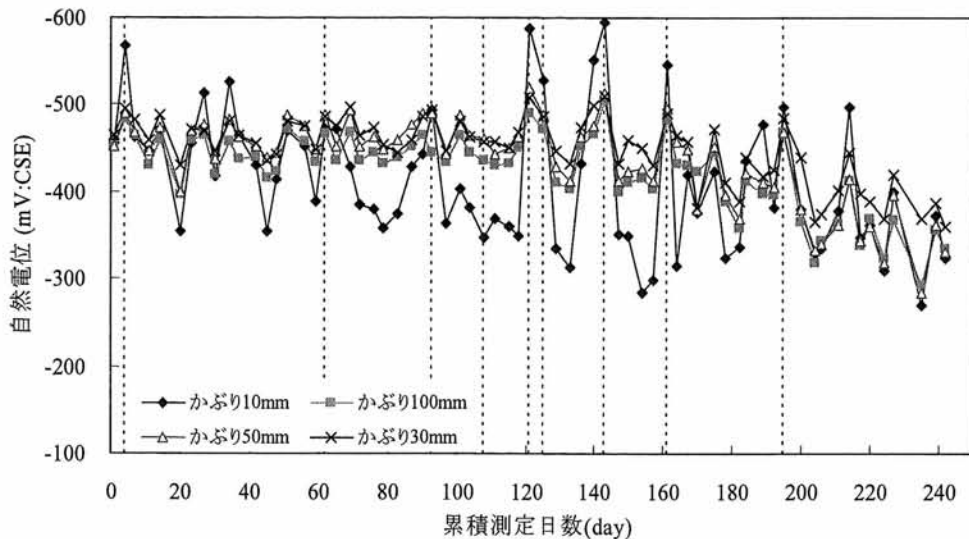


図-2.3.4 A-70-9 の測定結果

このように、かぶりの違いにより、同一供試体内における鉄筋の自然電位の差はかなり大きくなってはいたが、各鉄筋の自然電位の変動は概ね等しい傾向を示しており、これには測定時の気温や相対湿度、降雨の有無による影響が大きいと考えられる。

図-2.3.5 に、測定時の気温の変化を示す。多少のばらつきはあるが、測定開始日から累積測定日数約 90 日まで気温は増加し、その後は気温が低下する傾向が確認できる。これは、測定を 2006 年 5 月に開始し、その後、夏季を経て 2007 年 1 月まで実施したためである。図-2.3.1~2.3.4 の測定結果では、測定値に多少のばらつきがあるものの、累積測定日数がおよそ 200 日を超えた辺りで初期と比較して自然電位が約 100mV 貴な方向へ変化する傾向にあった。これは、図-2.3.5 において、測定時の気温が約 10℃ 以下となった時期と概ね一致した。すなわち、測定時の気温が約 10℃ 以下となる冬季では、鉄筋の腐食反応の速度が低下し腐食性状が夏季と大きく異なったため、夏季と比較して貴な自然電位が測定されたと考えられる。

また、図-2.3.6 には、測定時の相対湿度の変化を示す。測定時の相対湿度には、測定期間全体を通じて大きな変動があり、降雨があった測定日に特に大きくなる傾向にある。降雨のない場合にも相対湿度の高い測定日があるが、これは測定日の前日に降雨があったことや測定日の天候の影響を受けたことが

原因と考えられる。また、気温のような季節間の差は小さく、冬季の方が小さくなる傾向にあることが僅かに認められる。図-2.3.1~2.3.4の自然電位の測定結果では、例えば、累積測定日数4, 62, 93, 108, 121, 143, 161, 195日で、各供試体とも卑な測定値が得られる傾向にあった。これは、各グラフ中に破線で示したように、測定時および測定4時間以内に降雨のあった測定日と一致する。今回の測定に用いた供試体は屋外に暴露しており、降雨のあった場合には供試体表面が既に濡れた状態で測定を開始した。従って、これらの測定日では、降雨により供試体表面もしくはコンクリートの含水状態が降雨のない測定日と大きく異なったこと、相対湿度の変化により鉄筋の腐食環境が異なったことなどから、ここでは他と比べて卑な自然電位が測定されたと考えられる。また、降雨のない測定日にも自然電位が大きく変動し卑な値が得られているが、これは図-2.3.6において相対湿度の高い測定日と概ね一致する。すなわち、降雨により供試体表面が濡れている場合や相対湿度の高い場合には、卑な自然電位が測定されたと考えられる。

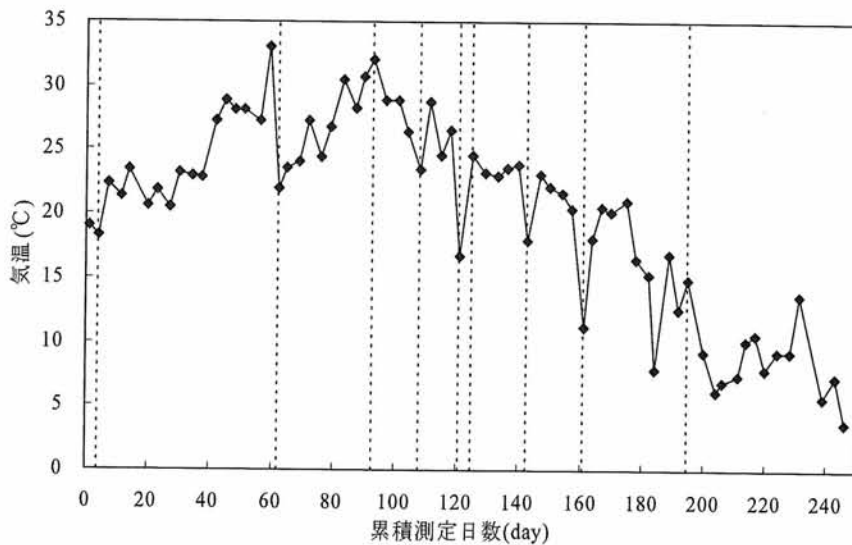


図-2.3.5 測定時の気温の変化

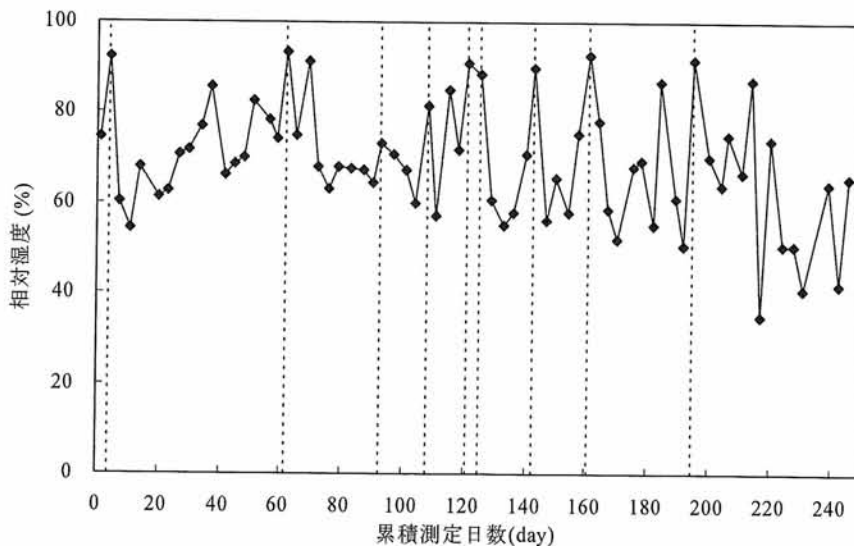


図-2.3.6 測定時の相対湿度の変化

図-2.3.7, 2.3.8 に、塩分供給方法の異なる供試体の測定結果を示す。ここでは、2006年6月中旬に測定を開始し、同年12月中旬まで測定を継続した。この期間は、A 供試体の累積測定日数 37~220 日目と一致する。グラフ中の破線は、測定4時間以内に10分間雨量で0.5mm以上の降雨があったことを示している。

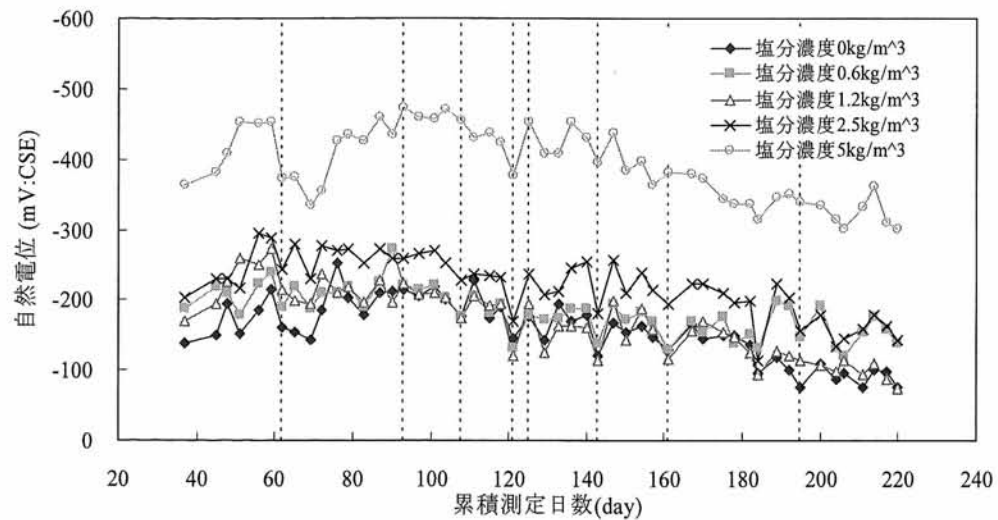


図-2.3.7 初期塩飽混型供試体の測定結果

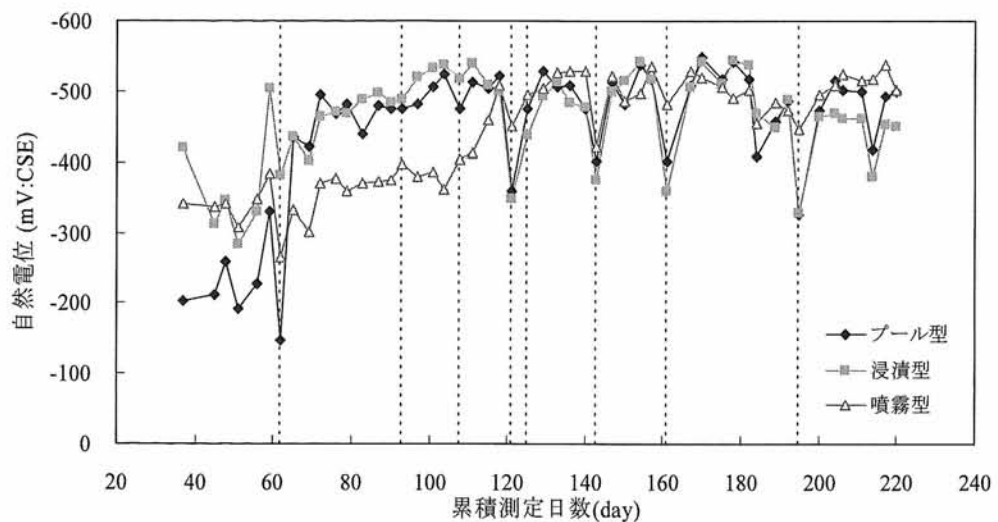


図-2.3.8 プール型、浸漬型、噴霧型供試体の測定結果

初期塩飽混型の供試体では、塩化物イオン濃度が 5kg/m^3 の供試体で最も卑な自然電位が測定され、その他の供試体は概ね $-100\sim-300\text{mV}$ の貴な自然電位が測定された。また、A 供試体の測定結果と同様に、測定時の気温が低下するに伴って自然電位が貴な方向へと変化したことが確認できる。

一方、プール型、浸漬型、噴霧型の供試体では、測定値の変動が初期塩飽混型の供試体よりも大きいことが特徴的である。例えば、プール型の供試体は、測定開始直後は、 -200mV 程度の貴な自然電位を示していたにも関わらず、暴露期間が長くなるに伴い -500mV 程度まで自然電位が卑化した。また、降雨時の自然電位の変動も初期塩飽混型の供試体よりも大きくなった。

これら3種の供試体では、累積測定日数200日以降の気温の低下した冬季においても自然電位が貴な方向に変化することはなかった。この原因は、累積測定日数120日以降では、自然電位が -500mV まで卑化していることからこれらの供試体中の鉄筋が厳しい腐食環境にあり、冬季に気温が低下しても鉄

筋の腐食性状が変化しなかったためと考えられる。また、特に累積測定日数 120 日以降では、各供試体の自然電位がほぼ同程度の値を示し、供試体間のばらつきが小さくなった。これは、暴露開始当初では塩分の供給方法の違いにより塩分の浸透性状が供試体間で異なったものの、一定の暴露期間を経た後ではコンクリート打設後に供給した塩分が鉄筋位置まで浸透し、鉄筋周辺の腐食環境が概ね等しくなったためと考えられる。

また、プール型、浸漬型、噴霧型の供試体では、降雨があった測定日の自然電位は、他の測定日と比較して大幅に貴な自然電位を示した。これは先に示した A 供試体とは逆の傾向であり、現時点でこの原因は明確ではない。いずれにしても、自然電位の測定値は、降雨による供試体の湿潤状態や測定時の相対湿度の影響を強く受けたことが確認できる。

塩分供給方法の異なる供試体は、累積測定日数 220 日の自然電位の測定後に解体し、鉄筋の腐食状況を目視観察した。図-2.3.9 に、鉄筋の腐食状況の目視観察結果を示す。ここでは、鉄筋表面を 5mm×5mm のグリッドに分割し、各グリッドの腐食面積の割合で腐食状況を表示している。初期塩化物イオン濃度が 0~1.2kg/m³ の供試体では、鉄筋表面に腐食は生じていなかったため、ここでは示していない。

初期塩化物イオン濃度が 2.5kg/m³ の供試体では、一部でごく表面的な腐食が確認された。また、初期塩化物イオン濃度が 5kg/m³ の供試体とプール型、浸漬型、噴霧型の 3 体の供試体では一部で軽微な断面欠損を伴う腐食が発生していた。これら 4 体の供試体の自然電位は、測定時の気温や相対湿度、降雨などにより変動したが、概ね-300~-600mV と他の供試体と比較して卑な値となり、鉄筋の腐食環境に応じた測定値が得られたと考えられる。

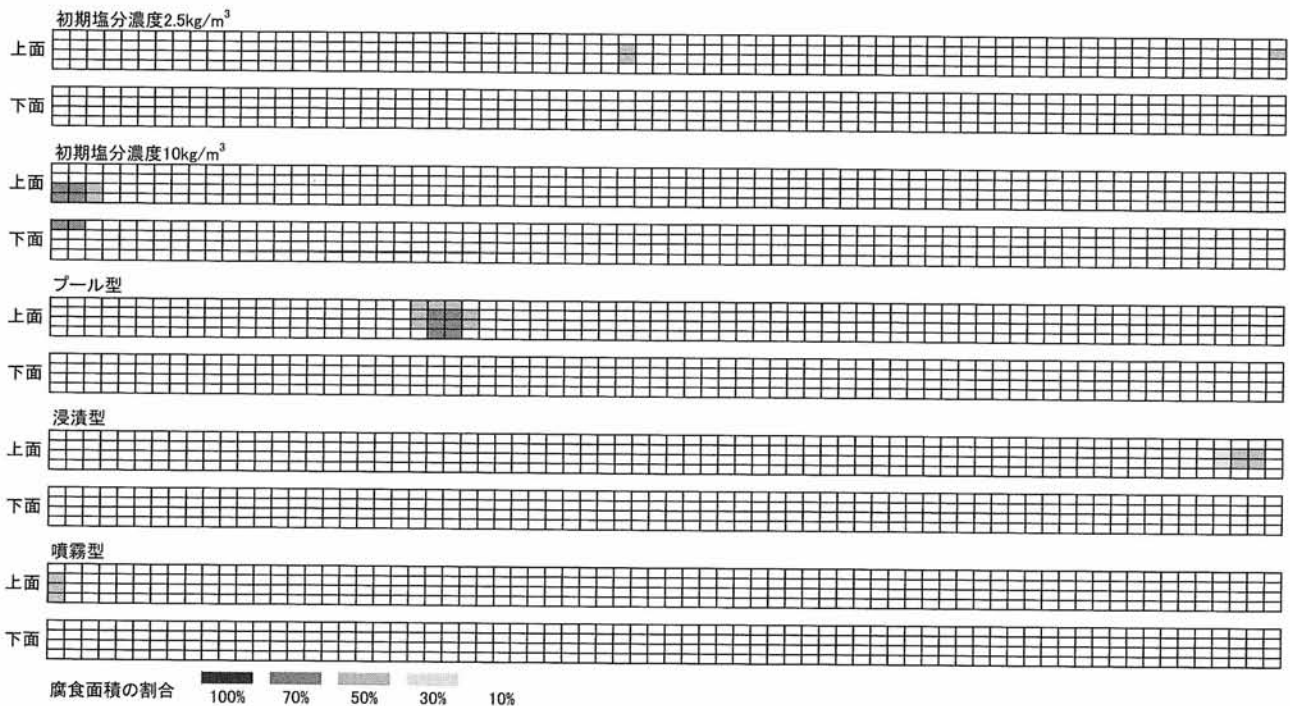


図-2.3.9 鉄筋の腐食状況

なお、ここで用いた塩分供給方法の異なる供試体は、今回の調査で解体したもの以外に各 1 体を製作しており、引き続き暴露試験と自然電位の測定を継続する予定である。

2.4 暴露供試体の長期継続測定結果のまとめ

土木研究所内に暴露している水セメント比、塩化物イオン濃度、かぶりの異なる供試体と、塩化物イオン濃度の供給方法の異なる供試体の自然電位を約9ヶ月間にわたって測定し、自然電位の測定値の変動の範囲とその発生原因について検討した。今回の実験の範囲内で得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 自然電位の測定値の変動は、水セメント比あるいは塩化物イオン濃度の大きい供試体のかぶりの小さい鉄筋で大きくなった。ただし、水セメント比50%で初期塩化物イオン濃度を含まない供試体では、かぶりの大小に関わらず、概ね等しい傾向の自然電位が測定された。また、塩化物イオンをコンクリート練混ぜ時に与えた場合と打設・養生後に与えた場合では、後者の方が自然電位の変動が大きくなった。
- (2) 自然電位の測定値の変動と気温の関係を精査すると、測定値にばらつきがあるものの、気温の低い冬季で自然電位が約100mV 貴な方向に変化する傾向にあった。
- (3) 相対湿度の高い場合や降雨時の測定では、自然電位の変動が大きくなることを確認した。ところが、降雨時の自然電位の測定値は、A 供試体では卑な方向に、塩分供給方法の異なる供試体では貴な方向に変化し、現時点でこの原因は明確ではない。
- (4) 初期塩化物イオン濃度 5kg/m^3 の供試体とプール型、浸漬型、噴霧型の供試体の計4体の自然電位は、若干のばらつきがあるものの、測定期間全体を通じて他の初期塩化物イオン濃度 $0\sim 2.5\text{kg/m}^3$ の供試体よりも卑な値となった。これらの供試体を解体して鉄筋の腐食状態を行うと、前者4体の供試体では軽微な断面欠損を伴う腐食が発生していた。従って、自然電位の測定値は測定時の気温や相対湿度などの影響を受けて大きく変動するが、相対比較を行うことで鉄筋の腐食状況を推定することは可能と考えられる。

3. 気温の変化と自然電位の関係

3.1 実験の目的

これまでに示した実構造物と暴露供試体の測定結果では、気温の高い夏季で冬季よりも卑な自然電位が測定されることを確認した。この原因は、夏季の気温の上昇により鉄筋の腐食反応が活性化し、これを反映して卑な自然電位が測定されたためと考えられた。しかしながら、鉄筋の腐食反応だけでなく、測定に用いた照合電極の電極電位も測定時の気温の影響を受けて変動することが予想される。すなわち、自然電位の測定結果を正しく解釈するためには、自然電位の変動が、鉄筋の腐食反応の変化あるいは照合電極の電極電位の変化のどちらに起因するものかを明らかにしておくことが必要である。

そこで、ここでは、熱電対を埋設した供試体の温度を恒温恒湿槽内で制御し、測定時の気温およびコンクリートの温度と、自然電位の測定値の関係について検討する。

3.2 実験の概要

3.2.1 供試体の概要

図-3.2.1, 2 に、供試体の概要を示す。供試体は、寸法 $10 \times 10 \times 40\text{cm}$ 、水セメント比 55% とし、塩化物イオン濃度 0, 1.2, 5kg/m^3 となるように打設時に所定の塩分を練混ぜたものを用いた。SD295D13 異形鉄筋を供試体中心に埋設したため、かぶりは 43.5mm とした。また、熱電対をコンクリート表面(かぶり 10mm の位置)、鉄筋上面から 10mm の位置、鉄筋下面から 10mm の位置の 3ヶ所に埋設し、データロガーと接続して供試体内部のコンクリートの温度をモニタリングできるようにした。

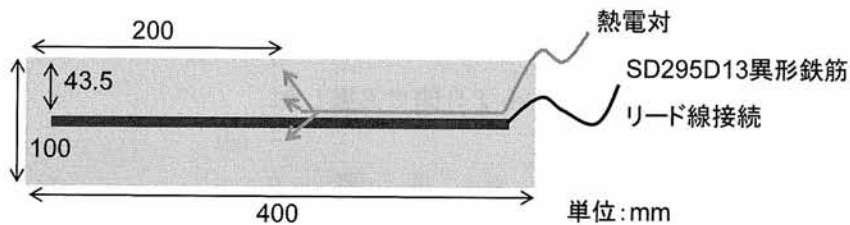
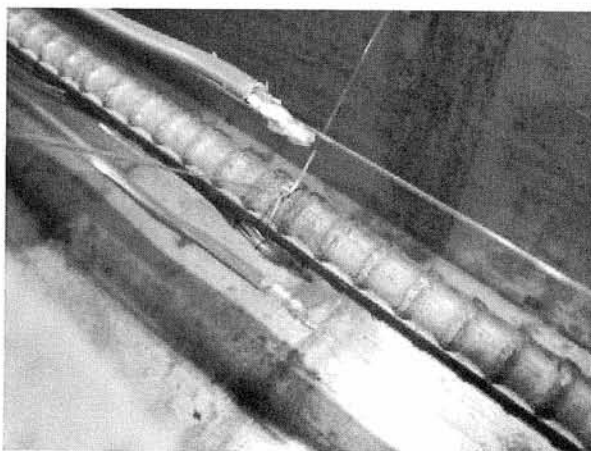
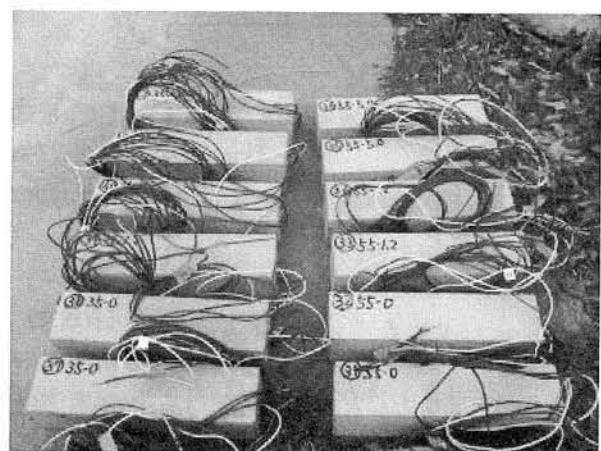


図-3.2.1 熱電対を埋設した供試体の概要



(a) 熱電対の配置状況



(b) 供試体の状況

図-3.2.2 供試体の状況

3.2.2 測定概要

自然電位は、2本の飽和塩化銀電極(電極A, B)を用いてコンクリート表面3点で測定し、これを平均した。測定は、供試体の温度を変化させないケース①と、供試体の温度を変化させるケース②の2つのケースを実施した。図-3.2.3に、実験手順の概要を示す。

(1) ケース①： 供試体の温度を変化させない場合

ケース①の目的は、供試体の温度は変化させず、照合電極の温度を変化させた場合の自然電位の測定結果を得ることである。

まず、恒温恒湿槽内に電極Aのみを入れ、湿度一定(60%RH)のまま恒温恒湿槽内の温度が目標温度となるようにした。最初の目標温度は、10°Cとした。恒温恒湿槽内の温度が目標温度に達した後、温度を一定に保った状態で約1時間安置した。この間、供試体と電極Bは実験室内に安置し、データロガーを介して供試体内部のコンクリートの温度を測定し、実験室の温度(約20°C)±3°Cに収まっていることを確認した。その後、供試体表面を約15分間湿潤させ、電極Aと電極Bを用いて自然電位を測定した。自然電位の測定終了後、恒温恒湿槽の目標温度を変えて同様の作業を繰り返した。目標温度は、10~50°Cの範囲で10°Cずつ上昇させることとした。

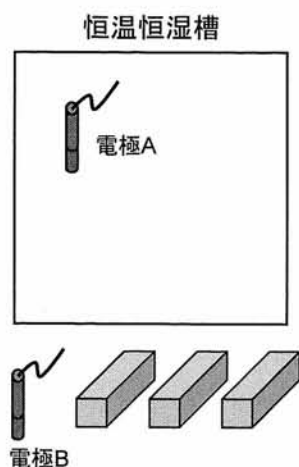
(2) ケース②： 供試体の温度を変化させる場合

ケース②の目的は、供試体の温度を変化させた場合に、温度を変化させていない照合電極による自然電位の測定結果を得ることである。

まず、恒温恒湿槽内に供試体と電極Aを入れ、湿度一定(60%RH)のまま温度を目標温度となるようにした。最初の目標温度は、ケース①と等しく10°Cとした。恒温恒湿槽内の温度が目標温度に達した後、温度を一定に保った状態で約1時間安置した。その後、データロガーを介して供試体内部のコンクリートの温度を測定し、目標温度±3°Cに収まっていることを確認した。次に、供試体表面を約15分間湿潤させ、電極Aと電極Bを用いて自然電位を測定した。自然電位の測定終了後、恒温恒湿槽の目標温度を変えて同様の作業を繰り返した。目標温度は、10~50°Cの範囲で10°Cずつ上昇させることとした。

なお、ケース①とケース②の実験は、連続する2日間で実施した。

ケース① 供試体の温度を変化させない



ケース② 供試体の温度を変化させる

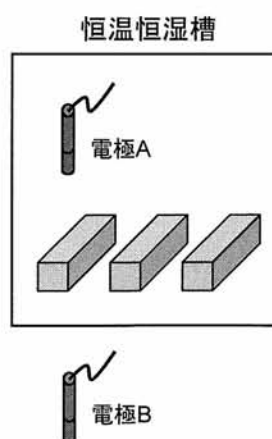


図-3.2.3 実験手順の概要

3.3 測定結果と考察

図-3.3.1~3 に、自然電位の測定結果を供試体ごとに示す。自然電位の値は、飽和塩化銀電極による測定値をそのまま使用しており、換算式を用いた補正は行っていない。

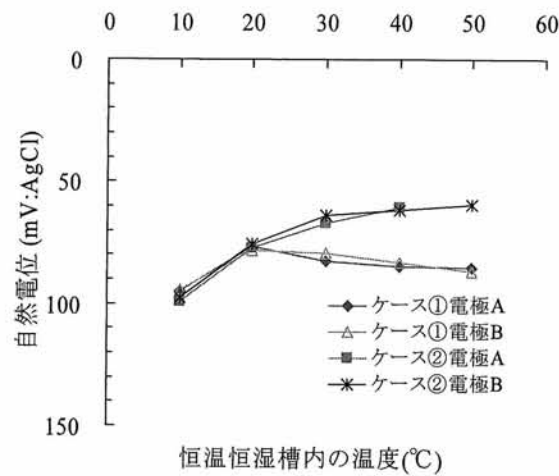


図-3.3.1 塩化物イオン濃度 0kg/m^3 の供試体の自然電位

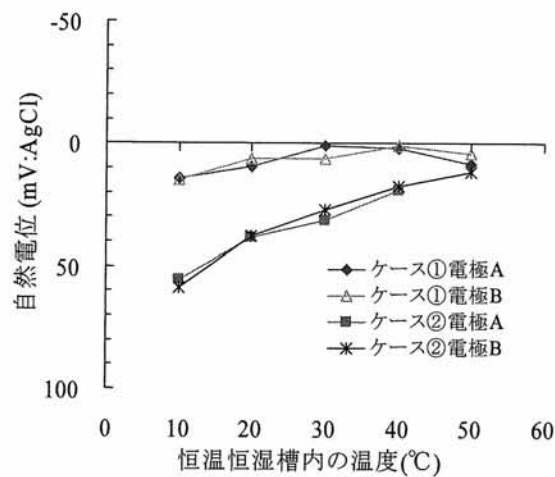


図-3.3.2 塩化物イオン濃度 1.2kg/m^3 の供試体の自然電位

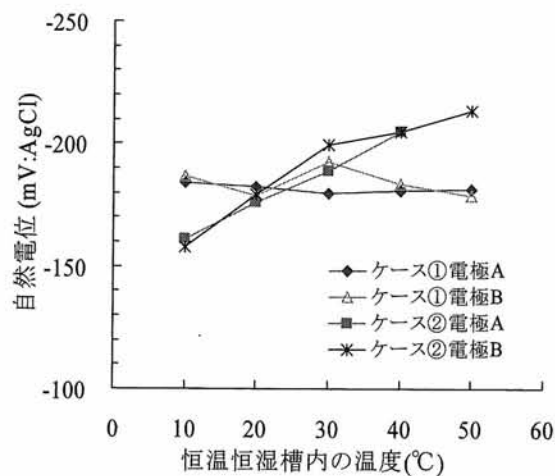


図-3.3.3 塩化物イオン濃度 5kg/m^3 の供試体の自然電位

ケース①とケース②を比較すると、ケース①の自然電位は恒温恒湿槽内の温度変化に関わらずほぼ水平に測定値が推移したが、ケース②では温度の上昇に伴い卑な方向に変化した。ケース①では供試体の温度を一定とし、ケース②では供試体の温度を変化させていた。このため、測定時の気温の違いによって生じる自然電位の変動は、コンクリートの温度変化とこれに伴う鉄筋の腐食環境の変化による部分が大きいと考えられる。

また、両ケースにおいて、電極 A と電極 B の自然電位はほぼ等しく、この差は約 10mV 以内に収まっていた。照合電極の温度変化により生じる測定値の差は 10mV 程度しかなく、供試体の温度変化による電位の変動に比べて小さいことがわかる。先に示した測定値の換算式には、温度補正項が含まれている。しかし、これは各照合電極に用いられている物質の示す電位の温度依存性を実験室内で厳格に行われた電気化学測定から得たものであり、今回の測定の範囲では飽和塩化銀電極の測定値を最大で 20mV 程度補正することとなる。しかし、ここで検討しているようなコンクリート内部の鉄筋の腐食状態の推定を主目的とした自然電位の測定では、実験室内のような理想的な状況とは異なり、測定者間の測定誤差やコンクリートとの接触面の状態など様々な要因によって測定値が変動する。すなわち、今回の測定で電極 A と電極 B の測定値の差が 10mV 以内であったことは、照合電極の温度変化によって生じる自然電位の変化がこれらの要因によって打ち消される程度のものでしかないことを意味している。

以上の結果から、実構造物と暴露供試体において夏季に卑な自然電位が測定された原因としては、測定時の気温の上昇によりコンクリート内部の温度も上昇し、鉄筋の腐食環境がより厳しいものへと変化したことが最も大きいものと考えられる。

4. 塩化物イオン濃度の差に起因するマクロセル腐食と自然電位の関係

4.1 実験の目的

第I部で述べたように、ASTM C 876やBS 7361の腐食判定基準は、鉄筋の腐食確率あるいは腐食の可能性としてコンクリート内部の鉄筋の腐食状態を推定するものであった。これらの腐食判定基準では、 $-200\sim-350\text{mV:CSE}$ の自然電位が測定された場合に、「不確定」あるいは「腐食の可能性50%」と判定されるため、実質的には評価を避けた形となっていた。この原因は、これまでの実構造物や供試体の測定結果でも確認されたように、測定時の気温、相対湿度、湿潤時間や照合電極の種類によって自然電位の測定値が大きく変動することなどを考慮し、誤った評価を行うことを避けるためと考えられる。

一方で、こうした測定時の条件以外に、鉄筋本来の自然電位が測定されないケースとして、マクロセル腐食の影響が指摘されている。マクロセル腐食は、鉄筋の腐食反応であるアノード反応とカソード反応が離れた位置で生じるものであり、ひび割れや打ち継ぎ目などの欠陥部もしくは鉄筋周辺の塩化物イオン濃度が不均一となった場合に形成することが報告されている。また、ミクロセル腐食と比較して腐食速度が著しく速いため、鉄筋腐食を進展させる要因としても懸念されている。

塩害環境下で供用されるコンクリート橋では、部材位置によって塩化物イオンの供給量や浸透速度が大きく異なる。このため、十分な供用期間が経過した後の鉄筋位置の塩化物イオン濃度は不均一に分布し、必然的にマクロセル腐食が形成されることとなる。マクロセル腐食が形成した場合、鉄筋の電位は分極の影響を受けて本来の電位から変化するため、自然電位の測定結果から適切な腐食状態の評価を行うことが困難となる。ASTM C 876やBS 7361で実質的に判定を避けたグレーゾーンを設定した要因は、測定時の気象条件による自然電位の変動に加えて、マクロセル腐食の生じた構造物において誤った判定を行うことを避けるためであると考えられる。しかしながら、こうした視点から塩化物イオン濃度の違いによって生じるマクロセル腐食と自然電位の測定値の関係を検討した例は極めて少ない。

これらのことを踏まえ、異なる塩化物イオン濃度のコンクリートを打ち重ね、人工的にマクロセル腐食を形成させることのできる供試体を製作し、塩化物イオン濃度の違いに起因して生じるマクロセル腐食と自然電位の関係を検討する。

4.2 実験の概要

4.2.1 供試体の概要

図-4.2.1に供試体の概要、表-4.2.1にコンクリート配合を示す。供試体は、塩分を含むコンクリートと塩分を含まないコンクリートから構成される。塩分を含むコンクリートは、塩化物イオン濃度が 5kg/m^3 と 10kg/m^3 になるようにコンクリート練り混ぜ時に所定量の塩分を加えた。この部分の鉄筋は、長さ300mmと100mmのSD295D13異形鉄筋を、それぞれ上面および下面からのかぶりが30mmとなるように埋設し、マクロセル腐食のアノード部となるようにした。一方、塩分を含まないコンクリートは、長さ300mmのSD295D13異形鉄筋を50mm間隔で30本埋設し、マクロセル腐食のカソード部となるようにした。コンクリートの打設・養生後、供試体側面をエポキシ樹脂で塗装した。

表-4.2.2に、実験パラメータを示す。アノード部の塩化物イオン濃度を 5kg/m^3 と 10kg/m^3 の2種類とした理由は、塩化物イオン濃度の大小がマクロセル腐食による自然電位の変化に与える影響を検討するためである。カソード側に50mm間隔で30本の鉄筋を埋設した理由は、アノード部の鉄筋とカソード部の鉄筋の間隔の違いがマクロセル腐食の形成機構へ与える影響を検討するためである。また、アノード部の鉄筋に2種類の長さの鉄筋を用いた理由は、アノード部の鉄筋の表面積とカソード部の鉄筋の表面積の比率の違いによるマクロセル腐食の形成機構への影響を検討するためである。

図-4.2.2に、供試体の製作状況を示す。供試体は、異なる塩化物イオン濃度のコンクリートが互いに不連続とならないように、コンクリートを打ち重ねて製作した。

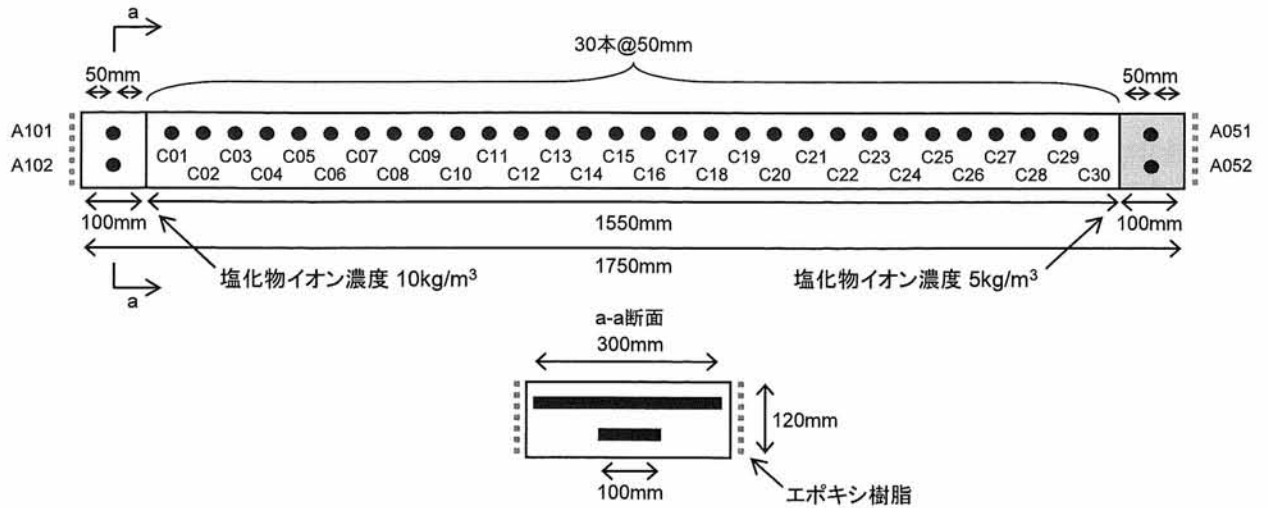


図-4.2.1 供試体の概要

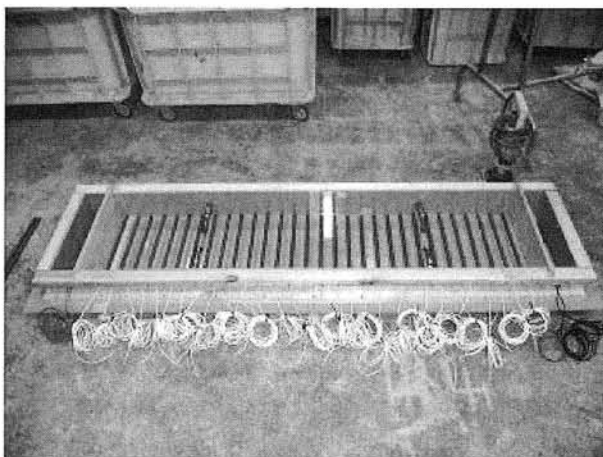
表-4.2.1 コンクリート配合

W/C	s/a	単位量(kg/m ³)				
		W	C	S	G	混和剤
(%)	(%)					
55	46	172	314	819	982	3.1

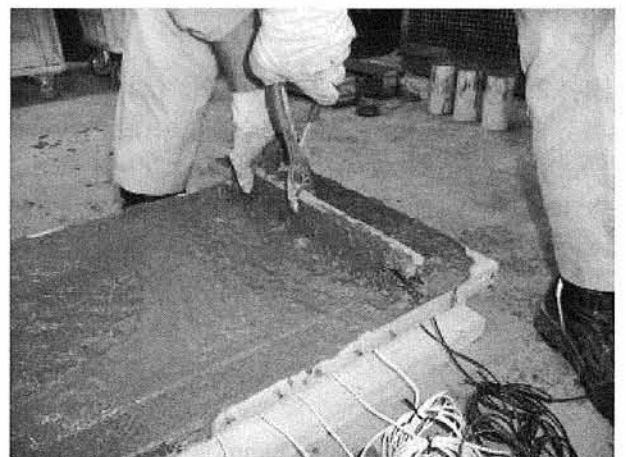
最大骨材寸法20mm, スランプ15cm, 空気量4.5%

表-4.2.2 実験パラメータ

塩化物イオン濃度(kg/m ³)	5, 10
アノード部とカソード部の鉄筋間隔(mm)	100~1550
アノード部の鉄筋面積/カソード部の鉄筋面積	1~30, 1~90



(a) 打設前の配筋状態



(b) コンクリートの打ち重ねの状況

図-4.2.2 供試体の製作状況

ここで製作した供試体では、アノード部とカソード部の鉄筋に接続したリード線を互いに短絡させた場合にマクロセル腐食が形成される。リード線を切断した状態では、マクロセル腐食は形成されず、マイクロセル腐食のみにより腐食が進展していると仮定した。厳密には、アノード部の鉄筋は、短絡を切断した状態においても、1本の鉄筋内でマイクロセル腐食とマクロセル腐食が同時に進行する状態にあると考えられるが、今回はこれを無視した。

なお、アノード部の鉄筋は、塩化物イオン濃度 5kg/m^3 のコンクリート中の 300mm の鉄筋を A051、 100mm の鉄筋を A052 とし、塩化物イオン濃度 10kg/m^3 のコンクリート中の 300mm の鉄筋を A101、 100mm の鉄筋を A102 とした。カソード部の鉄筋は、塩化物イオン濃度 10kg/m^3 のコンクリートに近い方から C01～C30 とした。

4.2.2 測定概要

まず、供試体表面をウェスで覆い約 150 分間湿潤させた後に、リード線を短絡していない状態で各鉄筋の自然電位を測定した。測定には、飽和塩化銀電極を用いた。その後、リード線を短絡して、再度、自然電位を測定した。この時の自然電位は、マクロセル腐食の影響を受けるため、鉄筋本来の自然電位とは異なった値が測定されることとなる。これと同時に、無抵抗電流計を用いて、アノード部とカソード部の鉄筋間のマクロセル電流を測定した。マクロセル電流は、リード線短絡直後では非常に大きな値が測定されるが、ある程度の時間が経過した後に概ね一定値に落ち着く傾向にある。このため、リード線を短絡させた約 15 分間後に、自然電位とマクロセル電流を測定した。自然電位は、測定値を飽和硫酸銅電極基準とするために、測定値から 120mV を差し引いている。

また、リード線を短絡させていない状態で、鉄筋腐食診断器を用いて各鉄筋の分極抵抗とコンクリート抵抗を測定した。ここでは、図-4.2.3 に示す等価電気回路モデルを想定し、二重対極を用いた交流インピーダンス法(印加電圧： 5mV 、周波数： 10Hz と 0.02Hz の 2 種類)を採用した。いずれもコンクリート表面の湿潤時間は、約 150 分間とした。これは、コンクリート表面を十分に湿潤させ、不安定な測定値が得られることを避けるためである。

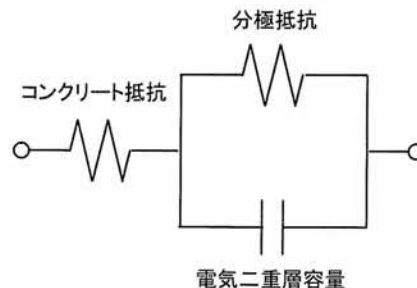


図-4.2.3 等価電気回路モデル

4.3 結果および考察

4.3.1 塩化物イオン濃度の差に起因するマクロセル腐食の形成機構

既に述べたように、塩害環境下のコンクリート構造物において鉄筋位置の塩化物イオン濃度の分布が不均一となった場合、マクロセル腐食が形成されることとなる。この形成機構は、図-4.3.1 の概念図を用いて説明することができる。

マクロセル腐食が形成していない状態では、塩化物イオン濃度が大きく腐食環境下にある鉄筋の自然電位 E_{corr}^a は、アノード分極曲線とカソード分極曲線の交点で与えられる。同様に、塩化物イオン濃度が小さく腐食環境下でない鉄筋の自然電位 E_{corr}^c も、アノード分極曲線とカソード分極曲線の交点で与えられる。ここで製作した供試体では、アノード部とカソード部の鉄筋のリード線を短絡していない状

態ではマイクロセル腐食のみが進展すると仮定しているため、アノード部とカソード部の鉄筋の自然電位を測定することで、 E_{corr}^a および E_{corr}^c が得られる。

アノード部とカソード部の鉄筋のリード線を短絡させると、マクロセル腐食が形成される。この際、各鉄筋の自然電位は分極の影響を受けて変化することとなる。アノード部の鉄筋の自然電位は E^a に、カソード部の鉄筋は E^c にシフトする。短絡後にアノード・カソード鉄筋の間で流れる電流が、マクロセル腐食電流 i_{macro} である。 i_{macro} は、アノード・カソード鉄筋の間のコンクリート抵抗 R_{con} の影響を受け、オームの法則から式(1)の関係で表される。

$$i_{macro} = \frac{E^c - E^a}{R_{con}} \quad (1)$$

さらに、アノード部とカソード部の鉄筋の分極抵抗 R_p^a と R_p^c が E 軸上の E_{corr}^a から点 X および E 軸上の E_{corr}^c から点 Y までの勾配と等しくなることを利用すると、 i_{macro} は、式(2)によって定義される。

$$i_{macro} = \frac{E_{corr}^c - E_{corr}^a}{R_p^a + R_p^c + R_{con}} \quad (2)$$

すなわち、 i_{macro} の大きさは、アノード鉄筋とカソード鉄筋の分極前の自然電位の差、アノード鉄筋とカソード鉄筋の分極抵抗、アノード・カソード鉄筋の間のコンクリート抵抗の3つのパラメータにより支配されることとなる。例えば、分極前の自然電位の差が大きい場合、鉄筋の分極抵抗もしくはコンクリート抵抗が小さい場合には、マクロセル腐食の進展速度は大きくなり、著しい腐食が発生することとなる。

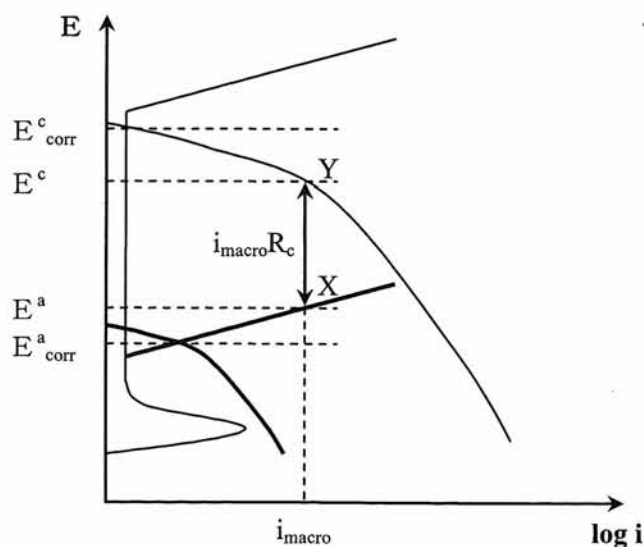


図-4.3.1 マクロセル腐食の形成機構の概念図

4.3.2 アノード・カソード間の間隔を変化させた場合

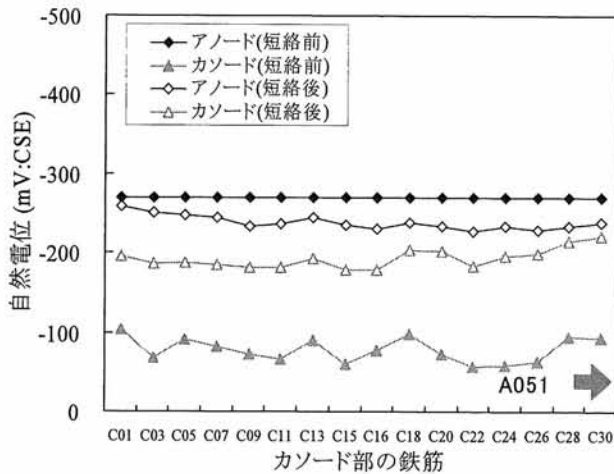
式(2)によれば、マクロセル腐食電流は、アノード鉄筋とカソード鉄筋の分極前の自然電位の差、アノード鉄筋とカソード鉄筋の分極抵抗、アノード・カソード鉄筋の間のコンクリート抵抗の3つのパラメータにより決定される。ここでは、各パラメータの影響を明らかにするため、供試体のアノード部とカソード部の鉄筋各1本ずつを短絡させて測定を行った。測定に用いた鉄筋は、アノード部の鉄筋4本とカソード部のC01, C03, C05, C07, C09, C11, C13, C15, C16, C18, C20, C22, C24, C26, C28, C30の16本である。このため、アノード・カソード鉄筋の間隔は、最短で100mm、最長で1550mmとなる。

図-4.3.2 に、リード線の短絡前後の自然電位の測定結果をアノード部の鉄筋ごとに示す。短絡前の自

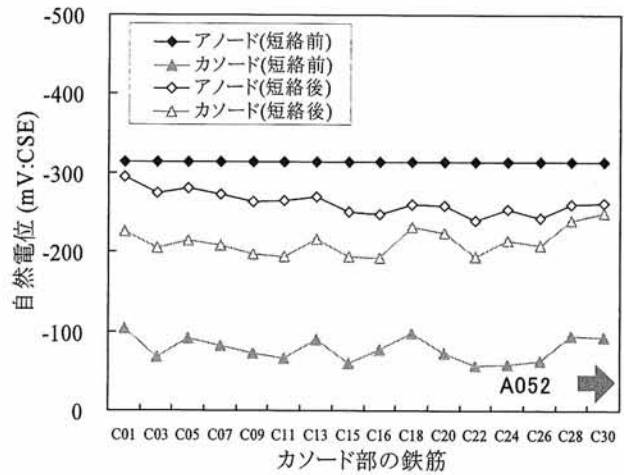
然電位は、塩化物イオン濃度 5kg/m^3 のコンクリート中で約 -300mV:CSE 、塩化物イオン濃度 10kg/m^3 のコンクリート中で約 -450mV:CSE となった。一方、カソード部の鉄筋は、各鉄筋で測定値にばらつきがあるものの、概ね $-50\sim-100\text{mV:CSE}$ の範囲の自然電位を示した。

その後、アノード部とカソード部の鉄筋各1本ずつのリード線を短絡させると、アノード部の鉄筋の自然電位は貴な方向に、カソード部の鉄筋の自然電位は卑な方向へと変化した。変化した電位量は、各鉄筋によって程度の差はあるものの、アノード部の塩化物イオン濃度を 10kg/m^3 とした場合に大きくなる傾向にある。塩化物イオン濃度 5kg/m^3 の場合、アノード部の鉄筋は平均で約 $30\sim60\text{mV}$ 、カソード部の鉄筋は平均で約 $120\sim140\text{mV}$ 変化し、塩化物イオン濃度 10kg/m^3 の場合、アノード鉄筋は平均で約 $40\sim60\text{mV}$ 、カソード部の鉄筋は平均で約 $210\sim220\text{mV}$ 変化した。

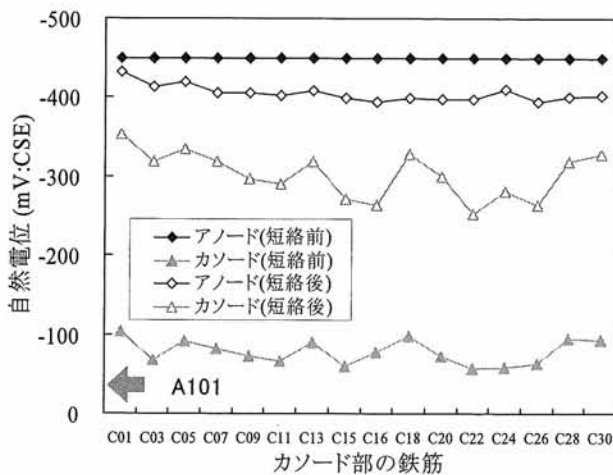
アノード部の鉄筋の自然電位の変化量は、鉄筋の長さが短いほど大きくなっており、アノード・カソードの鉄筋表面積の比に応じて、自然電位の変化量が異なることが窺える。一方、カソード部の鉄筋の自然電位は、短絡前のアノード・カソード鉄筋の自然電位の差が大きいほど、変化する電位量が大きくなる傾向にある。特に、カソード部の鉄筋の自然電位は、鉄筋によって短絡前の自然電位が異なっており、分極後の自然電位もこれを反映した値となった。また、各グラフには、アノード部の鉄筋の位置も併記しているが、アノード部とカソード部の距離と自然電位の変化量に何らかの関係があるとは考え難い。



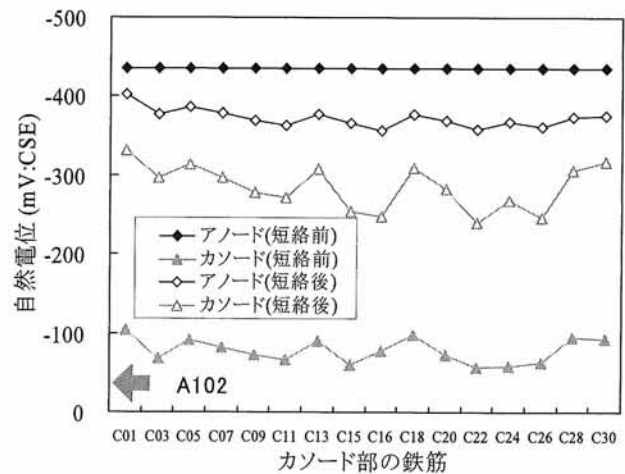
(a) A051



(b) A052



(c) A101



(d) A102

図-4.3.2 カソード部の鉄筋を1本ずつ短絡させた場合の自然電位の変化

図-4.3.3に、リード線短絡後のアノード・カソード鉄筋間のマクロセル腐食電流密度を示す。これは、無抵抗電流計によるマクロセル腐食電流の測定値をアノード部の鉄筋表面積で除して求めたものである。マクロセル腐食電流密度は、カソード部の鉄筋により大きく異なる値を示し、鉄筋によっては最大で約2倍の差が生じることもあった。グラフ中では、アノード部の鉄筋の方向も併記しているが、アノード・カソード鉄筋の距離と腐食電流密度の大きさには有意な関係は無いと考えられる。また、マクロセル腐食電流密度は、A102, A101, A052, A051の順に大きいことが確認できる。

このようなマクロセル腐食電流密度の測定結果が得られた原因については、式(2)を用いて考察することができる。式(2)によれば、マクロセル腐食電流は、アノード鉄筋とカソード鉄筋の分極前の自然電位の差、アノード鉄筋とカソード鉄筋の分極抵抗、アノード鉄筋とカソード鉄筋間のコンクリート抵抗の3つのパラメータにより決定される。そこで、図-4.3.4~6に、これら3つのパラメータの値を示す。ここで、分極抵抗は、鉄筋腐食診断器から得られる真の分極抵抗をカソード鉄筋の表面積で除したものとした。ただし、ここで用いた分極抵抗の測定値は、高低2種類の周波数を用いた交流インピーダンス法により得られたものであり、必ずしも十分な精度があるものではないことに留意しなければならない。コンクリート抵抗は、こちらも鉄筋腐食診断器で得られるコンクリート抵抗の平均値から式(3)を用いて比抵抗を算出し、これにアノード・カソード鉄筋間の距離と供試体の断面積の換算を行うことで求めた。ここで、コンクリート抵抗の平均値を用いた理由は、今回の測定では供試体全体においてほぼ同程度のコンクリート抵抗が測定されたため、供試体が均一なコンクリートで構成されているとみなし、計算を簡略化するためである。

$$\rho = R_s \frac{A}{L} \quad (3)$$

ここで、 ρ ：コンクリート比抵抗(k Ω ・m)、 R_s ：鉄筋腐食診断器から得られるコンクリート抵抗(k Ω)、 A ：二重対極のガード面積、ここでは12.06cm²、 L ：かぶり、ここでは3cmとする。

図-4.3.4の短絡前の自然電位の差は、アノード部の塩化物イオン濃度の違いによって大きく異なっている。アノード部の鉄筋として塩化物イオン濃度5kg/m³のコンクリート中の鉄筋を用いた場合、自然電位の差は150~200mV、塩化物イオン濃度10kg/m³のコンクリート中の鉄筋を用いた場合、自然電位の差は300~400mVの範囲で推移している。図-4.3.3では、アノード部の鉄筋として塩化物イオン濃度10kg/m³のコンクリート中の鉄筋を用いた場合に、マクロセル腐食電流密度が大きくなる傾向にあった。この原因は、塩化物イオン濃度の高いコンクリート中の鉄筋をアノード部とした場合に、カソード部の鉄筋との電位差が大きくなったためと考えられる。

図-4.3.5のカソード鉄筋の分極抵抗は、鉄筋によって大きく異なる値が測定された。これは、短絡前のアノード・カソード間の自然電位の差が大きい鉄筋、すなわち、短絡前のカソード側の自然電位が貴な鉄筋で小さくなる傾向を示していた。ここで、図-4.3.3のマクロセル腐食電流密度と短絡前の自然電位の差、カソード鉄筋の分極抵抗の関係を精査すると、腐食電流密度の大きいカソード鉄筋では、短絡前の自然電位の差が大きく、カソード鉄筋の分極抵抗が小さくなる傾向にあることが確認できる。また、腐食電流密度の小さいカソード鉄筋では、これとは逆の傾向が認められる。

一方、図-4.3.6のコンクリート抵抗は、アノード部の鉄筋(ここでは、A101とA102)と間隔が離れるほど大きくなる傾向にある。式(2)によれば、アノード・カソード間の間隔が離れコンクリート抵抗が大きくなるほどマクロセル腐食電流は小さくになると考えられる。しかし、図-4.3.3ではそういった傾向を確認することはできない。この原因は、ここで得られたコンクリート抵抗の値がカソード鉄筋の分極抵抗よりもオーダー的に小さいため、マクロセル腐食電流の増減にほとんど寄与しなかったためと考えられる。

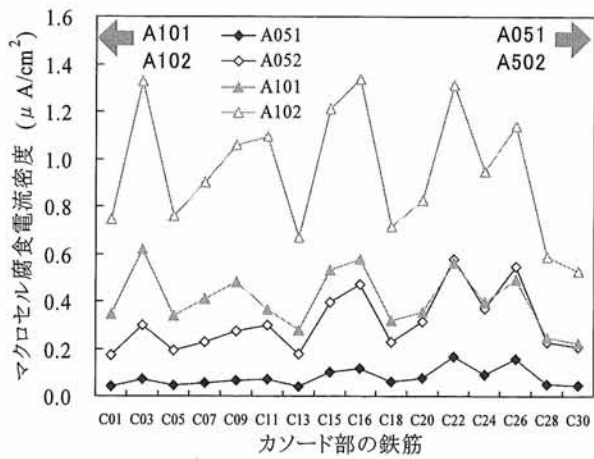


図-4.3.3 マクロセル腐食電流密度

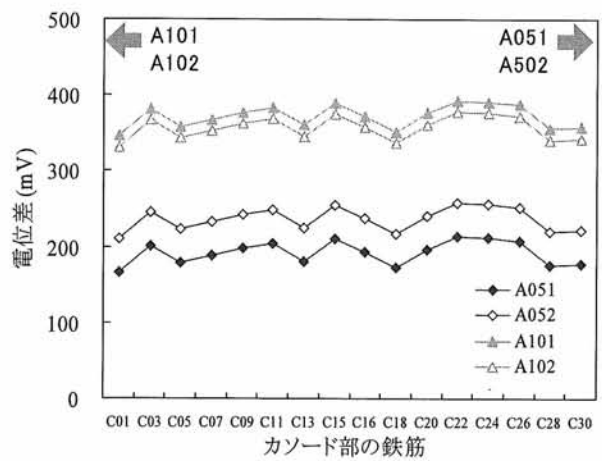


図-4.3.4 短絡前の自然電位の差

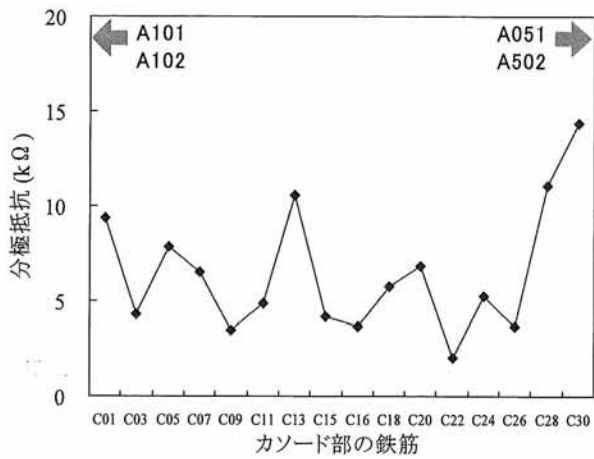


図-4.3.5 カソード鉄筋の分極抵抗

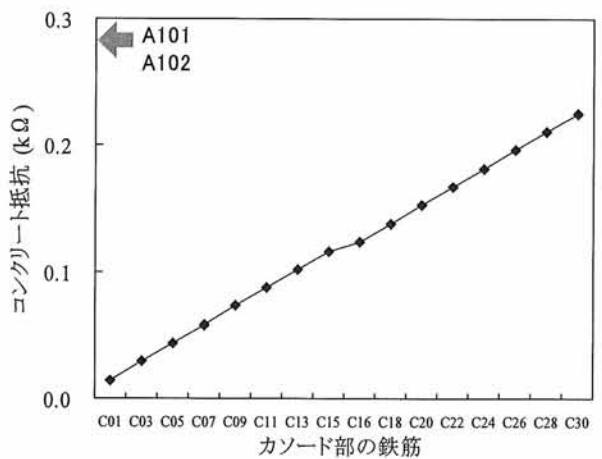
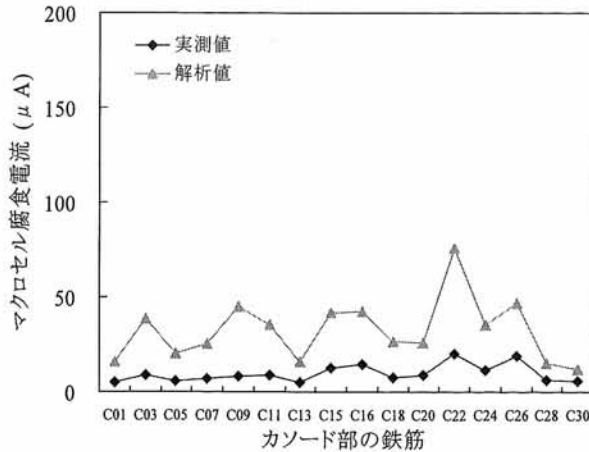


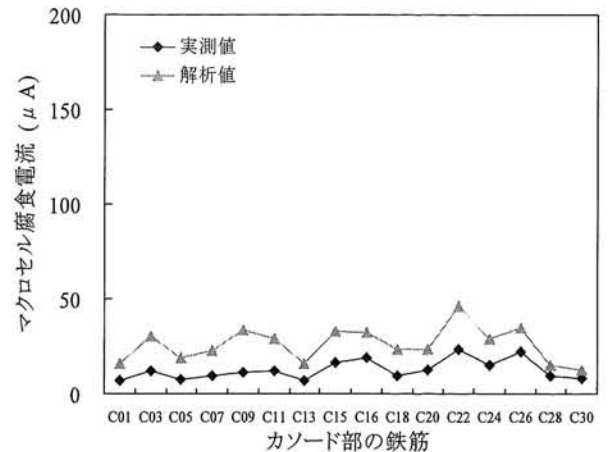
図-4.3.6 A101・A102 との間のコンクリート抵抗

次に、実際に無抵抗電流計で測定されたマクロセル腐食電流と、図-4.3.4~6の測定値から逆算したマクロセル腐食電流の解析値を比較する。図-4.3.7に、この実測値と解析値をアノード部の鉄筋ごとに示す。解析値は実測値を過大に評価する傾向にあるが、マクロセル腐食電流の大きさの傾向としては概ね妥当な結果が得られている。解析値が過大な値となった原因としては、今回の測定では2種類の周波数による交流インピーダンス法を用いて分極抵抗を測定していたため、分極抵抗の精度が十分でなかったことが考えられる。

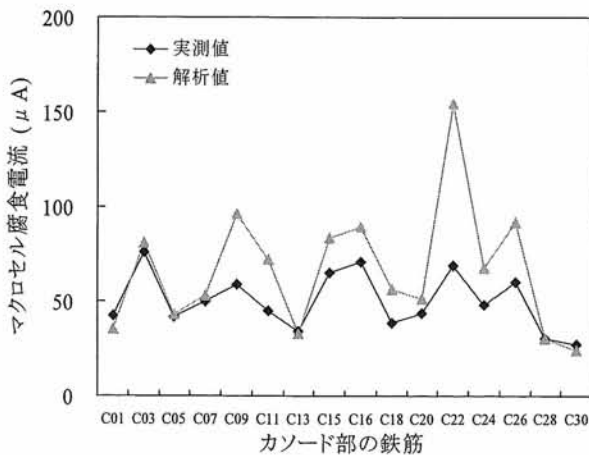
いずれにしても、今回の実験の範囲内では、マクロセル腐食による鉄筋の腐食速度には、アノード・カソード鉄筋の分極前の電位差と分極抵抗が大きな影響を与え、アノード・カソード間のコンクリート抵抗による影響は小さいと考えることができる。



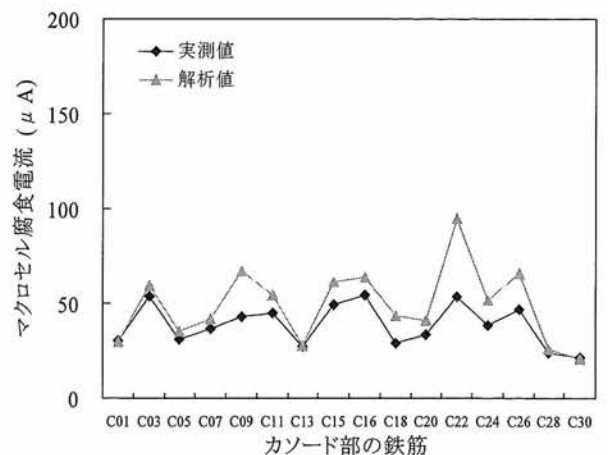
(a) A051



(b) A052



(c) A101



(d) A102

図-4.3.7 マクロセル腐食電流の実測値と解析値の比較

4.3.3 アノード・カソードの面積比を変化させた場合

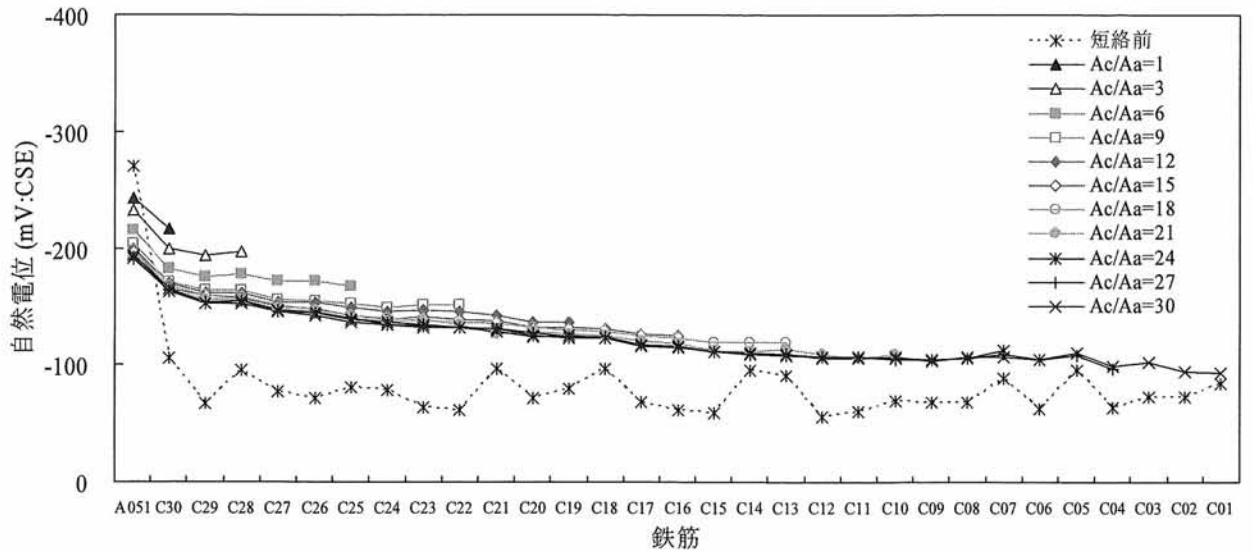
一般に、マクロセル腐食による腐食速度は、アノード部の鉄筋とカソード部の鉄筋の表面積比(A_c/A_a , A_a :アノード鉄筋の表面積, A_c :カソード鉄筋の表面積)に律速されると言われている。ここでは、マクロセル腐食を形成するカソード部の鉄筋本数を増加させることにより、アノード・カソード鉄筋の表面積比とマクロセル腐食による腐食速度、自然電位の測定値の変化について検討を行う。

測定は、アノード部の鉄筋各1本に対し、カソード部の鉄筋の本数を順次増加させることによって行うこととした。カソード部の鉄筋本数は、1, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, 27, 30本の順で増加させた。すなわち、鉄筋長300mmの鉄筋をアノード部とした場合、 A_c/A_a は1~30、鉄筋長100mmの鉄筋をアノード部とした場合、 A_c/A_a は1~90の範囲で変化させることとなる。

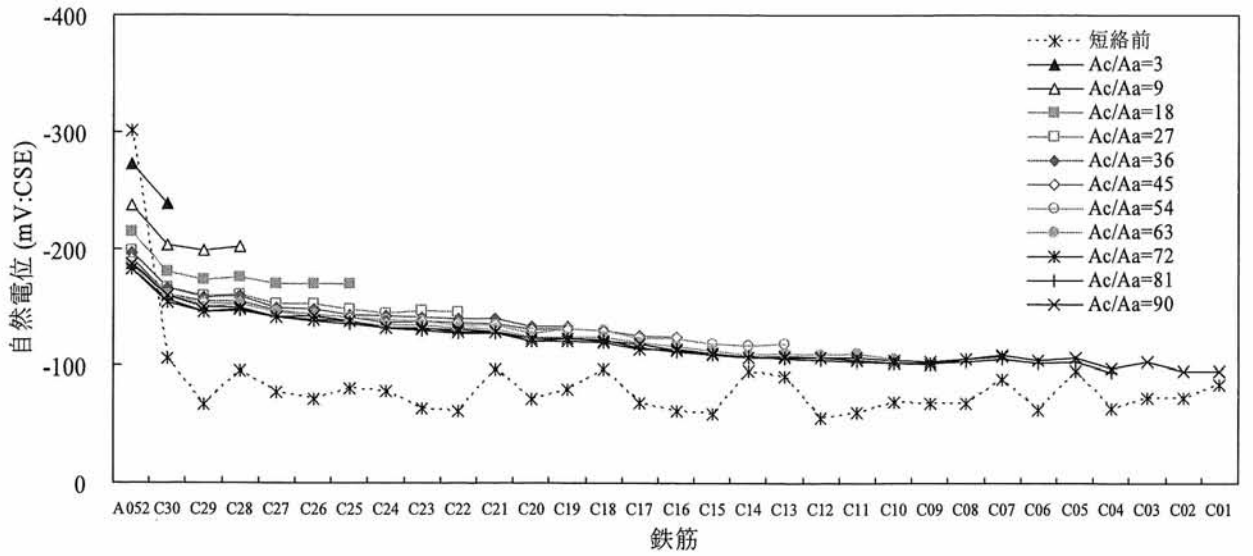
図-4.3.8に、アノード部の各鉄筋に対して、カソード鉄筋の本数を増加させた場合の自然電位の測定結果を示す。ここでは、各鉄筋の直上で測定した自然電位の値を示している。これによると、短絡前の自然電位は、A051とS052で-270~-300mV:CSE, A101とA102で-400~-430mV:CSE, C01~C30で-50~-100mV:CSEを示した。その後、アノード・カソード鉄筋のリード線を短絡し、 A_c/A_a の値を増加させて自然電位の測定を行うと、アノード鉄筋の自然電位は、 A_c/A_a の増加に伴って徐々に貴化し、ある時点で一定値に留まる傾向にあったことが確認できる。最終的に貴化した電位量は、鉄筋によって異なり、A051で約80mV, A052で約120mV, A101で約80mV, A102で約130mVとなった。アノード鉄筋の自然電位は、分極によって100mV程度は貴化すると考えられる。また、図-4.3.9に、 A_c/A_a とアノード鉄筋の自然電位の関係を示す。これによると、今回の実験の範囲内では、アノード鉄筋の自然電位の貴化が収束する閾値は A_c/A_a が10~30の範囲にあると考えられる。同様に、図-4.3.10にした A_c/A_a とマクロセル腐食電流密度の関係によると、マクロセル腐食電流密度も A_c/A_a とともに増加し、 A_c/A_a が10~30の範囲で一定値に落ち着いている。この傾向はアノード鉄筋の自然電位が貴化するプロセスとほぼ等しい。すなわち、マクロセルによる腐食電流は A_c/A_a に比例して増加するが、ある時点でアノード鉄筋の腐食反応が限界に達するために、一定値に収束すると考えられる。

一方、カソード鉄筋の自然電位の推移に着目すると、 A_c/A_a が小さい場合ほど、分極によって卑化する電位量が大きくなった。アノード鉄筋に最も近いカソード鉄筋(A051とA052ではC30, A101とA102ではC01)の自然電位の推移を注視すると、 A_c/A_a が大きくなるに伴って本来の自然電位、すなわち、短絡前の自然電位へと戻りつつある傾向が確認できる。この理由は、 A_c/A_a の増加に伴って、アノード鉄筋の腐食反応が限界に達し、分極の影響が次第に薄れたためと考えられる。

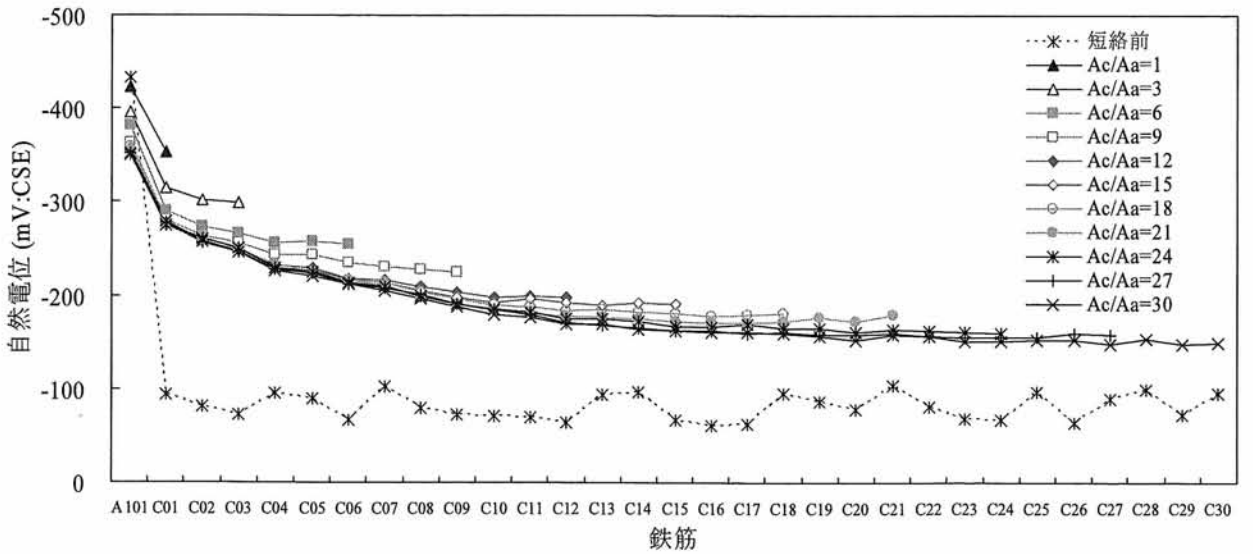
いずれのアノード鉄筋を用いた場合においても、供試体全体の自然電位の分布はなだらかな勾配となっていた。これは、アノード鉄筋とカソード鉄筋が互いに影響を及ぼした結果であり、A051とA101では A_c/A_a が12程度、A052とA102では A_c/A_a が27程度より大きい場合に、この勾配の傾きは概ね一定となった。また、 A_c/a を最大とした場合の自然電位の分布に着目すると、アノード鉄筋に近いカソード鉄筋ほど卑化する電位量が大きく、アノード鉄筋から最も遠いカソード鉄筋の変化は比較的小さい。このため、塩害環境下のコンクリート橋で局所的に鉄筋位置まで塩化物イオンが浸透してマクロセル腐食が形成しているような場合にも、自然電位の分布傾向を精査することで、アノード部の位置を特定することができると考えられる。ただし、A101とA102では、短絡前に-400mV:CSEよりも卑であった自然電位が、最終的に-350mV:CSEよりも貴となった。この結果、例えば、ASTM C 876の腐食判定基準に従えば、「不確定」と判定され、マクロセル腐食を形成する前後で判定が異なることとなる。従って、自然電位の絶対値のみで腐食の判定を行うことが困難となることに対しては、十分留意することが必要となる。



(a) 051

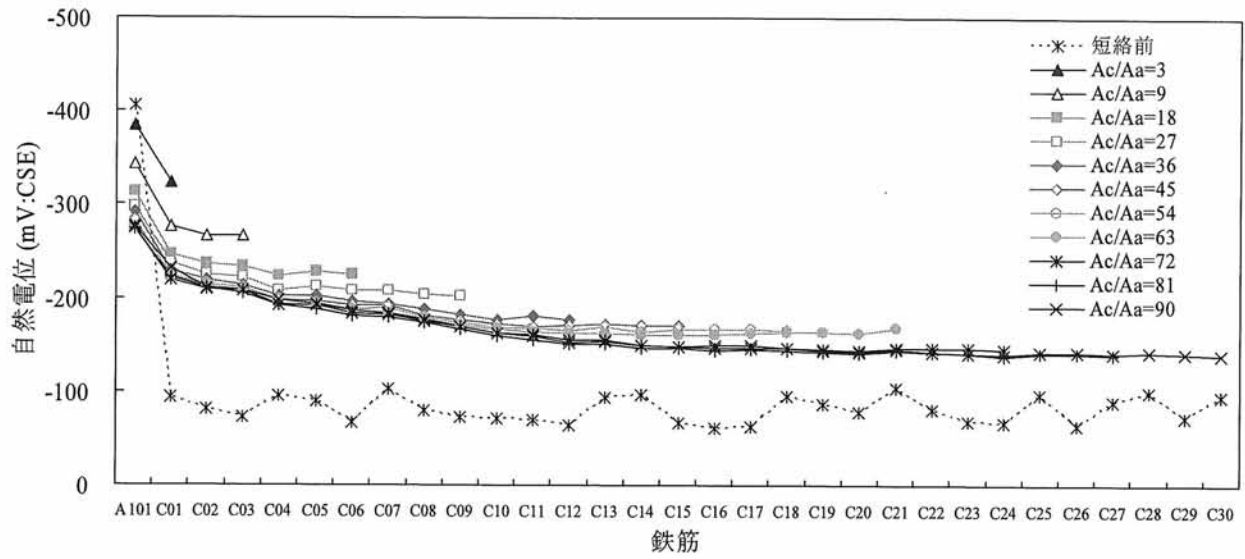


(b) 052



(c) 101

図-4.3.8 アノード・カソード鉄筋の表面積比を変化させた場合の自然電位(次ページへ続く)



(d) 051

図-4.3.8 アノード・カソード鉄筋の表面積比を変化させた場合の自然電位(前ページからの続き)

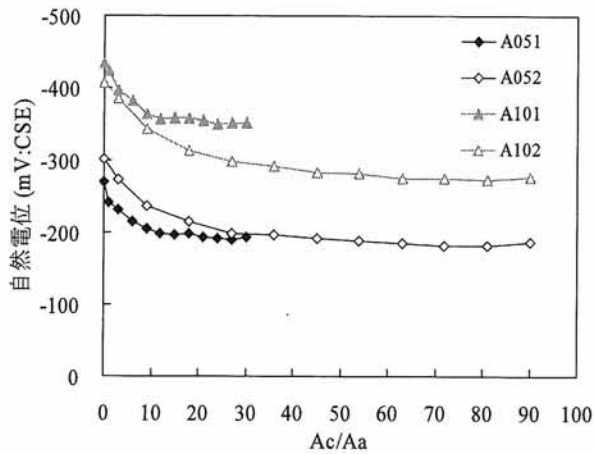


図-4.3.9 Ac/Aa とアノード鉄筋の自然電位

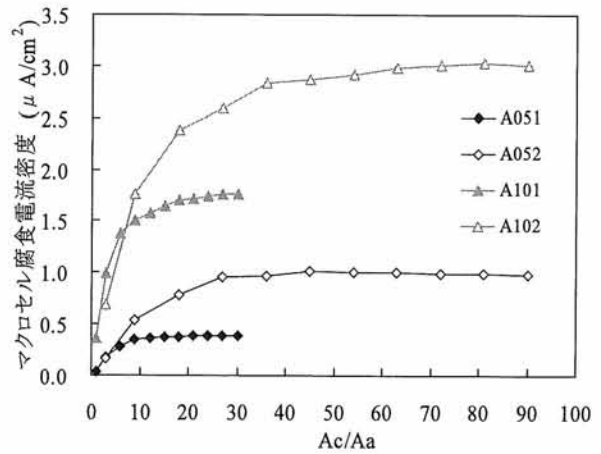


図-4.3.10 Ac/Aa とマクロセル腐食電流密度

4.4 測定結果のまとめ

ここでは、人工的にマクロセル腐食を形成させることのできる供試体の自然電位と腐食電流を測定することにより、塩化物イオン濃度の違いに起因して生じるマクロセル腐食の形成機構と自然電位の測定結果に与える影響について検討した。今回の実験の範囲内で得られた知見を以下にまとめる。

- (1) マクロセル腐食の形成によって生じるマクロセル腐食電流は、分極前のアノード・カソード鉄筋の自然電位の差と分極抵抗、アノード・カソード間のコンクリート抵抗の影響を受ける。アノード・カソード鉄筋の表面積比を一定とした場合、マクロセル腐食電流の大きさに与える影響は、分極前のアノード・カソード鉄筋の自然電位の差と分極抵抗が支配的であり、コンクリート抵抗の影響は小さかった。自然電位の差が大きく、分極抵抗が小さい場合には、マクロセル腐食電流は大きくなった。
- (2) アノード鉄筋の表面積に対するカソード鉄筋の表面積(A_c/A_a)の増加に伴って、マクロセル腐食電流も大きくなった。しかし、 A_c/A_a が 10~30 程度でマクロセル腐食電流は一定値に収束し、その後の増加はなかった。また、これを閾値として、分極によるアノード・カソード鉄筋の自然電位の変化も収束した。これは、アノード鉄筋のマクロセル腐食反応が限界に達したためと考えられる。
- (3) 塩害環境下のコンクリート橋で局所的に鉄筋位置の塩化物イオン濃度が高まった場合においても、自然電位の分布傾向に着目すれば、アノード部の位置を特定することができる。ただし、このような場合、アノード部の鉄筋は約 100mV 程度は貴化し、逆にカソード部の鉄筋も大幅に卑化するため、自然電位の絶対値のみを用いた鉄筋腐食の判定は困難である。また、アノード部とカソード部の自然電位はなだらかな勾配を持って分布するため、両者を判別することができなくなることはない。

第IV部 測定方法の提案

塩害環境下にあるコンクリート橋の自然電位測定方法（案）

1. 適用の範囲

この「塩害環境下にあるコンクリート橋の自然電位測定方法(案)」は、塩害環境下にあるコンクリート橋内部の鋼材の自然電位を測定し、その結果を用いて鋼材の腐食状態を推定する場合に用いる。

自然電位の測定を行うためには、コンクリート橋内部の鋼材とコンクリート表面に接地した照合電極の電気的な連続性が確保されていることが不可欠である。従って、次のような場合には自然電位法を適用することができない。

- ・コンクリート表面が非常に乾燥し電氣的に絶縁体に近い場合
- ・コンクリート表面や鋼材表面に絶縁材料が被覆されている場合
- ・コンクリート表面が完全に水で覆われている場合

2. 測定方法

自然電位の測定は、以下の方法で行う。ここに示されていない事項については、「コンクリート構造物における自然電位測定方法(JSCE-E 601-2000)・同解説」に従うものとする。

① 測定装置

測定には、照合電極、電位差計、リード線を用いる。

照合電極は、環境条件によらず安定した電極電位を示すものを使用し、使用に先立ち他の照合電極と電極電位の比較を行い、これが適切な電極電位を示すことを確認しなければならない。適切な電極電位を示さない照合電極を使用してはならない。

電位差計は、入力抵抗が $100\text{M}\Omega$ 以上で感量が 1mV 以下の直流電流計を用いる。

リード線は、被覆した軟銅より線を用いる。

② 測定前の準備

測定前の準備として、測定点の罫書き、鋼材の導通確認、コンクリート表面の湿潤を行う。

測定点の罫書きでは、配筋図や非破壊検査による鉄筋探査結果を参考とし、鋼材直上となるように測定点を定める。測定点の間隔は、局所的な鋼材腐食を特定できるように、 300mm 程度とする。測定間隔を狭めるほど詳細な測定結果を得ることができるが、鋼材間隔よりも狭くする必要はない。

鋼材の導通確認は、互いに離れた箇所の鋼材を露出させ、鋼材間の電位差を測定することにより行う。電位差が約 1mV 以下であれば導通がとれているとみなすことができる。電氣的に連続している鋼材であれば、どの位置に測定用のリード線を接続してもよい。

コンクリート表面の湿潤は、30分程度の間、水道水など清浄な水を断続的に噴霧散水して行う。ただし、測定時に浮き水等がないようにする。

③ 自然電位の測定

照合電極と鋼材を電位差計にリード線を介して接続し、照合電極をコンクリート表面に垂直に押し当てて測定を行う。自然電位は、 1mV の単位まで測定する。

測定計画は、測定開始から1時間以内に完了するように立案する。測定範囲が広い場合には、湿潤開始時間をずらすなど測定範囲を分けて測定を行う。

3. 測定値の換算

測定値は、使用した照合電極の種類に応じて、表-1の換算式を用いて 25°C の飽和硫酸銅電極を基準とする値に換算する。

表-1 照合電極の種類と電極電位

照合電極の種類	自然電位 E (mV:CSE) 25°C 飽和硫酸銅電極換算
飽和硫酸銅電極	$0+0.9 \times (t-25)$
飽和カロメル電極	$-74-0.66 \times (t-25)$
飽和塩化銀電極	$-120-1.1 \times (t-25)$
鉛電極	$-799+0.24 \times (t-25)$

t: 測定時の気温(°C)

表-1 では、25°Cを基準として、測定時の気温と照合電極の種類に応じて測定値を換算している。これは、測定時の気温の影響を受けて変化する各照合電極の電極電位を補正するためのものである。コンクリート内部の鋼材周辺の腐食環境も気温や湿度等の影響を受けるため、測定時の気象条件によって鋼材の自然電位も変化するが、表-1の換算式は、このような腐食環境の違いによって生じる自然電位の変化を補正することを目的としたものではない。

また、別途、照合電極ごとに試験を行って換算方法を確認している場合には、その方法を用いてもよい。例えば、現場測定には使用しない補正用の照合電極を準備し、飽和塩化カリウム水溶液中で現場測定に使用する照合電極との電極電位の差を測定し、この値を用いて測定値を換算する方法などがある。

なお、換算した値は、10mVの単位に丸めて報告する。

4. 鋼材腐食の推定

鋼材腐食の推定は、表-2の鋼材腐食判定基準に従って行う。

表-2 鋼材腐食判定基準

自然電位 E (mV:CSE)	腐食判定基準
$-350 \geq E$	90%以上の確率で腐食あり
$-200 \geq E > -350$	不確定 [※]
$E > -200$	90%以上の確率で腐食なし

※: 等電位線図の結果を踏まえて判定

表-2 では、自然電位の測定値に対する鋼材の腐食確率を示している。自然電位が-350mV:CSEよりも卑であれば「90%以上の確率で腐食あり」、-200mV:CSEよりも貴であれば「90%以上の確率で腐食なし」と判定する。

また、自然電位が-200~-350mV:CSEの範囲にある鋼材の腐食状態を「不確定」と判定する。これは、測定時の気温や湿度、湿潤時間、使用した照合電極が異なる場合に自然電位の測定値に差が生じることや、マクロセル腐食やかぶりコンクリートの中性化の影響を受けた場合に必ずしも鋼材周辺の腐食環境に対応した自然電位が測定されないことが報告されていることを踏まえ、個別の測定値のみを用いて誤った判定を下すことを避けるためである。特に、塩化物イオン濃度が局所的に鋼材位置まで浸透している橋梁においてはマクロセル腐食が生じている可能性が高く、腐食環境にある鋼材であっても-350mV:CSEよりも貴な自然電位が測定される場合がある。このため、橋梁全体の測定値のうち最も卑な自然電位が-200~-350mV:CSEの範囲に収まった場合には、50mV単位で作成した等電位線図を参照し、橋梁全体の自然電位の分布傾向を精査して鋼材の腐食状態を推定しなければならない。腐食判定基準で「不確定」と判定された箇所においても、周囲の等電位線の間隔が狭く、橋梁全体で最も卑な自然電位が測定された箇所では、鋼材腐食が生じている場合がある。

5. 塩化物イオン含有量・はつり調査箇所の実施

自然電位の測定と同時に塩化物イオン含有量調査およびはつり調査を実施する場合には、橋梁全体の自然電位の測定値を精査し、4.において鋼材腐食が生じていると推定された箇所か、等電位線図において周囲の等電位線の間隔が比較的狭く最も卑な自然電位を示した箇所から調査箇所を選定する。4.において鋼材腐食が生じていると推定された箇所においても、等電位線図を参照し、最も卑な自然電位の測

定された箇所から選定することが望ましい。

6. 報告

次の事項を報告する。

- ・対象構造物の構造種別
- ・対象構造物のおかれた環境
- ・自然電位の測定位置，測定点間隔，鋼材配置
- ・測定時の日時，気温，天候
- ・使用した照合電極の種類
- ・自然電位の測定値と等電位線図
- ・鋼材腐食の推定結果と推定方法
- ・塩化物イオン含有量調査とはつり調査の結果

7. 適用事例

① 対象橋梁

日本海沿岸に位置し塩害環境下にある RC 床版橋と PC ポストテンションテン T 桁橋(以下, PC 橋)の 2 つのコンクリート橋を対象とした。測定は, 夏季(2006 年 8 月, 気温約 30°C, 晴)と冬季(2005 年 12 月, 気温約 6°C, 雨)の 2 回実施した。RC 床版橋は 1963 年架設, PC 橋は 1975 年架設であり, 両橋とも一部でひび割れが確認されたが, 鋼材腐食によると思われる錆汁や剥離などは確認されなかった。図-1 に, 両橋の概要を示す。

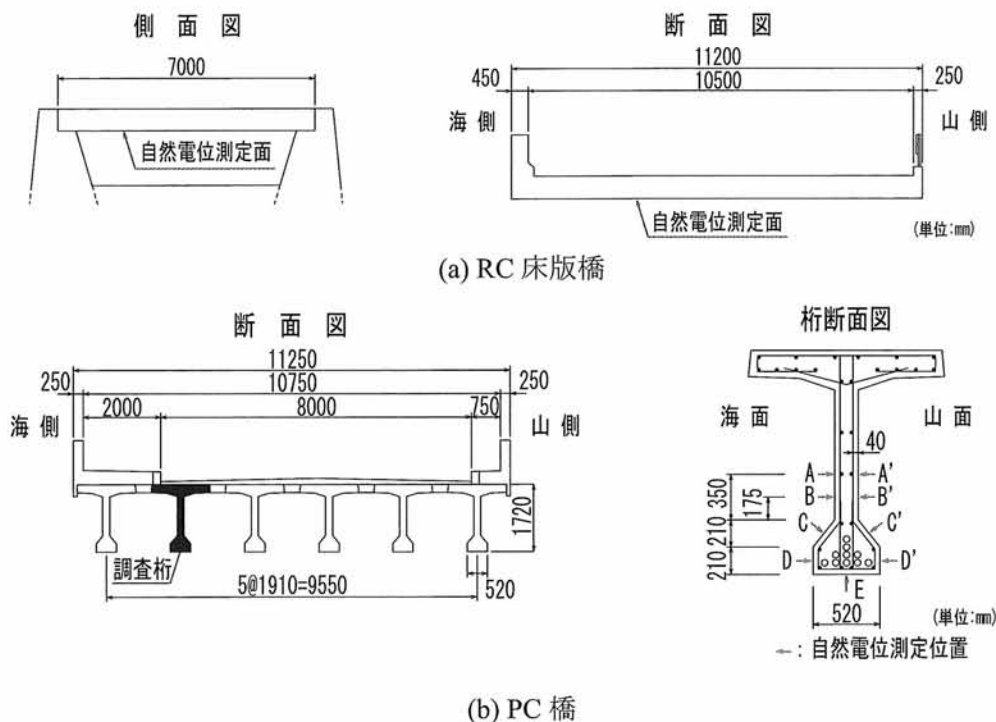


図-1 対象橋梁の概要

② 測定装置

測定には, 飽和塩化銀電極, 入力抵抗 100MΩ を有する電位差計, 被覆した軟銅より線を用いた。

③ 測定前の準備

RC 床版橋は, 鉄筋が 200mm 間隔で配筋されていたため, 200mm の格子状に測定点を設けた。PC 橋では, せん断補強鉄筋が 300mm 間隔で配筋されていたため, 橋軸方向に 300mm 間隔で測定点を設けた。また, 一断面当たり, ウェブとフランジに各 9 点の測定点を設けることとした。測定点の罫書きは, 配筋図と電磁波レーダ法による鉄筋探索結果を参考にし, 鋼材の直上となるようにした。

両橋とも離れた3ヶ所を任意に選定して鉄筋を露出させ、鉄筋間の電位差を測定することにより導通の確認を行い、自然電位の測定に用いるリード線を接続した。

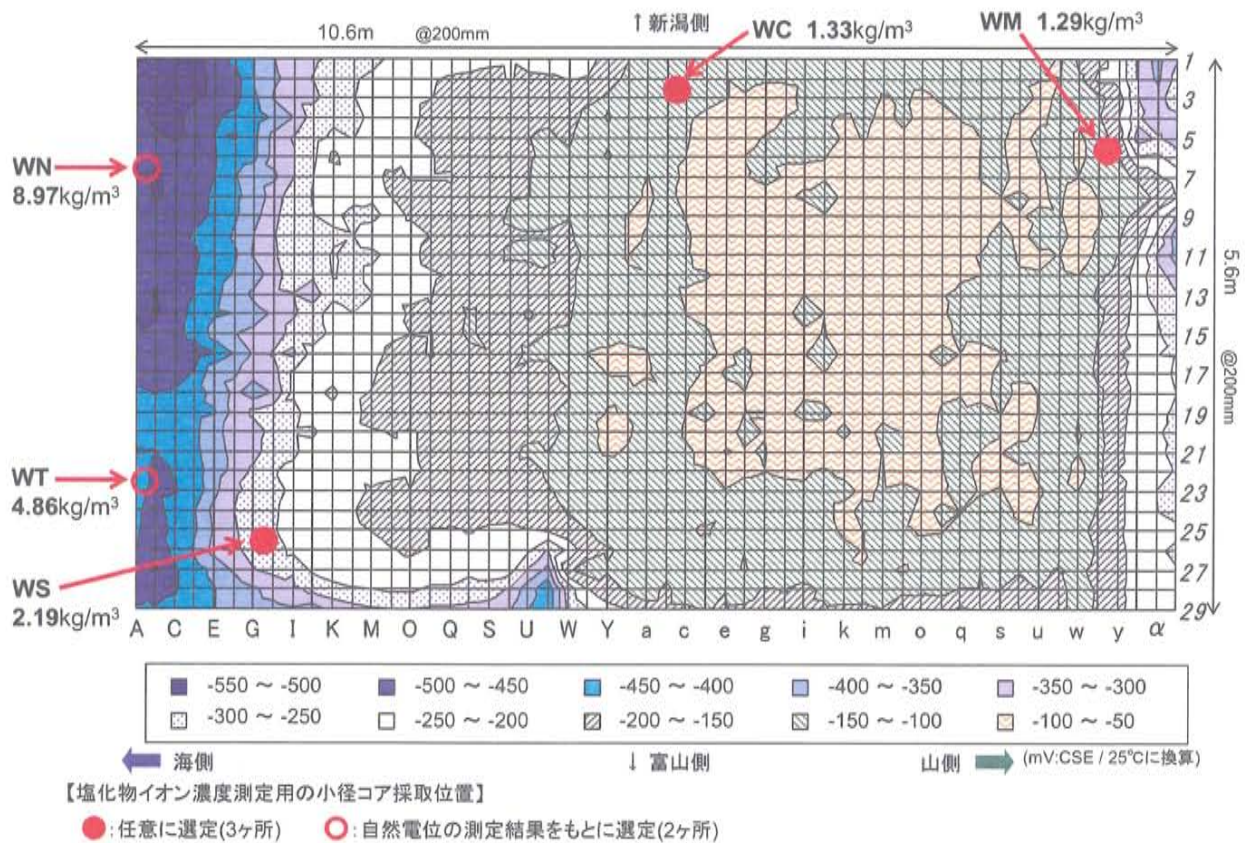
手動のポンプ式散水器を用いてコンクリート表面に散水した。湿潤時間は30分間とし、この間、コンクリート表面が乾燥するたびに断続的に噴霧散水を行った。

④ 自然電位の測定

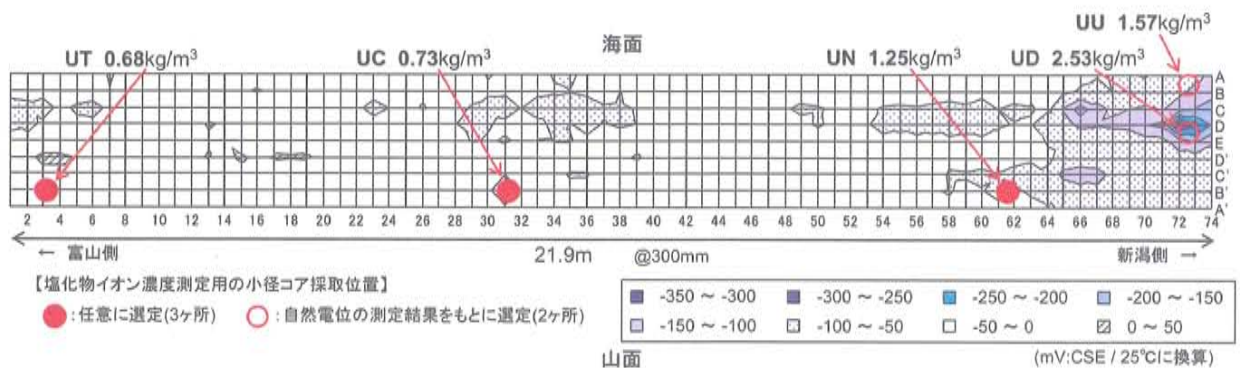
自然電位の測定は、測定開始から1時間以内に終了した。両橋とも測定面積が広く、一度に全体の測定を行うことが困難であったため、測定範囲を分割してコンクリートの湿潤と自然電位の測定を行った。

⑤ 鋼材腐食の推定

図-2に、各橋の自然電位の測定結果から作成した夏季の等電位線図を示す。RC床版橋では、海側ほど卑な自然電位が測定され、山側の一部でも卑な自然電位が測定された。これらの箇所では、 -350mV:CSE



(a) RC床版橋



(b) PC橋

図-2 自然電位と鋼材位置の塩化物イオン濃度の測定結果

よりも卑な自然電位が測定されたため、「90%以上の確率で腐食あり」と判定した。一方、PC 橋では、新潟側海面の一部で卑な自然電位が測定されたものの、 -350mV:CSE よりも貴であったため表-2 に従えば「不確定」と判定される。しかしながら、この周囲の等電位線の間隔が狭く、最も卑な自然電位が約 -320mV:CSE と比較的卑な値であったことから、鋼材腐食が生じている可能性が高いと推定した。

⑥ 塩化物イオン含有量・はつり調査箇所を選定

同時に、図-2 には、小径コア($\phi 25\text{mm}$)を採取して実施した鋼材位置の塩化物イオン濃度の測定結果も示している。両橋とも、自然電位測定前に任意に選定した3ヶ所と、等電位線図において比較的卑な自然電位を示した2ヶ所の計5箇所における測定結果を示している。RC 床版橋の海側(WN)と PC 橋の北側海面(UD)で鋼材位置の塩化物イオン濃度が最も高くなっており、これらは等電位線図において自然電位の卑な箇所と一致した。従って、等電位線図を用いて自然電位の分布傾向を把握することで、塩化物イオン濃度の最も高い箇所を調査箇所として選定することができる。

また、RC 床版橋の WN と PC 橋の UD のはつり調査の結果を図-3 に示す。RC 床版橋では鋼材表面に軽微な腐食が生じ、PC 橋では赤褐色の腐食が生じていた。表-2 の判定基準によると、WN は「90%以上の確率で腐食あり」、UD は「不確定」と判定されるが、実際には UD においても鋼材腐食は生じていた。UD 周辺の自然電位は -320mV:CSE であったが、これは、腐食部が局所的なアノード部となりマクロセル腐食を形成していたため、分極の影響を受けて本来の値よりも貴な自然電位が測定されたためと考えられる。従って、鋼材腐食の推定やはつり調査を行う場合には、表-2 の判定基準だけでなく、等電位線図における自然電位の分布傾向を精査することが必要である。

このように、外観上の損傷の観察のみで塩化物イオン含有量調査やはつり調査の実施箇所の決定が困難な場合には、自然電位の測定結果から等電位線図を作成し、周囲の等電位線の間隔が比較的狭く、最も卑な自然電位を示した箇所から調査箇所を選定することが可能である。

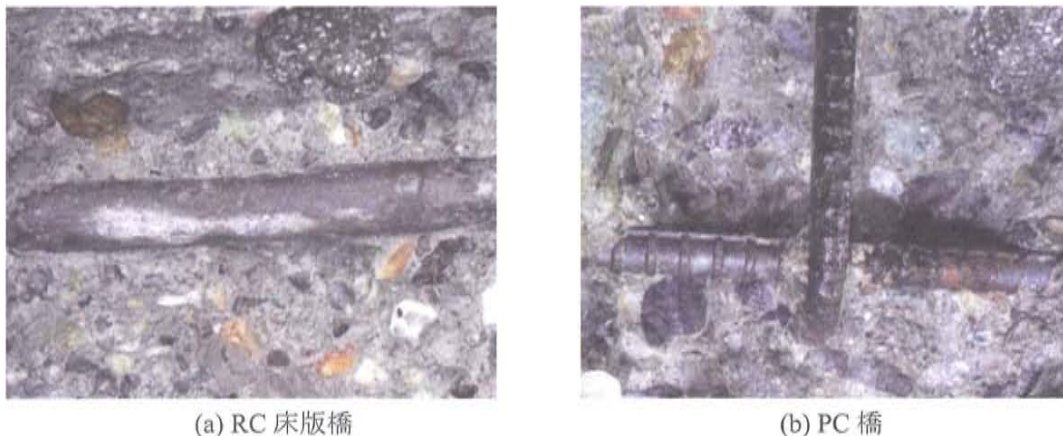


図-3 はつり調査による鋼材の腐食状況

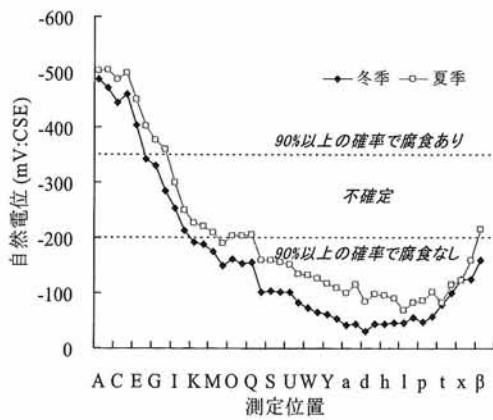
⑦ 自然電位の測定値の差

図-4 に、各橋の夏季と冬季の飽和塩化銀電極による測定結果を示す。この結果によると、夏季の方が平均で約 40mV 卑な自然電位を示した。この原因は、測定時の気温や湿度など気象条件が変化すると、鋼材周辺の腐食環境も変化するため、これを反映して自然電位が卑に変化したためである。ただし、両橋とも自然電位の全体的な分布傾向は概ね同様のものとなった。

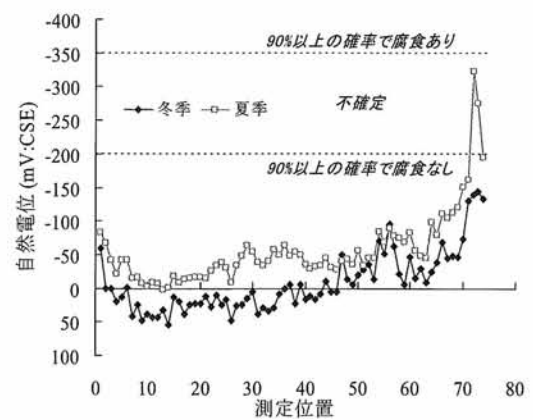
また、図-5、6 に、複数の照合電極を使用した場合の測定結果を、測定値の換算方法ごとに示す。ここでは、飽和塩化銀電極、鉛電極、飽和硫酸銅電極の3種類の照合電極を用い、換算式を用いた場合と飽和塩化カリウム水溶液中で各照合電極と補正専用の飽和カロメル電極との電極電位差を測定して換算した場合の結果を比較している。照合電極の違いにより、換算方法に関わらず、RC 床版橋では平均で約 150mV 、PC 橋では平均で約 50mV の差が生じていたが、どちらの補正方法を用いても自然電位の分布傾向は概ね同様のものが得られた。

このように自然電位の測定値には、気温や湿度などの気象条件、使用した照合電極により、差が生じ

ることが起こり得る。このため、鉄筋の腐食状態の推定、塩化物イオン濃度の測定やはつり調査を行う場合には、自然電位の測定値だけでなく、等電位線図のように測定値の分布傾向を精査して検討を行うことが重要である。

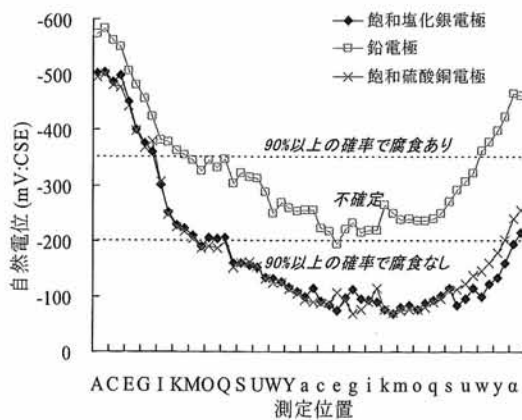


(a) RC床版橋

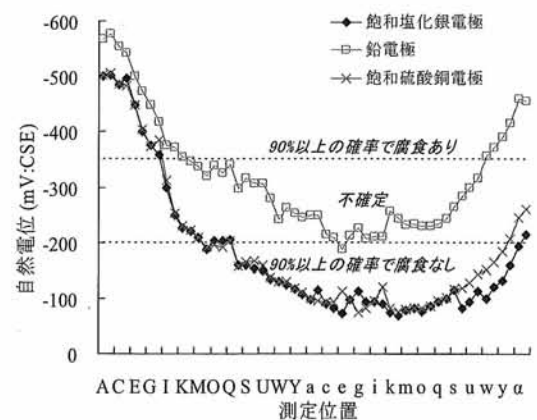


(b) PC橋

図-4 はつり調査による鋼材の腐食状況

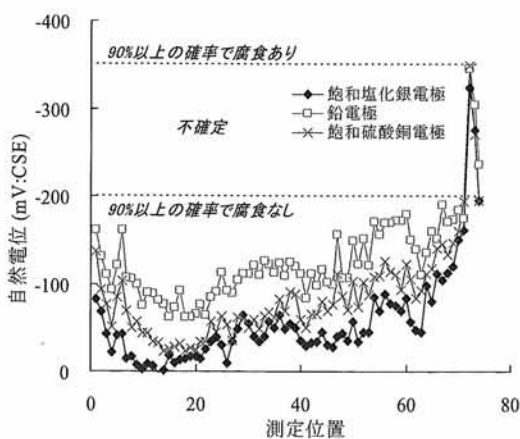


(a) 換算式を用いた場合

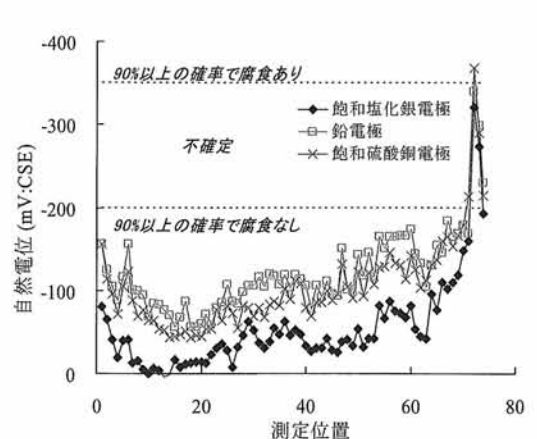


(b) 補正用電極により換算した場合

図-5 複数の照合電極を用いた場合の自然電位(RC床版橋)



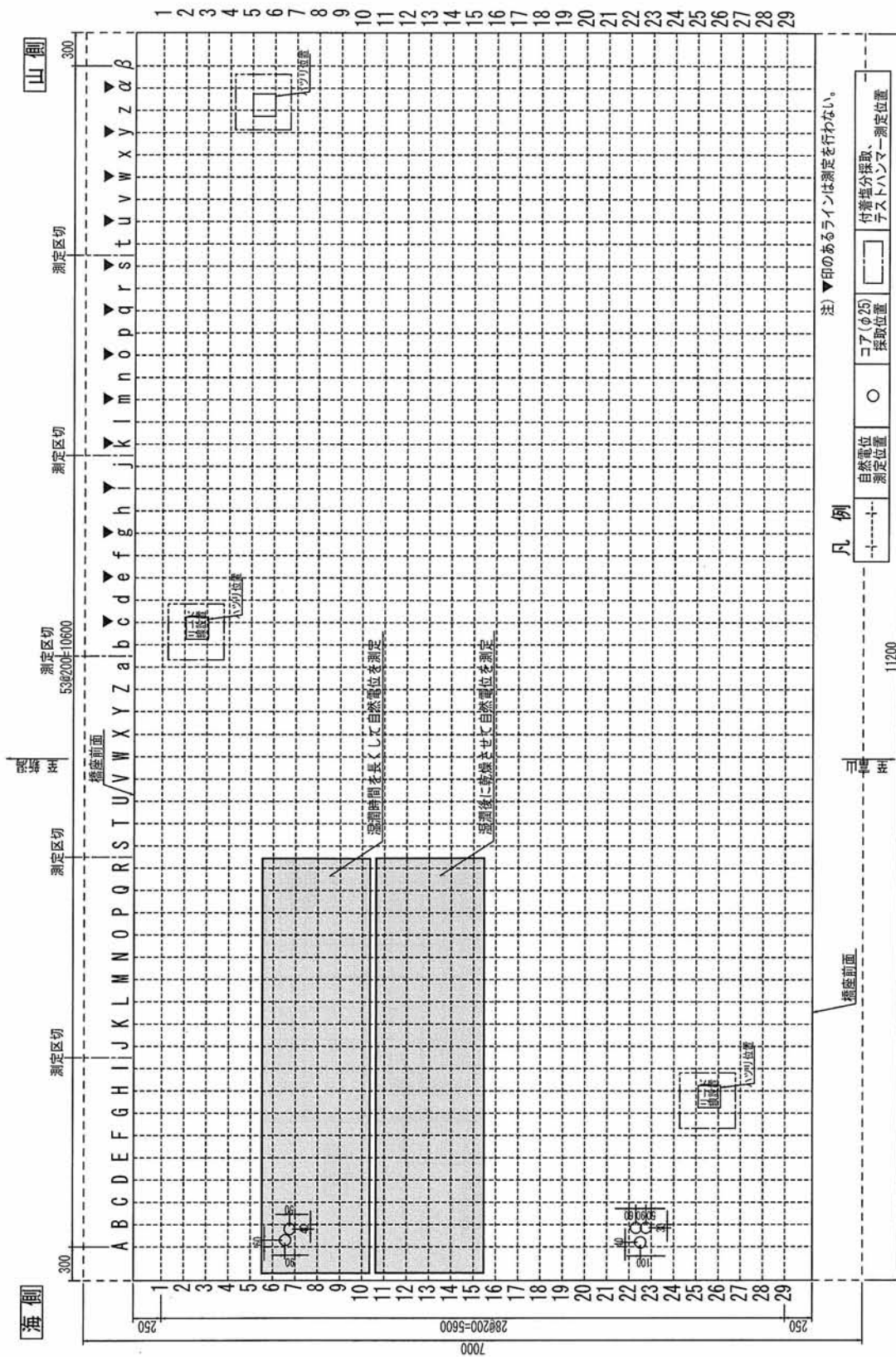
(a) 換算式を用いた場合



(b) 補正用電極により換算した場合

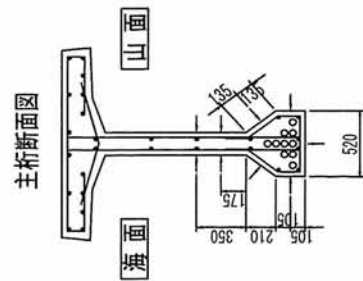
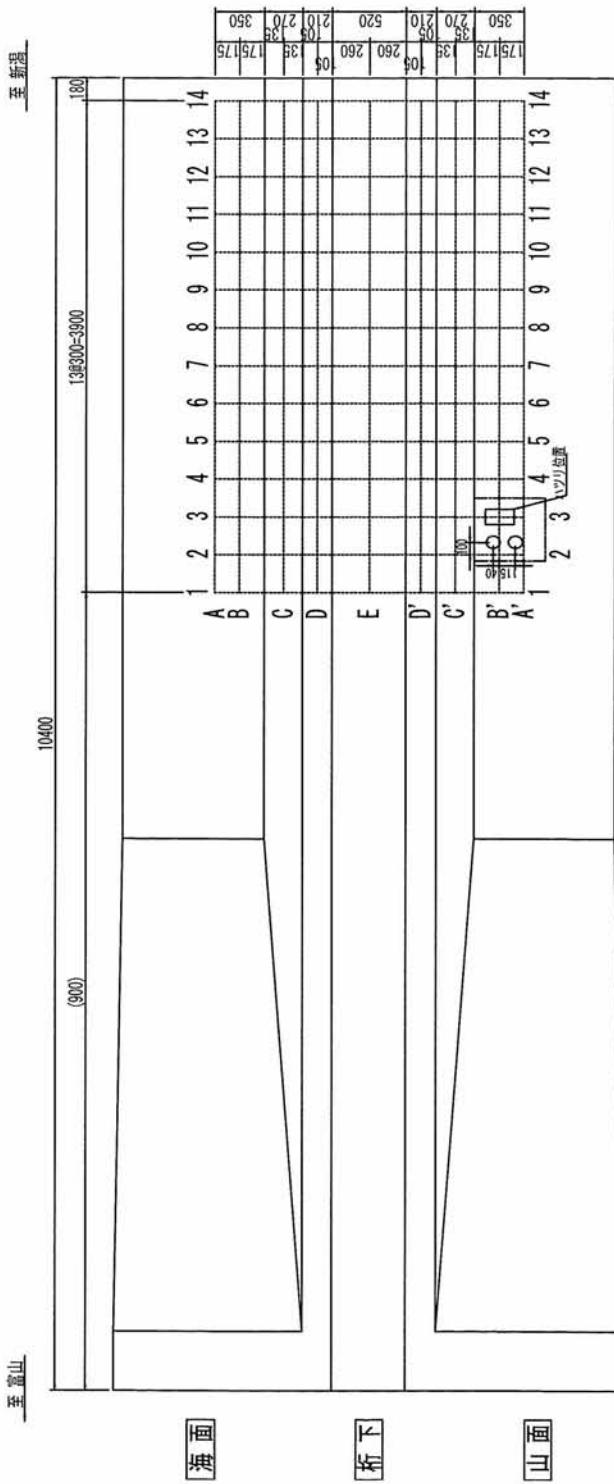
図-6 複数の照合電極を用いた場合の自然電位(PC橋)

付録



付図-1 脇谷川橋の測定位置図

歌高架橋(富山側) 測定位置図

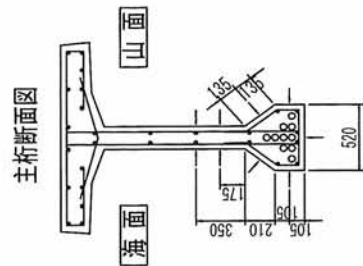
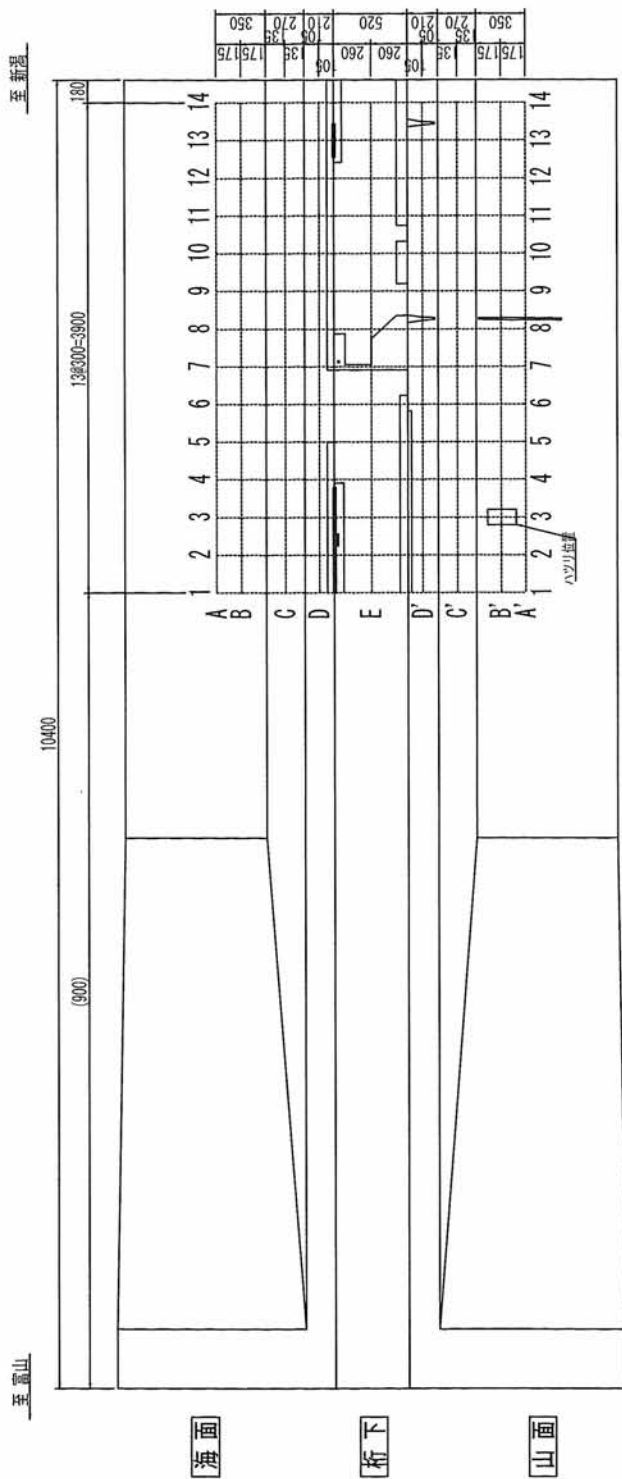


凡例

— + —	自然電位測定位置
○	コア(φ25)採取位置
□	付着塩分採取、テストハンマー測定位置

付図-2(a) 歌高架橋(富山側)の測定位置図

歌高架橋 (富山側) 目視点検結果

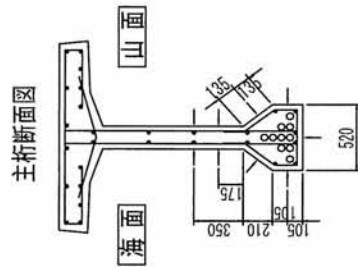
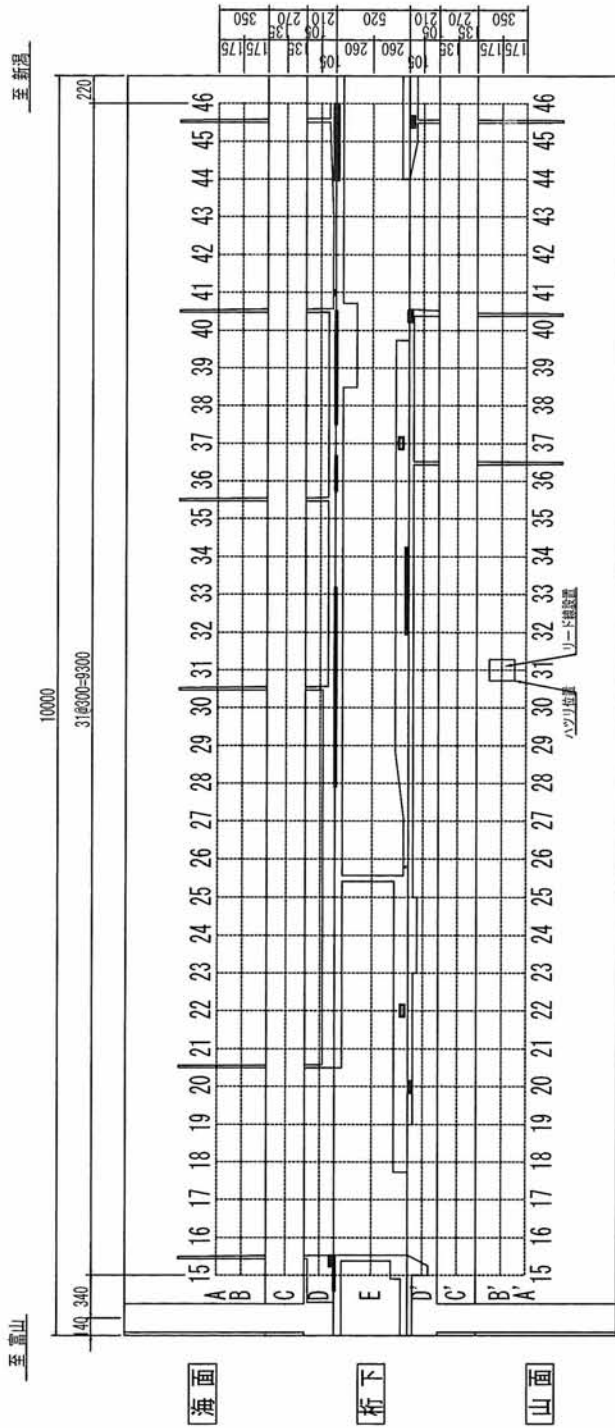


凡例

— + —	自然電位測定位置	遊離石灰
— 〓 —	ひび割れ	錆び汁
□	剥離	点錆び (薬物による錆び等)
▨	ジャンカ	その他 (変色)
▩	鉄筋露出	

付図-4(a) 歌高架橋(富山側)の目視点検結果

歌高架橋 (中央部) 目視点検結果



凡例

— + — + —	自然電位測定位置	遊離石灰
山	ひび割れ	錆び汁
□	剥離	点錆び (異物による錆び等)
▨	ジャンカ	その他 (変色)
▩	鉄筋露出	

付図-4(b) 歌高架橋(中央部)の目視点検結果

脇谷川橋 自然電位測定工程表 (午前)

	午前				8時			9時			10時			11時			12時					
					15	30	45	60	15	30	45	60	15	30	45	60	15	30	45	60		
①	散水																					
	測定								Db法													
②	散水																					
	測定								Nk法、Nh法、Fj法													
③	散水																					
	測定																					
④	散水																					
	測定																					
	散水																					
	測定																					
	散水																					
	測定																					

【特記事項】

Db法は、湿潤時間を長くした場合と湿潤後乾燥させた場合の測定を行う。

測定は、Nk法、Nh法、Fj法の順で行う。

Nk法、Nh法、Fj法は、橋梁全体の測定を行う。

測定は、200mm間隔で行う。

付表-1(a) 脇谷川橋の測定工程表(午前)

脇谷川橋 自然電位測定工程表 (午後)

午後	13時			14時			15時			16時			17時			
	15	30	45	60	15	30	45	60	15	30	45	60	15	30	45	60
① 任意																
② A~I	散水															
	測定															
② J~R	散水															
	測定															
③ S~a	散水															
	測定															
③ b~j	散水															
	測定															
④ k~s	散水															
	測定															
④ t~β	散水															
	測定															

【特記事項】

Db法は、湿潤時間を長くした場合と湿潤後乾燥させた場合の測定を行う。

測定は、Nk法、Nh法、Fj法の順で行う。

Nk法、Nh法、Fj法は、橋梁全体の測定を行う。

測定は、200mm間隔で行う。

付表-1(b) 脇谷川橋の測定工程表(午後)

歌高架橋 自然電位測定工程表 (午前)

	午前			8時			9時			10時			11時			12時					
	15	30	45	60	15	30	45	60	15	30	45	60	15	30	45	60	15	30	45	60	
①	海面 新潟側 1~20																				
	散水 測定																				
②	海面 新潟側 1~28																				
	散水 測定																				
③	海面 新潟側 1~29																				
	散水 測定																				
④	海面 富山側 1~14																				
	散水 測定																				
④	海面 富山側 1~14																				
	散水 測定																				
【特記事項】																					
Db法は、湿潤時間を長くした場合と湿潤後乾燥させた場合の測定を行う。																					
測定は、Nk法、Nh法、Fj法の順で行う。																					
Nk法、Nh法、Fj法は、橋梁全体の測定を行う。																					

付表-2(a) 歌高架橋の測定工程表(午前)

歌高架橋 自然電位測定工程表 (午後)

	午後	13時				14時				15時				16時				17時			
		15	30	45	60	15	30	45	60	15	30	45	60	15	30	45	60	15	30	45	60
①	海面 新潟側 1~20																				
	散水 測定																				
②	海面 新潟側 1~28																				
	散水 測定																				
③	海面 富山側 1~14																				
	散水 測定																				
④	海面 富山側 1~14																				
	散水 測定																				

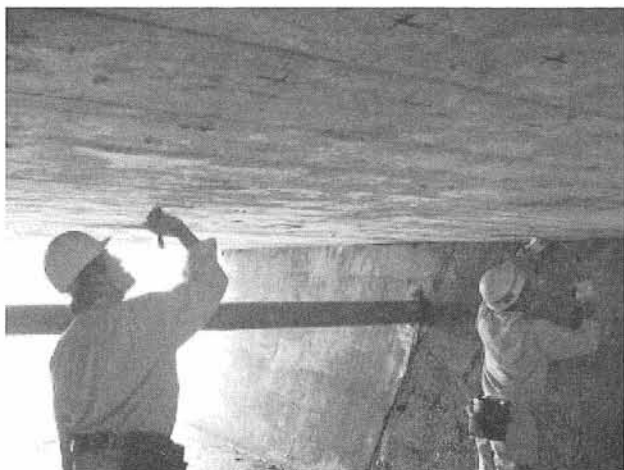
【特記事項】

Db法は、湿潤時間を長くした場合と湿潤後乾燥させた場合の測定を行う。

測定は、Nk法、Nh法、Fj法の順で行う。

Nk法、Nh法、Fj法は、橋梁全体の測定を行う。

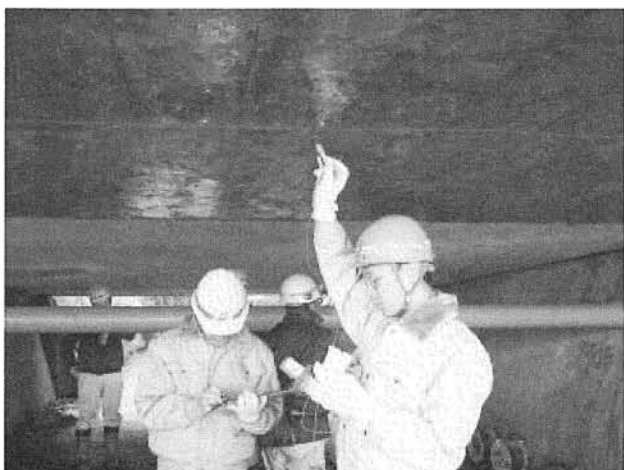
付表-2(b) 歌高架橋の測定工程表(午後)



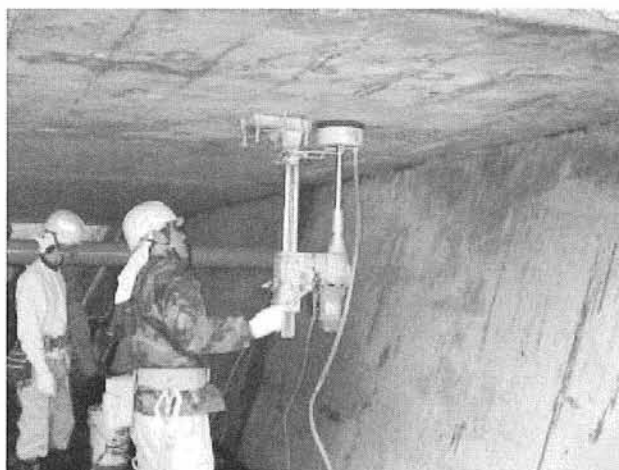
(a) 脇谷川橋 罫書き



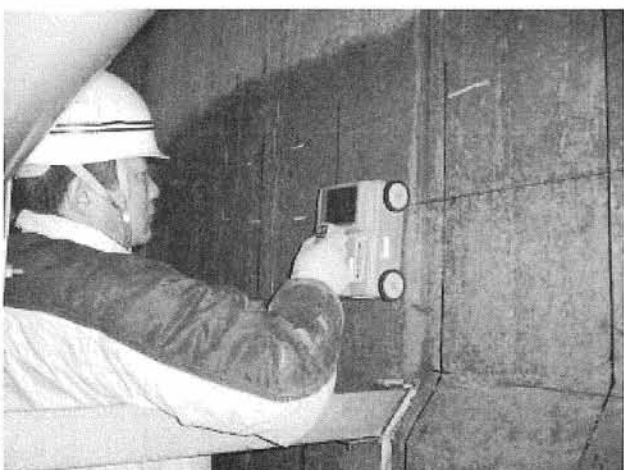
(b) 脇谷川橋 散水



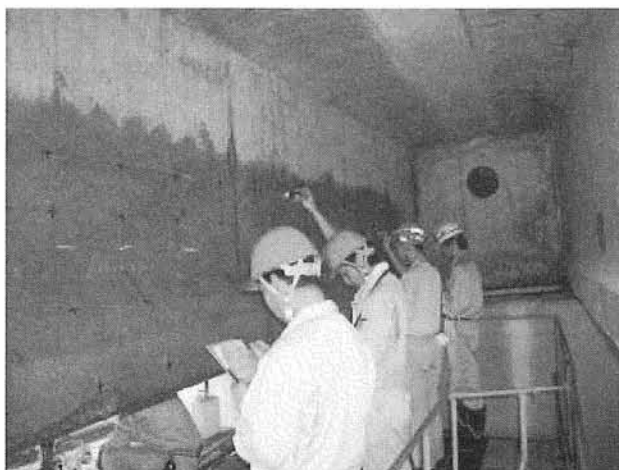
(c) 脇谷川橋 測定



(d) 脇谷川橋 小径コア採取



(e) 歌高架橋 鉄筋探査



(f) 歌高架橋 自然電位測定

付図-5 測定状況写真