

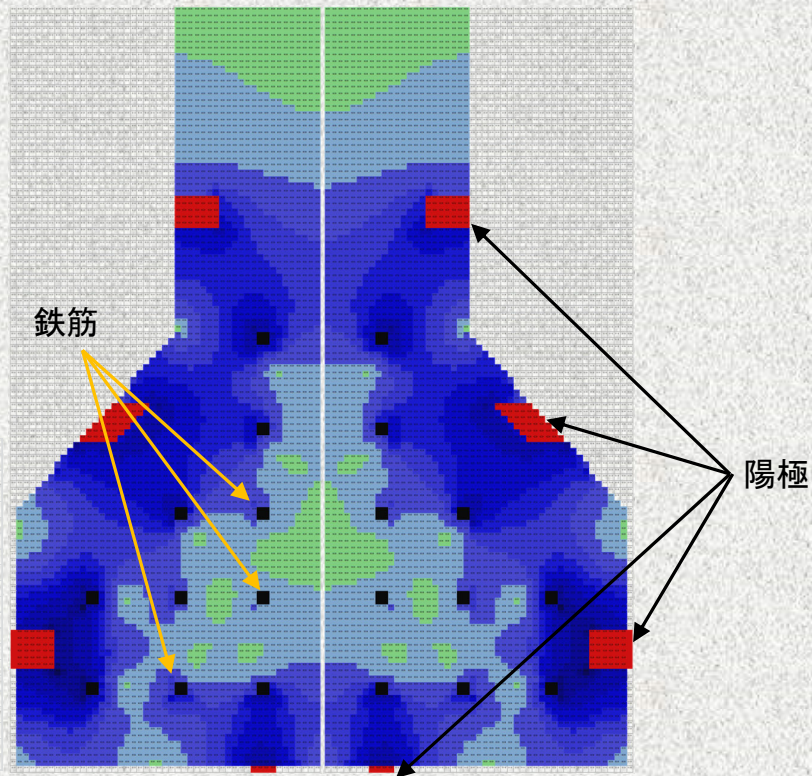
コンクリートを対象とした電気防食の防食電流の計算

【解析事例】

PC桁に対する線状陽極の電流分布の計算例
(1/2モデルの計算結果を反転して全体表示)

凡例(電流分布:mA)

	0.0013	より大	
	0.0010	以上	0.0013 未満
	0.0007	以上	0.0010 未満
	0.0004	以上	0.0007 未満
	0.0003	以上	0.0004 未満
	0.0002	以上	0.0003 未満
	0.0001	以上	0.0002 未満
	0.0001	以上	0.0001 未満
	0.0000	以上	0.0001 未満
	0.0000	未満	



1

Excelの環境設定

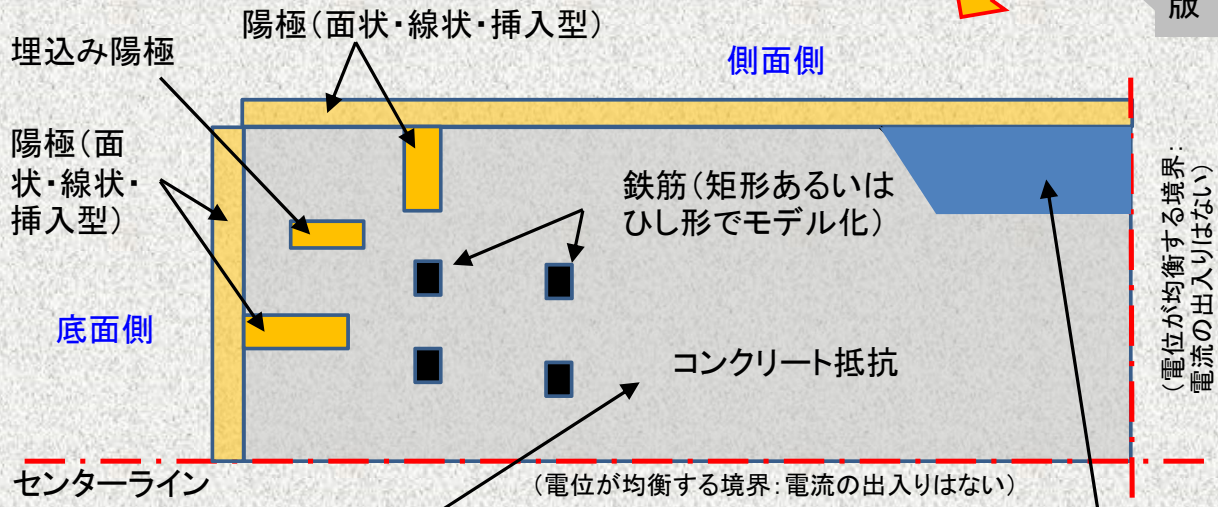
オプションの「数式」をクリックし「手動」をチェックし再計算をはずす「R1C1参照形式を使用する」をチェック

Excelのスタート画面のメニューから「ファイル」→「オプション」

2

計算モデル化の基本

モデル化した範囲を差分法(陽解放)により、各セルの電位を計算



モデルの範囲の各セルには任意のコンクリート抵抗 ($\rho: \Omega\text{mm}$) を入力できる。

モデルのイメージ

モデルの形状は矩形が基本であるが、任意形状に対応するために、断面を無視したいセルには高抵抗 ($=1E250\Omega\text{mm}$) を入力する。

モデル化するセルの行・列の範囲を設定

データ入力(1)・・・データシートの構成

セルの大きさを設定

陽極の種類と数を設定(なし・面状・線状(表面貼付け)・線状(溝型)挿入)

線状(表面貼り付け)陽極の位置を設定(底面・側面)

線状(溝型)・挿入陽極の位置を設定(底面・側面)

埋込み陽極の位置・電位を設定(セルの番地で指定)

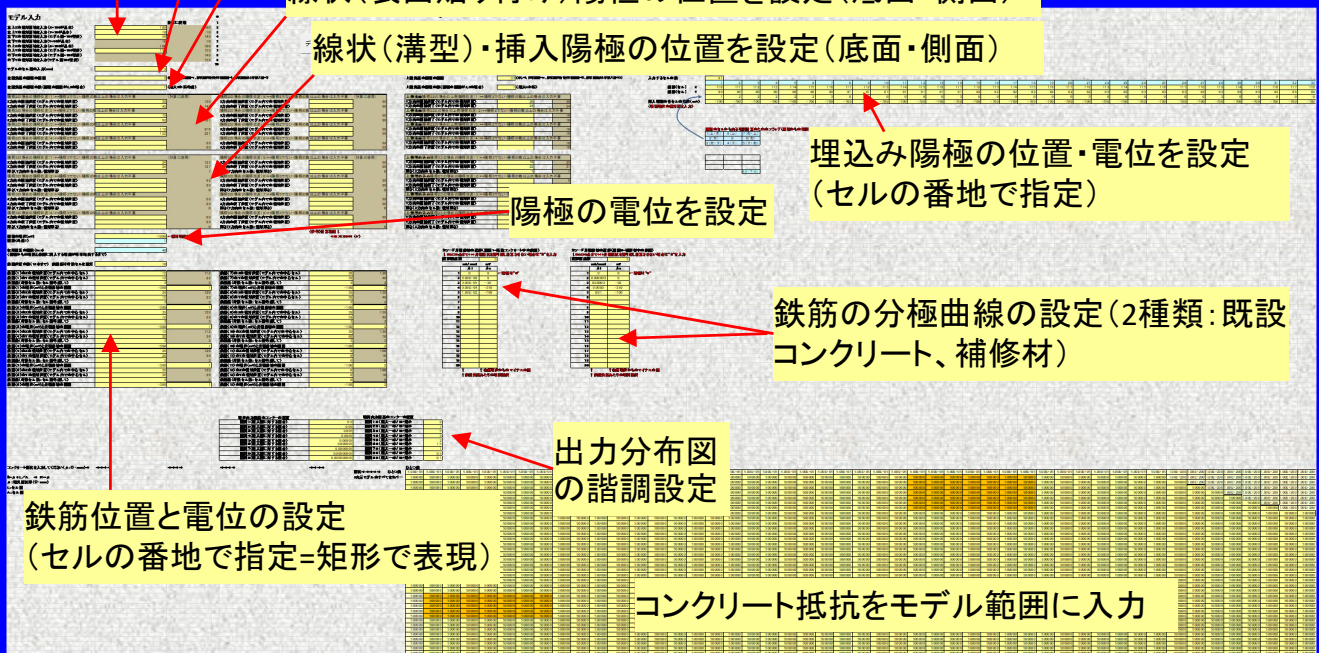
陽極の電位を設定

鉄筋の分極曲線の設定(2種類: 既設コンクリート、補修材)

出力分布図の諧調設定

鉄筋位置と電位の設定(セルの番地で指定=矩形で表現)

コンクリート抵抗をモデル範囲に入力



データ入力(2)・・・モデル化の範囲の設定

1. モデルの範囲は「データ入力」「モデル化と計算」「電流計算」の各シートで共有される。
2. 矩形でモデル化するために「左上X=100」「左上Y=10」は動かさない。
3. X方向(行)のサイズ(モデルの幅)は最大で160程度とする。
4. Y方向(列)のサイズ(モデル幅)は最大で100程度とする。
5. モデル化したセルの幅を、モデル化の範囲、鉄筋径、かぶりなどより設定する。
(3mmに設定した場合、モデル化の範囲(ハーフモデル)は、X方向480mm,Y方向300mm程度になる)

Microsoft Excel 2017のスクリーンショット。シート名は「マクロ分割_2次元版_鉄筋電位0版_PC部材_陽極直接入力版_陽極左端と上端_20171031_...xlsm」。メニューバーには「ファイル」「ホーム」「挿入」「ページレイアウト」「数式」「データ」「校閲」「表示」「開発」「アドイン」「Acrobat」などがある。リボンには「MS Pゴシック」フォントと「11」サイズが設定されている。ツールバーには「折り返して全体を表示する」「標準」「セルを結合して中央揃え」などのボタンがある。

中央には黄色いセル範囲があり、その上に「モデルの範囲(行・列)を黄色のセルに入力する(他のセルは自動計算される)」というテキストと赤い矢印が指している。

	1	2	3	4
1				
2	モデル入力			0
3			計算に使用	1
4	左上Xの絶対番地を入力(X=100が基本)	100		100
5	左上Yの絶対番地を入力(Y=10が基本)	10		10
6	左下Xの相対番地を入力(モデル幅=160程度)	50		149
7	左下Yの絶対番地を入力(Y=10が基本)	10		10
8	右上Xの相対番地を入力(X=100が基本)	100		100
9	右上Yの相対番地を入力(モデル幅=100程度)	150		159
10	右下Xの相対番地を入力(モデル幅=160程度)	50		149
11	右下Yの相対番地を入力(モデル幅=100程度)	150		159
12				10
13	モデルのセル幅の入力(mm)	3		
14				5

データ入力(3)・・・底面側の陽極の設定

1. 陽極の種類を底面及び側面のそれぞれに設定する。(0=なし,1=面状陽極(全面貼付け),2=線状表面貼付,3=線状溝型および挿入型)
 - 1とした場合、表面全体を陽極が覆う
 - 2とした場合、設定したセルの範囲の表面を陽極が覆う(コンクリート内に入らない)
 - 3とした場合、設定したセルの範囲のコンクリートを陽極で置き換える
2. 陽極の種類が2,3の場合には、陽極の数をを入力する(最大8か所)
3. 陽極の種類が2の場合、表面を覆う範囲(モデルの始点からの行数:X方向)を設定する
4. 陽極の種類が3の場合、挿入する範囲を矩形(モデルの始点からの行・列:X,Y方向)で設定する。
5. 陽極の電位を設定する。絶対電位(マイナス)で入力する。陽極の電流量で制御したい場合でも、計算上は電位で設定した後、出力電流量に応じた電位を計算し再設定する。

Excelのスクリーンショット。シート名は「マクロ分割_2次元版_鉄筋電位0版_PC部材_陽極直接入力版_陽極左端と上端_20171031_...xlsm」。メニューバーには「ファイル」「ホーム」「挿入」「ページレイアウト」「数式」「データ」「校閲」「表示」「開発」「アドイン」「Acrobat」などがある。リボンには「MS Pゴシック」フォントと「11」サイズが設定されている。ツールバーには「折り返して全体を表示する」「標準」「セルを結合して中央揃え」などのボタンがある。

中央には黄色いセル範囲があり、その上に「1 2 3 4 5 黄色着色セルのみ入力」というテキストと赤い矢印が指している。

	1	2	3	4	5
14	左側表面の陽極の種類	0			
15	右側表面の陽極の種類	0			
16	左側表面の陽極の取(陽極の種類が2の場合)	1			
17	右側表面の陽極の取(陽極の種類が2の場合)	1			
18	陽極の種類(0:なし,1:全面貼付,2:線状表面貼付,3:線状溝型および挿入型)	0			
19	X方向の開始位置(モデル内での相対位置)	39			
20	X方向の終了位置(モデル内での相対位置)	42			
21	Y方向の開始位置(モデル内での相対位置)	78			
22	Y方向の終了位置(モデル内での相対位置)	82			
23	X方向の開始位置(モデル内での相対位置)	119			
24	X方向の終了位置(モデル内での相対位置)	122			
25	X方向の開始位置(モデル内での相対位置)	89			
26	X方向の終了位置(モデル内での相対位置)	92			
27	Y方向の開始位置(モデル内での相対位置)	159			
28	Y方向の終了位置(モデル内での相対位置)	162			
29	電位(mV)	-1000			
30	電流(A)	1			

グレーは自動計算される(以下同じ)

データ入力(4)・・・側面側の陽極の設定→基本的には底面側と同様

1. 陽極の種類を底面及び側面のそれぞれに設定する。(0=なし,11=面状陽極(全面貼付け),22=線状表面貼付,33=線状溝型および挿入型)
11とした場合、表面全体を陽極が覆う
22とした場合、設定したセルの範囲の表面を陽極が覆う(コンクリートに入らない)
33とした場合、設定したセルの範囲のコンクリートを陽極で置き換える
2. 陽極の種類が22,33の場合には、陽極の数を入力する(最大4か所)
3. 陽極の種類が22の場合、表面を覆う範囲(モデルの始点からの列数:Y方向)を設定する
4. 陽極の種類が33の場合、挿入する範囲を矩形(モデルの始点からの行・列:X,Y方向)で設定する。
5. 陽極の電位は底面で設定した電位と同一。

1 2 3 黄色着色セルのみ入力

計算(使用)	上側表面側の陽極の種類	上側表面側の陽極の数(陽極の種類が2,3の場合)	上側表面陽極22の場合の上側陽極位置(1)**陽極2でない・陽極の数以上の場合は入力不要	Y方向の開始位置(モデル内での相対位置)	Y方向の開始終了(モデル内での相対位置)	上側表面陽極22の場合の上側陽極位置(2)**陽極2でない・陽極の数以上の場合は入力不要	Y方向の開始位置(モデル内での相対位置)	Y方向の開始終了(モデル内での相対位置)	上側表面陽極22の場合の上側陽極位置(3)**陽極2でない・陽極の数以上の場合は入力不要	Y方向の開始位置(モデル内での相対位置)	Y方向の開始終了(モデル内での相対位置)	上側表面陽極22の場合の上側陽極位置(4)**陽極2でない・陽極の数以上の場合は入力不要	Y方向の開始位置(モデル内での相対位置)	Y方向の開始終了(モデル内での相対位置)
99	33	1												
99														
0														
99														
99														
99														
99														
0														
99														
99														
99														
99														
0														

4

データ入力(5)・・・埋込み陽極の設定

1. データ入力(3),(4)と独立した陽極を、モデル内のセルに直接設定する(埋込み陽極)。
2. 埋込み陽極を設定するセルの数を入力する。埋込み陽極を設定しない場合は「0」とする。(最大100程度まで対応)
3. 埋込み陽極を設定するセルの行(X)と列(Y)を、モデルの“絶対番地”で入力する。
絶対番地を設定するためには、抵抗を入力するための“モデル図”で色を変えて設定しておき、確認しながら入力するのが良い。
4. 埋込み陽極の(コンクリートに対する)位置関係を、参考の図を参照して番号で入力する。(陽極から出る電流量を計算するために、陽極とコンクリートとの位置関係を明確にする必要がある)
5. 陽極の電位をそれぞれのセルごとに設定する。(鉄筋の電位を「0」とした相対電位を入力する)

黄色着色セルのみ入力

セルに電位を直接入力する場合 入力するセルの数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
座標(セル) X	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123
座標(セル) Y	1	2	2	2	2	2	2	3	0	0	0	0	0	0
挿入電極の各セルの電位(mV) (鉄筋電位を「0」としたときの電極電位を正の値で入力)	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300

2 3 4 5

データ入力(6)・・・鉄筋の設定

1. 差分法の収束計算の繰り返し回数で、繰り返し回数が多くなると時間がかかる。
(一般には1000回程度と考えられるが、最初は500回程度で解の状態を確認するのが良い)
2. 防食対象となる鉄筋の本数を入力する(最大12本)。その後、鉄筋の形状を■か◆を選定する(1or2を入力)。鉄筋の初期の分極抵抗を入力する(この値は計算途中で変化)。
3. 鉄筋(1~12)の中心となるセルの行(X)をモデル内の上端からの相対位置で設定する。鉄筋(1~12)の中心となるセルの列(Y)をモデル内の左端からの相対位置で設定する。
(かぶりや鉄筋間隔を、「モデル化のセル幅」で割ることにより算出できる)
鉄筋径は、中心となるセルを含めて鉄筋が占めるセル数(奇数のみ)を入力する。
4. 鉄筋の電位(マイナス側)を入力し、分極曲線の種類を1, 2のいずれかを設定する。
5. 分極曲線に近似させるための計算回数を入力する。おおよそ15回程度が収束の目安。

黄色着色セルのみ入力

データ入力(7)・・・鉄筋の分極曲線

1. 鉄筋の分極曲線は2種類用意されている。左側が種類1(既設コンクリート中の鉄筋)、右側が種類2(断面修復材中の鉄筋)。
2. アノード・カソード分極曲線は、折れ線で近似するため、接点数を入力する(max20節点)。分極曲線を考慮しないで計算する場合は"0"を入力する。
3. 各接点における電流密度(鉄筋表面積あたりmA/mm²)と電位(mV)を入力する。
(最初は"0, 0"から始める)

カソード分極曲線の近似(種類1=既設コンクリート中の鉄筋)

近接接点数	mA/mm ²	mV
1	0.0003	380
2	-1.00E-04	240
3	-3.00E-05	120
4	-1.00E-05	40
5	-3.00E-06	20
6	-1E-06	10
7	0	0
8	0.000001	-5
9	0.000003	-15
10	0.00001	-50
11	0.00002	-150
12	0.0001	-310
13	0.0003	-560
14		
15		
16		
17		
18		
19		
20		

カソード分極曲線の近似(種類2=補修材中の鉄筋)

近接接点数	mA/mm ²	mV
1	0.0003	380
2	-0.0001	480
3	-0.00003	240
4	-0.00001	80
5	-3E-06	40
6	-1E-06	20
7	0	0
8	0.000001	-10
9	0.000003	-30
10	0.00001	-120
11	0.00002	-300
12	0.0001	-620
13	0.0003	-1120
14		
15		
16		
17		
18		
19		
20		

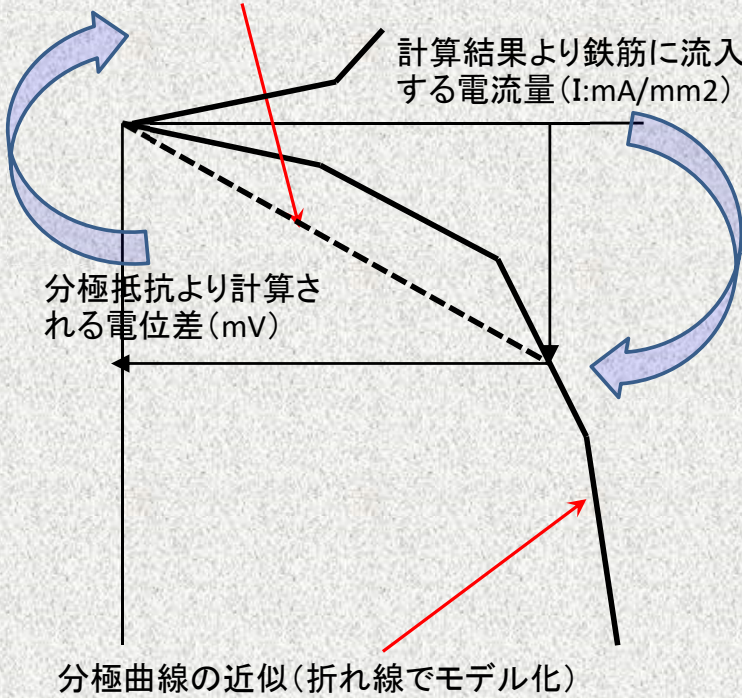
1 自然電位からのマイナス値
1 鉄筋表面あたりの電流密度

1 自然電位からのマイナス値
1 鉄筋表面あたりの電流密度

1 自然電位からのマイナス値
1 鉄筋表面あたりの電流密度

鉄筋の表面の分極抵抗を以下の様に考慮する。

鉄筋表面の見かけの抵抗(R) ⇒ 次回の計算でモデルに反映



データ入力シートに近似式を設定し、数回計算させる。
分極抵抗を考慮しない場合は「近似接点数=0」とする。初期値による計算で終了。

近似接点数	mA/mm ²	mV
1	0	0
2	9.00E-06	0
3	3.00E-05	-30
4	9.00E-04	-350
5	1.00E-02	-700
6		
7		
8		
9		
10		
11		
12		
13		
14		
15		
16		
17		
18		
19		
20		

データ入力(8)・・・コンクリート抵抗・陽極抵抗の設定

- 先に入力した「データ入力(2)モデル化の範囲の設定」において指定した範囲にコンクリート抵抗を入力する。(モデルの内容を分かり易くするために、セルを着色するなどする)
 $R = \rho * L / A$ として、L=セル幅、A=セル幅×奥行(1mm)とすると、R=ρとなるため、コンクリートの電気抵抗率ρ(Ωmm)を入力する(単位に注意)。計算ではLで除す。
- モデルは矩形とするが、電気抵抗ρを10²⁵⁰にしたセルは無視される。(自由な形状に対応可能)
- 底面(モデル左端)、側面(モデル上端)の表面に陽極を考慮するため、陽極の抵抗を入力する、便宜的にコンクリートの抵抗で置き換える。(結果の評価は電流とするので、陽極部の抵抗の数値はそれほど重要ではないと考えられる)

(参考)モデル化を分かり易くするために、陽極位置、鉄筋位置、無視する断面などを色分けしておくこと、入力データを確認することができる。

データ入力(9)・・・電位分布、電流分布の諧調(色分け)の設定

1. 計算結果は数値と共に、分布図として色分けで表現するが、着目する範囲の諧調を明確にしたい場合に入力する。(必ず入力)
2. 電位出力図は、陽極の電位が最大になるので、その値の割合で分布図の諧調を設定する。
3. 電流出力図は、電流の最大と最小の差に対して分布図の諧調を設定する。電流出力図は、計算の結果を確認した後、改めて分布図の諧調を変更することができる。

2		3	
電位出力図面のコンターの配置		電流出力図面のコンターの配置	
諧調1(最大値に対する割合)	0.9	諧調1×(最大-最小)÷10+最小	9
諧調2(最大値に対する割合)	0.8	諧調2×(最大-最小)÷10+最小	7
諧調3(最大値に対する割合)	0.7	諧調3×(最大-最小)÷10+最小	5
諧調4(最大値に対する割合)	0.6	諧調4×(最大-最小)÷10+最小	3
諧調5(最大値に対する割合)	0.5	諧調5×(最大-最小)÷10+最小	2
諧調6(最大値に対する割合)	0.4	諧調6×(最大-最小)÷10+最小	1.5
諧調7(最大値に対する割合)	0.3	諧調7×(最大-最小)÷10+最小	1
諧調8(最大値に対する割合)	0.2	諧調8×(最大-最小)÷10+最小	0.5
諧調9(最大値に対する割合)	0	諧調9×(最大-最小)÷10+最小	0.1

黄色着色セルのみ入力

13

データ入力(10)・・・データの確認と計算開始

1. 全てのデータが入力できたことを確認して、「データ入力」シートの左上方にある「データの確認と計算開始」ボタンを押下する。計算時間は、モデルの大きさなどによって異なるが、おおよそ5~6分程度かかる。

The screenshot shows an Excel spreadsheet with multiple sheets. The 'データ入力' sheet is active, displaying a large table of data. A red arrow points from a button labeled 'データの確認と計算開始' (Data Confirmation and Calculation Start) to the calculation area of the spreadsheet. The spreadsheet contains various numerical values and formulas, with some cells highlighted in yellow. The Excel interface, including the ribbon and status bar, is visible at the top and bottom of the window.

14

EXCELシートへの計算結果の出力

- 「データ入力」シートの「計算開始」ボタンを押すと計算をスタートするが、実際の計算は「モデル化と計算」シートで行っている。ただし、計算速度を速めるために、画面表示は止めてあるので、計算のプロセスを画面で確認することは出来ない。
- 繰り返し計算を40回程度行うが(データ入力(6)の2.で設定した回数)、計算のプロセスを確認するために、各回数での電位分布を「二次元イメージ収納」シートに、200行ごとに示している。左上の数値が回数である。
- 計算の結果、陽極から出る電流量と各鉄筋に流入する電流量は、「陽極－陰極の電位後電流」シートに出力される。陽極から出る全電流量が、全鉄筋に流入する電流量に近い値となることを確認する。
- 防食電流の分布状況計算結果は「電流計算」シートに分布図として出力される。
- (参考まで)「入力データ保存(1)」は、データ入力シートを保存するための予備シートである。(使用者が、モデルを保存したい場合に、データ入力シート全体をコピーして貼り付ければよい。そこに保存されたモデルを使用したい場合は、再度データ入力シートに貼り付けて計算することができる。)・使用者がモデルの数に応じて追加できる。



「陽極－陰極の電位後電流」シートへの結果出力

- 底面側(左側)電極、側面側(上側)電極および埋込み電極のそれぞれの電流量および合計("F9"を押下)の電流量が出力される。
- 鉄筋(1~12)の各鉄筋に流入する電流量及びそれらの合計が出力される。
- 定常状態であれば、陽極からの全電流量と、鉄筋に流入する全電流量は一致すべきであるが、計算時間の関係で近似的な値となる。ただし、両者がほぼ同じになることを確認する。
- 防食面積を入力すると防食電流密度が計算され、さらに設計上考慮したい防食電流密度を入力して"F9"を押下すると、計算に用いる陽極の電位が算出される。この値を陽極電位として再計算すれば最終的な値が求まる。

左側電極		上側電極	
左側の陽極の電位	400 mV	上側の陽極の電位	400 mV (左と上の陽極電位の合計)
左側の陽極からの全電流	0.0027434 mA	上側の陽極からの全電流	0 mA
左側の陽極からの電流密度	7.821E-06 mA/m ²	上側の陽極からの電流密度	0.002743415 mA/m ²
鉄筋1の流入電流	0.0009492 mA	埋込み電極	
鉄筋2の流入電流	0.0008498 mA	埋込み電極の平均電位	0 mV
鉄筋3の流入電流	0.0009979 mA	埋込み電極からの全電流	0 mA
鉄筋4の流入電流	0 mA	埋込み電極からの電流密度	0 mA/m ²
鉄筋5の流入電流	0 mA		
鉄筋6の流入電流	0 mA		
鉄筋7の流入電流	0 mA		
鉄筋8の流入電流	0 mA		
鉄筋9の流入電流	0 mA		
鉄筋10の流入電流	0 mA		
鉄筋11の流入電流	0 mA		
鉄筋12の流入電流	0 mA		
全鉄筋に流入する電流	0.002731 mA	陽極からの全電流(mA)	0.002743415 mA

防食コンクリート面積(m ²)	0.00043	←入力
設計電流密度(mA/m ²)	5.71644818	←入力(F9キーを押下してシートの計算をさせる)
設計電流密度(mA/m ²)	40	
上記を基礎とする電位(mV)	2788.488518	

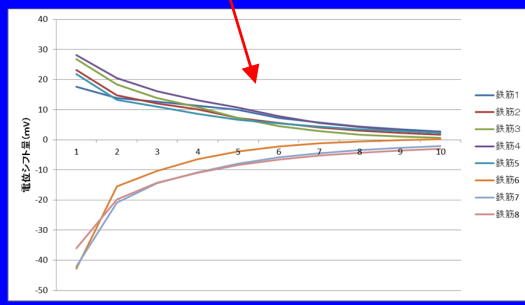
「陽極－陰極の電位後電流」シートへの結果出力(その2)

1. 分極曲線を用いた計算の場合には、10回の繰り返し計算の課程で設定した鉄筋表面の抵抗(分極抵抗+周辺コンクリート抵抗)や鉄筋のシフト量が表示される。計算では、設定した鉄筋の自然電位からシフト量を考慮した電位を設定して繰り返し計算を行っており、シフト量が収束傾向にあることを確認する。

各回の計算に用いた値

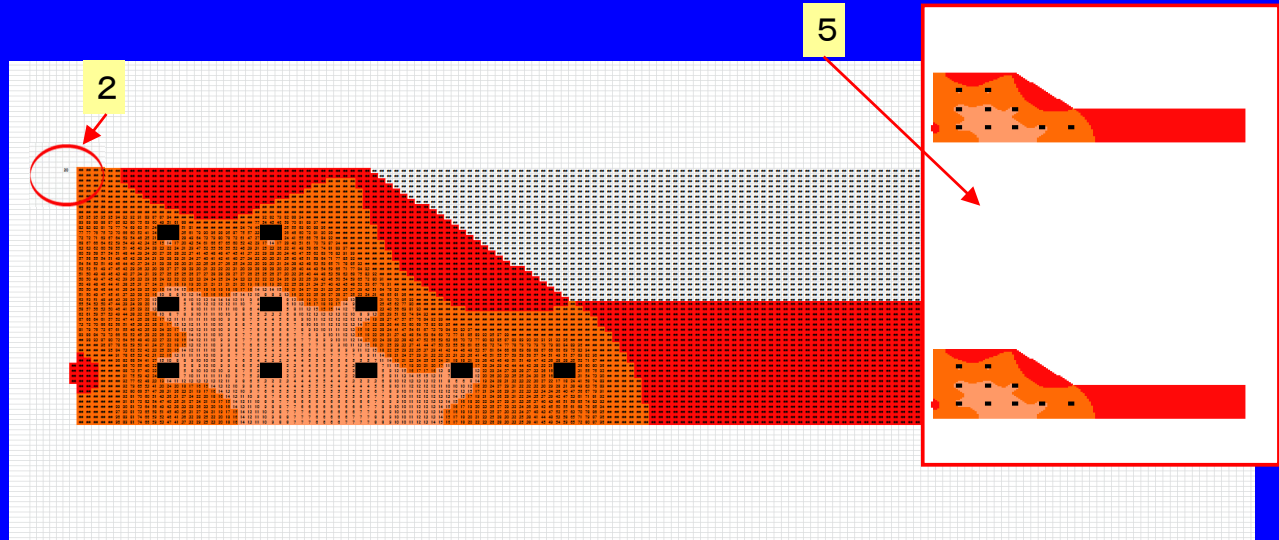
回数	鉄筋ID	入力電流 (mA/mm ²)	入力電圧 (mV/mm ²)	シフト量 (mm)
1	鉄筋1	4.095E-05	4.031E-05	3.2895E-15
2	鉄筋1	4.2433781E-05	3.8449192E-05	3.8122705E-05
3	鉄筋1	4.3918E-05	4.031E-05	4.29981E-05
4	鉄筋1	4.5402E-05	4.2198E-05	4.8001E-05
5	鉄筋1	4.6886E-05	4.4086E-05	5.3004E-05
6	鉄筋1	4.8370E-05	4.5974E-05	5.8007E-05
7	鉄筋1	4.9854E-05	4.7862E-05	6.3010E-05
8	鉄筋1	5.1338E-05	4.9750E-05	6.8013E-05
9	鉄筋1	5.2822E-05	5.1638E-05	7.3016E-05
10	鉄筋1	5.4306E-05	5.3526E-05	7.8019E-05

シフト量が収束傾向にあることを確認



「二次元イメージ収納」シートへの結果出力

1. 電位が安定するまで繰り返し計算を行っており、その都度、このシートに電位分布を記録している。
2. 左上の数字化、繰り返し回数である。
3. 分布図は、「データ入力」シートで設定した諧調で色分けされている。
4. 鉄筋は"黒"で示す。
5. 繰り返し回数ごとの分布図に大きな変化がなければ収束していると判断できる。



「電流計算」シートへの結果出力

1. 電位が安定した段階(最後の繰り返し計算後)に、対象セルに対して、左隣のセル、上側のセルから流れ込む電流量を計算し、分布図と共に出力される。(抵抗はそれぞれ左・上のセルの抵抗を使用して計算しているため、セルが一つずれる)
2. 陽極は赤色で、鉄筋は黒で、それぞれ表示している。
3. 分布図は、「データ入力」シートで設定した諧調で色分けされて出力されるが、このシートの左上の表に数値を入力し「表示設定切り替え」ボタンを押下すると表示が切り替わる。

表示設定切り替え

54	筋線1	3
55	筋線2	2
56	筋線3	6
57	筋線4	2
58	筋線5	0
59	筋線6	15
60	筋線7	1
61	筋線8	05
62	筋線9	01
63		
64		
65		
66		

表示設

19

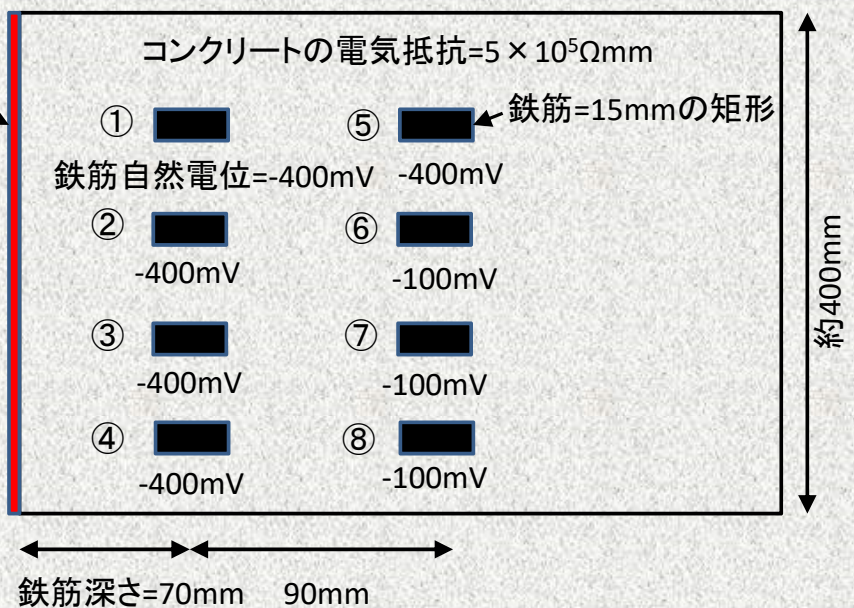
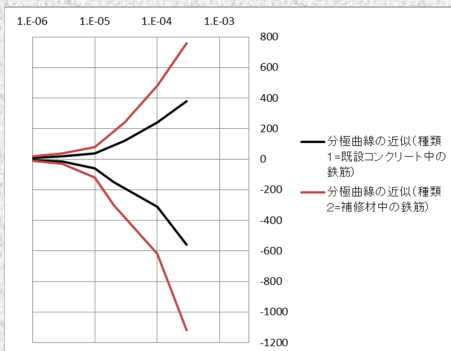
解析事例

矩形断面の下側に面状陽極を設置した場合の電流分布 (分極抵抗を考慮)

解析条件

底面側
陽極電位=-2000mV
(陽極界面での抵抗は考慮しない)

分極曲線の想定



矩形断面で電気防食を設置していない場合のマクロセル電流分布

電気防食を行っていない場合、表面付近の鉄筋(自然電位-400mV)からアノード電流が流れ出し、奥側の鉄筋(自然電位-100mV)にはカソード電流が流れ込んでいる。

鉄筋① 流出電流= -0.12×10^{-3} mA
電位シフト=+15mV

鉄筋② 流入電流= -0.22×10^{-3} mA
電位シフト=+22mV

鉄筋③ 流入電流= -0.29×10^{-3} mA
電位シフト=+25mV

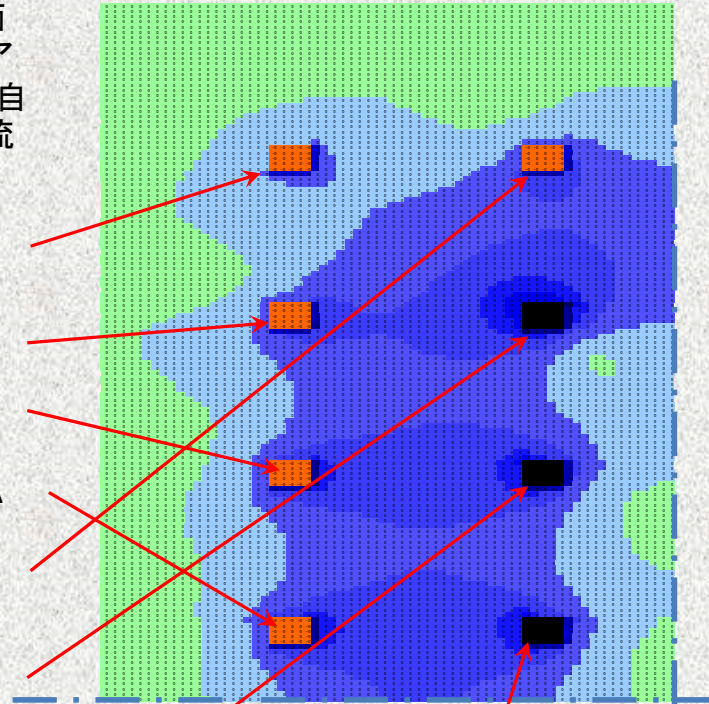
鉄筋④ 流入電流= -0.31×10^{-3} mA
電位シフト=+26mV

鉄筋⑤ 流入電流= -0.21×10^{-3} mA
電位シフト=+21mV

鉄筋⑥ 流入電流= 0.47×10^{-3} mA
電位シフト=-46mV

鉄筋⑦ 流入電流= 0.35×10^{-3} mA
電位シフト=-33mV

鉄筋⑧ 流入電流= 0.33×10^{-3} mA
電位シフト=-31mV



21

電気防食を実施した場合の解析結果 (陽極電位=-1000mV)

陽極からの総電流量は0.0048mAであり、コンクリート表面積当たりの電流密度としては11.8mA/m²であった。

この防食電流量では、いずれの鉄筋も防食されている。(分極曲線は種類1を使用)

鉄筋① 流入電流= 0.812×10^{-3} mA
電位シフト=-92mV

鉄筋② 流入電流= 0.638×10^{-3} mA
電位シフト=-66mV

鉄筋③ 流入電流= 0.593×10^{-3} mA
電位シフト=-59mV

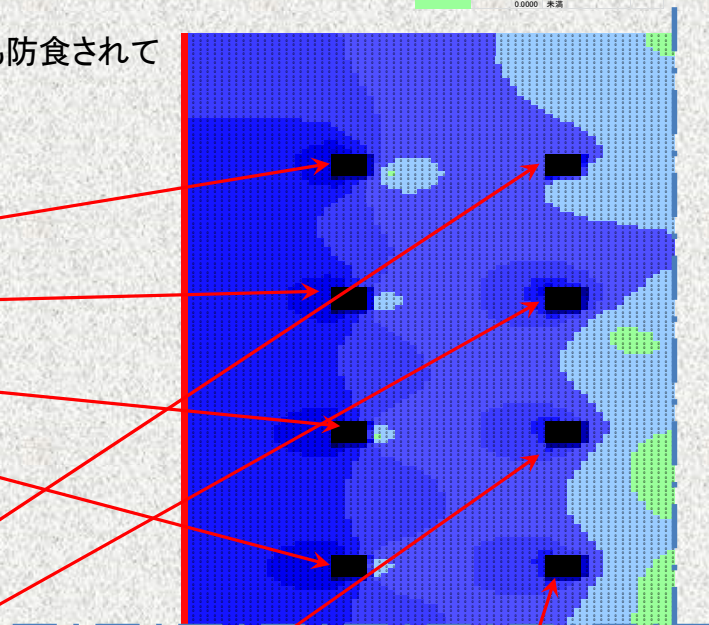
鉄筋④ 流入電流= 0.574×10^{-3} mA
電位シフト=-57mV

鉄筋⑤ 流入電流= 0.194×10^{-3} mA
電位シフト=-17mV

鉄筋⑥ 流入電流= 0.749×10^{-3} mA
電位シフト=-82mV

鉄筋⑦ 流入電流= 0.602×10^{-3} mA
電位シフト=-60mV

鉄筋⑧ 流入電流= 0.585×10^{-3} mA
電位シフト=-58mV



22

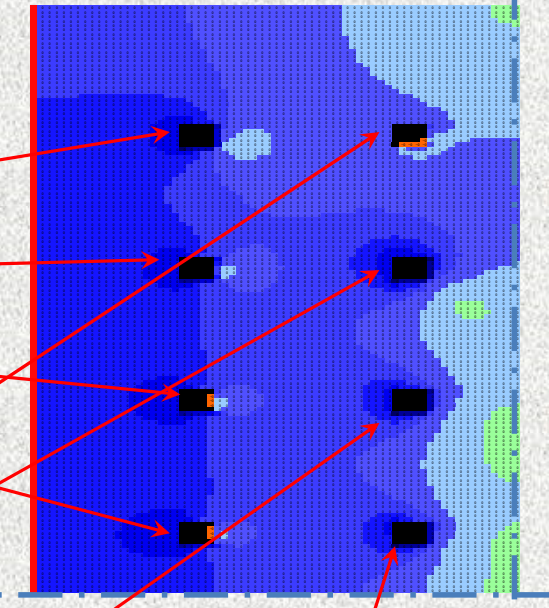
電気防食を実施した場合の解析結果 (陽極電位=-800mV)

陽極からの総電流量は0.0033mAであり、コンクリート表面積当たりの電流密度としては8.2mA/m²であった。

この防食電流量では、一部の鉄筋の裏側でアノード電流が確認され、最大値は 0.8×10^{-7} mA/mm²であった。かぶりにひび割れが発生する年数は $Y_{crack} = 0.3(\text{mg/mm}^2) / (9.128 \times 10^6 \times 0.8 \times 10^{-10}) = 411$ 年となり、問題にならない腐食速度である。

- 鉄筋① 流入電流= 0.519×10^{-3} mA
電位シフト=-51mV
- 鉄筋② 流入電流= 0.372×10^{-3} mA
電位シフト=-36mV
- 鉄筋③ 流入電流= 0.328×10^{-3} mA
電位シフト=-31mV
- 鉄筋④ 流入電流= 0.317×10^{-3} mA
電位シフト=-30mV
- 鉄筋⑤ 流入電流= 0.064×10^{-3} mA
電位シフト=-5mV
- 鉄筋⑥ 流入電流= 0.676×10^{-3} mA
電位シフト=-71mV

- 鉄筋⑦ 流入電流= 0.534×10^{-3} mA
電位シフト=-53mV
- 鉄筋⑧ 流入電流= 0.501×10^{-3} mA
電位シフト=-49mV



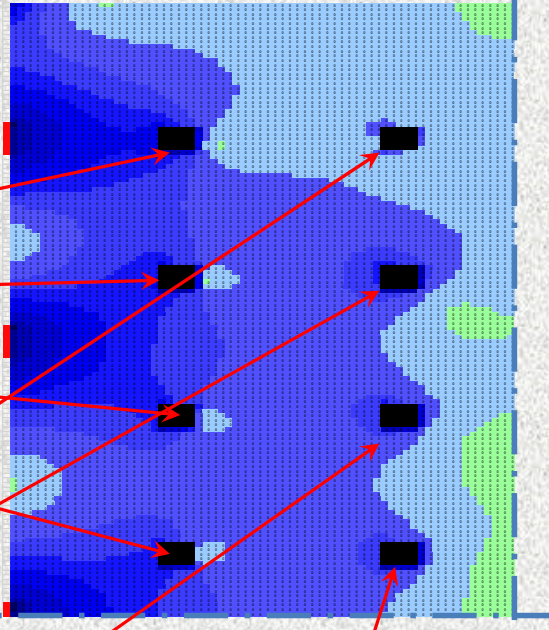
電気防食を実施した場合の解析結果 (線状陽極 陽極電位=-1500mV)

カソード分極曲線の種類1を使用した場合、線状陽極からの総電流量は0.00465mAであり、コンクリート表面積当たりの電流密度としては、側面も入れて11.5mA/m²であった。

すべての鉄筋がカソード側となっている。

- 鉄筋① 流入電流= 0.756×10^{-3} mA
電位シフト=-83mV
- 鉄筋② 流入電流= 0.606×10^{-3} mA
電位シフト=-61mV
- 鉄筋③ 流入電流= 0.464×10^{-3} mA
電位シフト=-45mV
- 鉄筋④ 流入電流= 0.435×10^{-3} mA
電位シフト=-42mV
- 鉄筋⑤ 流入電流= 0.138×10^{-3} mA
電位シフト=-11mV
- 鉄筋⑥ 流入電流= 0.738×10^{-3} mA
電位シフト=-81mV

- 鉄筋⑦ 流入電流= 0.583×10^{-3} mA
電位シフト=-58mV
- 鉄筋⑧ 流入電流= 0.545×10^{-3} mA
電位シフト=-54mV



解析結果(挿入型陽極、-1000mV)

カソード分極曲線 種類1を使用した場合、陽極の電位-1000mVから出る総電流量は0.0046mAであり、面状陽極(-1000mVの場合)とほぼ同じ電流量であり、コンクリート表面積当たりの電流密度も11.4mA/m²と同程度であった。

すべての鉄筋に防食電流が流れ込んでいる。

鉄筋① 流入電流= 0.807×10^{-3} mA
電位シフト=-91mV

鉄筋② 流入電流= 0.632×10^{-3} mA
電位シフト=-65mV

鉄筋③ 流入電流= 0.639×10^{-3} mA
電位シフト=-66mV

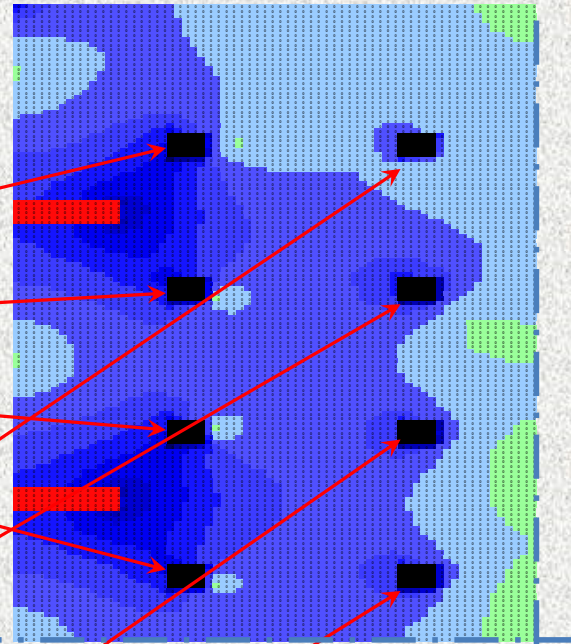
鉄筋④ 流入電流= 0.578×10^{-3} mA
電位シフト=-58mV

鉄筋⑤ 流入電流= 0.162×10^{-3} mA
電位シフト=-13mV

鉄筋⑥ 流入電流= 0.759×10^{-3} mA
電位シフト=-84mV

鉄筋⑦ 流入電流= 0.617×10^{-3} mA
電位シフト=-63mV

鉄筋⑧ 流入電流= 0.601×10^{-3} mA
電位シフト=-60mV

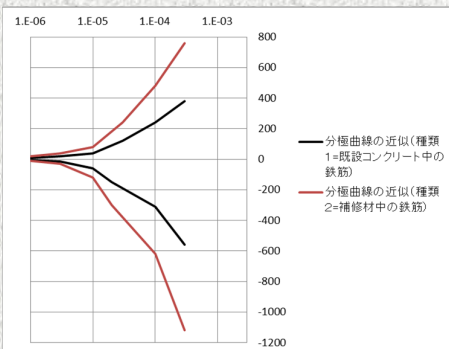


矩形断面の一部を断面修復したときの、下側に面状陽極を設置した場合の電流分布 (分極抵抗を考慮)

解析条件

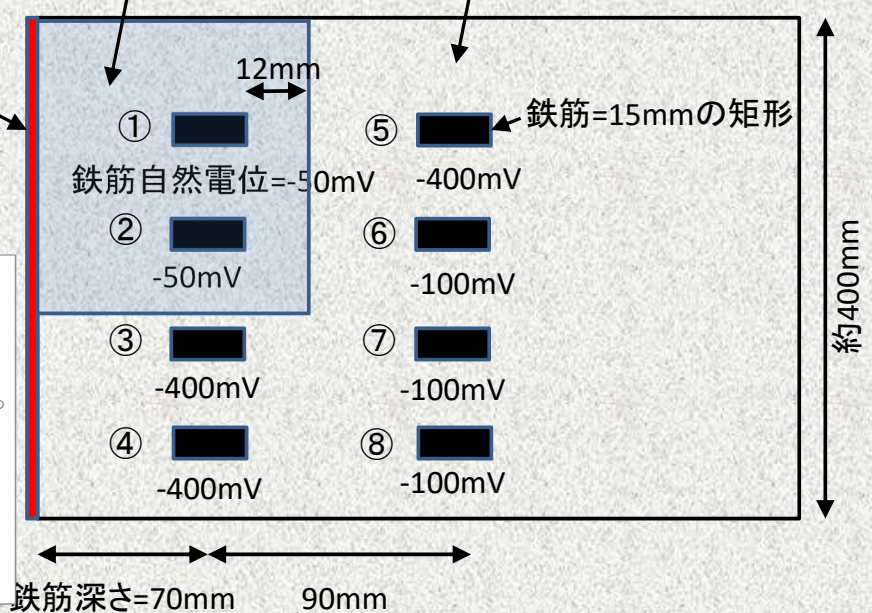
底面側
陽極電位=-1000mV
(陽極界面での抵抗は考慮しない)

分極曲線の想定



断面修復材の電気抵抗
= $5 \times 10^6 \Omega$ mm (10倍)

コンクリートの電気抵抗
= $5 \times 10^5 \Omega$ mm



矩形断面の一部を断面修復(電気抵抗10倍)による電気防食の電流分布(電極電位-1000mV)

コンクリート部のカソード分極抵はいずれも種類1を用いて計算した結果、陽極からの発生電流量は0.00313mA(コンクリート面積当たり7.7mA/m²)であった。

断面修復部(電気抵抗がコンクリートの10倍)の内部の鉄筋には防食電流が流れ込んでいるが、その背面の鉄筋5はアノード電流が発生しており、電気防食が効かない状態にある。

鉄筋① 流入電流= 0.372×10^{-3} mA
電位シフト=-36mV

鉄筋② 流入電流= 0.490×10^{-3} mA
電位シフト=-48mV

鉄筋③ 流入電流= 0.400×10^{-3} mA
電位シフト=-39mV

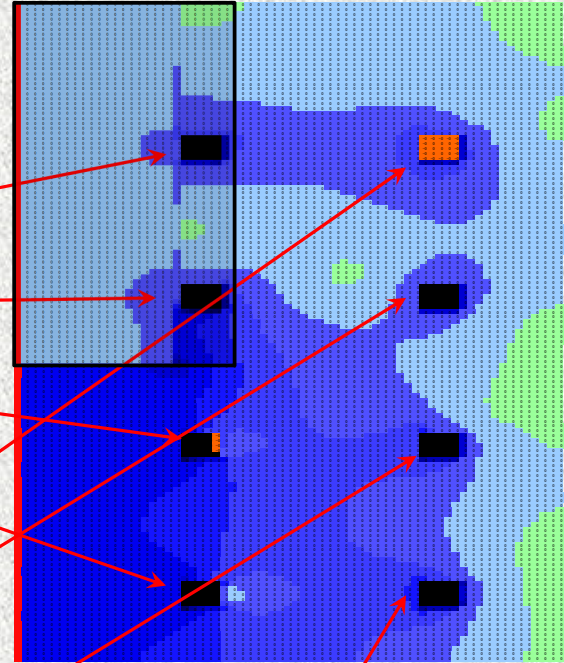
鉄筋④ 流入電流= 0.528×10^{-3} mA
電位シフト=-52mV

鉄筋⑤ 流入電流= -0.544×10^{-3} mA
電位シフト=+37mV

鉄筋⑥ 流入電流= 0.360×10^{-3} mA
電位シフト=-34mV

鉄筋⑦ 流入電流= 0.461×10^{-3} mA
電位シフト=-45mV

鉄筋⑧ 流入電流= 0.533×10^{-3} mA
電位シフト=-53mV



27

PC桁に対して電気防食を実施した場合の電流分布(分極抵抗を考慮)

解析条件

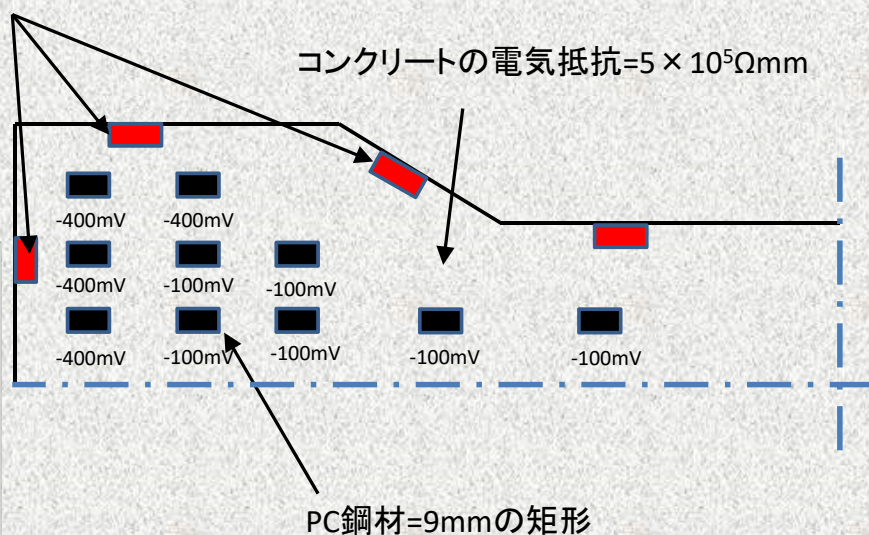
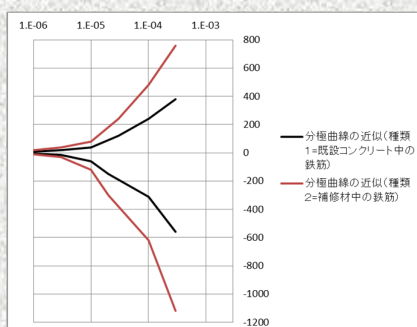
底面側・側面側

陽極電位=-1000mV

(陽極界面での抵抗は考慮しない)

コンクリートの電気抵抗= $5 \times 10^5 \Omega$ mm

分極曲線の想定



28

PC桁の鉄筋の自然電位の違いによるマクロセル電流

鉄筋① 流入電流= -0.90×10^{-3} mA

電位シフト=+26mV

鉄筋② 流入電流= -0.232×10^{-3} mA

電位シフト=30mV

鉄筋③ 流入電流= -0.284×10^{-3} mA

電位シフト=34mV

鉄筋④ 流入電流= -0.327×10^{-3} mA

電位シフト=37mV

鉄筋⑦ 流入電流= 0.177×10^{-3} mA

電位シフト=-27mV

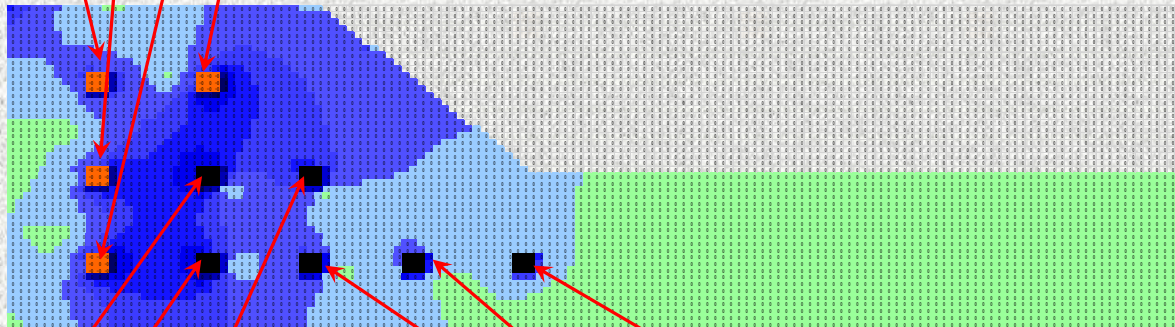
鉄筋⑥ 流入電流= 0.239×10^{-3} mA

電位シフト=-38mV

鉄筋⑤ 流入電流= 0.291×10^{-3} mA

電位シフト=-48mV

表面付近にある鉄筋と奥側にある鉄筋の間でマクロセルによる電流が確認できる。



鉄筋⑩ 流入電流= 0.053×10^{-3} mA
電位シフト=-7mV

鉄筋⑨ 流入電流= 0.073×10^{-3} mA
電位シフト=-10mV

鉄筋⑧ 流入電流= 0.119×10^{-3} mA
電位シフト=-17mV

29

PC桁に電気防食(陽極電位-1000mV)を行った場合の電流解析(1)

鉄筋① 流入電流= 1.88×10^{-3} mA

電位シフト=-213mV

鉄筋② 流入電流= 1.31×10^{-3} mA

電位シフト=-183mV

鉄筋③ 流入電流= 0.101×10^{-3} mA

電位シフト=-16mV

鉄筋④ 流入電流= 1.08×10^{-3} mA

電位シフト=-169mV

鉄筋⑦ 流入電流= 1.48×10^{-3} mA

電位シフト=-192mV

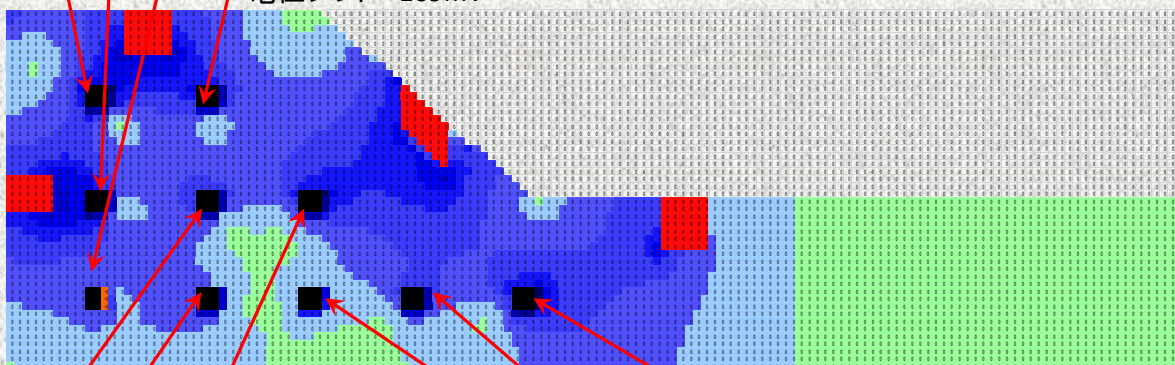
鉄筋⑥ 流入電流= 0.583×10^{-3} mA

電位シフト=-116mV

鉄筋⑤ 流入電流= 1.09×10^{-3} mA

電位シフト=-171mV

分極曲線種類1を考慮した電気防食では、陽極からの総電流量は0.0078mAであり、コンクリート表面積当たり6.14mA/m²程度である。



鉄筋⑩ 流入電流= 1.83×10^{-3} mA
電位シフト=-212mV

鉄筋⑨ 流入電流= 0.839×10^{-3} mA
電位シフト=-156mV

鉄筋⑧ 流入電流= 0.318×10^{-3} mA
電位シフト=-55mV

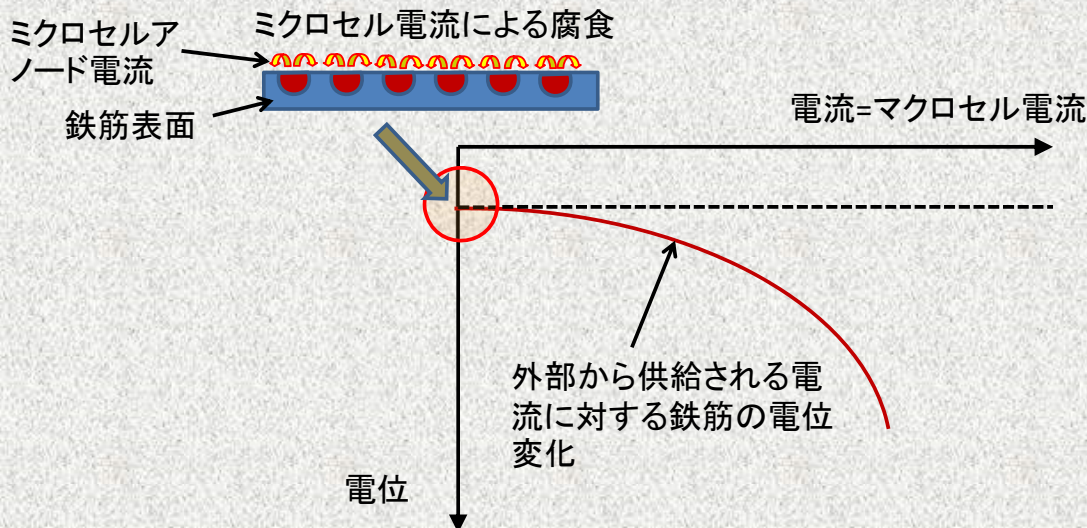
30

マイクロセル電流に対する電気防食効果の判定

これまでの検討では、マクロセル腐食に対する防食電流について検討してきたが、激しい腐食環境にある鉄筋は全面腐食(マイクロセル腐食)によって激しく腐食していくと考えられる。

このような全面腐食(マイクロセル腐食)に対する防食電流の効果について、一つの手法を考えて検討を行う。

(ここで用いる計算は、マクロセル腐食を計算させるためのEXCELマクロを用いて行った)



31

ASTM C876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

(1) マイクロセル腐食の形状の仮定 ($E > -200$)

→測定された自然電位に対して、振幅 $\pm 5\%$ ×自然電位、1波長十数cmのsinカーブ状のマイクロセルを想定

(2) マイクロセル腐食の形状の仮定 ($-200 \geq E > -350$)

→測定された自然電位に対して、振幅 $\pm 10\%$ ×自然電位、1波長数cmのsinカーブ状のマイクロセルを想定

(3) マイクロセル腐食の形状の仮定 ($-350 \geq E$)

→測定された自然電位に対して、振幅 $\pm 20\%$ ×自然電位、1波長10mm程度のsinカーブ状のマイクロセルを想定

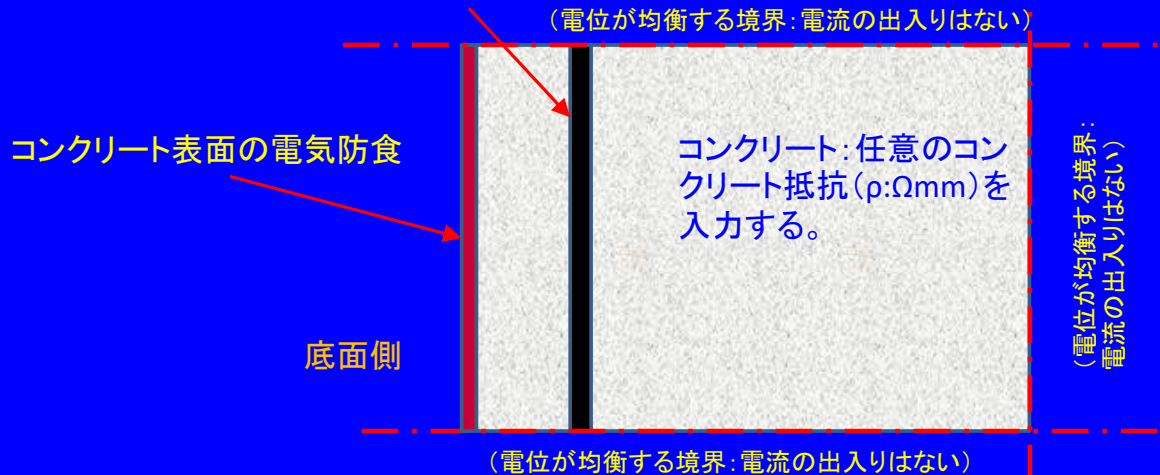
32

解析モデルの基本イメージ

全面腐食(マイクロセル腐食)に対する検討は、下記の断面の鉄筋表面(黒色)に細かい電位分布を入力することによって、鉄筋表面のマイクロセル腐食を表現する。この時、分極曲線は対象コンクリートで測定したE-log i 曲線を用いる。

(ここで用いる計算は、マクロセル腐食を計算させるためのEXCELマクロと同様である)

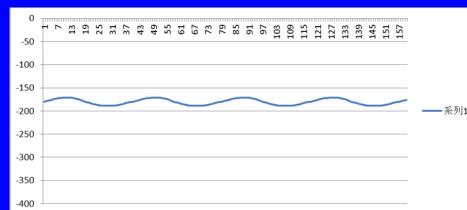
マイクロセルを検討する鉄筋には、細かい電位分布を入力する。



解析上でモデル化したマイクロセル

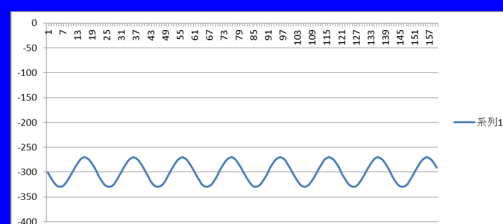
(1) マイクロセル腐食の形状の仮定 ($E > -200$)

→測定された自然電位-180mVに対して、振幅±5%(9mV)、1波長十数cm(39セル分117mm)のsinカーブ状



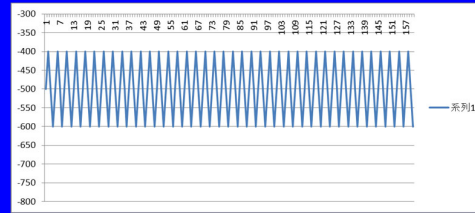
(2) マイクロセル腐食の形状の仮定 ($-200 \geq E > -350$)

→測定された自然電位(-300mV)に対して、振幅±10%(30mV)、1波長数cm程度(21セル分6.3cm)のsinカーブ状

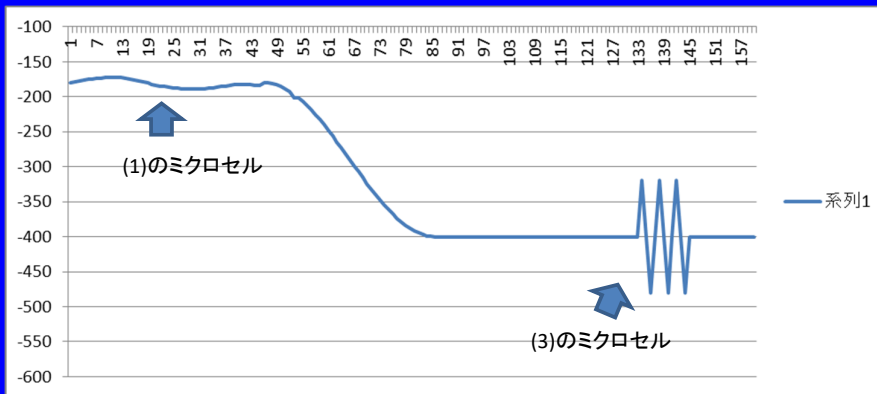


(3) ミクロセル腐食の形状の仮定 ($-350 \geq E$)

→測定された自然電位(-500mV)に対して、振幅±20%(100mV)、1波長10mm程度(5セル分15mm)のsinカーブ状

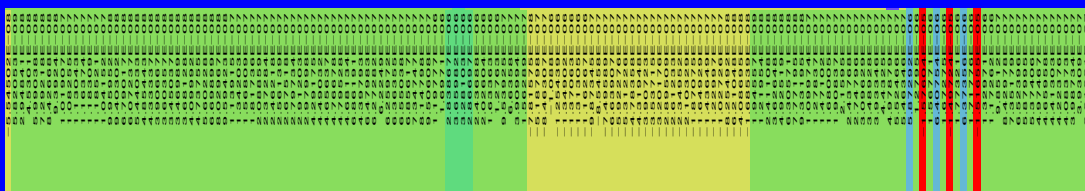
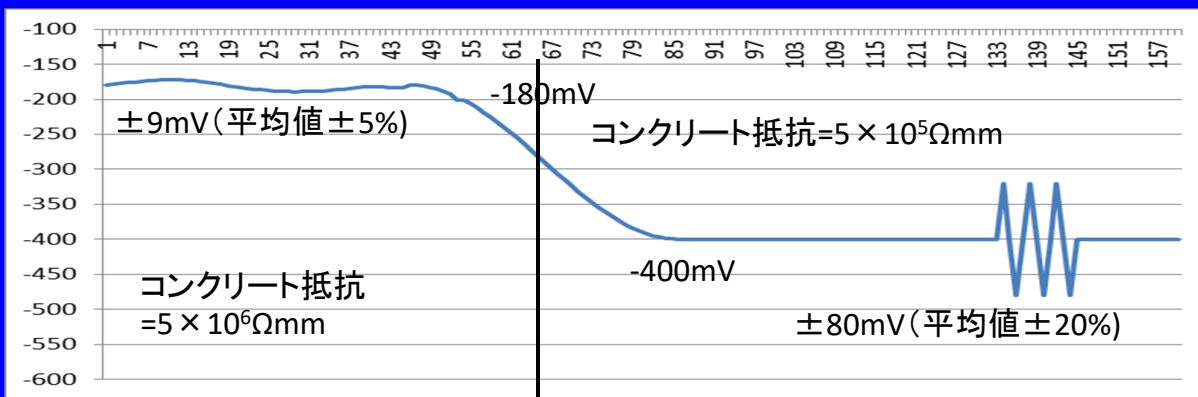


事例: -180mVと-400mVのマクロセルが発生している場合のモデル化の例



35

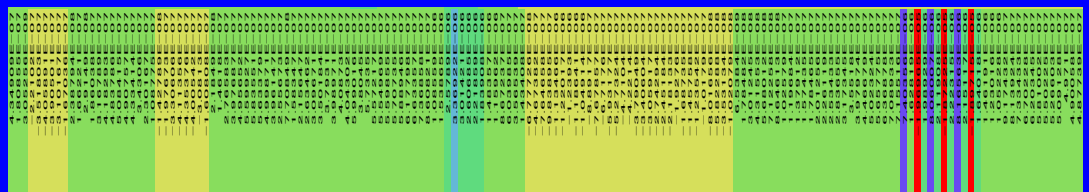
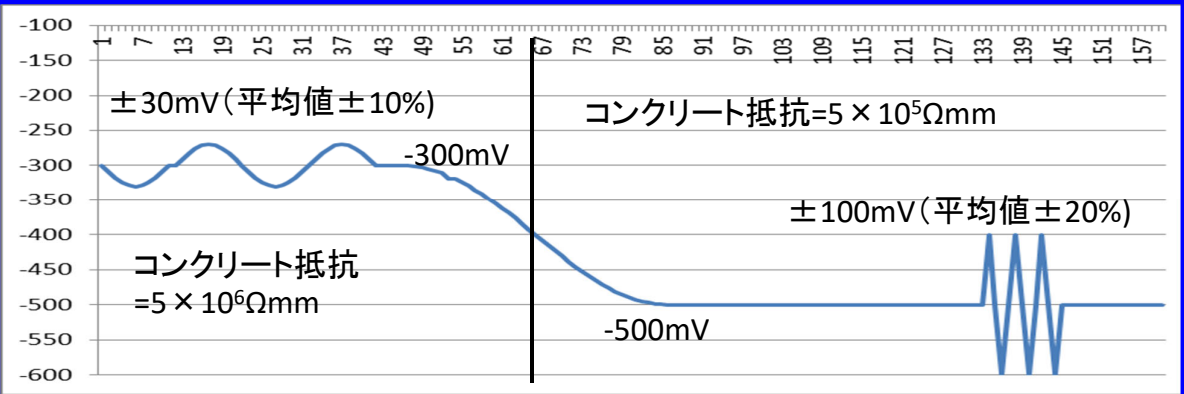
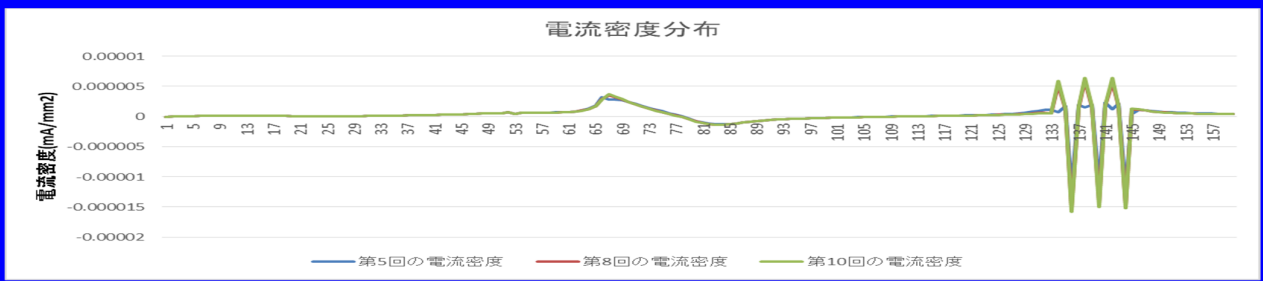
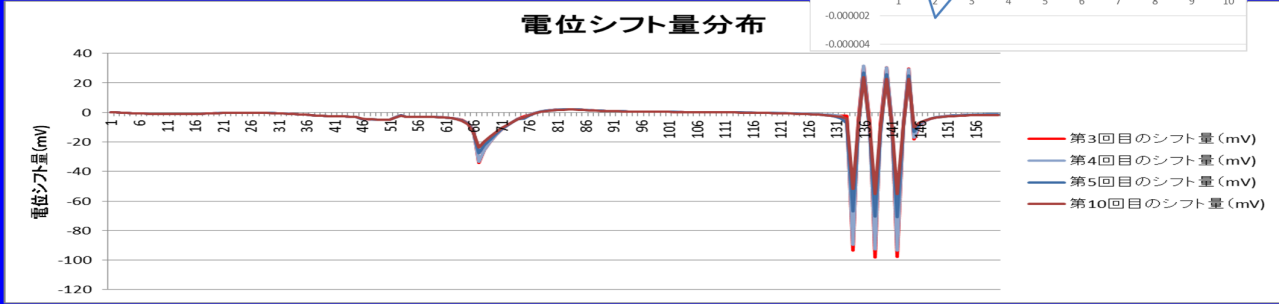
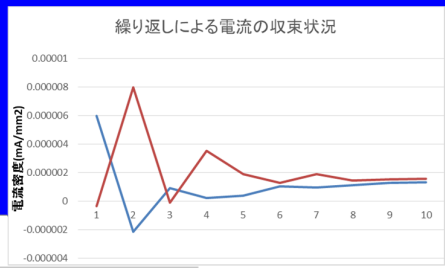
事例: マクロセルとミクロセルが混在した腐食電流の発生状況



奥行方向にマクロセルが発生し、局所的なミクロセルが混在する場合、ミクロセルの部分に激しいアノード電流が確認される。平均-180mVの部分(90%以上の確率で腐食なし)ではアノード電流は確認されない。

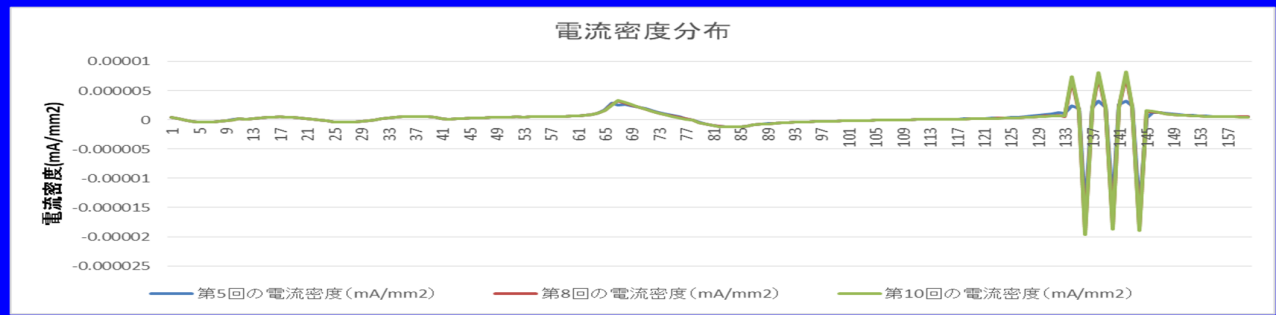
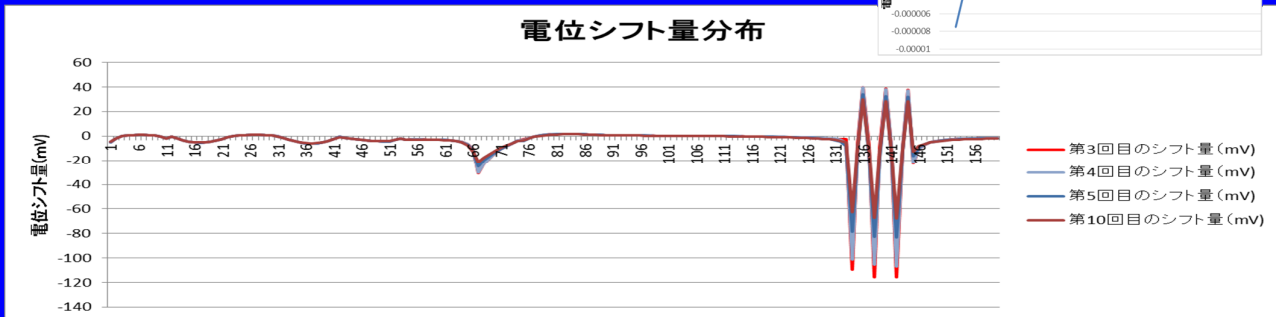
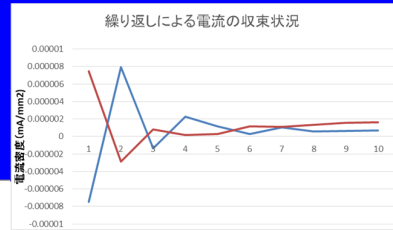
36

先のマクロセルとマイクロセルが混在しているときの、電位シフト量および鉄筋表面の電流密度を以下に示す。10回の繰り返しにより近似させており、ほぼ収束傾向にある。

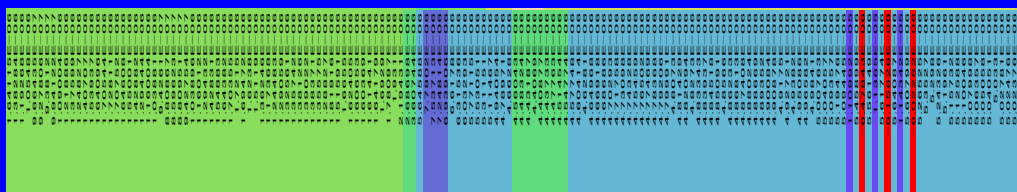
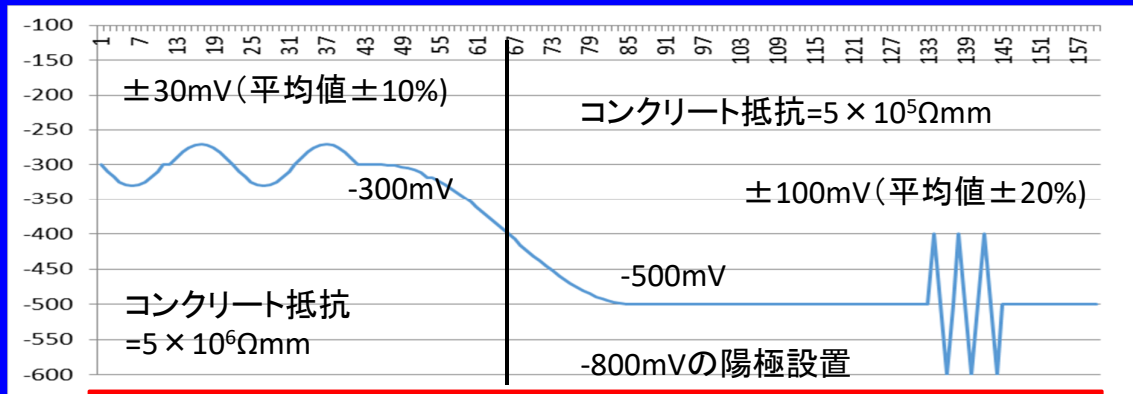


奥行方向にマクロセルが発生し、局所的なマイクロセルが混在する場合、マイクロセルの部分に激しいアノード電流が確認される。
 電位の平均-300mVの部分(不確定)では一部にアノード電流が確認されるが $4 \times 10^{-7} \text{mA/mm}^2$ であり、 $Y_{\text{crack}} = 0.3 (\text{mg/mm}^2) / (9.128 \times 10^6 \times 4 \times 10^{-10}) = 82$ 年とかぶりにひび割れが発生するまで腐食する可能性は低い。

先のマクロセルとマイクロセルが混在しているときの、電位シフト量および鉄筋表面の電流密度を以下に示す。10回の繰り返しにより近似させており、ほぼ収束傾向にある。

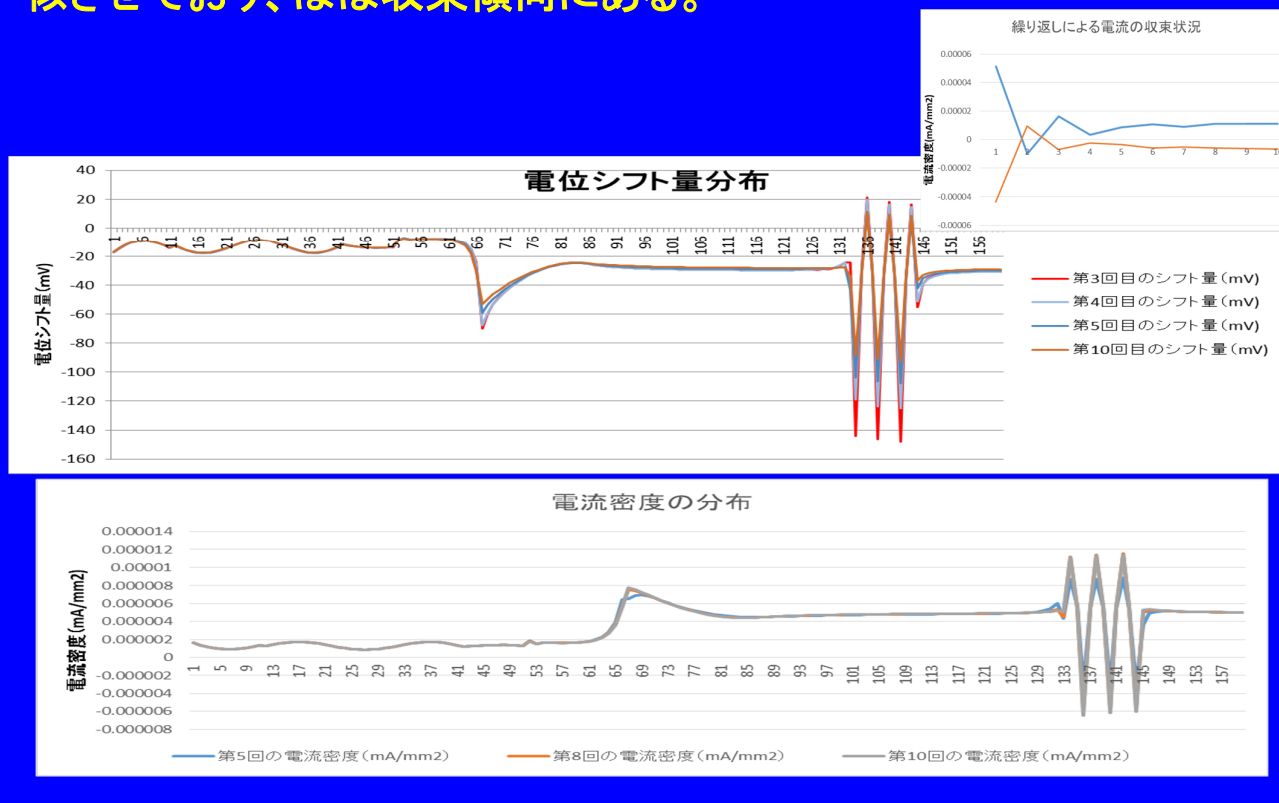


事例：マクロセルとマイクロセルが混在した腐食電流の発生状況
陽極電位=-800mV

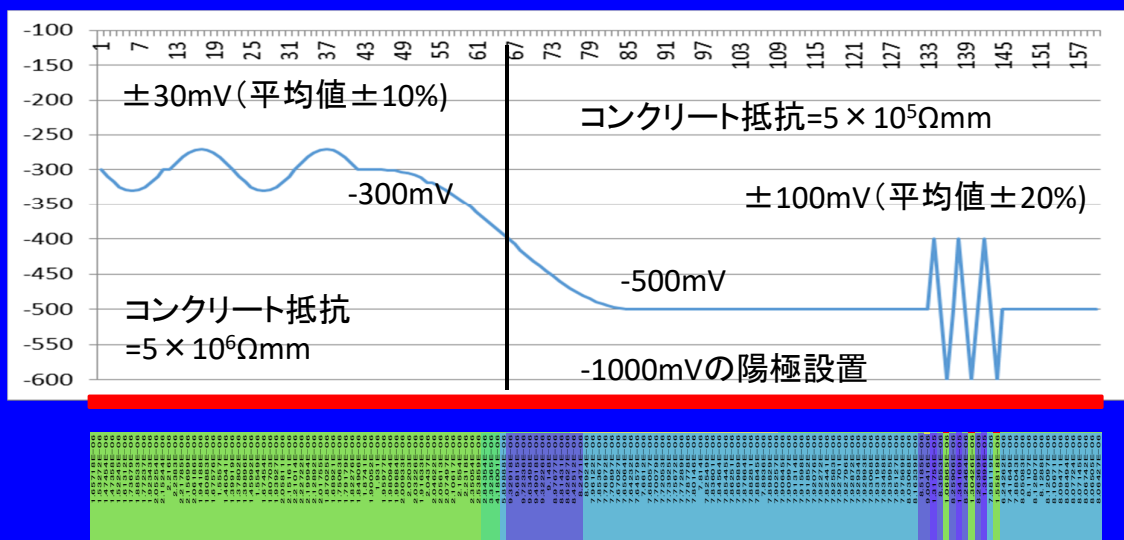


-800mVの陽極を設置した場合には、-300mV側のマイクロセルによるアノード電流は消滅しているが、-500mVの側にあるマイクロセル腐食のアノード電流は消滅しておらず、防食をしない場合の約1/2程度のアノード電流密度に低下している。
 $Y_{crack} = 0.3 \text{ (mg/mm}^2\text{)} / (9.128 \times 10^6 \times 6.4 \times 10^{-9}) = 5 \text{ 年}$ となり、明らかに防食が不十分であることがわかる(陽極からの防食電流は 3.5 mA/m^2)。

先のマクロセルとマイクロセルが混在しているときの、電位シフト量および鉄筋表面の電流密度を以下に示す。10回の繰り返しにより近似させており、ほぼ収束傾向にある。

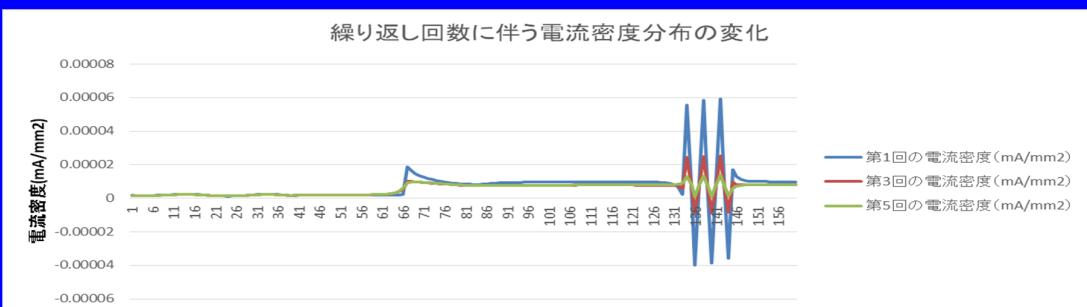
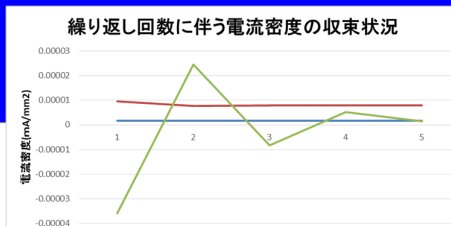
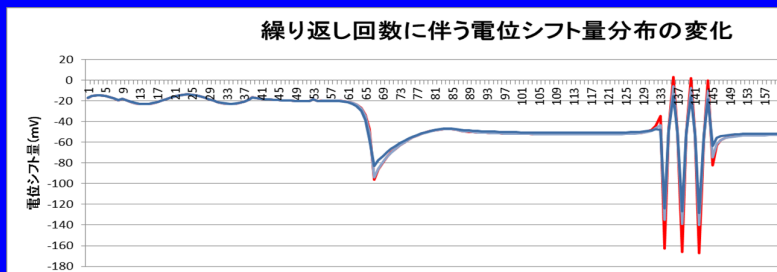


事例：マクロセルとマイクロセルが混在した腐食電流の発生状況 陽極電位=-1000mV



-1000mVの陽極を設置した場合には、全ての領域でアノード電流は消滅している。陽極からの防食電流密度は5.5mA/m²であり、この程度の防食電流密度がないとマイクロセル腐食の防食は難しいことがわかる。

マクロセルとマイクロセルが混在しているときの、-1000mVの陽極を設置したときの電位シフト量および鉄筋表面の電流密度を以下に示す。5回の繰り返しにより近似させており、ほぼ収束傾向にある。



電気防食の陽極の設計について、現状の想定...

先の検討の結果、まずマクロセル腐食にかかわる防食を目的として、陽極配置や陽極の電位などを設定し、対象とする鉄筋に防食電流(密度)が流入するように設計する。

その後、対象とする鉄筋のマイクロセル腐食をモデル化し、防食効果が得られる陽極からの防食電流(密度)を設定する。

総防食電流量は、マクロセル腐食に対する防食電流(密度)と、マイクロセル腐食に対する防食電流(密度)を加え合わせたものを設計値とする。

メンテナンス性を考慮して、現地の鉄筋からE-logi曲線を測定し、先に設定した総防食電流量(密度)を印加した時の鉄筋の電位シフト量を確認して、以降のメンテナンスに用いる。

電気防食によって鉄筋周辺環境が改善した場合には、マイクロセル腐食モデルを再検討して、総防食電流量(密度)を見直す。

→マイクロセル腐食をどのようにモデル化するか？

→電気防食による環境改善効果をどのように評価しモデルに反映するか？

(参考: 差分法のバックグラウンドとなる知識)

定常状態における温度や静電ポテンシャルの解析にはラプラス方程式を用いることができる。

$$\frac{\partial^2 u(x, y, z)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u(x, y, z)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u(x, y, z)}{\partial z^2} = 0 \quad (1)$$

静電ポテンシャルのラプラス方程式は二次元では次式のようにになる。

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = 0 \quad (2)$$

(以下のスライド5枚は、JFEエンジの北川尚男氏作成のものを借用した)

45

二次元のラプラス方程式を数値解析で近似解を求める。まず、解 $\phi(x, y)$ をテイラー展開する。x, y 方向に微小変位 $\pm h$ があつた場合のポテンシャルは

$$\phi(x + h, y) = \phi(x, y) + \frac{\partial \phi}{\partial x} h + \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} h^2 + \frac{1}{3!} \frac{\partial^3 \phi}{\partial x^3} h^3 + \frac{1}{4!} \frac{\partial^4 \phi}{\partial x^4} h^4 + \dots \quad (3)$$

$$\phi(x - h, y) = \phi(x, y) - \frac{\partial \phi}{\partial x} h + \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} h^2 - \frac{1}{3!} \frac{\partial^3 \phi}{\partial x^3} h^3 + \frac{1}{4!} \frac{\partial^4 \phi}{\partial x^4} h^4 - \dots \quad (4)$$

となる。これらの式の第3項までの片々を足し合わせると

$$\left. \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \right|_{x, y} = \frac{1}{h^2} [\phi(x + h, y) - 2\phi(x, y) + \phi(x - h, y)] \quad (5)$$

46

このことから、2階の偏導関数の値は微小変位 h の場所の関数の値を用いて、 h^2 の精度で近似計算ができることがわかる。すなわち、式(5)の右辺の第一項を計算すれば良い。同じことを y 方向について行くと

$$\left. \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} \right|_{x,y} = \frac{1}{h^2} [\phi(x, y+h) - 2\phi(x, y) + \phi(x, y-h)] \quad (6)$$

が得られる。これらの式(5)と(6)を元の2次元ラプラス方程式に代入すれば

$$\phi(x+h, y) + \phi(x-h, y) + \phi(x, y+h) + \phi(x, y-h) - 4\phi(x, y) = 0 \quad (7)$$

式(7)をさらに変形すると、

$$\begin{aligned} \phi(x, y) = & [\phi(x+h, y) + \phi(x-h, y) \\ & + \phi(x, y+h) + \phi(x, y-h)] / 4 \end{aligned} \quad (8)$$

が得られる。これは、任意の点の値は、隣接する4点を足して4で割って求めることができることを示す。

シミュレーションでは(8)式を繰り返し行い、ある一定の値になるまで繰り返す。

→ X

$$\phi(x) = [\phi(x + \Delta x) + \phi(x - \Delta x) + \phi(y + \Delta y) + \phi(y - \Delta y)] / 4$$

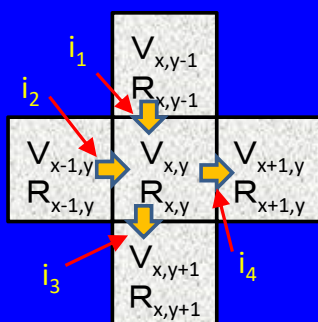
$$\phi(x) = [2 \times \phi(x + \Delta x) + \phi(y + \Delta y) + \phi(y - \Delta y)] / 4$$

$$\phi(x) = [2 \times \phi(x + \Delta x) + 2 \times \phi(y - \Delta y)] / 4$$

分極抵抗を考慮する場合は、これらの計算の結果得られた電流から分極曲線より電位シフト量を求め、「電位シフト量/電流」から分極抵抗を仮定してモデルに代入する。子の計算を数回繰り返すことにより、電流密度、電位シフト量、分極抵抗の近似値を求める。

電位の定常状態の計算

$V_{x,y}$ 要素に出入りする電流は、定常状態の場合は均衡する。



$$i_1 + i_2 - i_3 - i_4 = 0$$

$$i_1 = \frac{V_{x,y-1} - V_{x,y}}{R_{x,y-1}}$$

$$i_2 = \frac{V_{x-1,y} - V_{x,y}}{R_{x-1,y}}$$

$$i_3 = \frac{V_{x,y} - V_{x,y+1}}{R_{x,y+1}}$$

$$i_4 = \frac{V_{x,y} - V_{x+1,y}}{R_{x+1,y}}$$

$V_{x,y}$ 要素の電位は周辺の要素から以下のように計算される。

$$A = \frac{1}{R_{x,y-1}} + \frac{1}{R_{x-1,y}} + \frac{1}{R_{x,y+1}} + \frac{1}{R_{x+1,y}} \quad \dots \text{と置くと}$$

$$V_{x,y} = \frac{1}{A} \times \left(\frac{V_{x,y-1}}{R_{x,y-1}} + \frac{V_{x-1,y}}{R_{x-1,y}} + \frac{V_{x,y+1}}{R_{x,y+1}} + \frac{V_{x+1,y}}{R_{x+1,y}} \right)$$

したがって、上記の式により全ての $V_{x,y}$ 要素の電位を計算し、陽極及び鉄筋の電位を固定して、全ての要素が収束するまで計算を繰り返せば、各要素の電位を計算することができる。