コンクリート構造物建設工程シュミレータの開発
－初期損傷下における保有耐荷力解析－

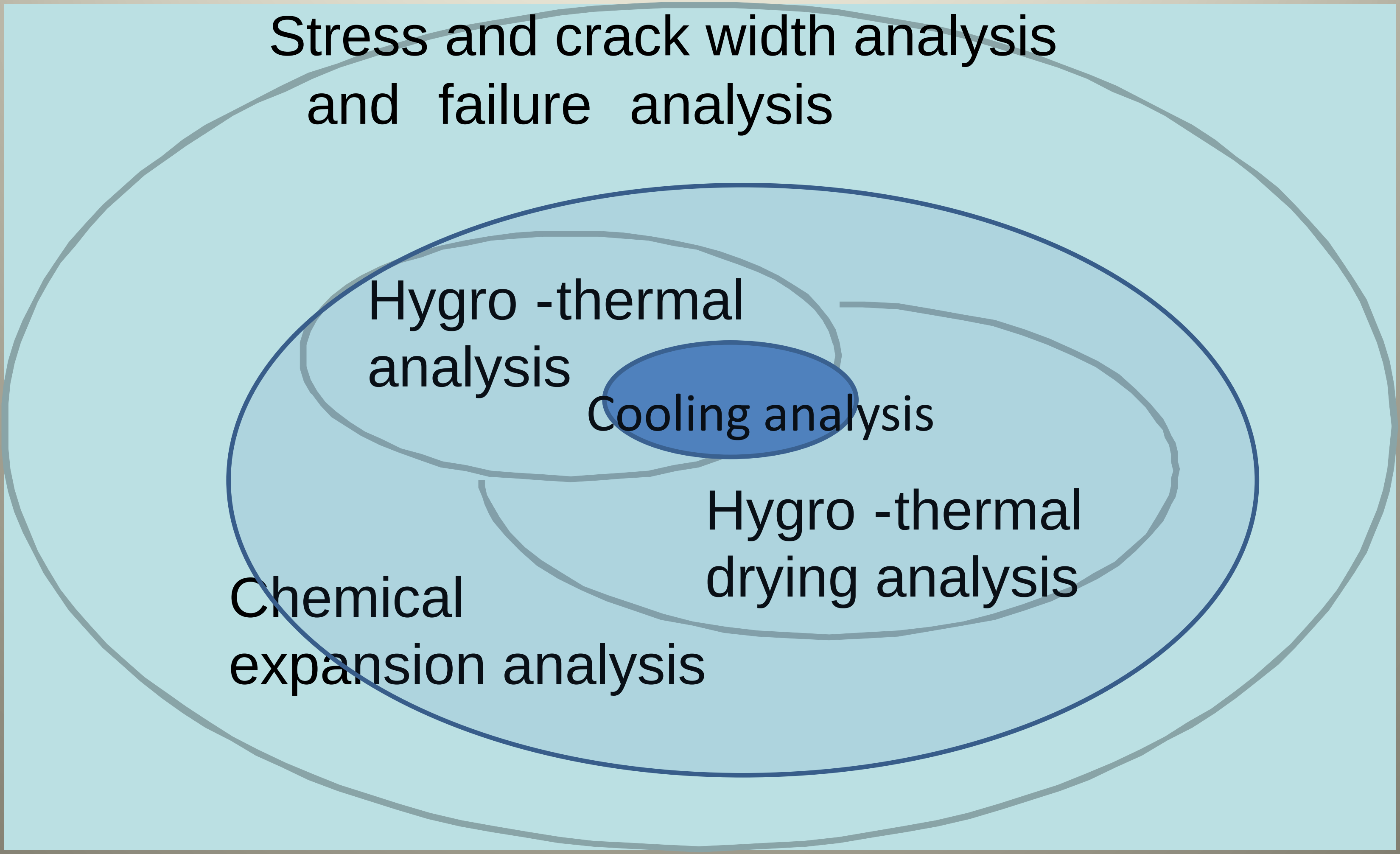
田辺　忠顕
名古屋大学名誉教授
社会基盤技術評価支援機構・中部
専務理事

初期損傷解析とその下での保有耐荷力解析の包括的なプラットフォーム

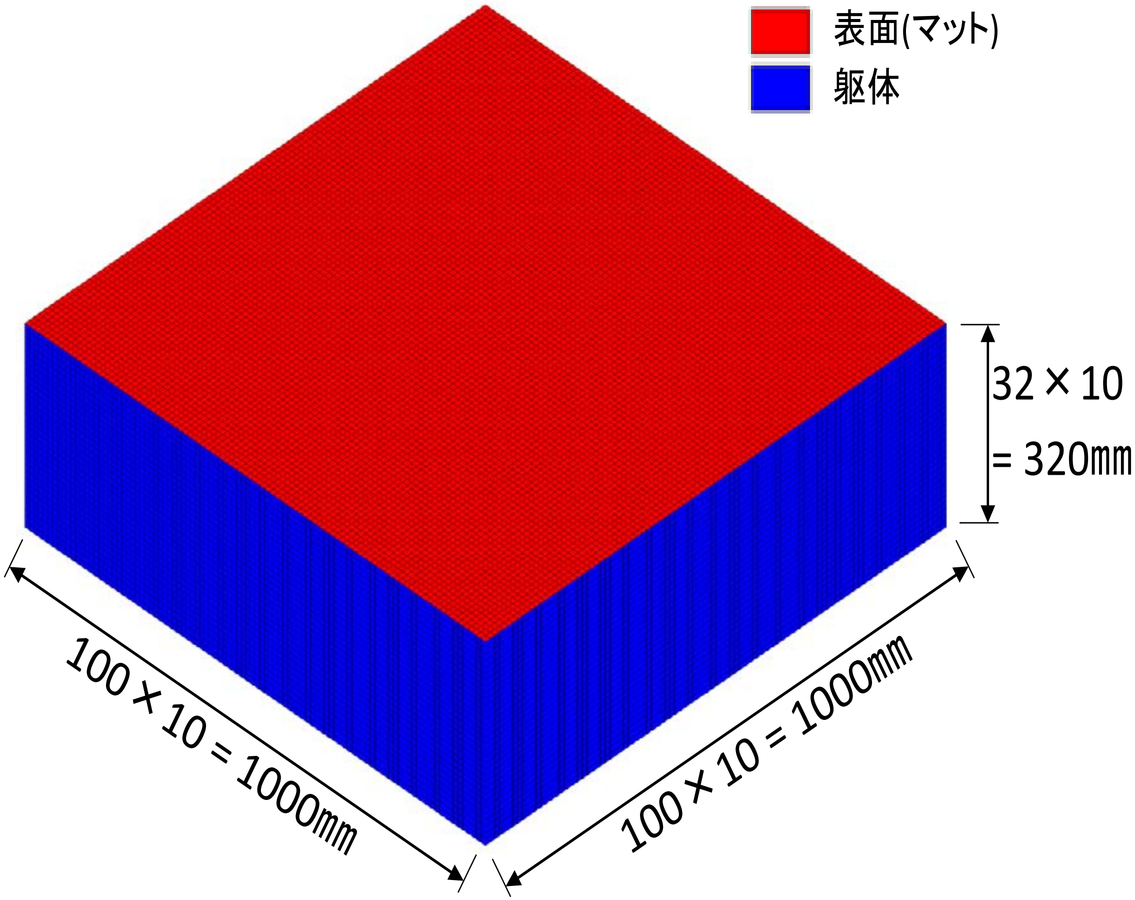
JCI マスコンクリートソフト作成委員会

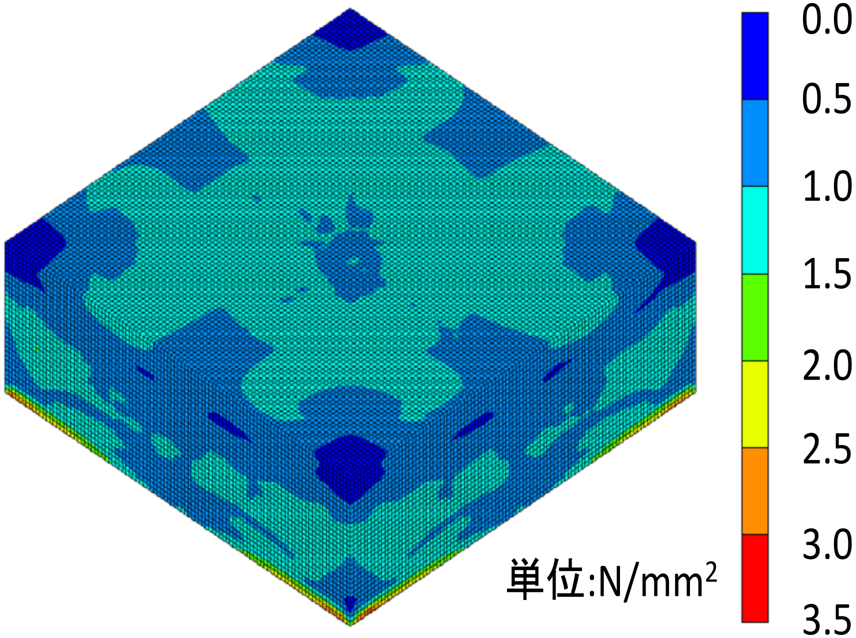
JCMAC3, JCMAC3-U

初期損傷解析とその下での保有耐荷力解析の包括的なプラットフォーム

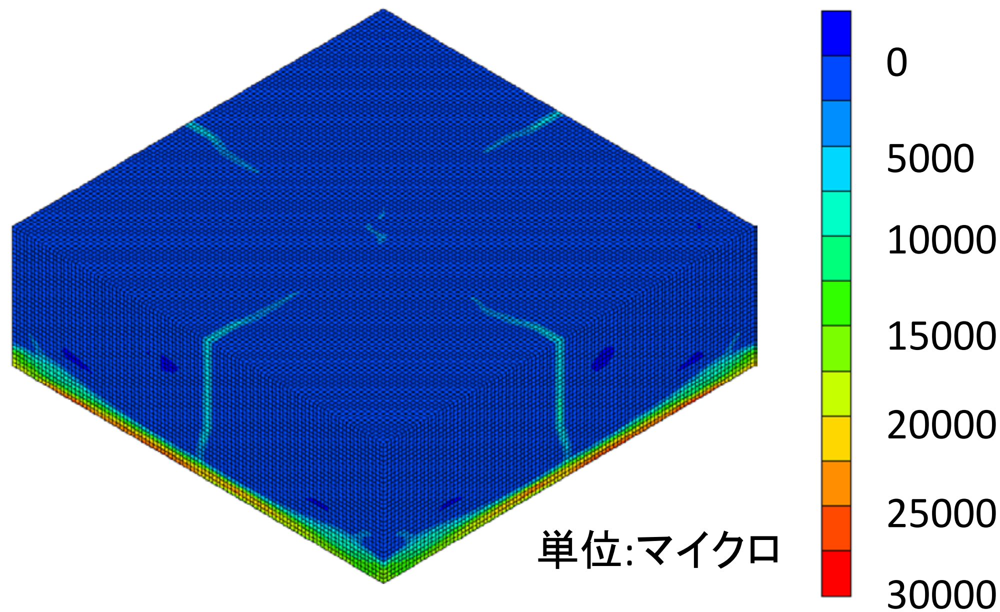


100万自由度非線形解析が可能。 **温度、 乾燥収縮、 応力、ひび割れ、ひび割れ幅の解析**



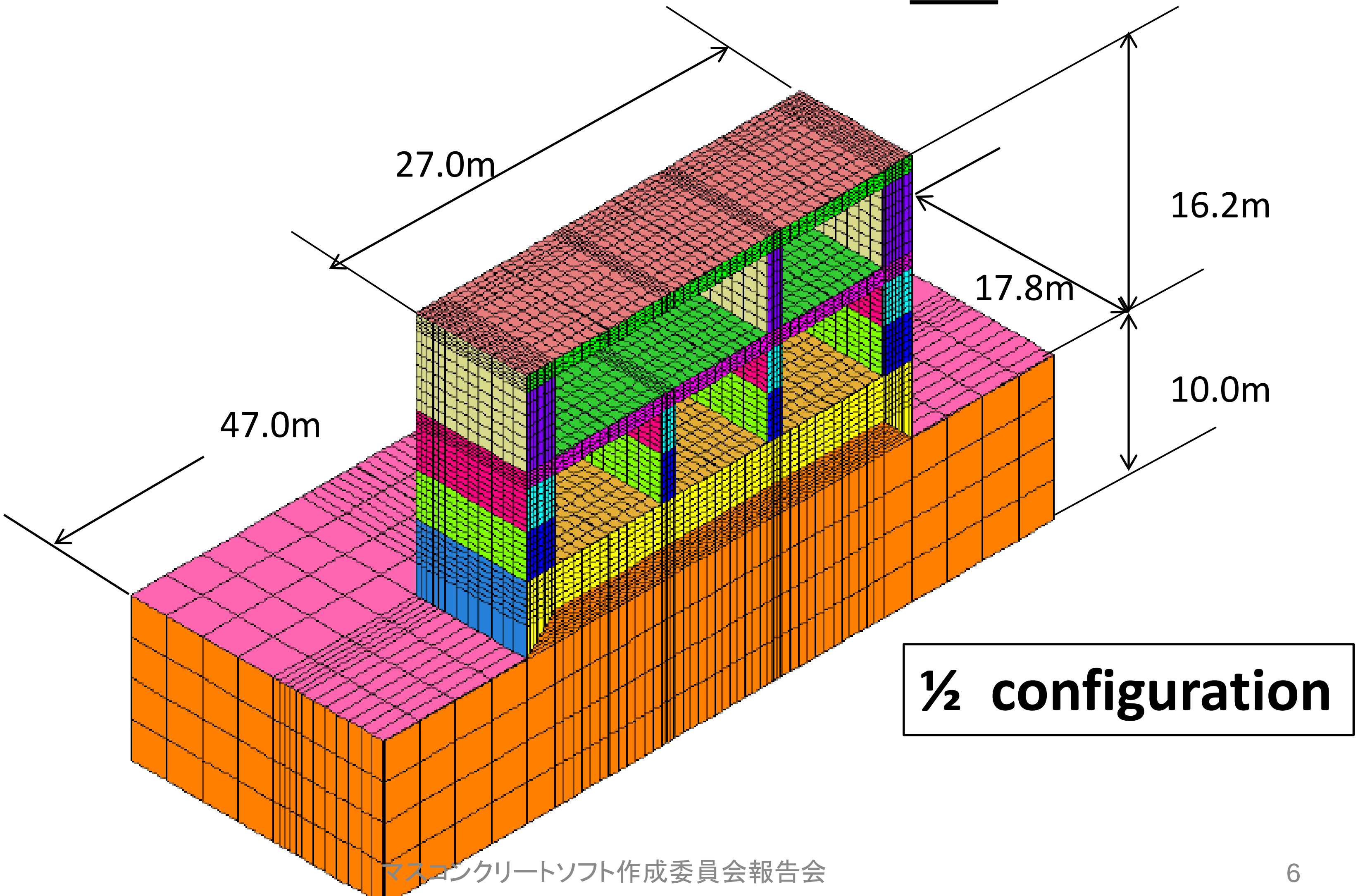


最大主応力

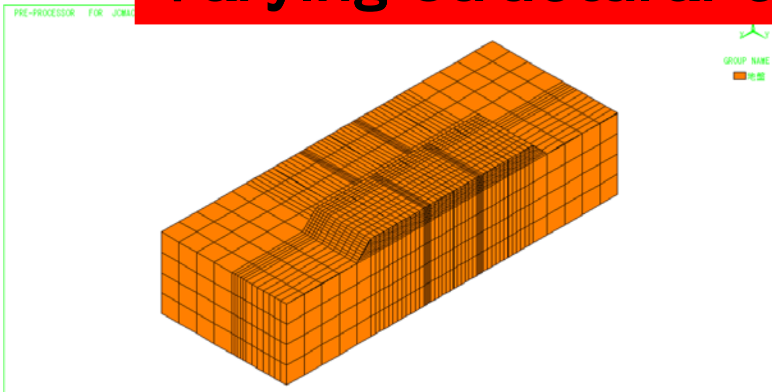


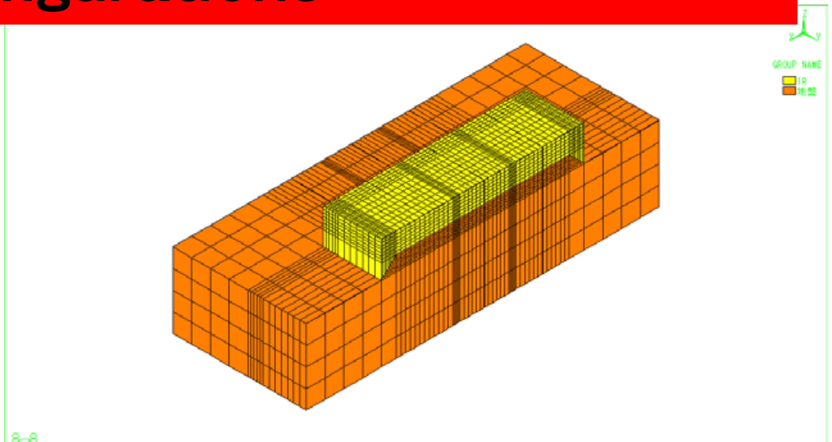
最大ひび割れ相当ひずみ

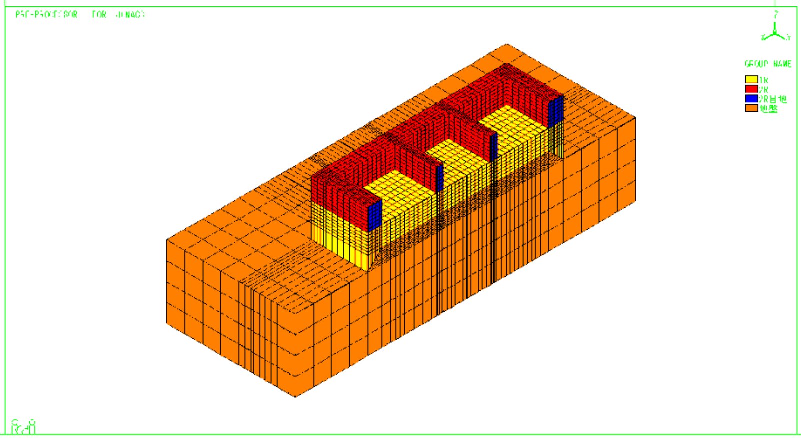
30万自由度を超えるケイソン建造過程の初期応力ひび割れ幅解析例

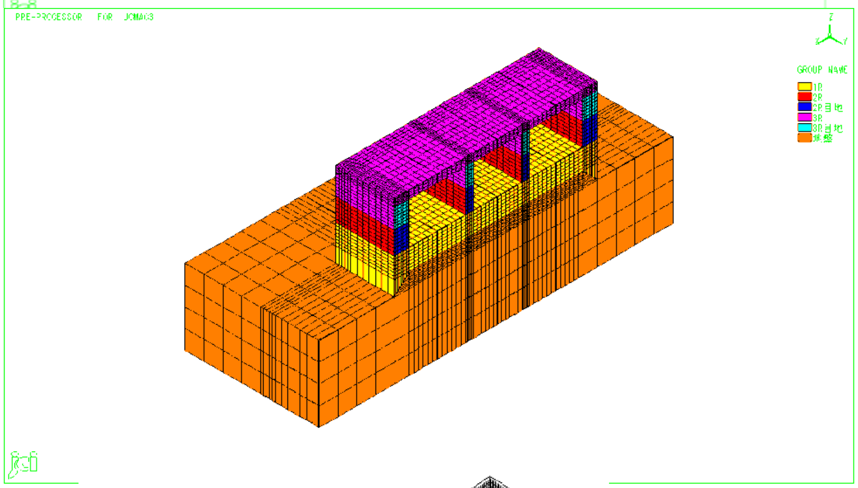


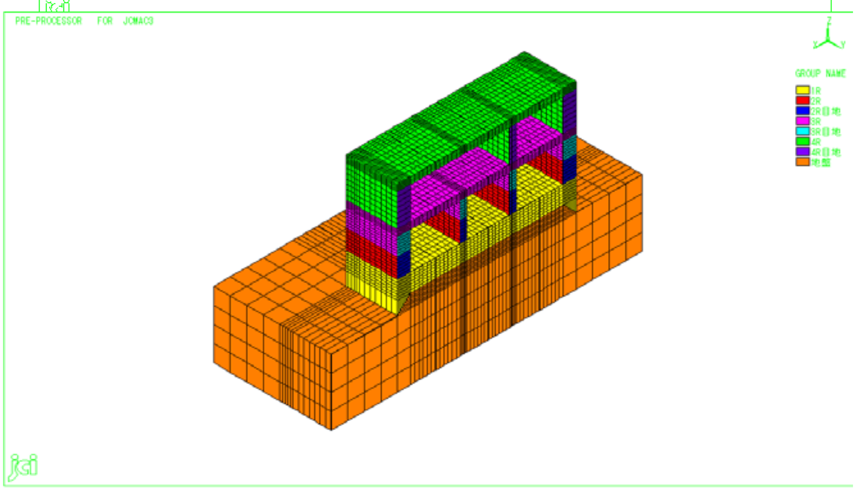
Varying structural configurations

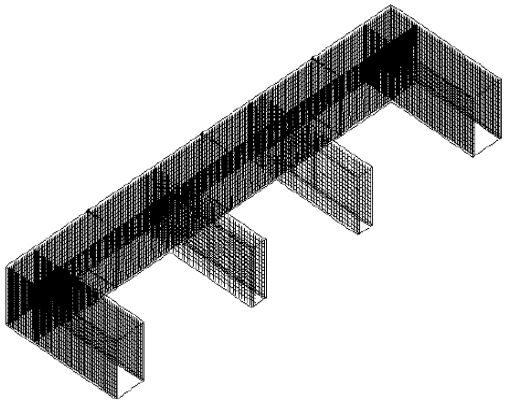




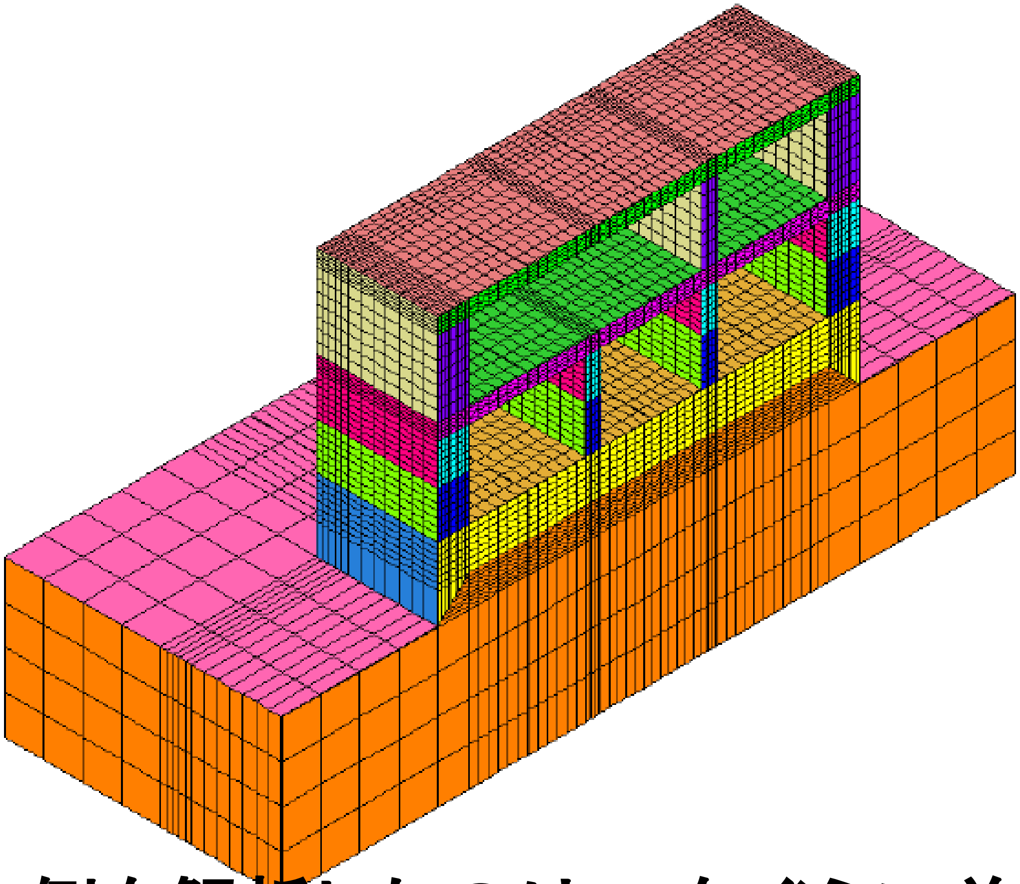








この例では、初期に想定したコンクリートの配合、養生条件では、基礎スラブに1.5mmのひび割れ幅が算出され、配合・養生方法の変更がなされた。



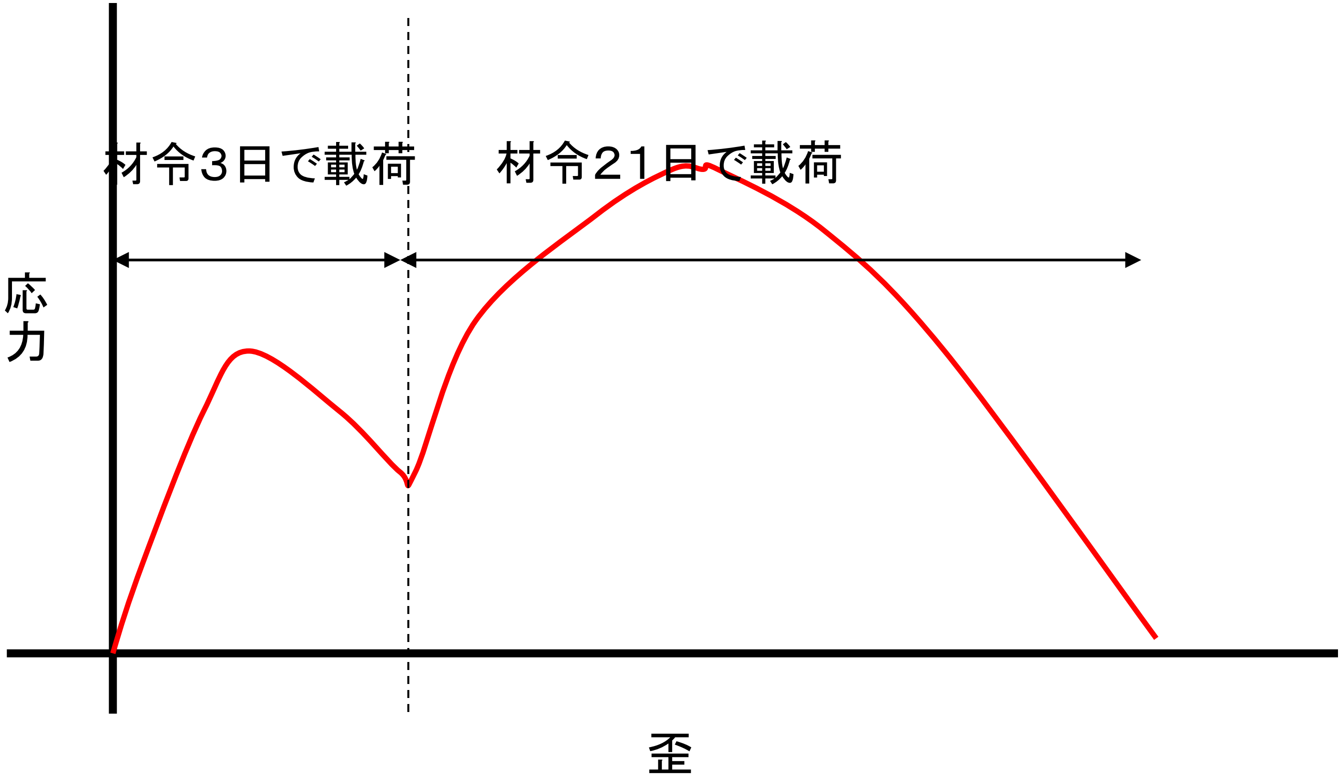
この例を解析したのは、2年ぐらい前の事であったが、その時点での問題点の一つは、弱材齢からの乾燥収縮初期ひずみの算定方法であった。

建設工程を通じて、コンクリートの硬化が進み、温度応力、乾燥収縮応力、あるいは荷重によって、ひび割れが発生し、その場合の保有耐荷力如何によって、解体撤去、再建造などの事態が過去に何度も生じている。

- 硬化過程の力学特性と硬化後の力学特性を連続的に表現する
  Solidification Theoryの適用 （耐荷力解析への連続）
- 硬化過程での乾燥収縮ひずみの算定方法
- Smearedモデルから、離散的なひび割れ幅の計算方法
- 垂井高架橋の解析事例

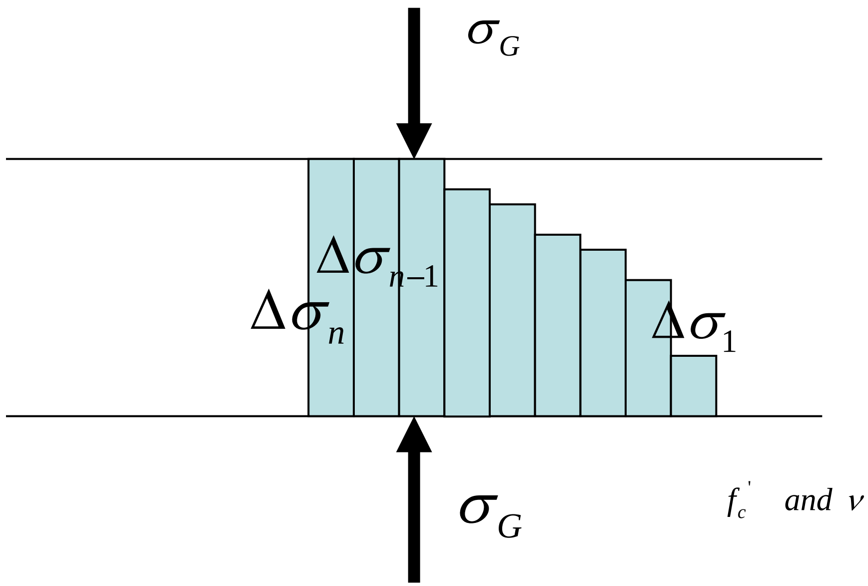
Solidification Theory　の適用

硬化中のコンクリートが応力を受けて、ある程度変形し、その後また硬化がすすみ、そこでまた新たな応力を受ける場合の構成則を考える。



モデルの概念

- まず　１軸モデルを作る。２軸、３軸状態への拡張はLECOMによる。



各柱状の高さは、あるひずみ増分を受けた際に、時間ごとに生成期日が異なる硬化物質の受け持っている応力増分を表している。　（Solidification　Theory）

この硬化物質の量$\nu(t)$ が時間とともに増大する。

各柱状体の応力歪み関係は同じで、生成期日だけが異なる。

$$
\begin{aligned}
d\sigma_G &= \sum \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \cdot \Delta\varepsilon \cdot \Delta\nu(\tau) \\
&= \int_0^t \frac{\partial}{\partial\varepsilon} f(\tau, \varepsilon - \varepsilon_\tau) \cdot d\varepsilon \cdot d\nu(\tau) \\
&= \left[\int_0^t \frac{\partial}{\partial\varepsilon} f(\tau, \varepsilon - \varepsilon_\tau) \cdot d\nu(\tau) \right] \cdot d\varepsilon \\
&= \left[\int_0^t \frac{\partial}{\partial\varepsilon} f(\tau, \varepsilon - \varepsilon_\tau) \cdot \frac{\partial\nu(\tau)}{\partial\tau} \cdot d\tau \right] \cdot d\varepsilon \\
&= \qquad D \cdot d\varepsilon \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (1)
\end{aligned}
$$

上の式で、 $$\left[\int_0^t \frac{\partial}{\partial \varepsilon} f(\tau, \varepsilon - \varepsilon_\tau) \cdot d\nu(\tau)\right] \cdot d\varepsilon$$

の、解釈が重要で、 $f(\tau, \varepsilon - \varepsilon_\tau)$

は、当然のことながら、ε一ετが負の時に　f　はゼロ。 したがって、

$$\left[\int_0^t \frac{\partial}{\partial \varepsilon} f(\tau, \varepsilon - \varepsilon_\tau) \cdot d\nu(\tau)\right] = dv1 * \frac{\Delta f(\varepsilon - \varepsilon_1)}{\Delta \varepsilon} + dv2 * \frac{\Delta f(\varepsilon - \varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{\Delta \varepsilon} + \cdots$$

となり、上の式は、各柱の体積とその時点でのその柱の剛性の積を表している。

（1）式において、決定すべき関数は

$$f \quad and \;\; \nu$$

$f \quad and \;\; \nu$ が、満たすべき条件

（1）十分硬化した後で載荷された場合には、実験的に求められている関数 $f_c^{\,'}$ と一致しなければならない。

（2）硬化量を表す ν は、最終的に１．０でなくてはならない。

（1）の条件は、ε_τ ＝0 の場合なので、

$$d\sigma_G = \left[\int_0^t \frac{\partial}{\partial \varepsilon} f(\tau,\varepsilon) \cdot \frac{\partial \nu(\tau)}{\partial \tau} \cdot d\tau \right] \cdot d\varepsilon$$

$$= \frac{\partial}{\partial \varepsilon} \int_0^t f(\varepsilon) \cdot \frac{\partial \nu(\tau)}{\partial \tau} \cdot d\tau$$

$$= \frac{\partial}{\partial \varepsilon} f(\varepsilon) \cdot \int_0^t \frac{\partial \nu(\tau)}{\partial \tau} \cdot d\tau$$

$$= \frac{\partial}{\partial \varepsilon} f(\varepsilon) = \frac{\partial}{\partial \varepsilon} f(\varepsilon)_c^{'}$$

即ち $f(\varepsilon) = f(\varepsilon)_c^{'}$

さて、これを2次元,3次元に拡張しよう。 一般的には、

$$d\sigma_{G,kl} = \sum \frac{\Delta\sigma_{kl}}{\Delta\varepsilon_{ij}} \cdot \Delta\varepsilon_{ij} \cdot \Delta\nu(\tau)$$

$$= \int_0^t \frac{\partial}{\partial\varepsilon_{ij}} f_{kl}(\tau, \varepsilon_{ij} - \varepsilon_{ij,\tau}) \cdot d\varepsilon_{ij} \cdot d\nu(\tau)$$

$f = 0$

$$= \left[\int_0^t \frac{\partial}{\partial\varepsilon_{ij}} f_{kl}(\tau, \varepsilon_{ij} - \varepsilon_{ij,\tau}) \cdot d\nu(\tau) \right] \cdot d\varepsilon_{ij}$$

$$= \left[\int_0^t \frac{\partial}{\partial\varepsilon_{ij}} f_{kl}(\tau, \varepsilon_{ij} - \varepsilon_{ij,\tau}) \cdot \frac{\partial\nu(\tau)}{\partial\tau} \cdot d\tau \right] \cdot d\varepsilon_{ij}$$

…………………（1）

$$= \qquad D_{klij} \cdot d\varepsilon_{ij}$$

上の式において、

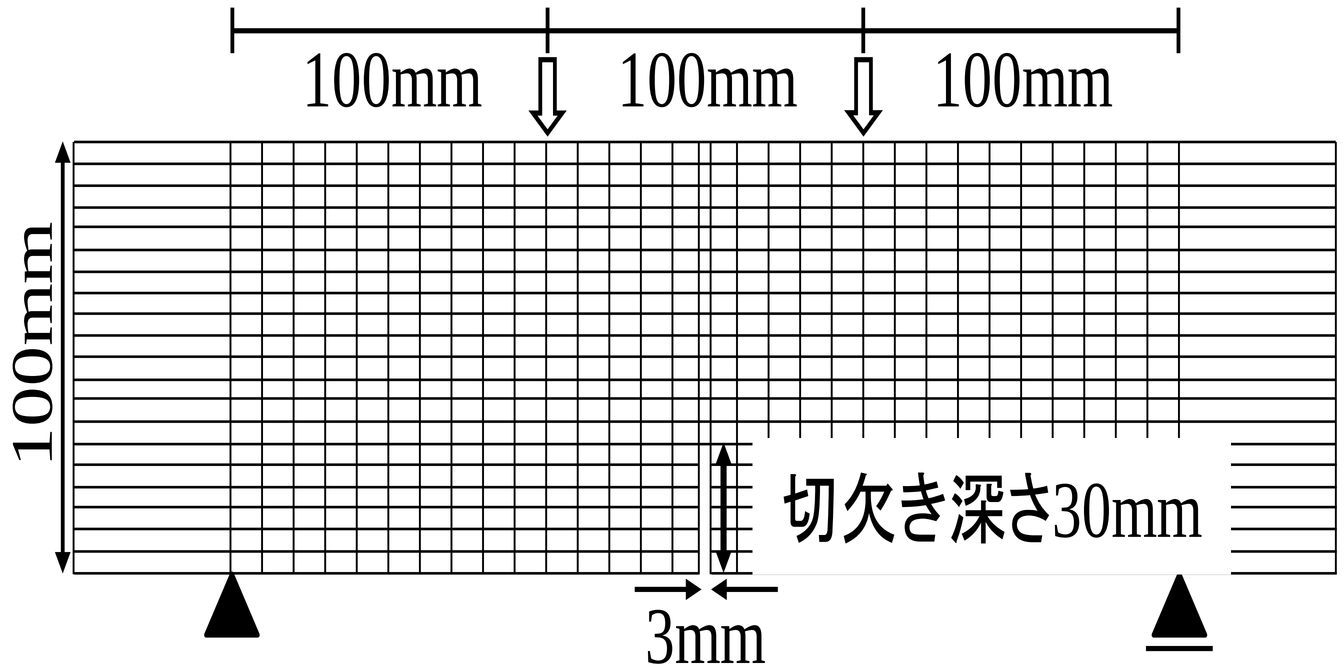
$k = l = 1, 2, 3$ の時にのみ $f_{kl} = f$

$k \neq l$ の時には $f_{kl} = 0$

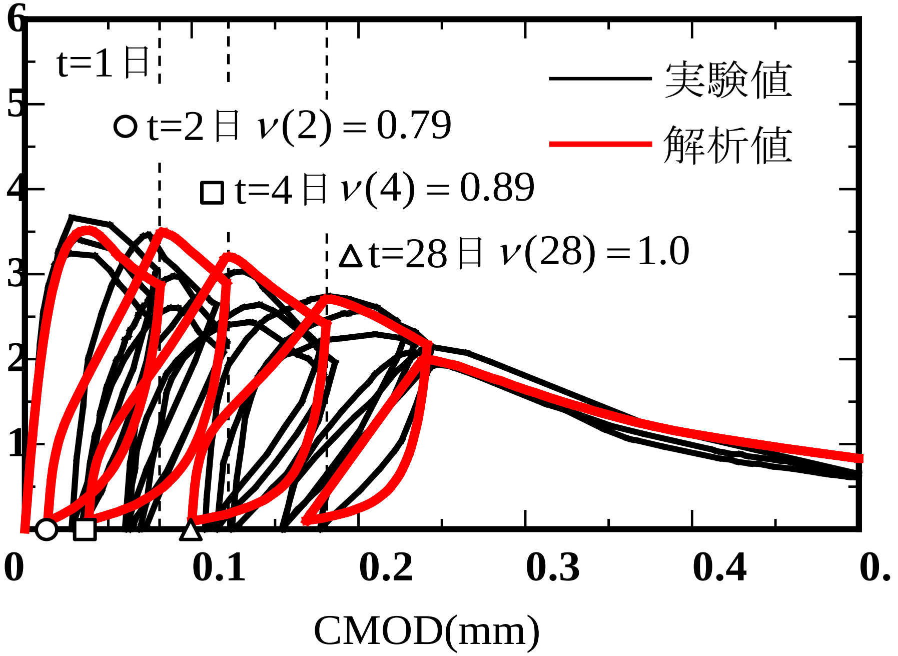
と仮定すると

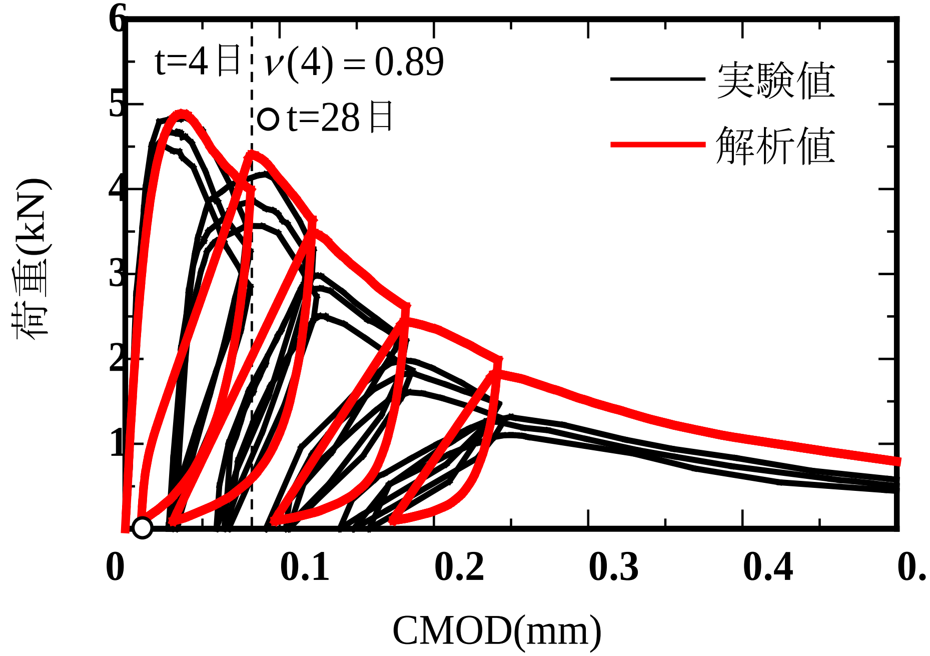
主方向にのみ格子が存在する通常の格子連続体モデルに一致する。 しかし、もはや、格子は、時間の関数となり、任意の材齢での応力履歴を記憶することになる。

名大　国枝助教授　実験

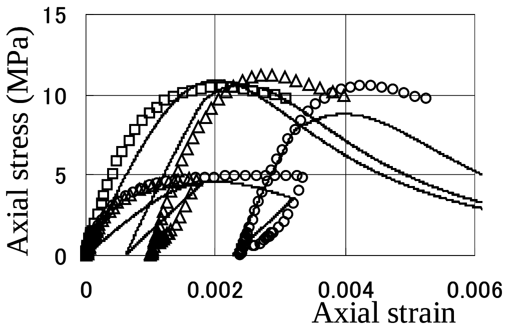


名大　国枝助教授　実験と解析との比較

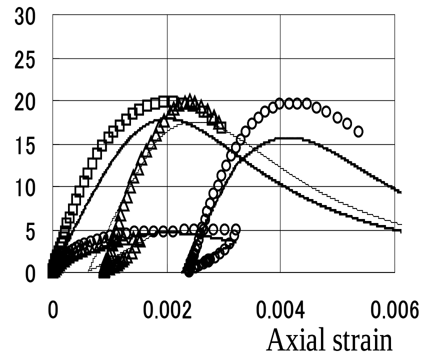




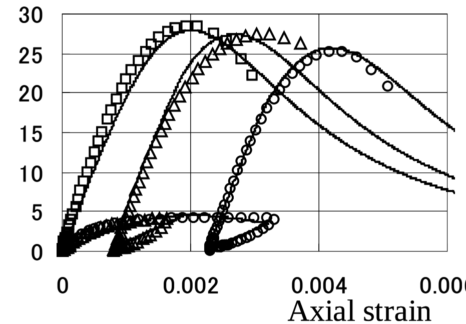
名城大　石川教授実験と解析との比較



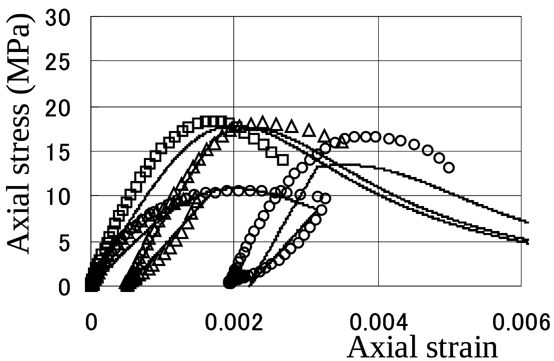
Initial loading 1day
Re-loading 3days



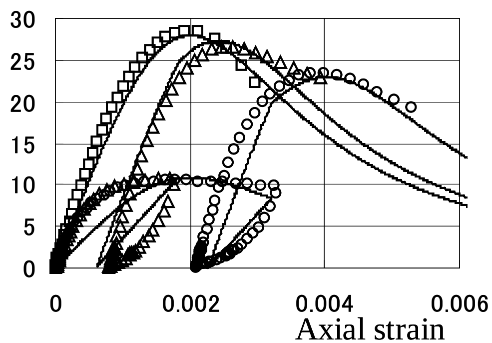
Initial loading 1day
Re-loading 7days



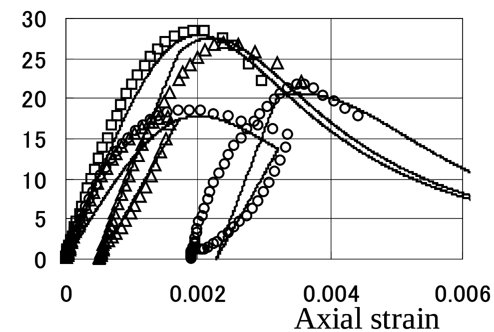
Initial loading 1day
Re-loading 7days



Initial loading 3day
Re-loading 7days



Initial loading 3day
Re-loading 28days



Initial loading 7day
Re-loading 28days

弱材齢時からの乾燥収縮量の問題

JCI 2011

$$\varepsilon_{sh\infty} = \frac{\varepsilon_{sh\rho}}{1+\phi\cdot t_0}$$

$$\varepsilon_{sh\rho} = \frac{\alpha\cdot(1-h)\cdot W}{1+150\,\mathbf{exp}\left\{-\dfrac{500}{f_c'(28)}\right\}} = \frac{\alpha\cdot\left(1-\dfrac{RH}{100}\right)\cdot W}{1+150\,\mathbf{exp}\left\{-\dfrac{500}{f_c'(28)}\right\}}$$

$$\phi = 10^{-4}\left\{15\,\mathbf{exp}\left(0.007\,f_c'(28)\right)+0.25W\right\}$$

CEB Code, 1990 （Euro code later)

$$\varepsilon_{CSO} = \varepsilon_S(f_{cm28}) \cdot \beta_{RH}$$

$$\varepsilon_S(f_{cm}) = \left\{160 + 10 \cdot \beta_{sc} \cdot \left(9 - \frac{f_{cm28}}{f_{cm0}}\right)\right\} \times 10^{-6}$$

$$\beta_{RH} = -1.55\beta_{sRH} \qquad (40\% \leqq \mathrm{RH} \leqq 99\%)$$

$$\beta_{RH} = +0.5 \qquad (\mathrm{RH} \geqq 99\%)$$

$$\beta_{sRH} = 1 - \left(\frac{RH}{RH_0}\right)^3$$

RH : relative humidity（%）　　(40%～100%)

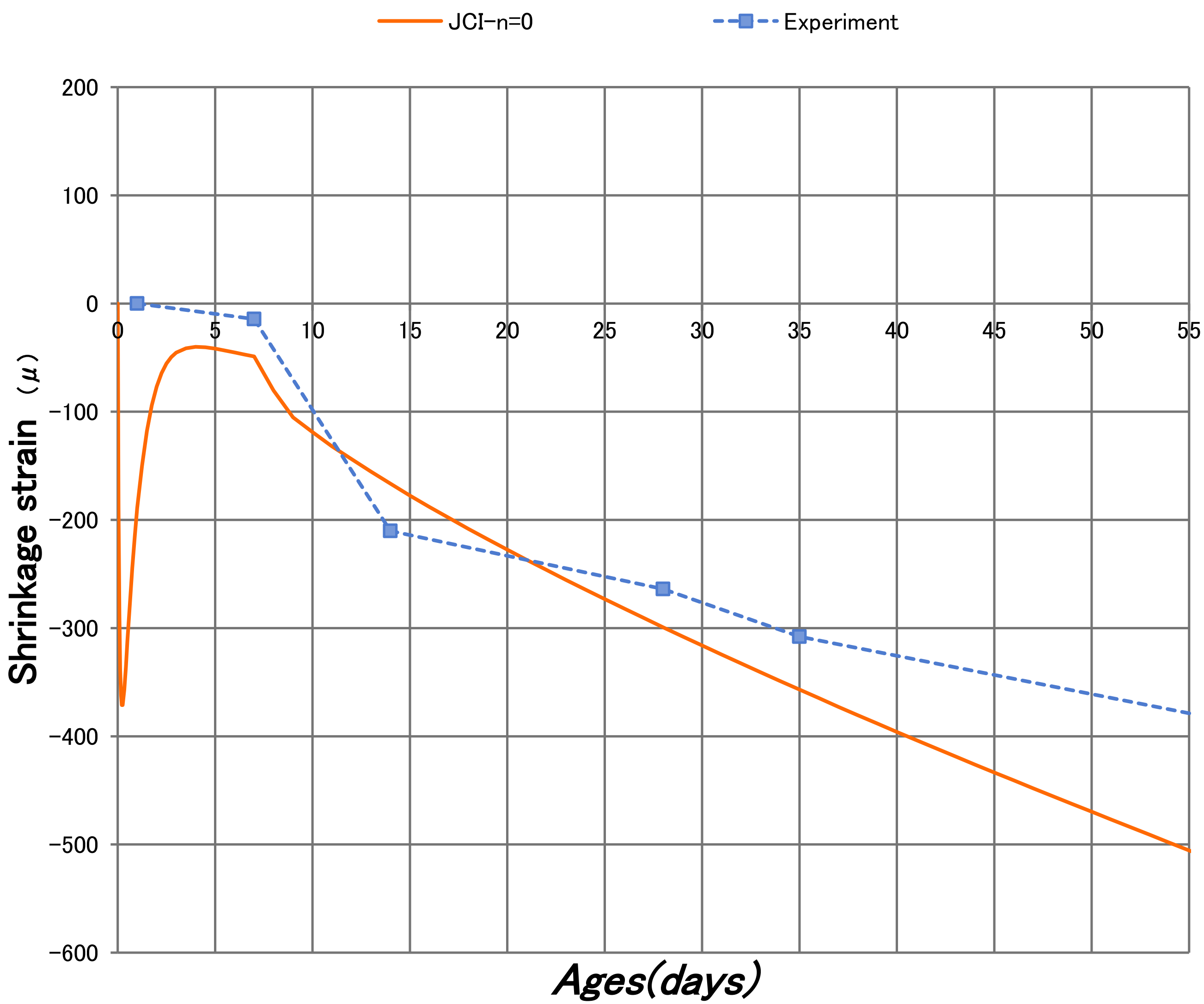
RH_0 : =100%

これらの式は、実験式であるが、弱材齢データには当てはまらないうえに、温度の影響を考慮していないから、温度解析結果の温度を考慮すると材齢3日ぐらいで、殆ど考えられない大きな収縮量を与える。

これらの提案式に、弱材齢にも適用可能な適切な補正を加える。

オリエンタル白石　　原、正司

Oriental Shiraishi Co. Hara and Shoji



When temperature field changes, we can not use relative humidity as a variable to solve the diffusion diff. eq. In stead,

$$J_w = -C_w \cdot \nabla w - C_H \cdot \nabla T$$

$$\nabla w = (\partial w / \partial p) \nabla p$$

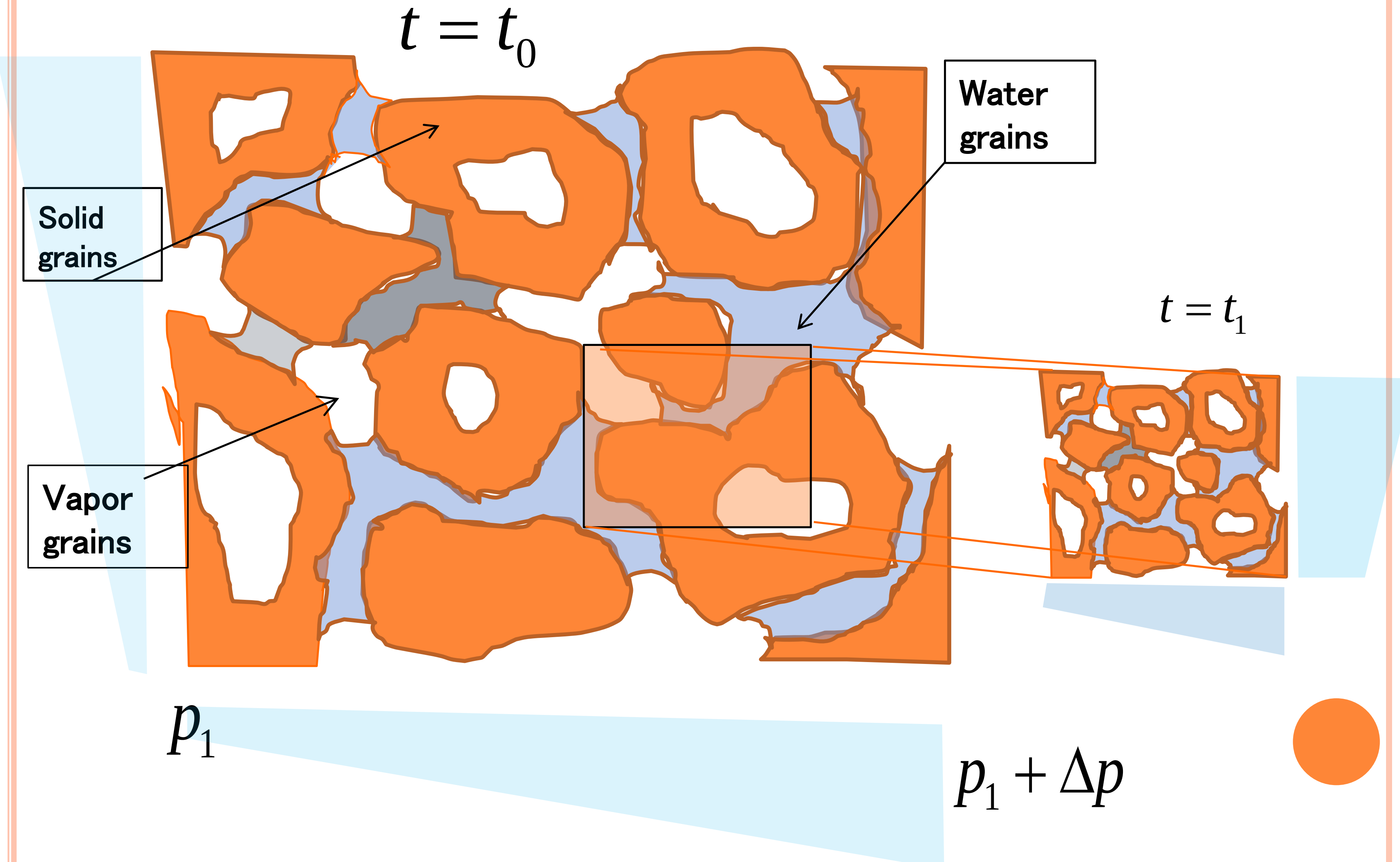
$$J_w = -C_w \frac{\partial w}{\partial p} \cdot \nabla p = -C_w' \cdot \nabla p$$

$$\left(\frac{\partial w}{\partial p}\right) \dot{p} = -\nabla \cdot J_w - \dot{w}_d \qquad \cdots\cdots (2)$$

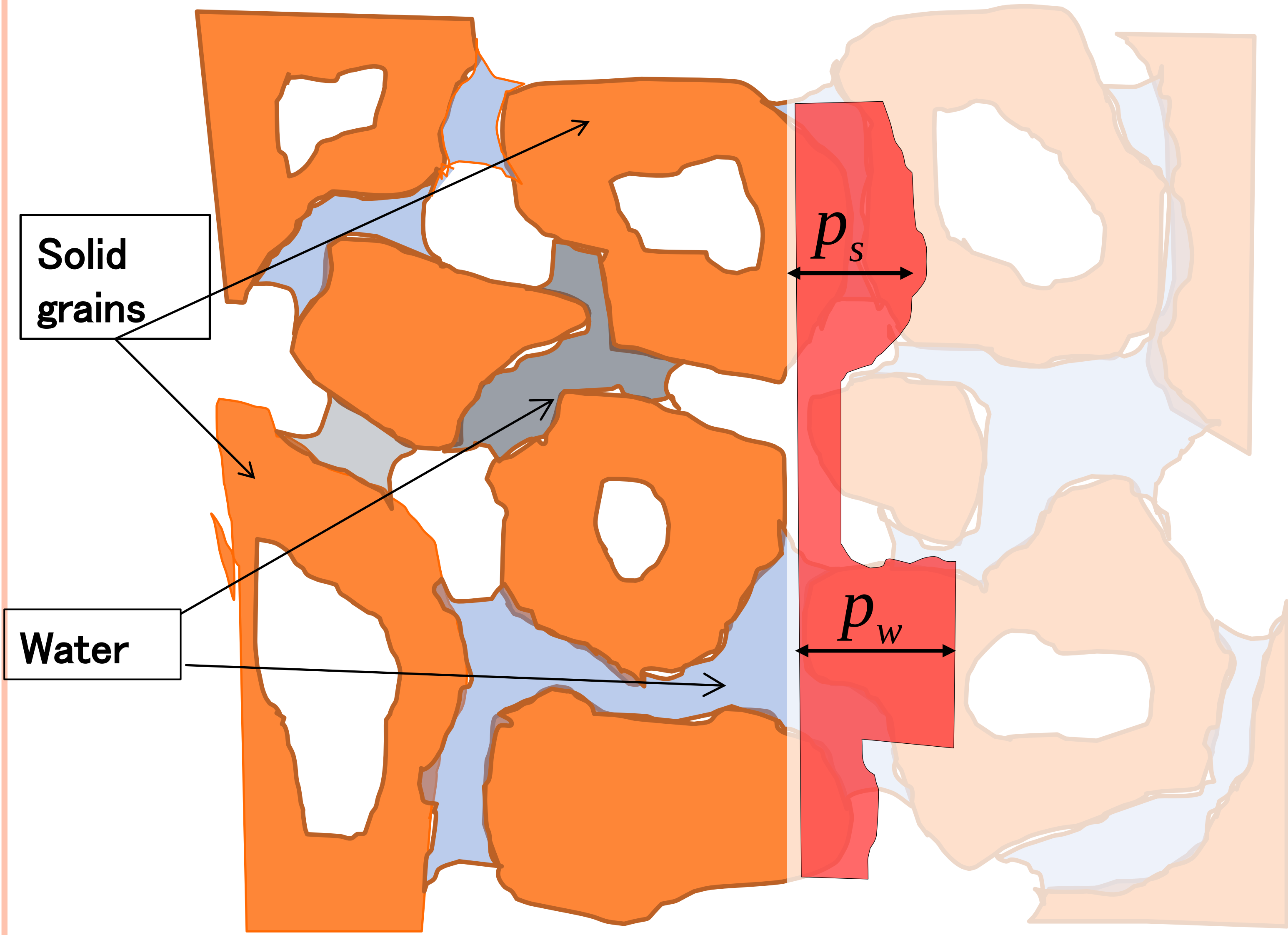
Boundary condition,

$$n \cdot J_w = \alpha_w (p - p_0)$$

Schematic model of cement grains and water grains in the hardening process

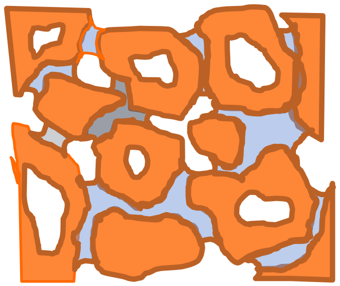


Schematic model of cement grains and water grains (Fractal nature may be possible)



Force to introduce contraction of grain organization

$$F = \iiint_V B^T \cdot P \cdot dV$$



$$= \iiint_V B^T \cdot dV \left[\sum \frac{V_i}{V} \cdot p_w^i + \sum \frac{\alpha V_i}{V} \cdot p_s^i \right]$$

$$F = \left[\sum \frac{V_i}{V} \cdot p_w^i + \sum \frac{\alpha V_i}{V} \cdot p_s^i \right] \cdot \boldsymbol{\Gamma}$$

$$= \omega\left[\sum \frac{r^2{}_i}{V} \cdot r_i \cdot p_w^i + \sum \frac{\alpha r^2{}_i}{V} \cdot r_i \cdot p_s^i \right] \cdot \boldsymbol{\Gamma}$$

Contraction force related to the specific surface area

$$\mathbf{F} = \omega\left[\sum \frac{\mathrm{r}^2{}_\mathrm{i}}{2\mathrm{V}} \cdot \gamma_\mathrm{w} + \sum \frac{\alpha \mathrm{r}^2{}_\mathrm{i}}{\mathrm{V}} \cdot \beta\gamma_\mathrm{s}\right] \cdot \boldsymbol{\Gamma}$$

$$\propto \left[\frac{\mathrm{s_p}}{\mathrm{V}} \cdot \gamma_\mathrm{w} + \frac{\alpha \mathrm{s_p}}{\mathrm{V}} \cdot \beta\gamma_\mathrm{s}\right] \cdot \boldsymbol{\Gamma} = (\gamma_\mathrm{w} + \alpha\beta\gamma_\mathrm{s})\frac{\mathrm{S_p}}{\mathrm{V}} \cdot \boldsymbol{\Gamma}$$

$$f_c^{'}(t) = f_c^{'}(s_p(t))$$

Appropriate form of $\emptyset$

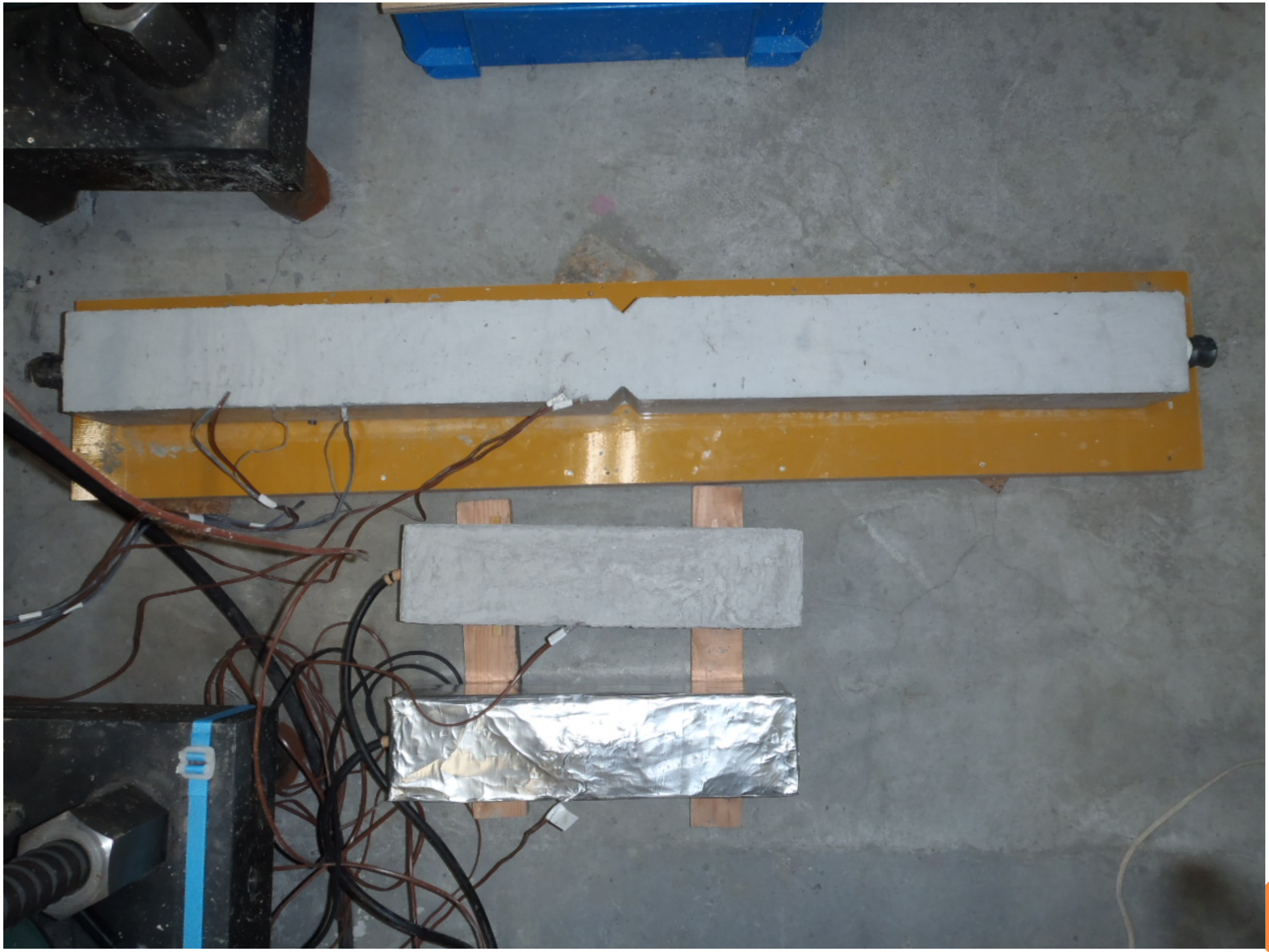
$$\Delta\boldsymbol{\varepsilon}_{sh}(\boldsymbol{t}) = \emptyset\left(\frac{\boldsymbol{f'}_{\boldsymbol{c}}(\mathbf{t})}{\boldsymbol{f'}_{\mathbf{c,28}}}\right) \cdot \Delta\boldsymbol{\varepsilon}_{\mathbf{sh},\boldsymbol{hardened}}$$

$$\emptyset\left(\frac{\boldsymbol{f'}_{\boldsymbol{c}}(\mathbf{t})}{\boldsymbol{f'}_{\mathbf{c,28}}}\right) = \left(\frac{\boldsymbol{f'}_{\boldsymbol{c}}(\mathbf{t})}{\boldsymbol{f'}_{\mathbf{c,28}}}\right)^{\boldsymbol{n}}$$

$$\emptyset\left(\frac{\boldsymbol{f'}_{\boldsymbol{c}}(\mathbf{t})}{\boldsymbol{f'}_{\mathbf{c,28}}}\right) = \text{Sargin's formula}$$

or other forms

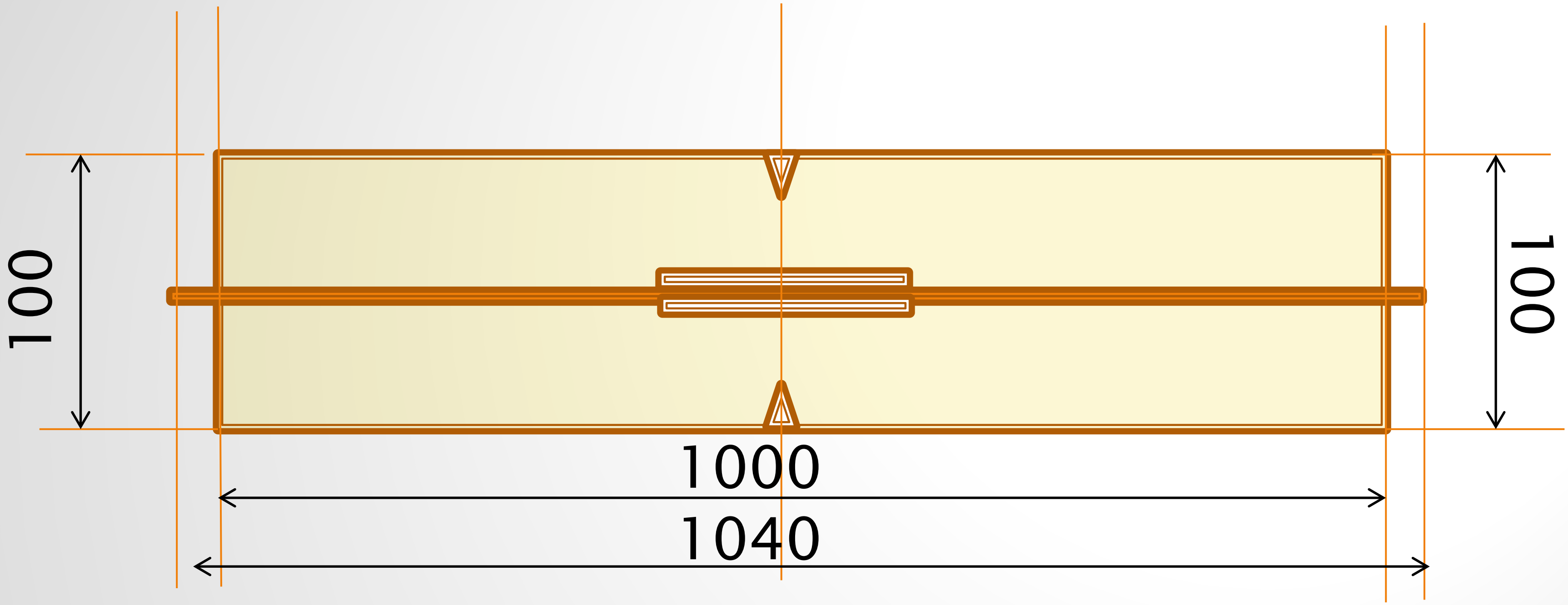
By Oriental Shiraishi Hara and Shoji

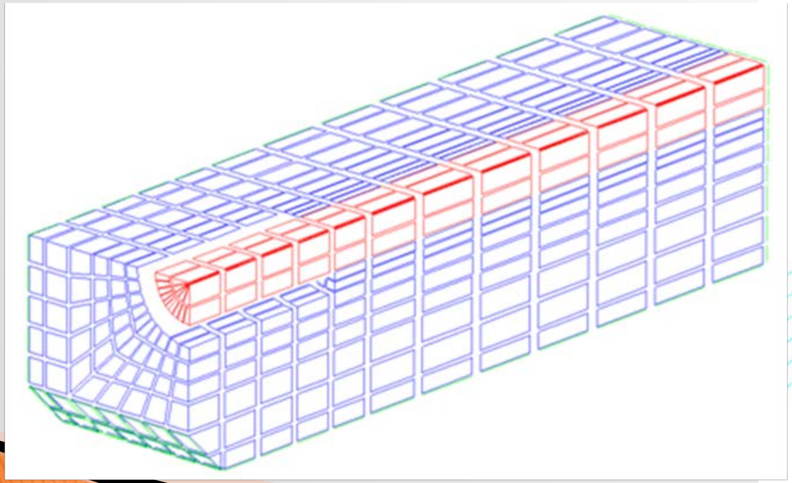


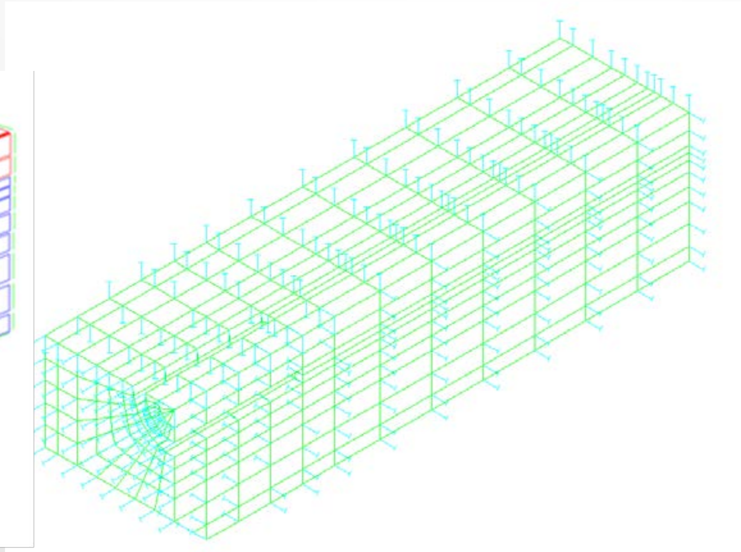
Concrete constituent properties

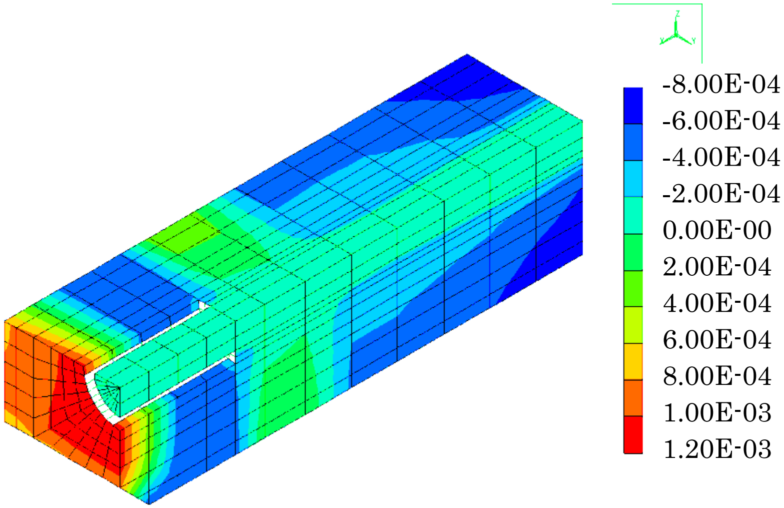
Thermal Properties		Mechanical Properties									
Cement Kind	Unit Cement Content (kg/m3)	Drying Shrinkage Parameter			Autogenous Shrinkage (JCI Standard ,experimental)						
		JCI α	CEB β	Unit Water Content (kg/m3)	γ	W/C	始発	c	d	a	b
Normal Portland Cement	337	11	5	165	1	0.49	0.3	3070	7.2	0.13	0.85
	446	11	5	165	1	0.37	0.3	3070	7.2	0.3	0.63
High Early Portland Cement	337	15	5	165	1.2	0.49	0.2	3070	7.2	0.13	0.85
	446	15	5	165	1.2	0.37	0.2	3070	7.2	0.3	0.63

Oriental Shiraishi Co. Hara and Shoji



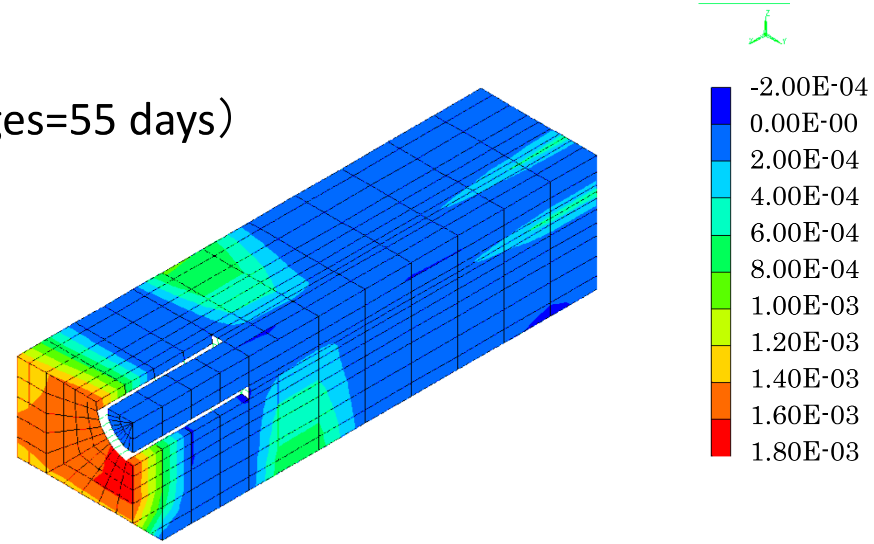






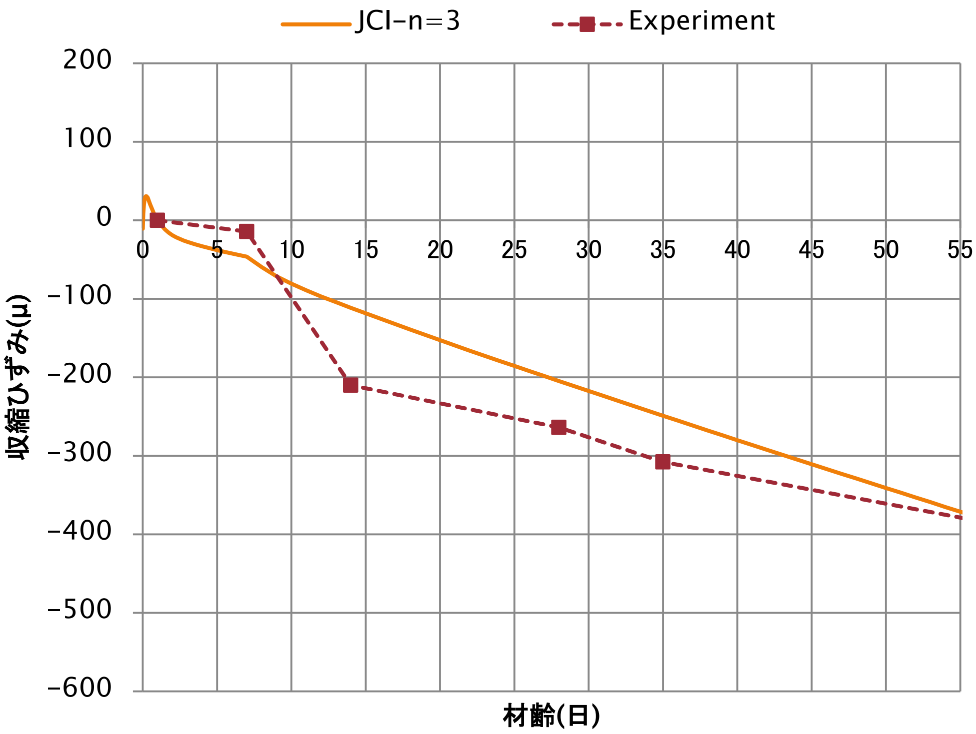
Crack equivalent strain distrb.（Ages=55 days）
earlier drying curing

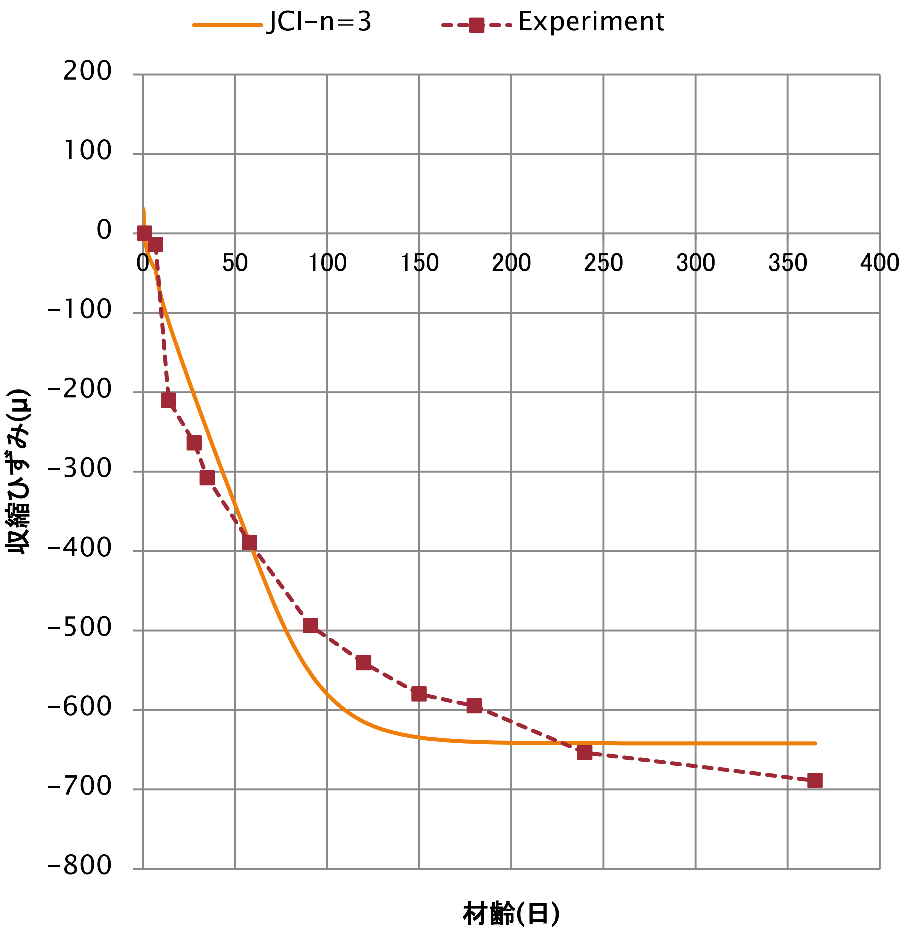
Crack equivalent strain distribution to X dir.（Ages=55 days）
7 days in water



Oriental Shiraishi Co. Hara and Shoji

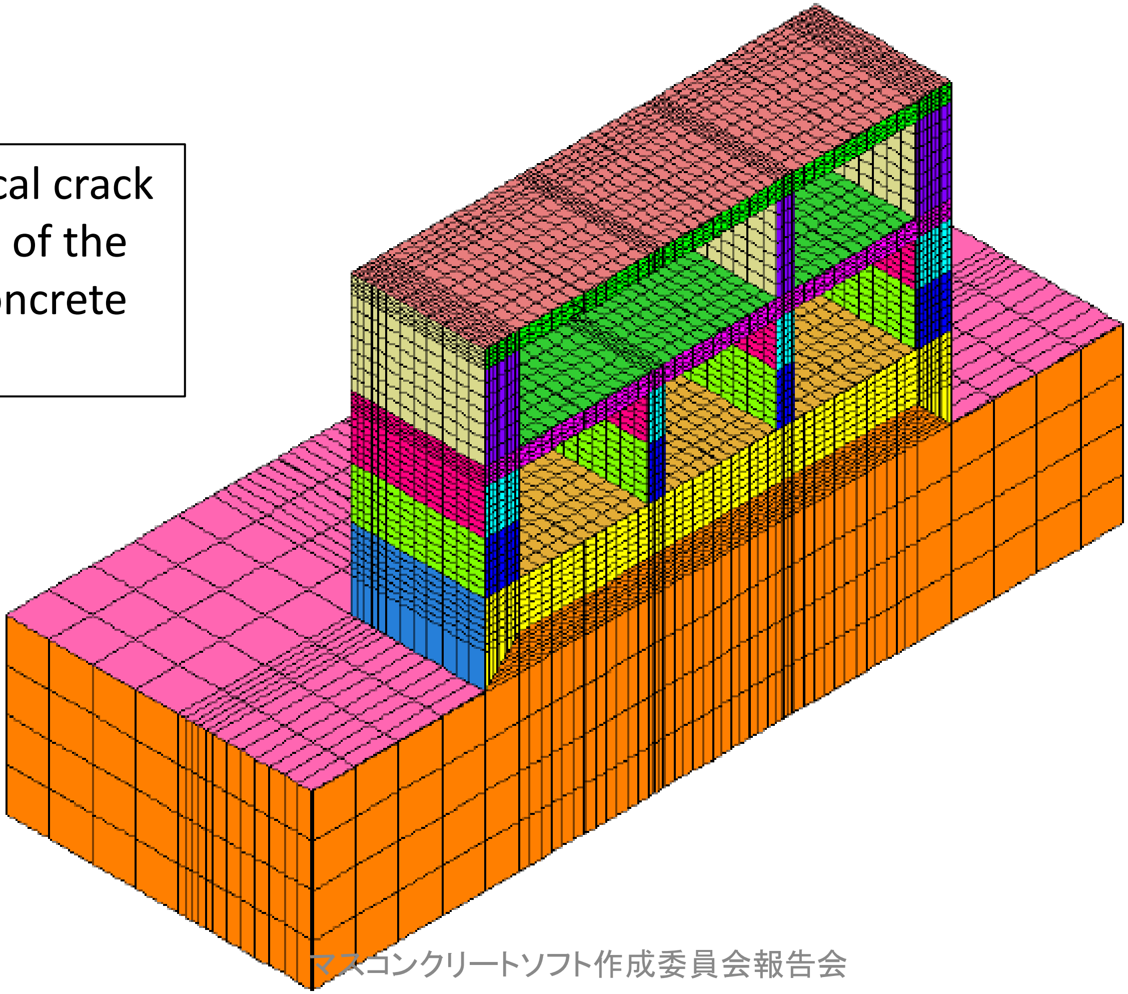
Oriental Shiraishi Co. Hara and Shoji





Smeared cracking modelから、離散的なひび割れ幅を計算する方法

1.5mm vertical crack at both sides of the thick base concrete slab



Crack equivalent strain definition

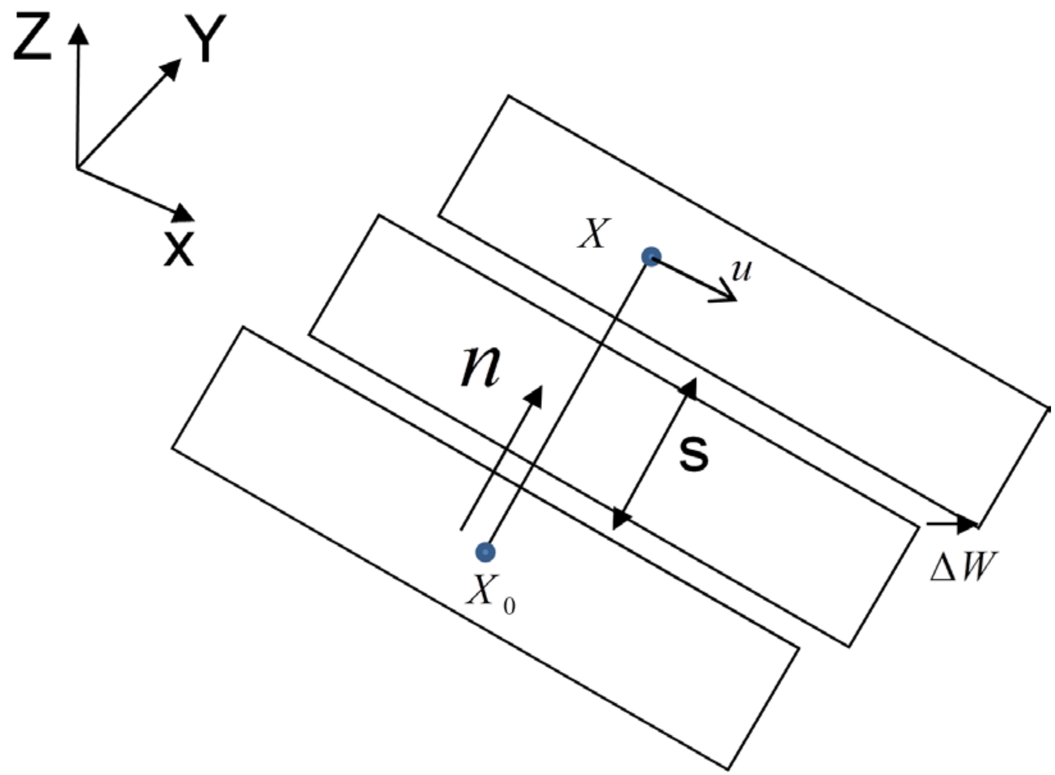


Figure 2 Crack width and spacing

$$\mathbf{u} = \left[\frac{(\mathbf{X} - \mathbf{X}_0)}{\mathbf{s}} \cdot \mathbf{n}\right] \Delta\mathbf{w} = [(\mathbf{X} - \mathbf{X}_0) \cdot \mathbf{n}] \cdot \frac{\Delta\mathbf{w}}{\mathbf{s}} = [(\mathbf{X} - \mathbf{X}_0) \cdot \mathbf{n}] \cdot \ \Delta\mathbf{w}^{\mathbf{m}}{}_{\mathrm{crack}}$$

$$\Delta\mathbf{w}^{\mathbf{m}}{}_{\mathrm{crack}} = \begin{Bmatrix} \Delta\mathbf{w}_{\mathbf{x}}/\mathbf{s} \\ \Delta\mathbf{w}_{\mathbf{y}}/\mathbf{s} \\ \Delta\mathbf{w}_{\mathbf{z}}/\mathbf{s} \end{Bmatrix}$$

$$\mathbf{u} = [\mathbf{n} \otimes \Delta\mathbf{w}^{\mathbf{m}}{}_{\mathrm{crack}}](\mathbf{X} - \mathbf{X}_0)$$

上の式の対称部分は歪、交代部分は剛体変位を表しているから、

$$\varepsilon_{\mathrm{crack}} = \frac{1}{2}\left(\mathbf{n} \otimes \Delta\mathbf{w}^{\mathbf{m}}{}_{\mathrm{crack}} + \ \Delta\mathbf{w}^{\mathbf{m}}{}_{\mathrm{crack}} \otimes \mathbf{n}\right)$$

さて、問題は上のひび割れ相当ひずみから、如何にして離散的なひび割れ幅を算出するかであるが、それを以下のように導く。

In case of X axis coincide with axis ξ

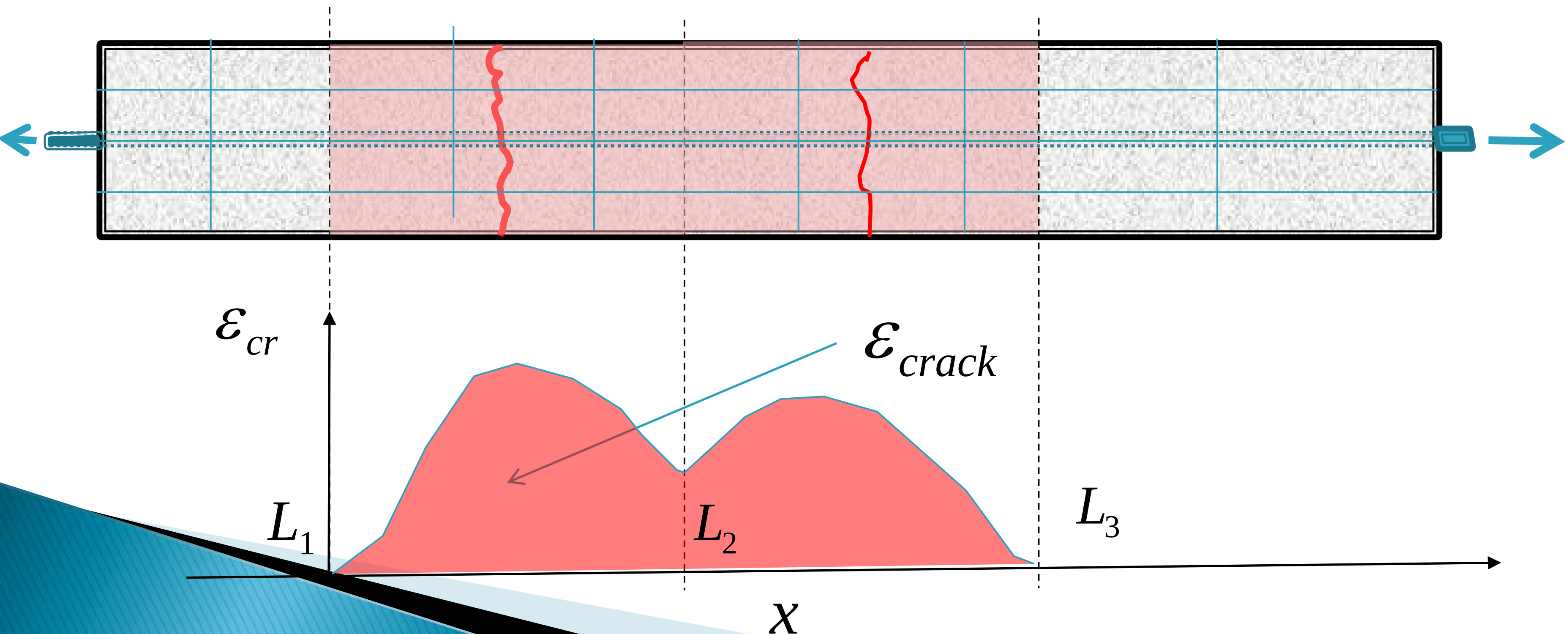
$$\varepsilon_{XX,crack} = \frac{\Delta W}{s} = \varepsilon_{\xi\xi}$$

$$dW = \varepsilon_{XX,crack} \cdot ds$$

$$w_1 = \int_{L1}^{L2} \varepsilon_{crack} ds$$

Estimation of Crack Widths from Smeared Crack Equivalent Strain Distributions

$$w_1 = \int_{L1}^{L2} \varepsilon_{crack} dx \qquad w_2 = \int_{L2}^{L3} \varepsilon_{crack} dx$$

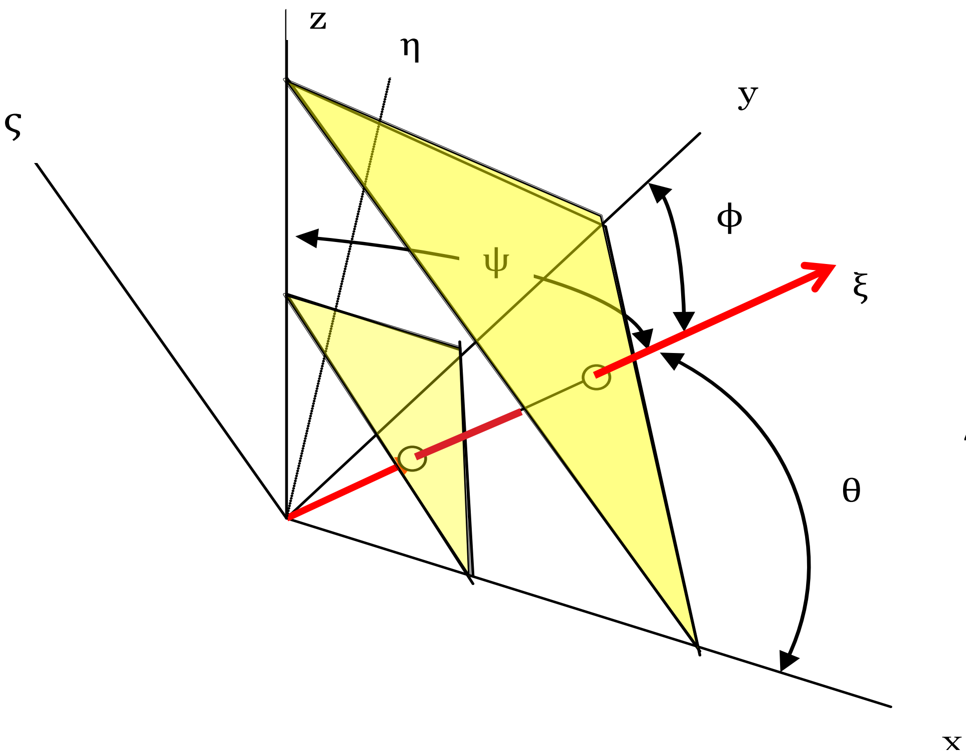


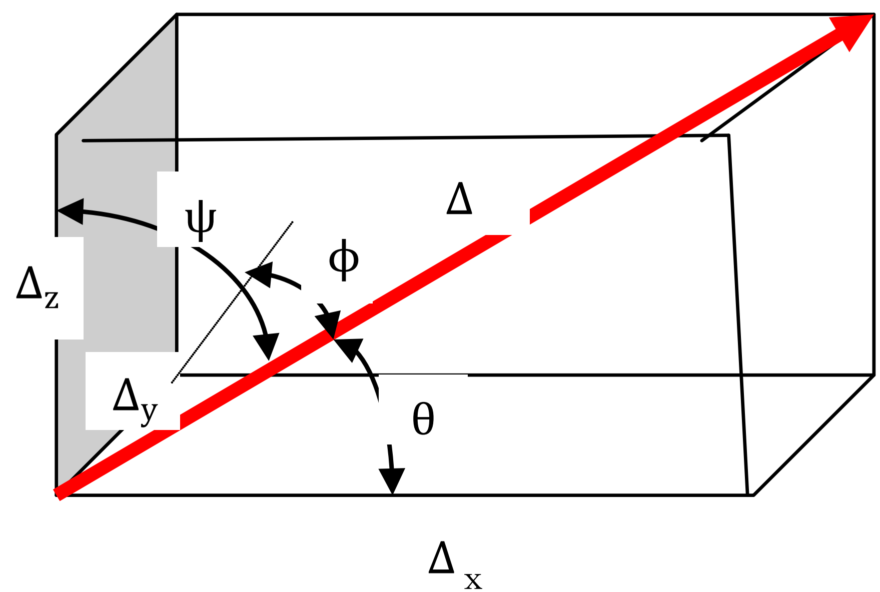
3次元空間に拡張すれば、各方向に直なひび割れ相当ひずみならびにせん断スリップ歪から、それらから、ひび割れ幅、ひび割れ面におけるせん断すべり量が計算できる。

初期ひび割れのひび割れ幅は、せん断スリップは生じないとして、対格成分のみをとりだすと、

$$\varepsilon_{xx,crack} = \mathbf{n_x n_x}\,\Delta W/s = \cos^2\theta \cdot \varepsilon_{\xi\xi},$$
$$\varepsilon_{yy,crack} = \mathbf{n_y n_y}\,\Delta W/s = \cos^2\varphi \cdot \varepsilon_{\xi\xi},$$
$$\varepsilon_{zz,crack} = \mathbf{n_z n_z}\,\Delta W/s = \cos^2\psi \cdot \varepsilon_{\xi\xi}$$

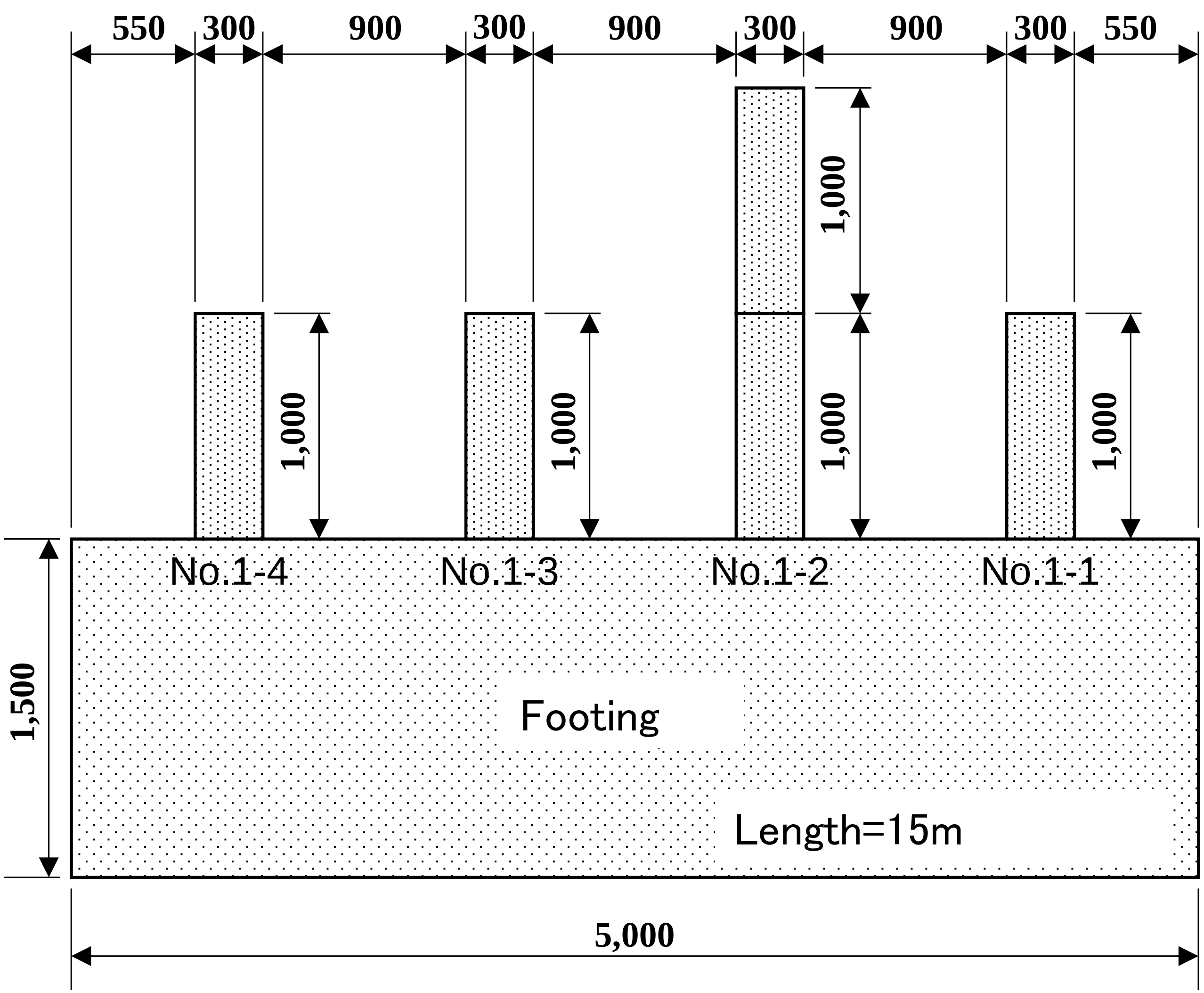
Three dimensional extension





$$\Delta w = \sqrt{\Delta w_x{}^2 + \Delta w_y{}^2 + \Delta w_z{}^2}$$

Real size experiment conducted by MHC



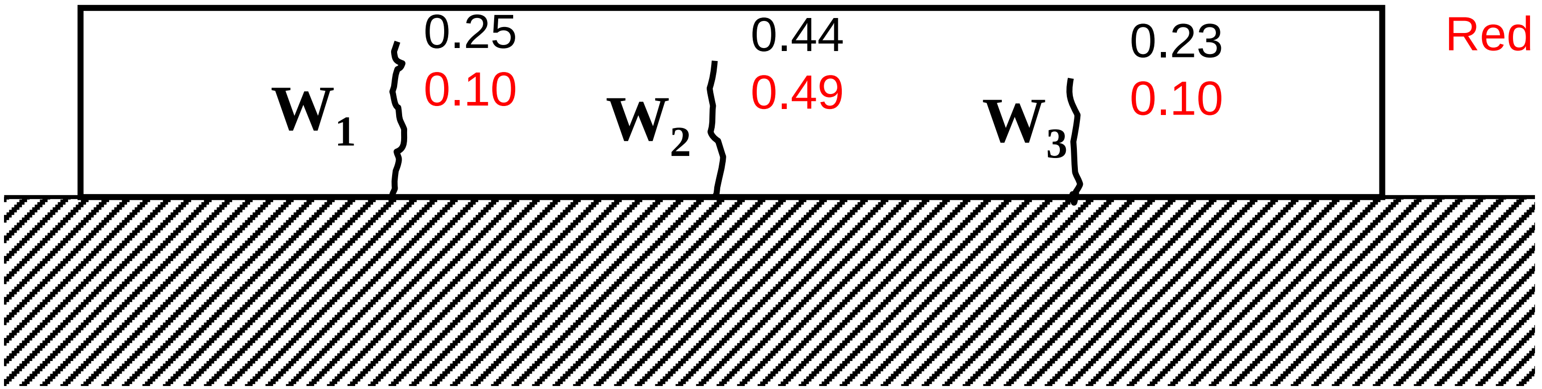
Unit by mm

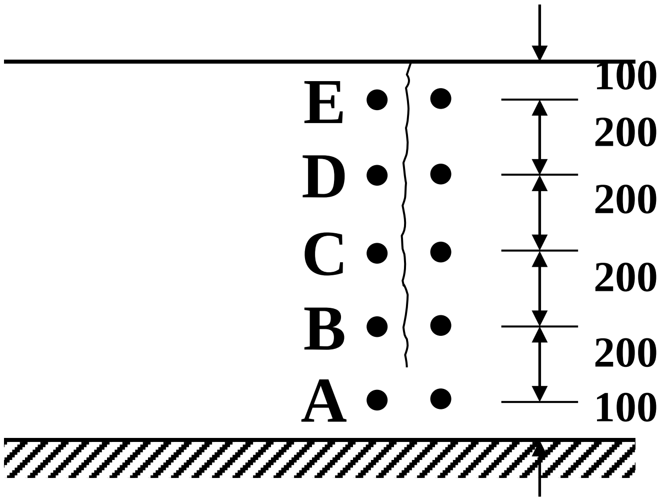
Mechanical properties of concrete

	footing	No.1-1	No.1-2	No.1-3	No.1-4
28days strength $f_c(28)$ (N/mm^2)	—	26.1	24.8	21.9	32.2
Development of strength $f_c(t)$ (N/mm^2)	—	$f_c(t)=t/(4.5+0.95t) \times f_c(28) \times 1.11$			
Young's modulus(N/mm^2)	25000	$Ec(t)=4700 \cdot (fc(t))^{0.5}$			
Creep	—	Effective Young's modulus method			
Tensile strength $f_t(t)$ (N/mm^2)	—	$f_t(t) = 0.3 \cdot (fc(t))^{0.5}$			
Poison' coefficient	0.2	0.2			
Thermal expansion coefficient $\alpha(\times 10^{-6} 1/K)$	6.90	6.63	6.63	6.51	7.73
Reinforcement ratio(%)	—	0.25	0.25	0.25	0.25
Slit	—	yes	yes	no	no

No.1-1 Crack locations and crack widths

Black: exp.
Red : cal.

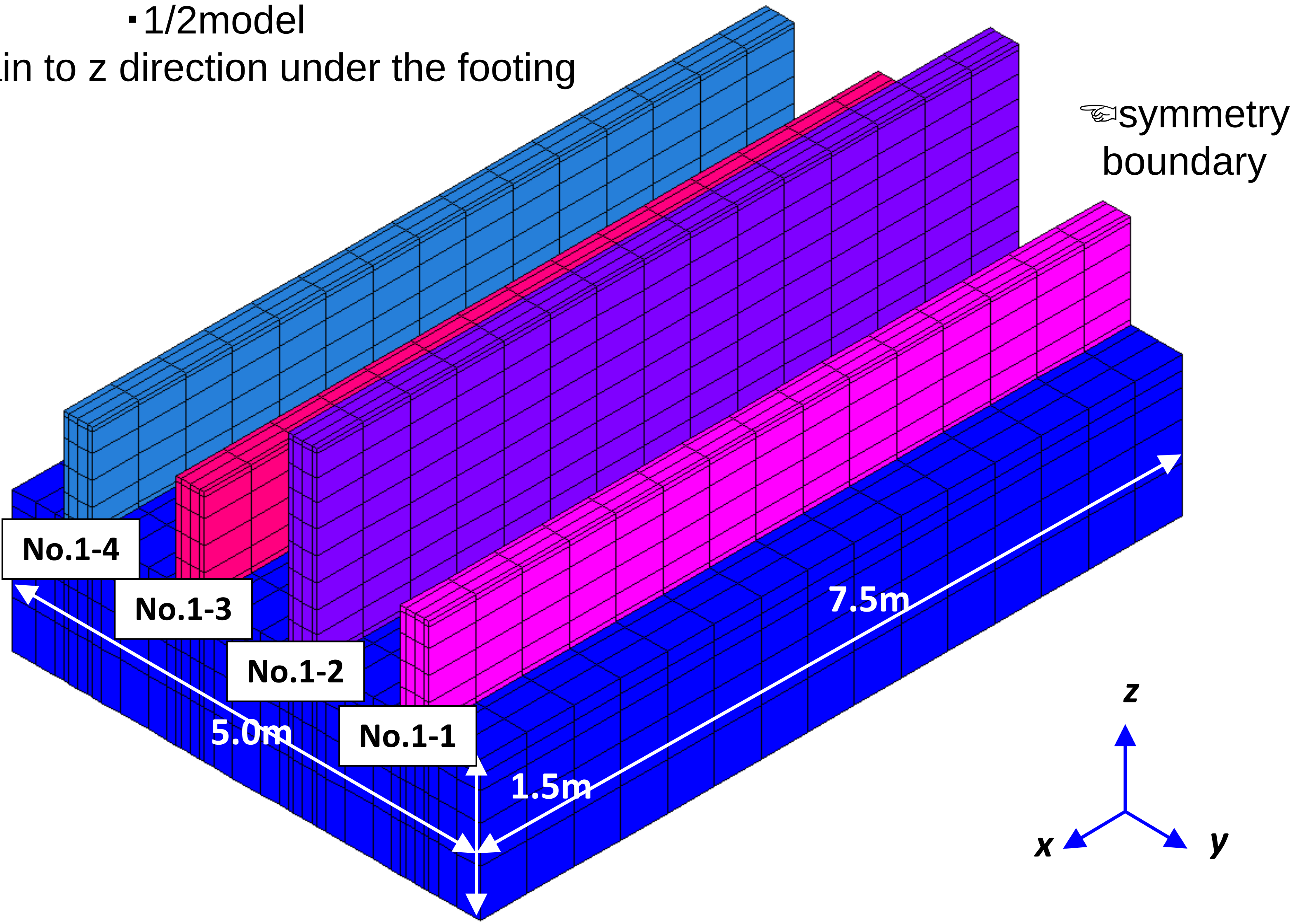




Location where crack width is measured

Mesh discretization

▪1/2model
▪constrain to z direction under the footing

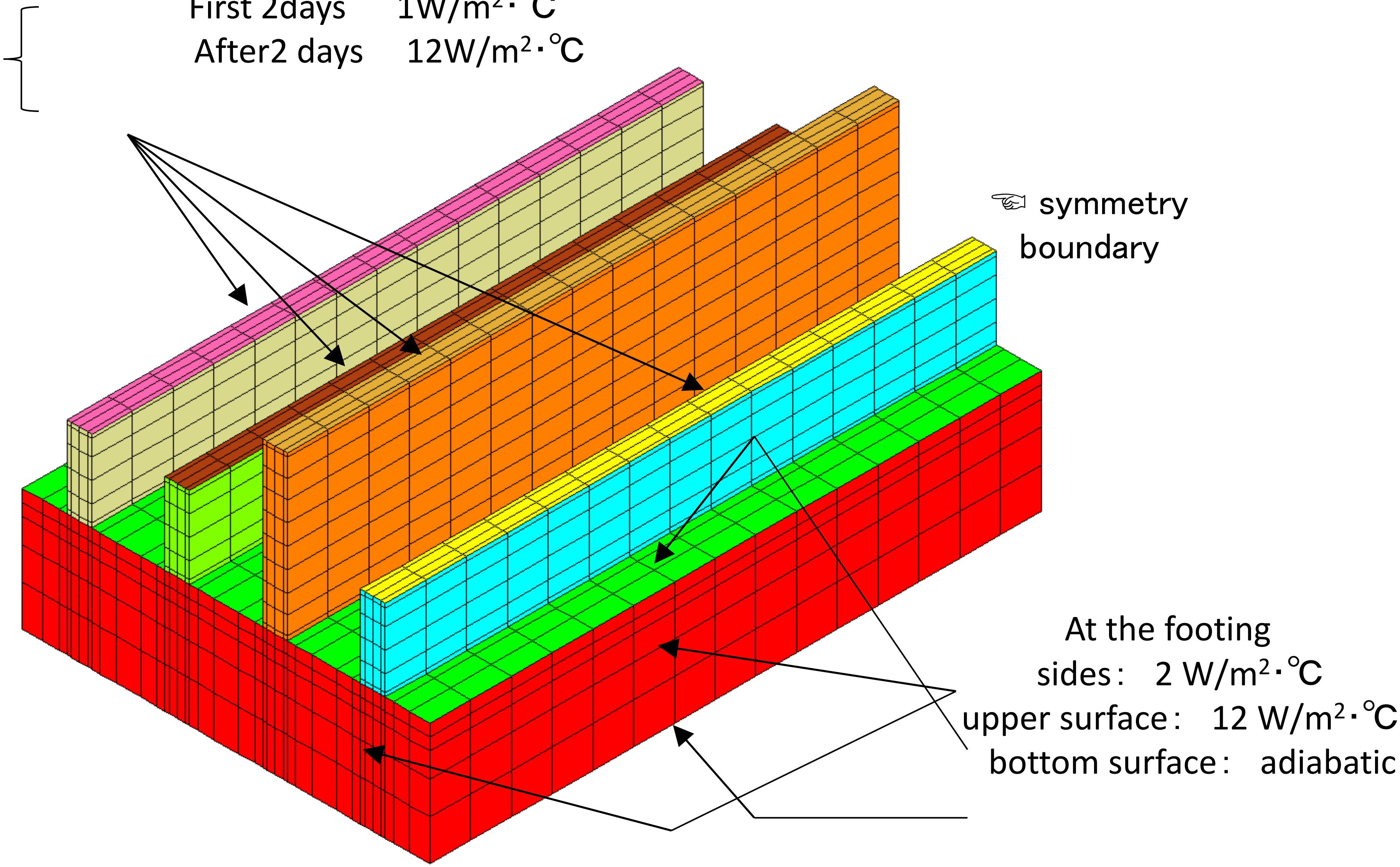


Thermal boundary

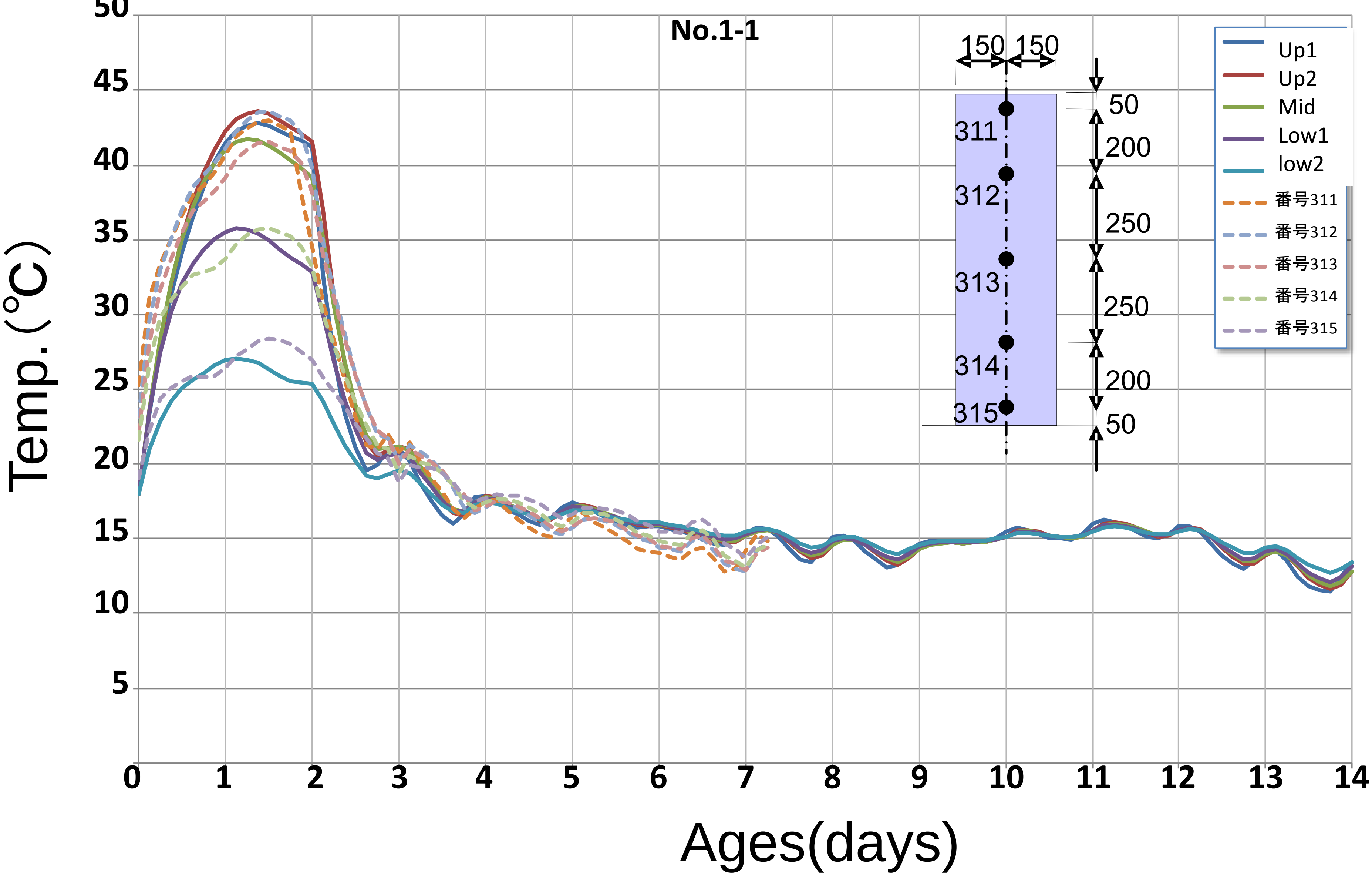
Convection coefficient at the sides and at the top

First 2days $1 W/m^2 \cdot ℃$

After2 days $12 W/m^2 \cdot ℃$



No.1-1 Calculated temp.(real line) versus Observed temp.(dotted line)

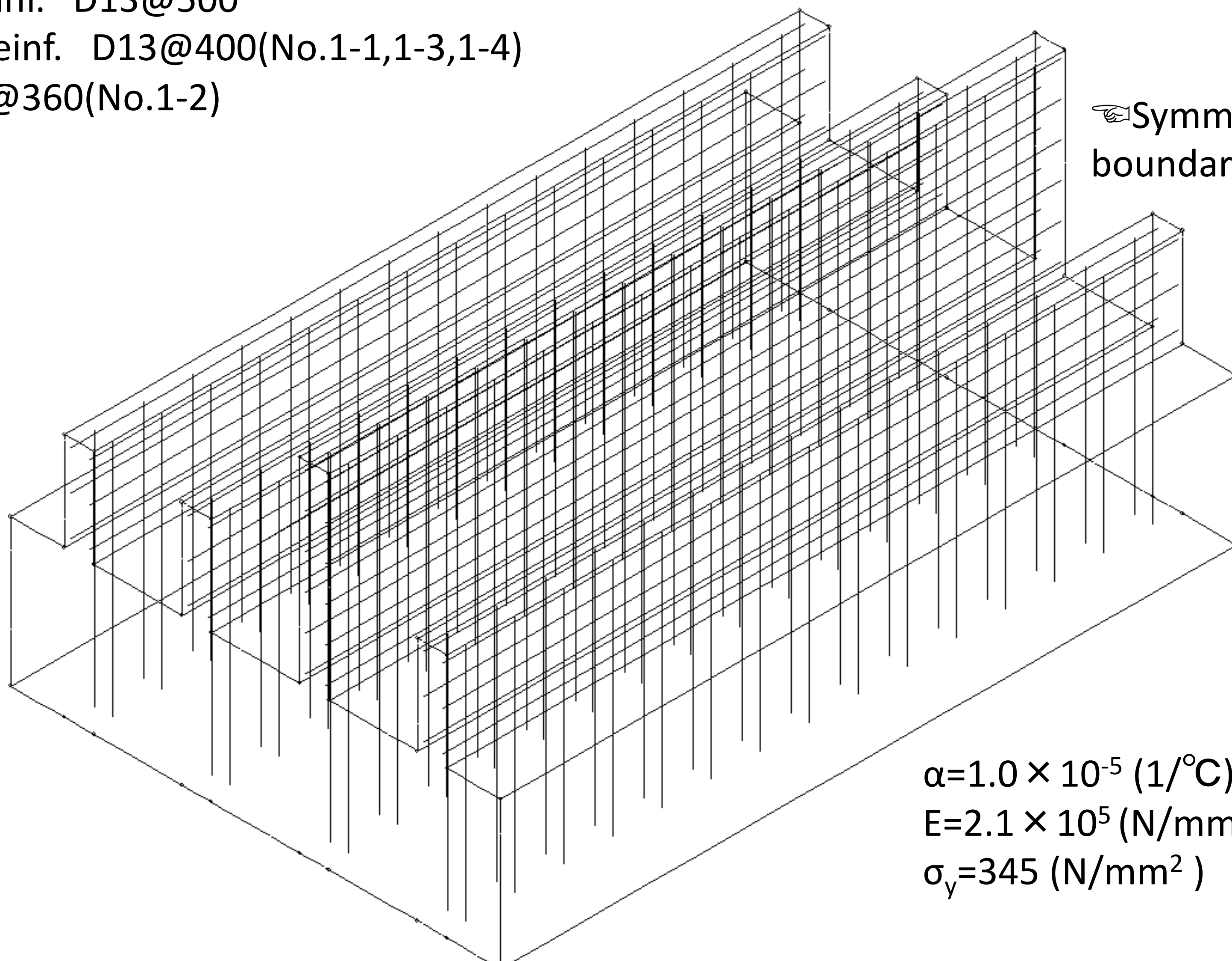


Thermal properties of concrete

	footing	No.1-1	No.1-2	No.1-3	No.1-4
Thermal conductivity (W/m・K)	2.7				
Specific heat (KJ/kg・K)	1.1				
Specific density (kg/m^3)	2350				
Casting temperature (℃)	15.0 Init. Temp	18.0	18.5	18.0	20.0
Adiabatic temperature rise Q_∞(K)	–	48.7	44.2	42.6	57.0
Temperature rise velocity γ	–	1.00	1.02	0.80	1.02
Unit cement content (kg/m^3)	–	300	300	250	380
Cement kind	–	(N)	(N)	(N)	(N)

Reinforcement layout

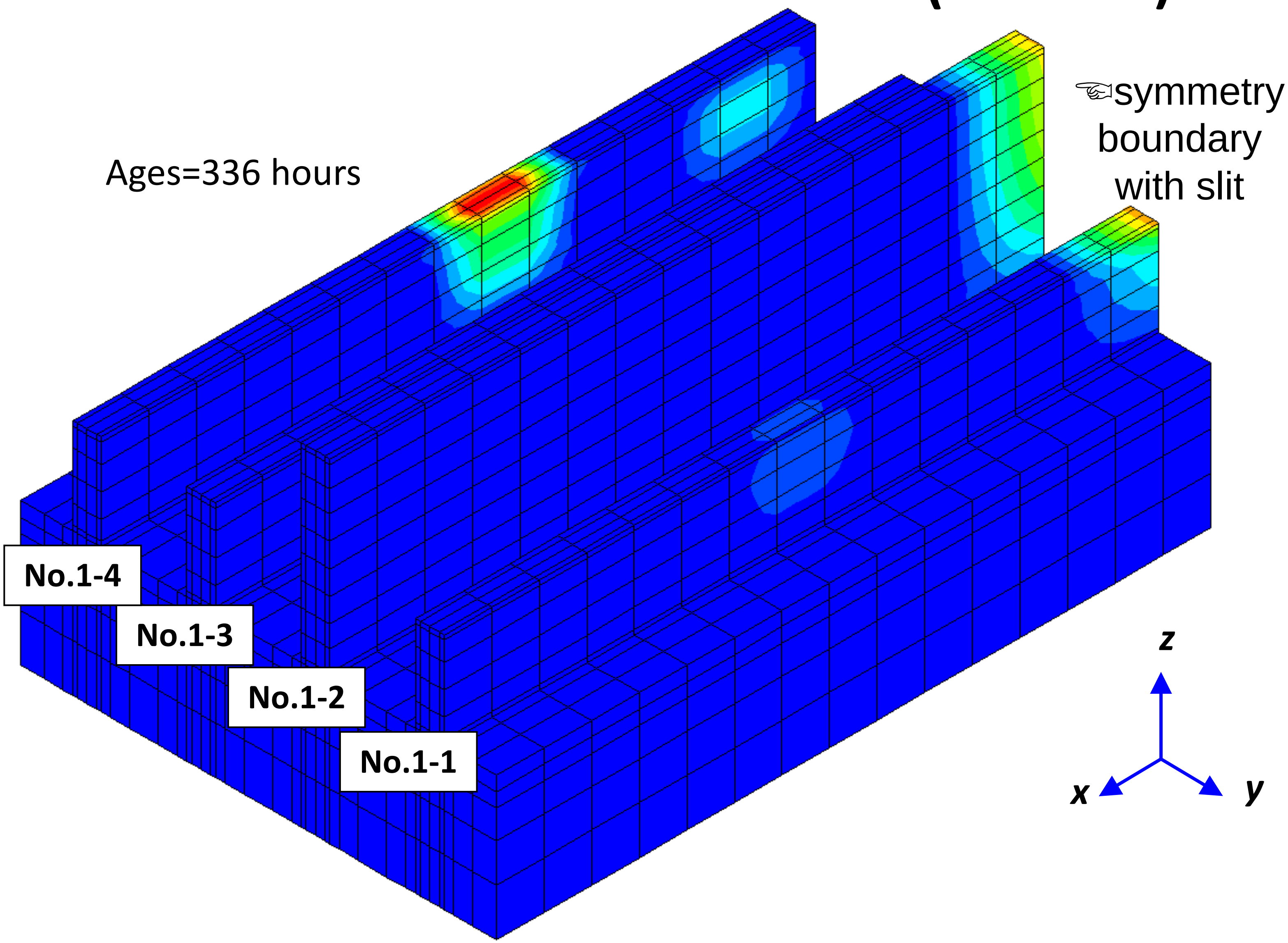
Vert. Reinf. D13@500
Horiz. Reinf. D13@400(No.1-1,1-3,1-4)
D13@360(No.1-2)



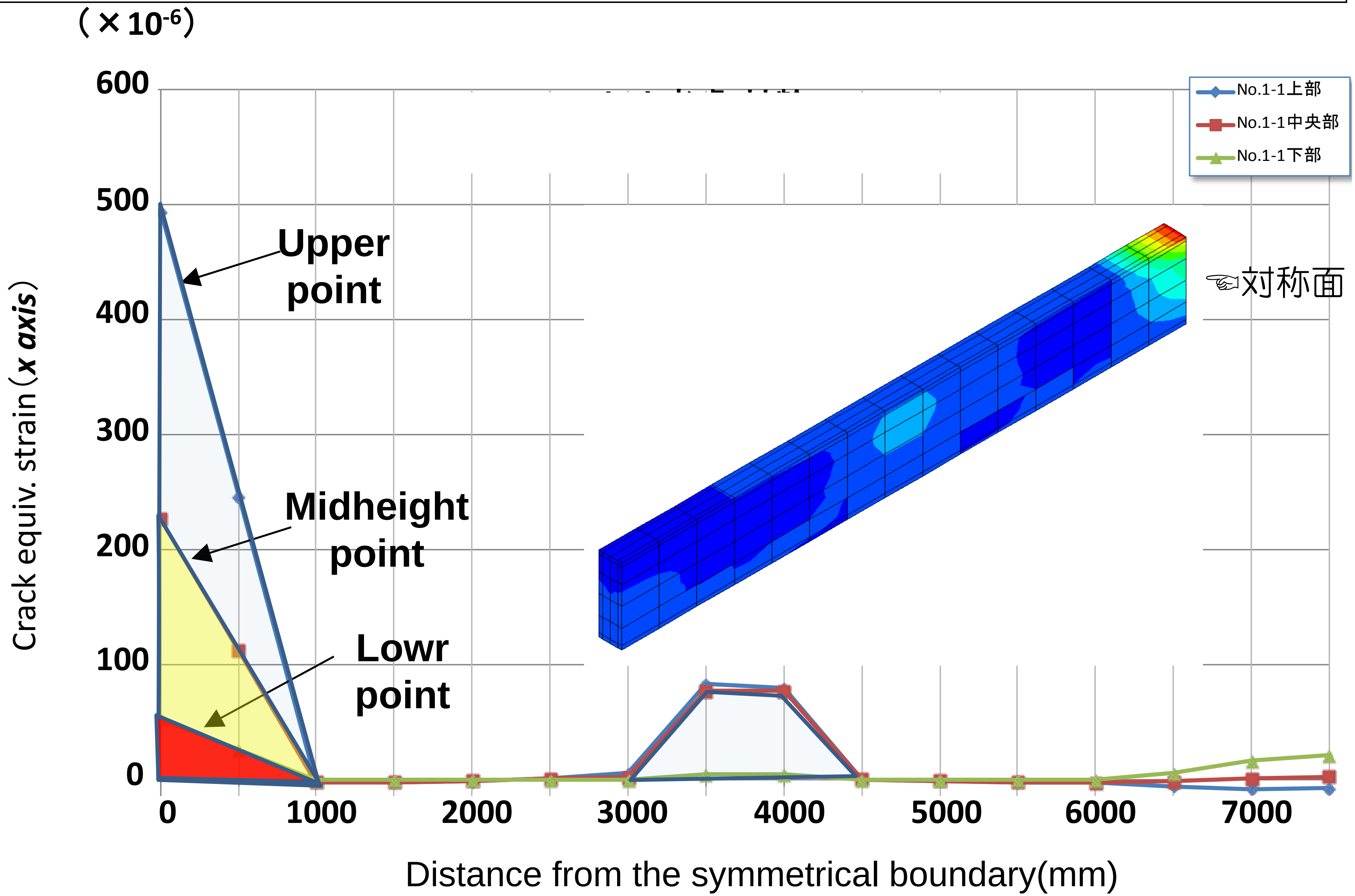
☜Symmetry boundary

$\alpha=1.0\times10^{-5}$ (1/°C)
$E=2.1\times10^{5}$ (N/mm^2)
$\sigma_y=345$ (N/mm^2)

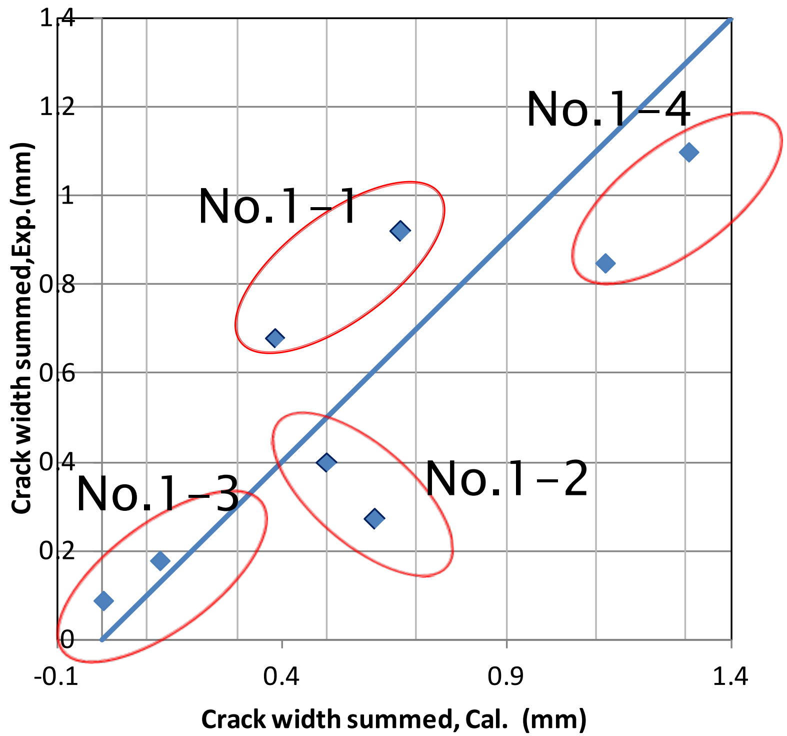
Calc. crack equiv. strain contour along the X direction (with Slit)

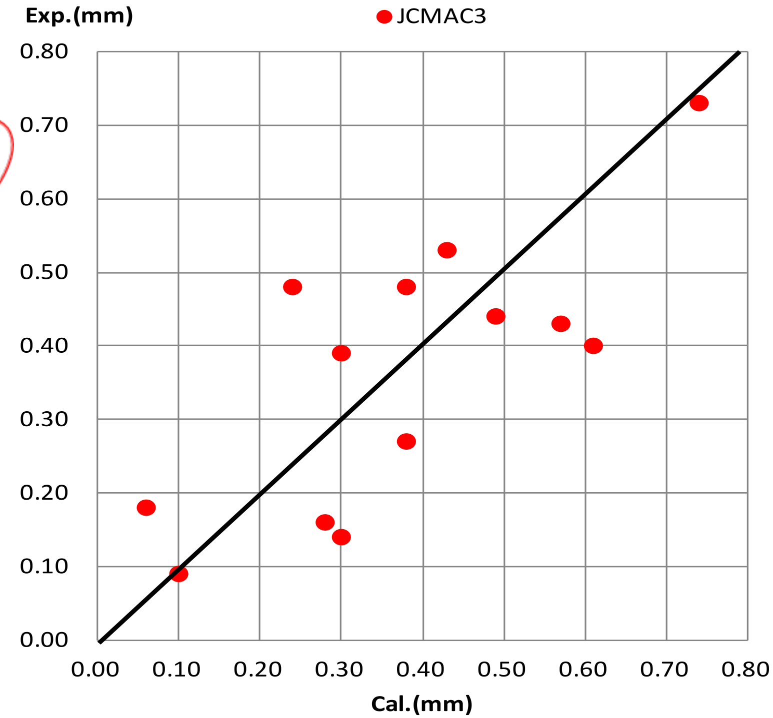


No.1-1　Crack equiv. strain along X axis dir. Slit exist)

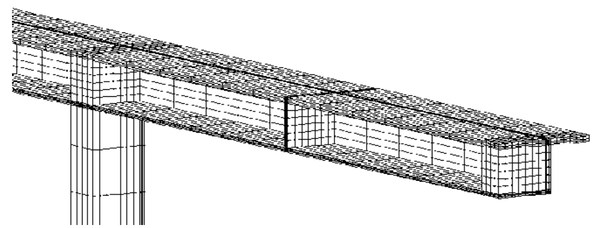


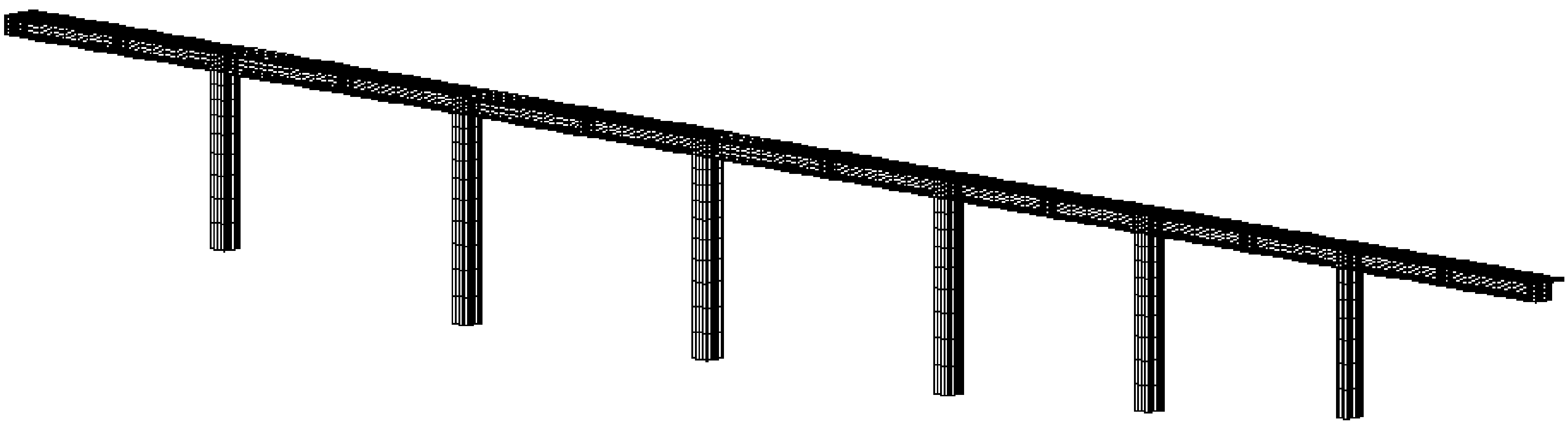
Comparison of the calculated crack widths and the observed crack widths





LECOMで解析した垂井高架橋の耐荷力解析

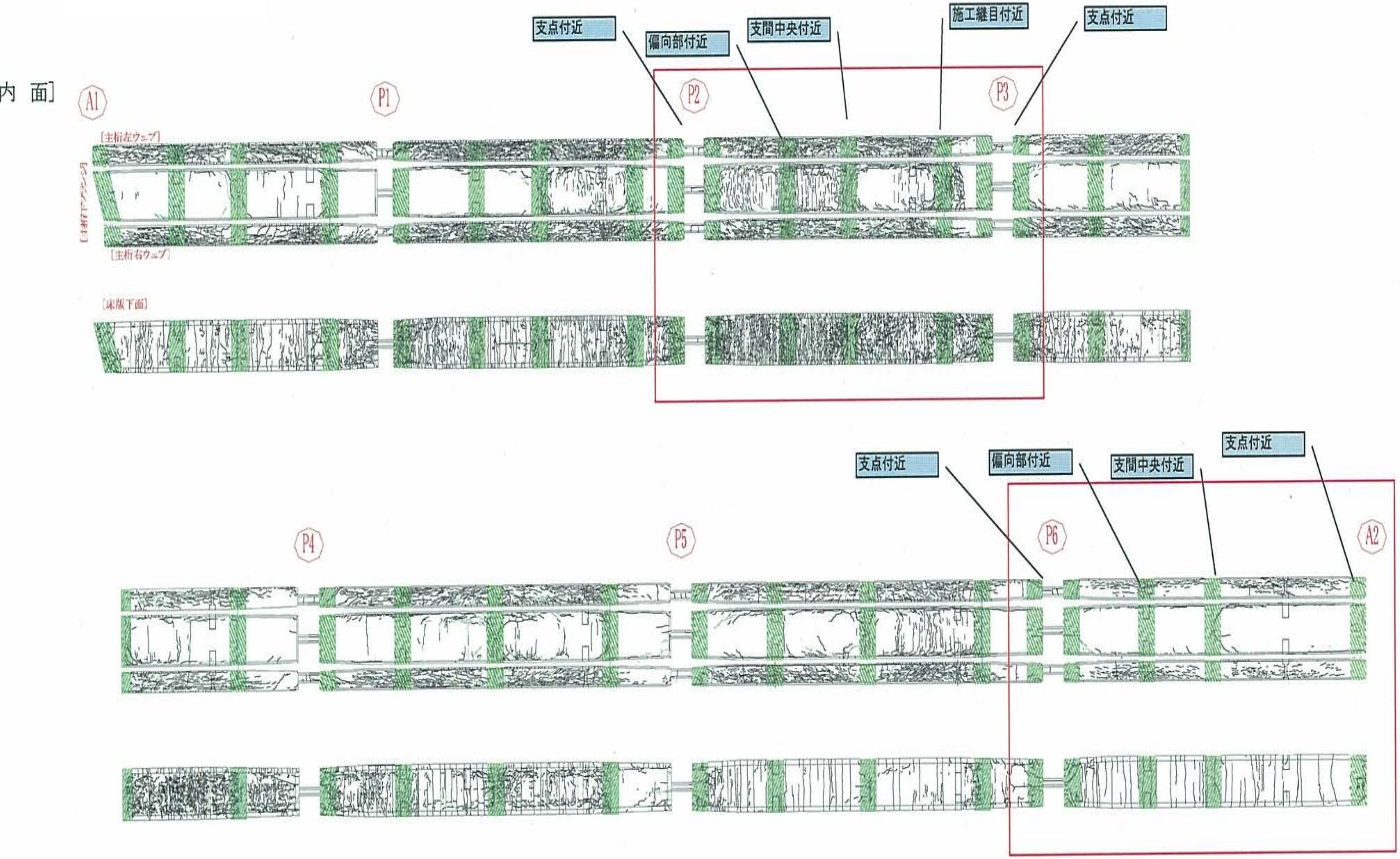




垂井高架橋 ひび割れ重点点検箇所図(案)

初期のひび割れ点検・定期点検においては、下図の赤囲み径間→P2－P3・P6－A2を全体の代表径間としてひび割れ幅・上床版下面の変状を点検する。

点検に際しては、下図緑色ハッチング部（2ｍ区間）においては、0.1mm以上のひび割れを記録し、ハッチング以外の部分においては、0.2mm以上のひび割れを記録する。



耐荷力解析の概要

□初期応力解析結果

・応力状態　・ひび割れ発生状況

を初期条件として，

□耐荷力解析

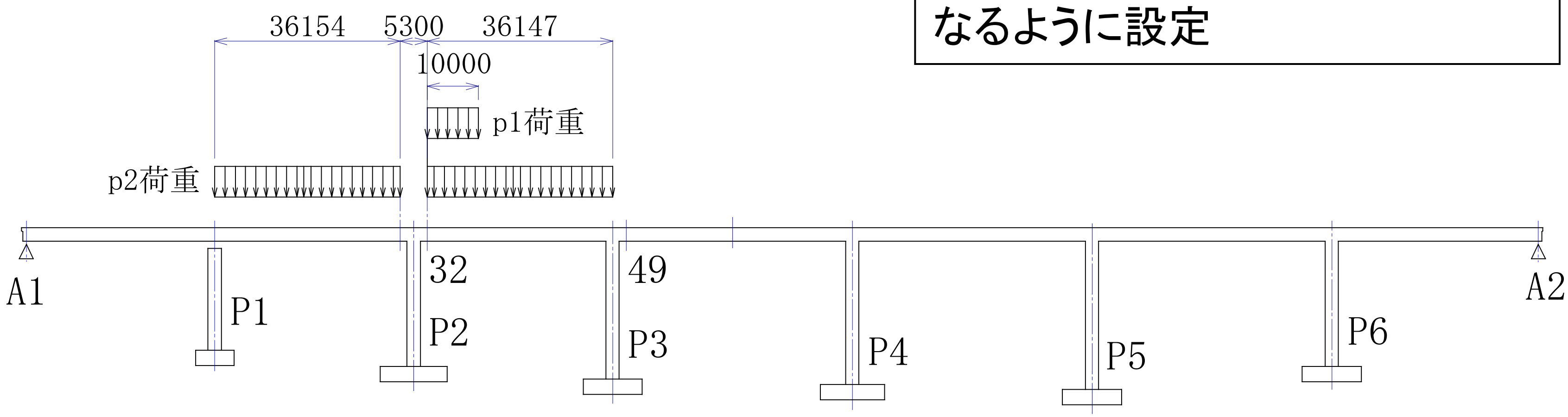
- ・初期応力解析で発生したひび割れ方向とは異なる方向のひび割れ発生を許容
- ・予測される耐荷力が安全側となるように，ひび割れ発生後のエネルギー吸収量を低減
- ・補修後の耐荷力解析では，ひび割れ注入をモデル化

載荷荷重

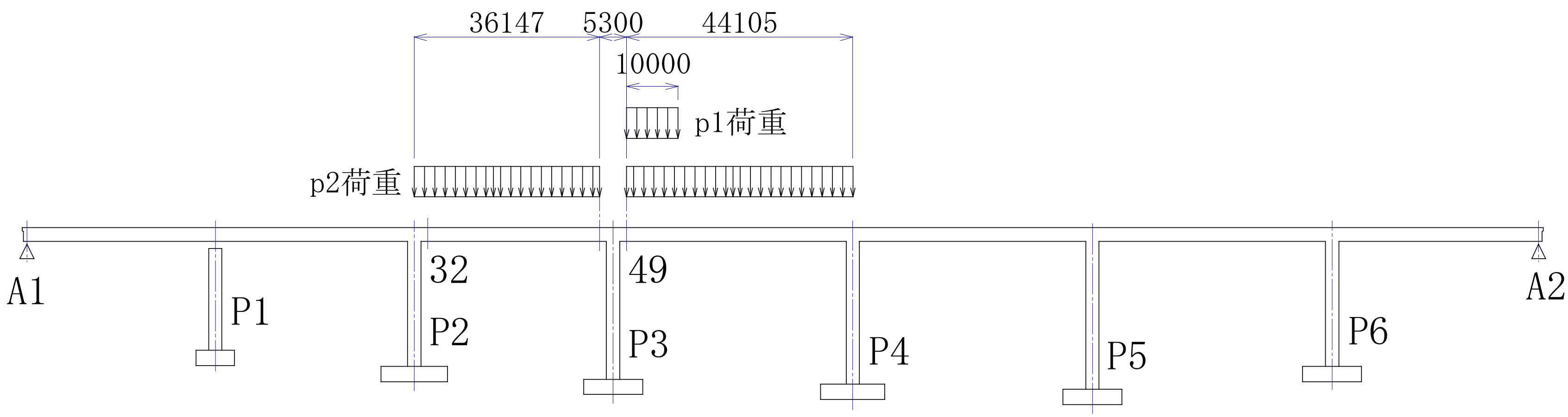
□せん断に対する検討

・P2ーP3間，32断面の照査

p1荷重は，影響線を使用することにより，照査断面が最も厳しくなるように設定



・P3ーP4間，49断面の照査

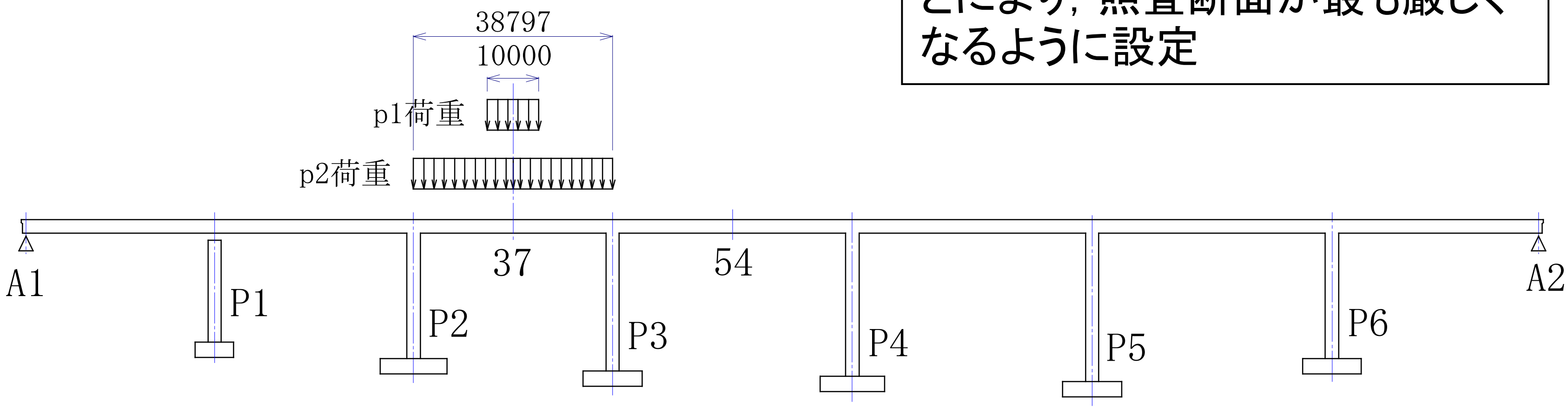


載荷荷重

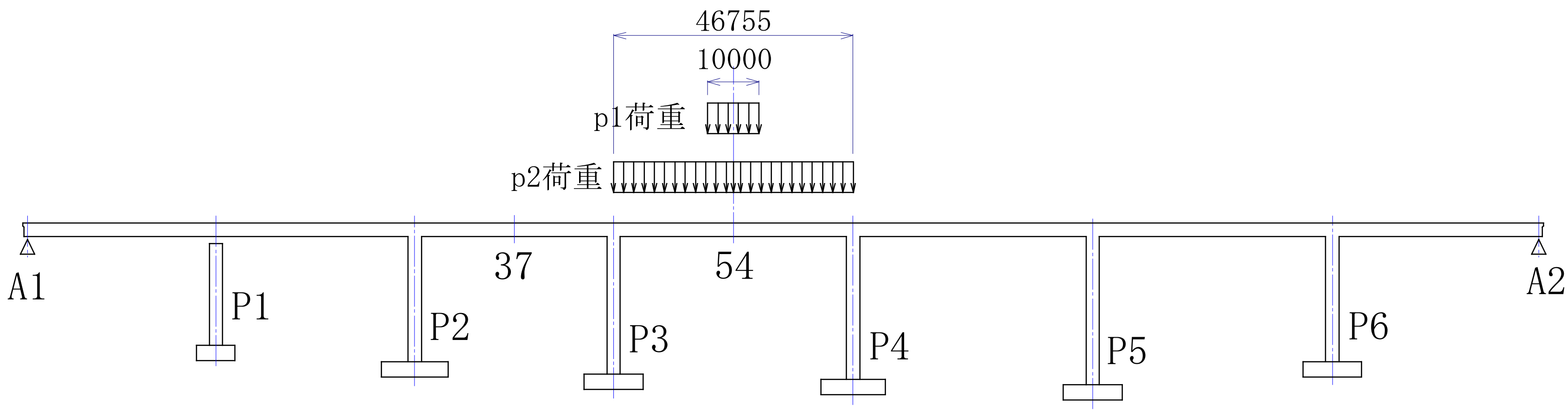
□曲げに対する検討

p1荷重は，影響線を使用することにより，照査断面が最も厳しくなるように設定

・P2ーP3間，37断面の照査

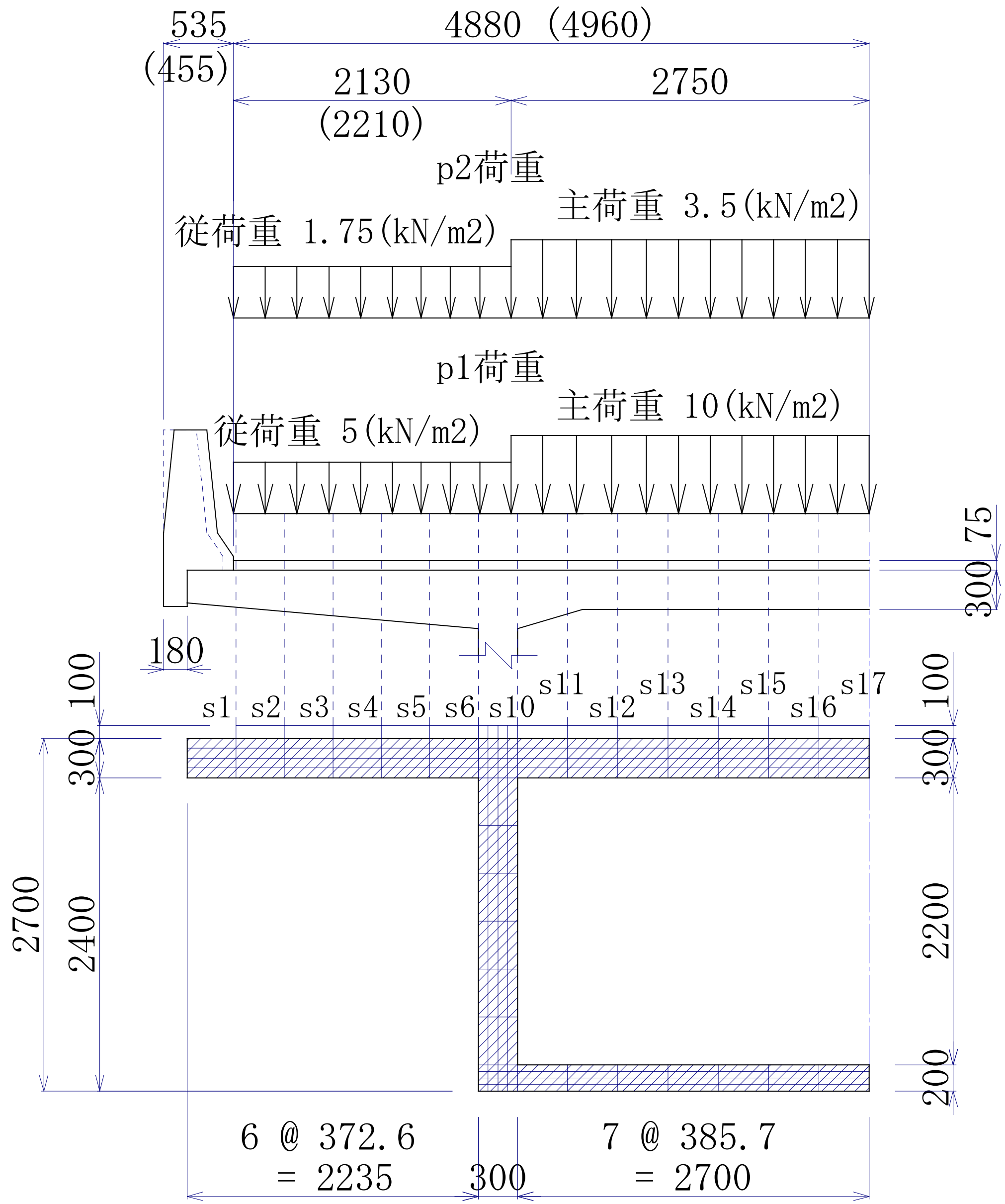


・P3ーP4間，54断面の照査



載荷荷重

・p2荷重


535
(455)
4880 (4960)
2130
(2210)
2750
p2荷重
主荷重 3.5(kN/m2)
従荷重 1.75(kN/m2)
p1荷重
主荷重 10(kN/m2)
従荷重 5(kN/m2)
75
300
180
s1 s2 s3 s4 s5 s6 s10 s11 s12 s13 s14 s15 s16 s17
100
300
2700
2400
2200
200
6 @ 372.6
= 2235
300
7 @ 385.7
= 2700

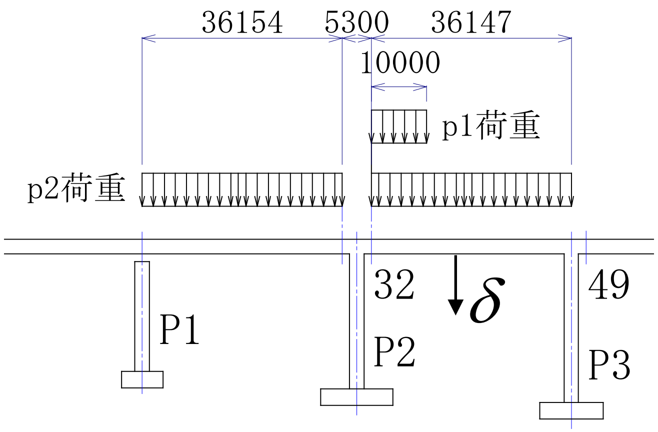
解析結果

□せん断に対する検討

P2－P3間，32断面の照査

荷重：(p1＋p2)で正規化

変位：下図参照

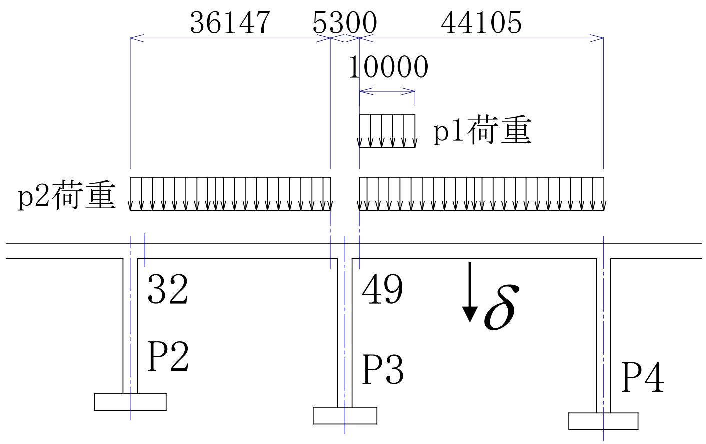


設計荷重：1660kN

P3－P4間，49断面の照査

荷重：(p1＋p2)で正規化

変位：下図参照



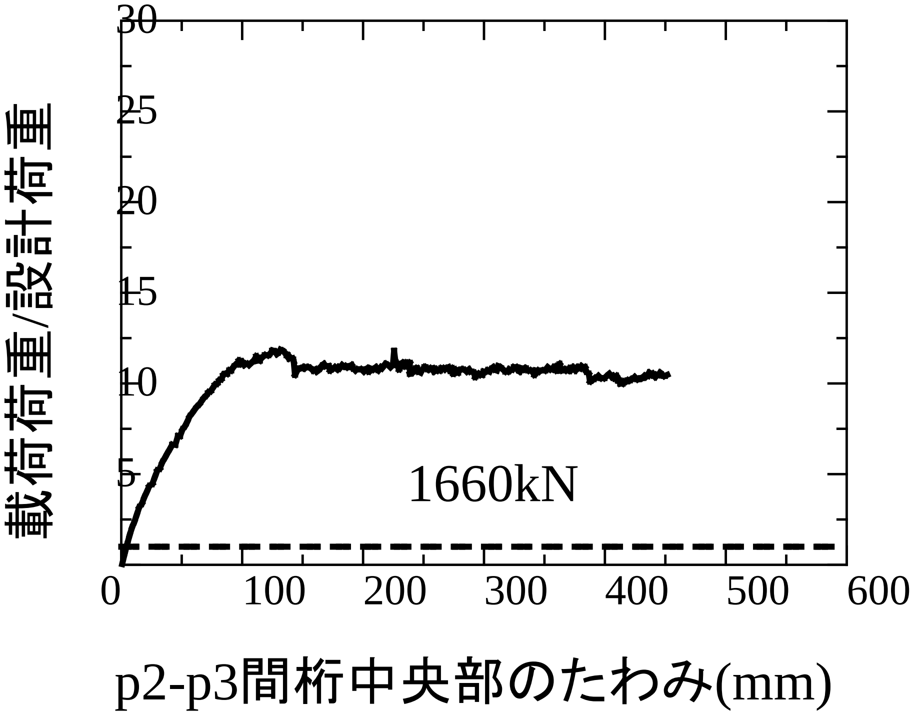
設計荷重：1760kN

解析結果

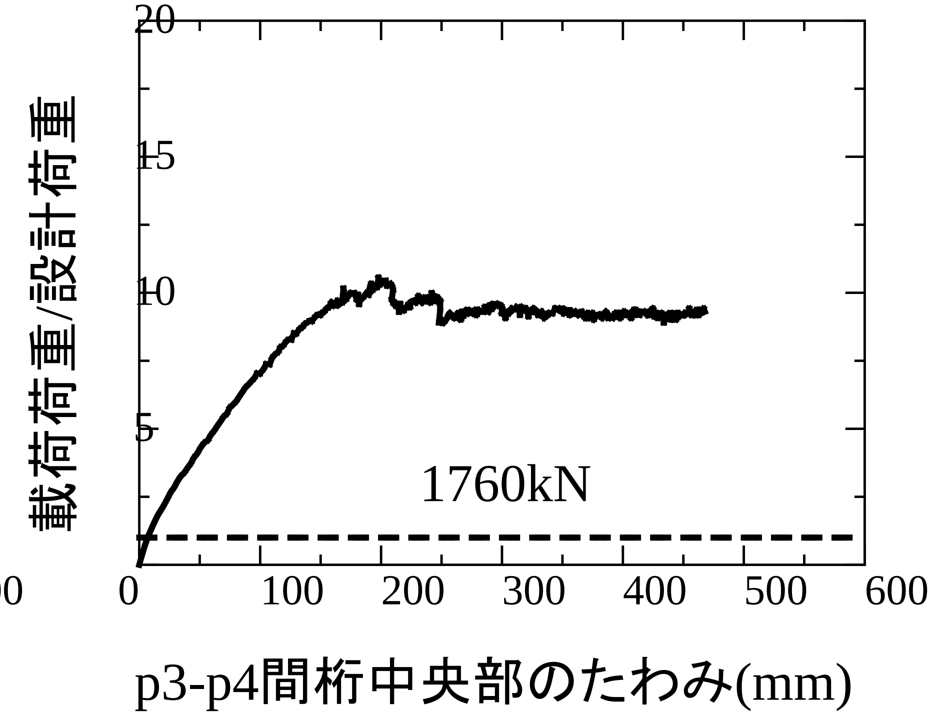
□せん断に対する検討

現状状態

P2－P3間，32断面の照査



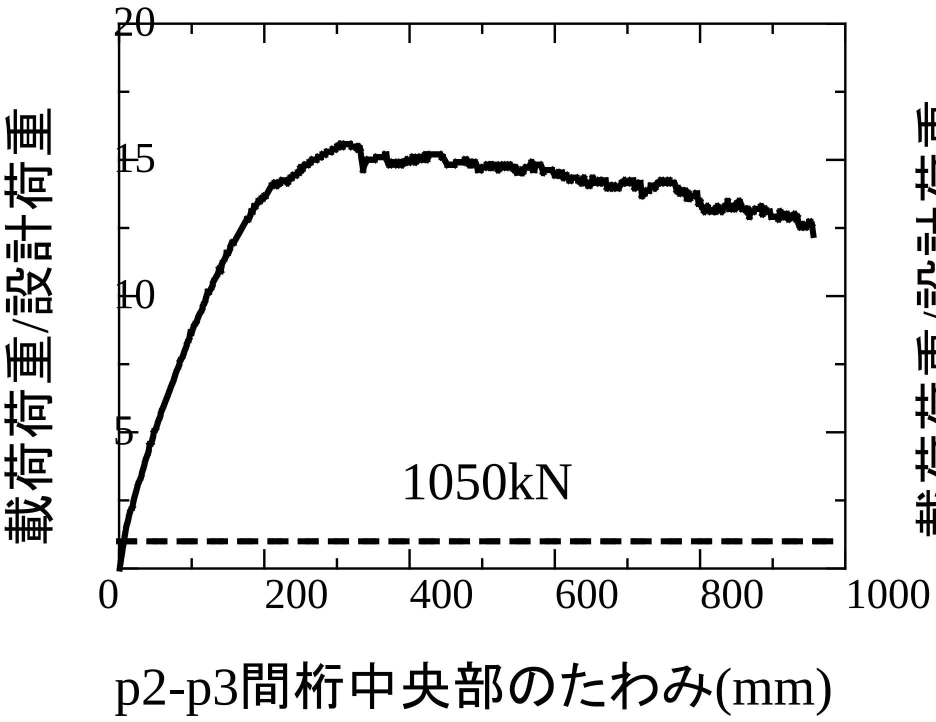
P3－P4間，49断面の照査



□曲げに対する検討

現状状態

P2－P3間，37断面の照査



P3－P4間，54断面の照査