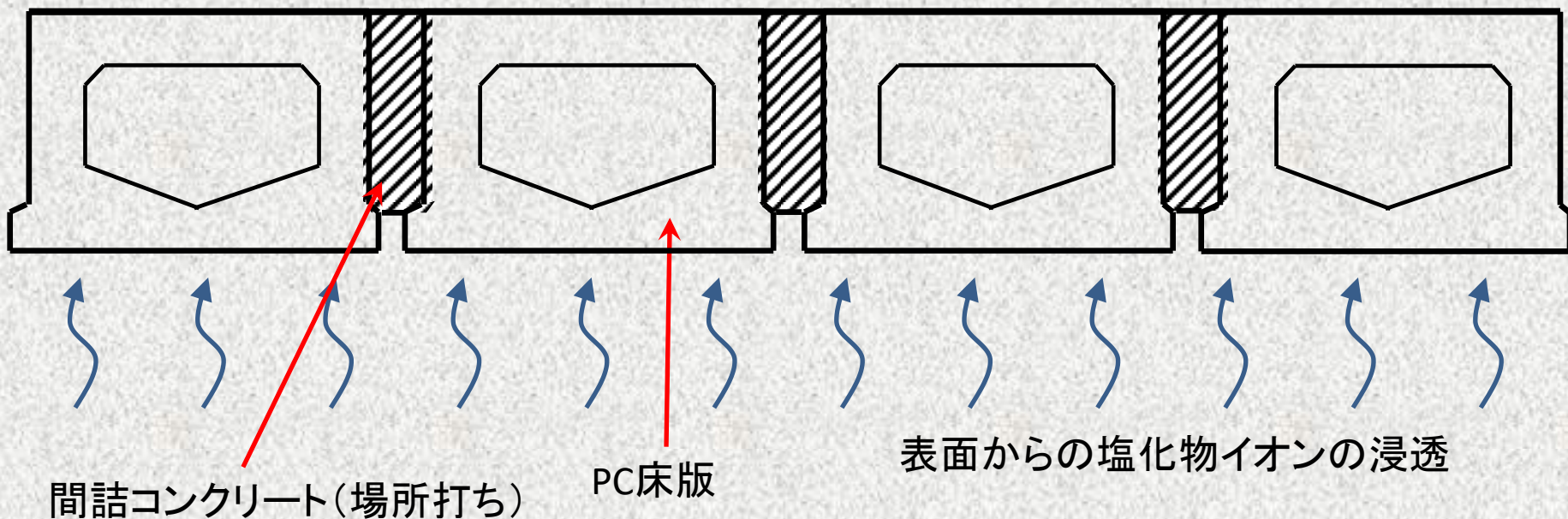


# 二次元塩分拡散の解析ツールについて

i-CONSTRUCTIONで推進されているプレキャスト部材の採用のためには、継手部（プレキャストと場所打ちコンクリート等）の耐久性照査が不可欠となる。このような構造における塩化物イオンの浸透計算は、二次元の拡散を考慮する必要がある。



# 解析モデルの基本イメージ

- ①コンクリートの表面塩化物イオン量の設定( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
- ②表面被覆の設定
- ③対称軸(塩分拡散の平衡状態)の設定

- ①コンクリートの表面  
塩化物イオン量の設定( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
- ②表面被覆の設定

任意のコンクリート内部に塩化物イオンの固定濃度を設定する。  
( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

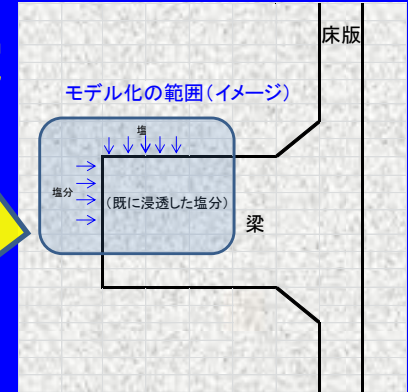
底面側

側面側

コンクリート: 任意の位置に  
任意の拡散係数( $\text{cm}^2/\text{年}$ )  
を入力する。

(塩化物イオンの拡散が  
平衡状態になる境界)

センターライン (塩化物イオンの拡散が平衡状態となる境界)





## データ入力(2)・・・データシートの構成

The image shows a screenshot of a spreadsheet application with a grid of data input fields. Two callout boxes with yellow backgrounds and black text provide instructions on how to use the spreadsheet. The top callout box points to a specific area in the grid, and the bottom callout box points to another area. The spreadsheet interface includes a menu bar at the top with options like '使用説明', 'データ入力', '二次元拡散計算', 'データ保存', and '時系列保存'. The status bar at the bottom shows 'ファイル名' and '選択範囲'.

表面塩化物イオン/被覆およびコンクリート中の  
任意の位置に拡散係数を入力するエリア  
(50～200max行の間)

計算条件を入力するエリアで、「既に塩分浸  
透がある計算」をYESとした場合、コンクリート  
中の任意の位置に既に浸透した塩分濃度を  
入力するエリア(250～300max行)

「データ入力」シートの構成

# EXCELによる二次元塩分浸透計算

## データ入力(1)・・・モデル化と計算間隔

1. モデルの範囲は「データ入力」「二次元拡散計算」の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=50」「左上Y=10」は基本的には動かさない。
3. 断面のモデル化の設定は、「左上セル番地」「右下セル番地」を指定する。
4. X方向(行)のサイズ(セル数)は最大で150(X方向maxセル番号=200まで)とする。
5. Y方向(列)のサイズ(セル数)は最大で140(Y方向maxセル番号=150まで)とする。
6. モデル化の1セル当たりのサイズ(単位mm)を設定する。(小さすぎると計算時間が長くなる)
7. 計算する時間間隔(濃度分布図を出力する年数)を設定する。(データ保存シートに分布図が出力される)

7

2

3,4,5

二次元拡散計算データ入力

計算結果を記録する年数

計算ケース数	10	10ケース以下
計算年数(1)	5	年(建設後)
計算年数(2)	10	年(建設後)
計算年数(3)	15	年(建設後)
計算年数(4)	20	年(建設後)
計算年数(5)	30	年(建設後)
計算年数(6)	40	年(建設後)
計算年数(7)	50	年(建設後)
計算年数(8)	60	年(建設後)
計算年数(9)	70	年(建設後)
計算年数(10)	80	年(建設後)

計算ステップ( $\Delta t$ ) 0.01 年(収束条件より小さい、自動設定される値)

モデルの左上X座標 50 (固定)  
モデルの左上Y座標 10 (固定)

モデルの右下X座標 200 (絶対座標MAX200)  
モデルの右下Y座標 150 (絶対座標MAX150)

このシートのデータ作成後にボタンを押してください

二次元浸透計算

既に塩分浸透がある計算 2 | Y=1, N=2

(Y=1の場合、このシートの250行以下に、モデルの範囲で既に浸透した塩分量を入れる。)

モデル幅 10 mm

床版

6

# データ入力(2)・・・分布図と着目セルの設定

1. 新規に表面から塩分が浸透する場合の計算の他に、既に塩分が浸透している場合の塩分の戻りを考慮した計算を行う場合には「既に塩分浸透がある計算」に1を入力。(Y=1の場合には、250行以下に各セルごとに塩分量を入力する)
2. 分布図の出力における色の諧調を設定する。色および数値の変更が可能。
3. 塩分浸透の履歴を確認するセルを設定する。

2
1
3

計算年数(8)	60	年(建設後)	
計算年数(9)	70	年(建設後)	
計算年数(10)	80	年(建設後)	

モデル幅	10	mm
------	----	----

レベル	表示色	塩化物イオン量
レベル1		8 より大
レベル2		8 以下
レベル3		6 以下
レベル4		4 以下
限界塩化物イオン		2 以下
レベル6		1.8 以下
レベル7		1.2 以下
レベル8		0.6 以下
レベル9		0.3 以下

時系列で確認したいポイント(セル位置)		
セルの数	5	最大5か所
	X	Y
セル座標(1)	95	26 (絶対座標)
セル座標(2)	95	27 (絶対座標)
セル座標(3)	95	28 (絶対座標)
セル座標(4)	95	29 (絶対座標)
セル座標(5)	95	30 (絶対座標)

既に塩分浸透がある計算  Y=1, N=2  
 (Y=1の場合、このシートの250行以下に、モデルの範囲で既に浸透した塩分量を入れる。)

モデル化の範囲(イメージ)

# データ入力(3)・・・コンクリート内部に固定塩分濃度を設定

1. 二次元拡散計算においては、表面塩化物イオンからのコンクリート内部への浸透や既設コンクリートからの塩分の戻りの計算の他に、コンクリート内部に固定の塩分濃度を設定できる。(複雑な表面形状や通水管からの漏水などによるコンクリート内部からの塩分の拡散も考慮できる)
2. セルごとに位置(行、列)及び固定する塩化物イオン濃度(kg/m<sup>3</sup>)を設定する。最大100セルまで設定可能。

3. 表面形状に凹凸がある場合に、表面塩化物イオンを設定するセルと拡散するセルの関係(セルの浸透位置)を、下に示した図に従って数値で入力する。  
ただし、「簡易形状版」ではこの入力項目は無い

1,2

3

表面となるセル数	78	100以内																	
X行(絶対値)	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120
Y列(絶対値)	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25			
C0の値(kg/m <sup>3</sup> )	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
セルの浸透位置	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2

右側 凹みの表現

右側 突出の表現

一列のみ表面塩化物イオンを挿入する場合

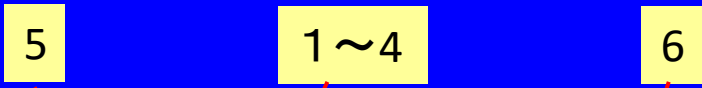
(11)内部のセルに表面塩化物イオンを挿入する場合  
(12)~(14)左側に浸透するケース

セルの塩化物イオン量を設定(固定)する(濃度拡散)

# データ入力(4)・・・表面塩化物イオン、拡散係数の設定

1. モデル上側(コンクリート側面)の表面には「777」「999」「表面塩分イオン濃度(kg/m<sup>3</sup>)」の3種類を入力できる。
2. 「777」(モデルの上側のみ設定可能)は、モデルが連続している場合に入力する。「777」の境界では塩分の移動が均衡した状態を表現している。
3. 「999」は表面被覆をモデル化している。外部からの浸透はないが内部から拡散してくる状態を表現している。
4. 「表面塩分イオン濃度(kg/m<sup>3</sup>)」は通常の外部環境にさらされた状態を表現しており、各条件での表面塩化物イオン濃度を設定する。
5. モデル側面(コンクリート底面)には「999」と「表面塩分イオン濃度(kg/m<sup>3</sup>)」の2種類が入力できる。
6. コンクリート内部にはセルごとに独立した拡散係数を設定できる。プレキャストや場所打ちコンクリート、さらには「ひび割れによる局所的な拡散係数の増大」なども表現可能である。空間を入れたい部分には「0」を入力。



拡散係数及びC0の入力		↓ C0の値																					
		777	777	777	777	777	777	777	777	777	777	777	777	777									
D	単位:mm <sup>2</sup> /年	15	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
CO	Kg/M3	15	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
		15	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
		15	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
		15	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
		15	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
		15	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
		15	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
		15	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
		15	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
		15	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
		15	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
		15	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
		15	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
		15	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
		15	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
		15	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
		15	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
		15	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
		15	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25

(注) 入力項目有り  
既に浸透している塩分を考慮する場合、250行以下のモデル範囲に入力







# データ入力(6)・・・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「二次元浸透計算」ボタンを押下する。

1

計算ステップ( $\Delta t$ )	0.01	年(収束条件より小さい、自動設定される値)
モデルの左上X座標	50	(固定)
モデルの左上Y座標	10	(固定)
モデルの右下X座標	200	(絶対座標MAX200)
モデルの右下Y座標	150	(絶対座標MAX150)
既に塩分浸透がある計算	2	Y=1,N=2 (Y=1の場合、このシートの250行以下に、モデルの範囲で既に浸透した塩分量を入れる。)

このシートのデータ作成後にボタンを押してください

**二次元浸透計算**

表面となるセル数	78	100以内				
X行(絶対値)	120	120	120	120	120	120
Y列(絶対値)	10	11	12	13	14	15
C0の値(kg/m3)	15	15	15	15	15	15
セルの浸透位置	1	2	2	2	2	2

表面

1	2	2	2	3
				4
				表面セルと浸透位置
				4

表面

7	6	6	6	5
---	---	---	---	---

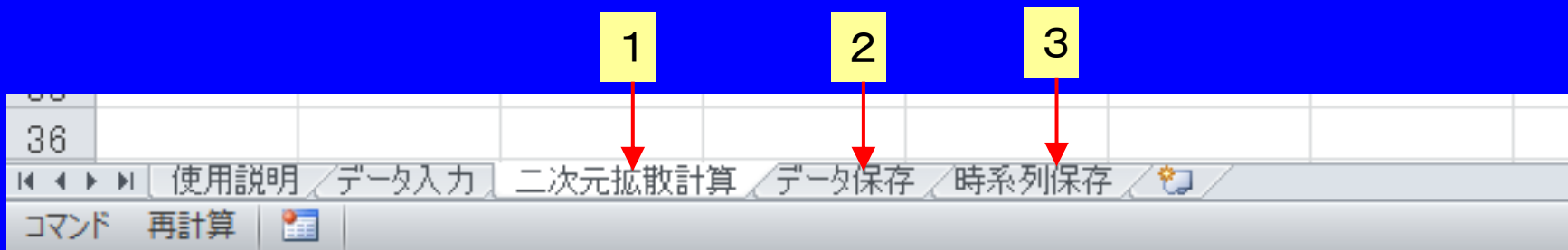
右側 凹みの表現

8	9	9	9	10
---	---	---	---	----

				12
				13
			11	
				14

## EXCELシートへの計算結果の出力(シート構成は電気防食の検討と同様)

1. 「データ入力」シートの「二次元浸透計算」ボタンを押すと計算をスタートするが、実際の計算は「二次元拡散計算」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。
2. 「データ入力」シートにおいて設定した計算間隔のタイミングで、その経過時間の塩分浸透分布図を「データ入力」で設定した諧調で、「データ保存」シートに出力する。
3. 「データ入力」シートで設定した個別のセルの塩分浸透履歴は、計算が終了した後に「時系列保存」シートに結果が出力される。



# 「データ保存」シートへの結果出力

1. モデル左側(コンクリート底面)から塩分が浸透場合の計算事例を以下に示す。モデル上側(コンクリート側面)は[777]を設定しており、この断面が続く状態を表現している。
2. モデル左側(コンクリート底面)およびモデル上側(コンクリート側面)から塩化物イオンが浸透している状態を示す。

凡例(塩分濃度: Kg/m<sup>3</sup>)

13.5000	より大		
12.0000	~	13.5000	未満
10.5000	~	12.0000	未満
9.0000	~	10.5000	未満
7.5000	~	9.0000	未満
6.0000	~	7.5000	未満
4.5000	~	6.0000	未満
3.0000	~	4.5000	未満
1.5000	~	3.0000	未満
1.5000	未満		

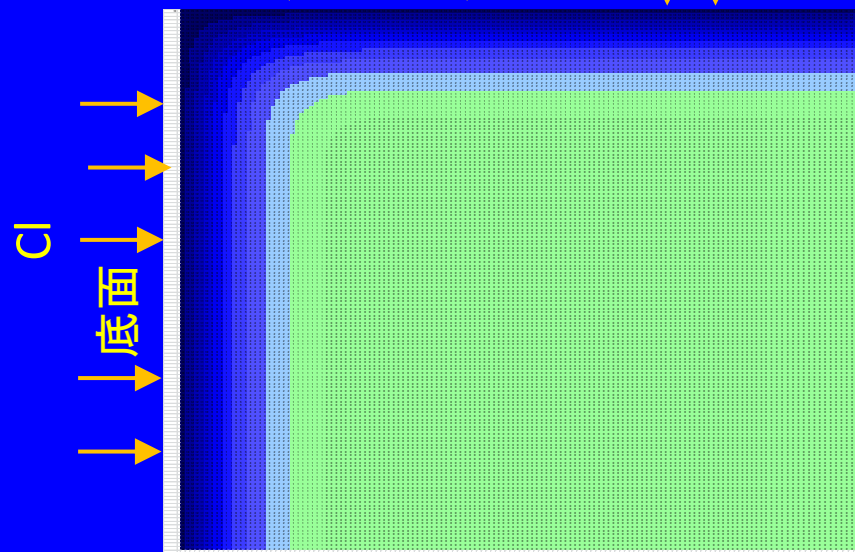
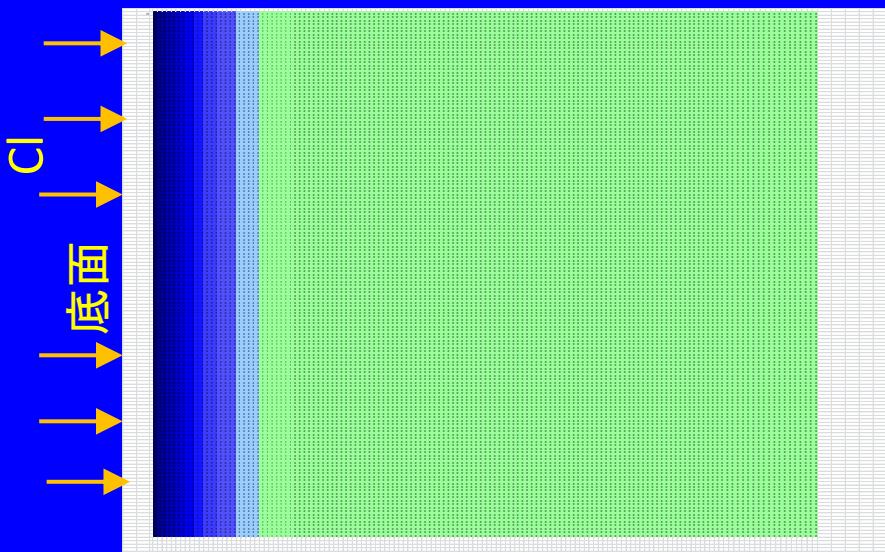
1

側面

2

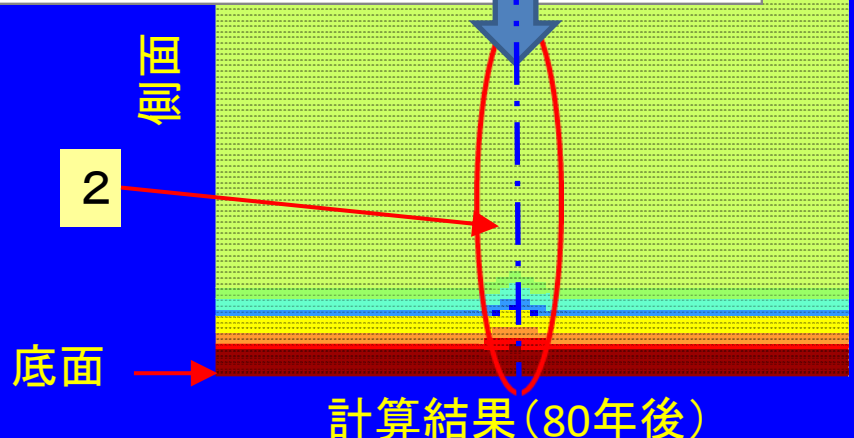
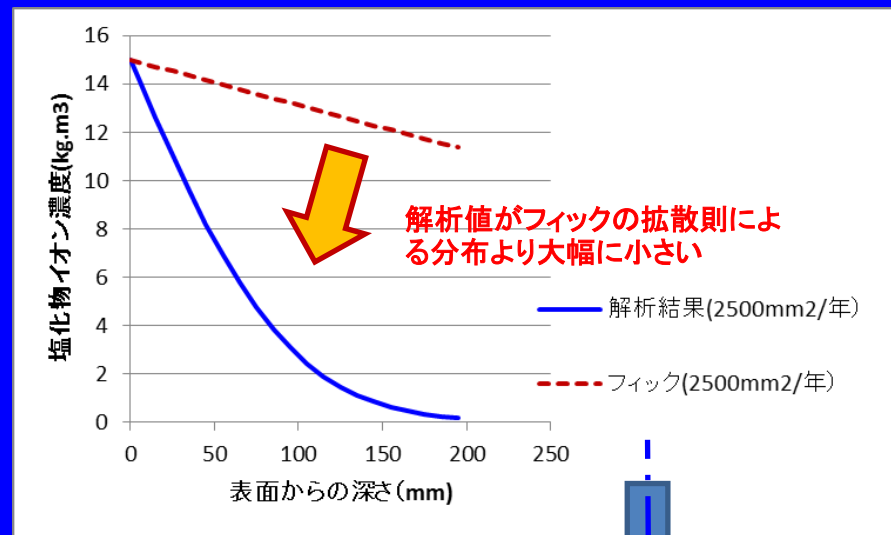
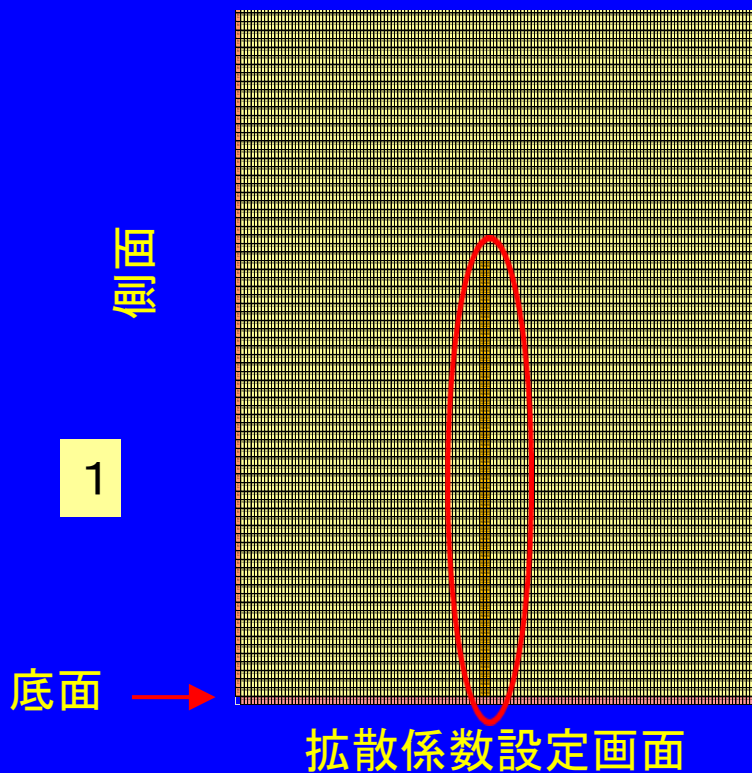
Cl

側面

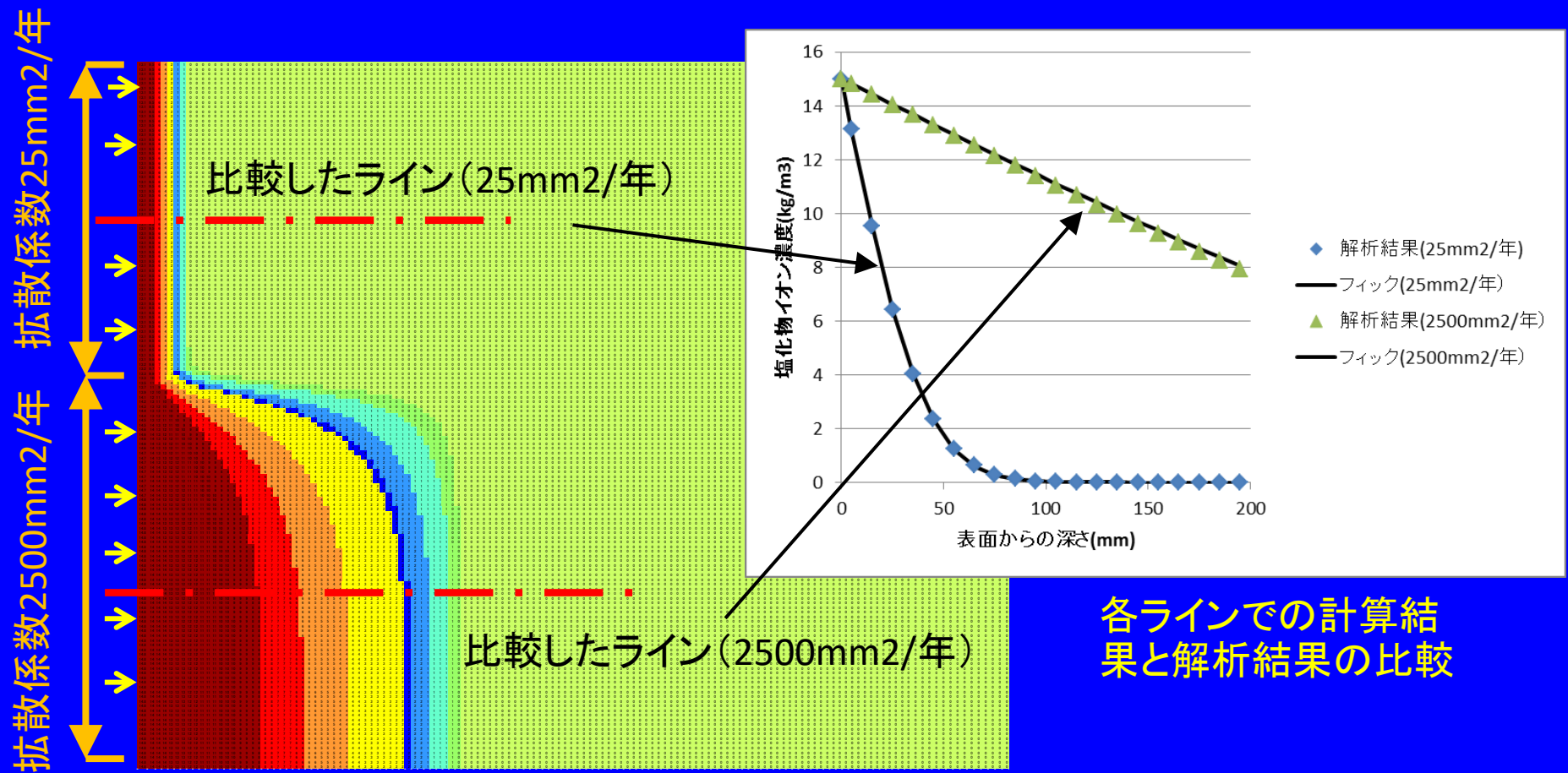


# 解析事例(1)\*\*\*ひび割れの影響を検討した例

1. モデル左側(コンクリート底面)の表面塩化物イオン濃度を $15\text{kg/m}^3$ として、モデル中置付近にひび割れをイメージとして、周辺のコンクリートの拡散係数( $25\text{mm}^2/\text{年}$ )に対して100倍( $2500\text{mm}^2/\text{年}$ )の拡散係数を設定した。(ひび割れの実現として、幅は2セル( $10\text{mm} \times 2 = 20\text{mm}$ )、深さは50セル( $10\text{mm} \times 50 = 500\text{mm}$ )の範囲とした。
2. 80年後のひび割れ位置での塩化物イオンの拡散状況は、フィックの拡散則に基づく分布と比較して、解析結果の方が大幅に小さい値となった。(ひび割れの影響があまり見られない?)

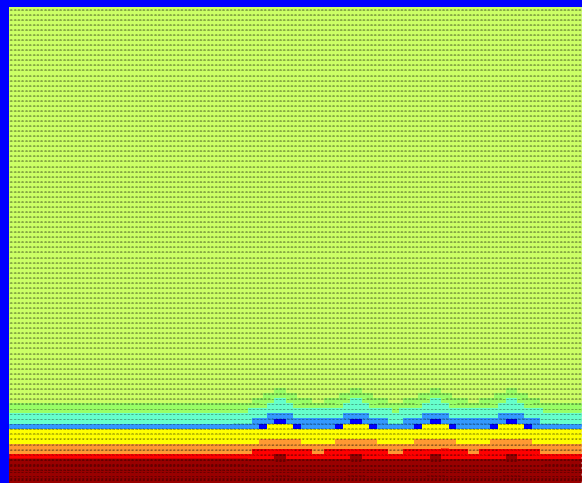


解析事例(2)\*\*\*先の解析でひび割れの影響がそれほど見られなかったが、拡散係数を広い範囲で100倍変化させて50年を計算させた下図に示す単純な解析では、比較したラインのいずれの位置でも解析結果はフィックの拡散則の分布とよく一致した。したがって、ひび割れのような狭い範囲で拡散係数が増加した場合、ひび割れ周辺に拡散するために、十分内部まで浸透することができないものと推測される。

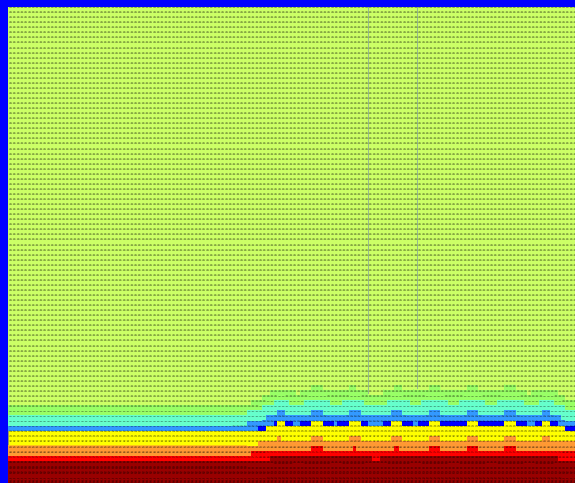


先の解析でひび割れの解析結果より、ひび割れ間隔が浸透深さに大きく影響する可能性が示唆された。そこで、3セル分30mmについて、健全なコンクリート拡散係数(25mm<sup>2</sup>/年)を100倍(2500mm<sup>2</sup>/年)させてひび割れの影響を考慮した。ひび割れの中心間隔が200mm、100mm、50mmと変化させた場合の解析結果を以下に示す。(ひび割れ部の拡散係数はひび割れに沿って片側15mm(合計30mmの範囲)を100倍している。ひび割れの深さは500mm程度)

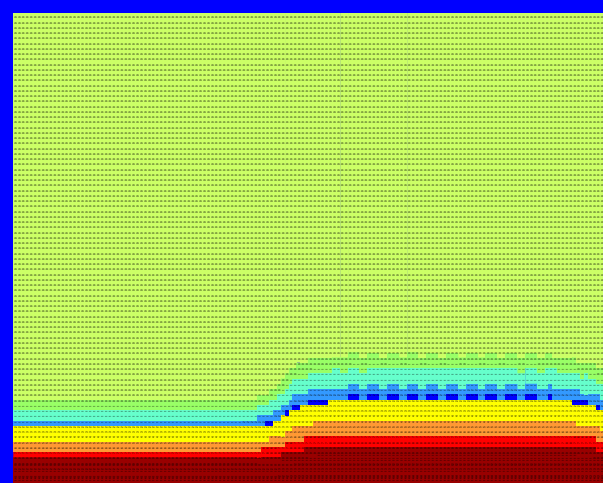
ひび割れ間隔が狭くなると、ひび割れが互いに影響しあって塩化物イオンの浸透が大きくなる傾向が伺える。



ひび割れ間隔200mm



ひび割れ間隔100mm

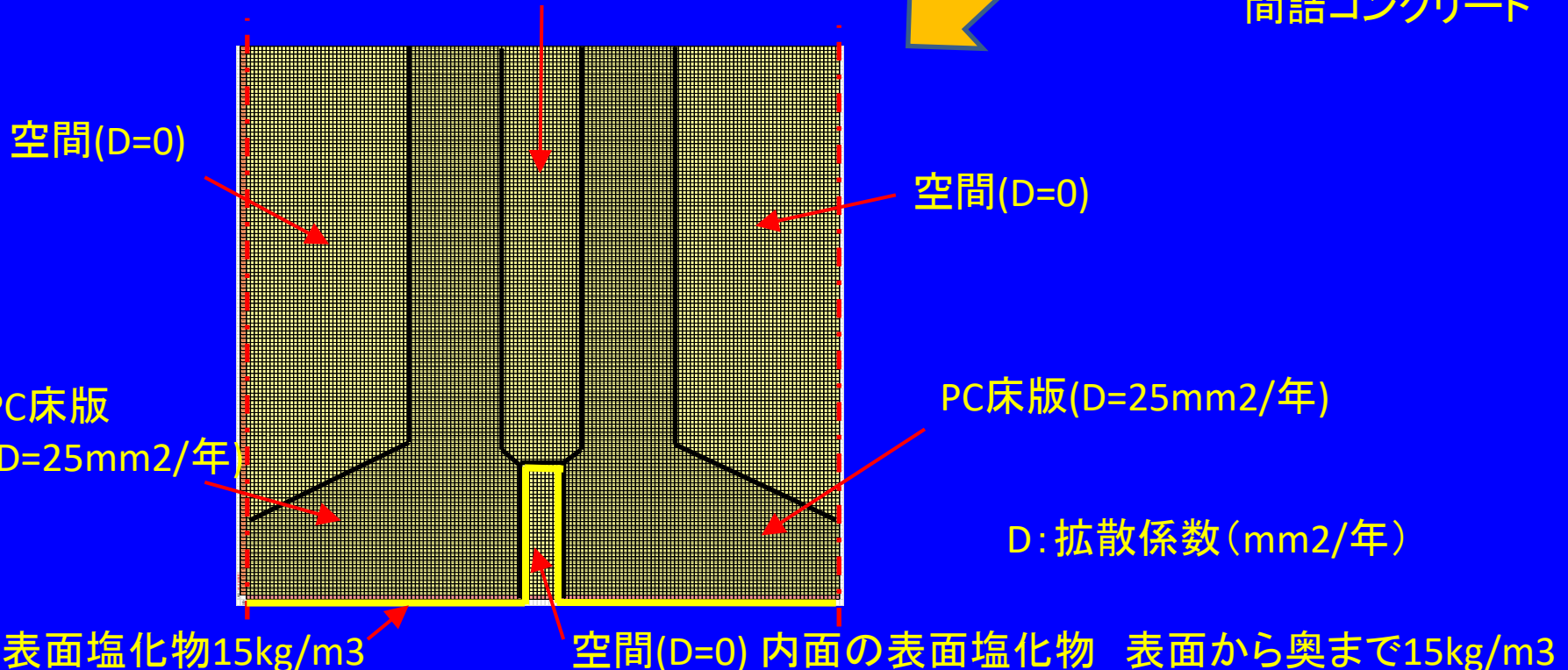
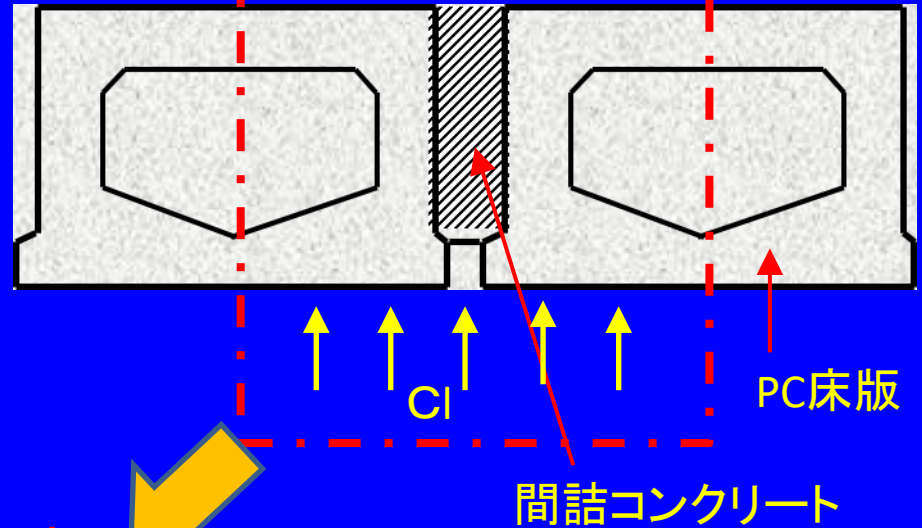


ひび割れ間隔50mm

計算年数80年

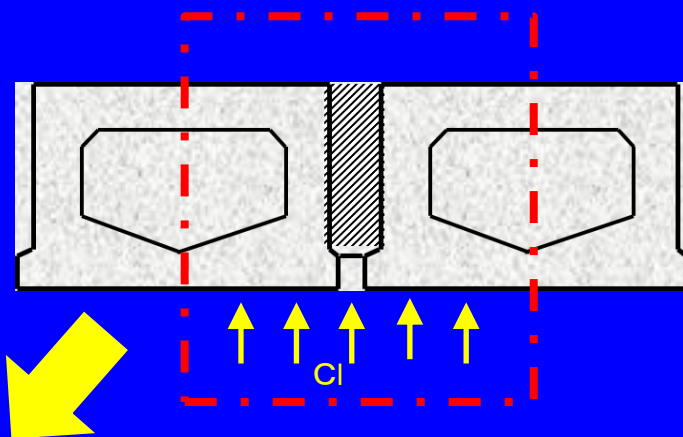
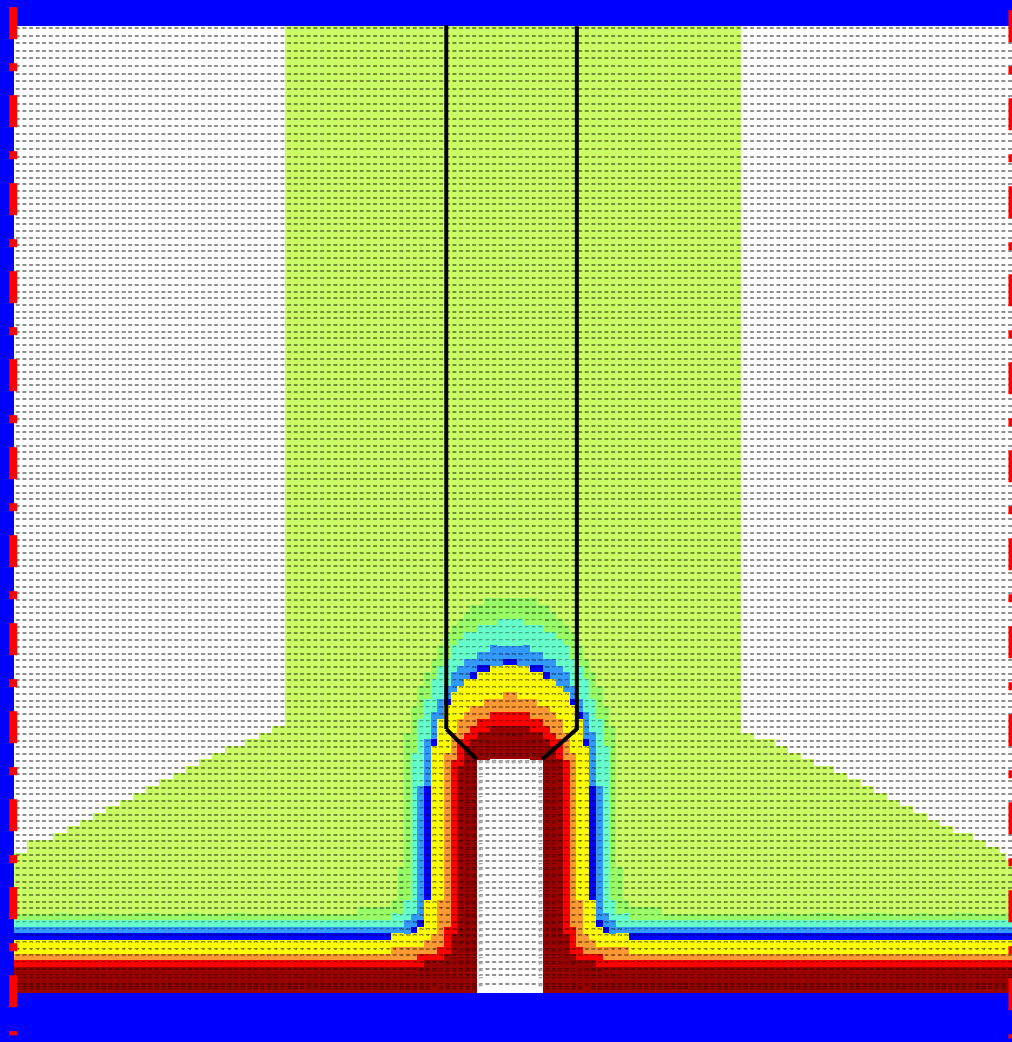
# 解析事例(3)\*\*\*プレキャストの境界

PC床版を例にとり、プレキャスト部材と場所打ちコンクリートの境界部の塩分浸透について確認した。





プレキャスト部材と場所打ちコンクリートの境界部の塩分浸透計算を行った結果、80年後では下図のようになり、場所打ちの間詰コンクリートへの塩分の浸透が大きいことが分かる。今後は、プレキャストと場所打ちコンクリートの打継部の評価方法を検討する必要がある。

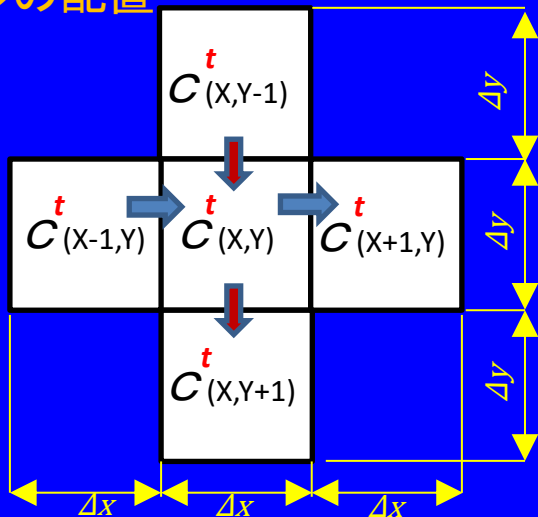


凡例(塩分濃度:Kg/m<sup>3</sup>)

	8.0000	より大	
	8.0000	～ 6.0000	より大
	6.0000	～ 4.0000	より大
	4.0000	～ 2.0000	より大
	2.0000	～ 1.8000	より大
	1.8000	～ 1.2000	より大
	1.2000	～ 0.6000	より大
	0.6000	～ 0.3000	より大
	0.3000	未満	

限界値

## セルの配置



## 差分法による式の展開

$$\frac{\partial C(x, y, t)}{\partial t} = D * \left( \frac{\partial^2 C(x, y, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C(x, y, t)}{\partial y^2} \right)$$

$$\frac{\Delta C(x, y, t+1) - \Delta C(x, y, t)}{\Delta t}$$

$$\begin{aligned} \frac{\Delta^2 C(x, y, t)}{\Delta x^2} &= \frac{C(x-1, y, t) - C(x, y, t)}{\Delta x} - \frac{C(x, y, t) - C(x+1, y, t)}{\Delta x} \\ &= \frac{1}{\Delta x^2} * (C(x-1, y, t) - 2 * C(x, y, t) + C(x+1, y, t)) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\Delta^2 C(x, y, t)}{\Delta y^2} &= \frac{C(x, y-1, t) - C(x, y, t)}{\Delta y} - \frac{C(x, y, t) - C(x, y+1, t)}{\Delta y} \\ &= \frac{1}{\Delta y^2} * (C(x, y-1, t) - 2 * C(x, y, t) + C(x, y+1, t)) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C(x, y, t+1) &= D * \Delta t * \left\{ \frac{1}{\Delta x^2} * (C(x-1, y, t) - 2 * C(x, y, t) + C(x+1, y, t)) \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{\Delta y^2} * (C(x, y-1, t) - 2 * C(x, y, t) + C(x, y+1, t)) \right\} \\ &\quad + C(x, y, t) \end{aligned}$$