



6. 劣化要因と診断②

Deterioration factor and assessment (2)

維持管理システム工学研究室

松本 浩嗣

A5-09室, 内線6219

km312@eng.hokudai.ac.jp



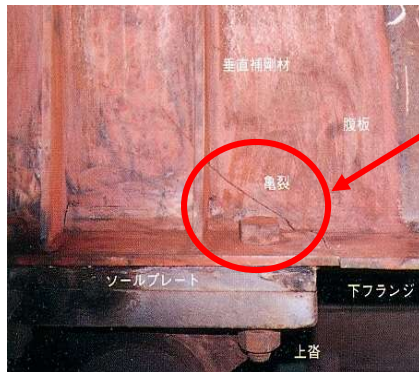
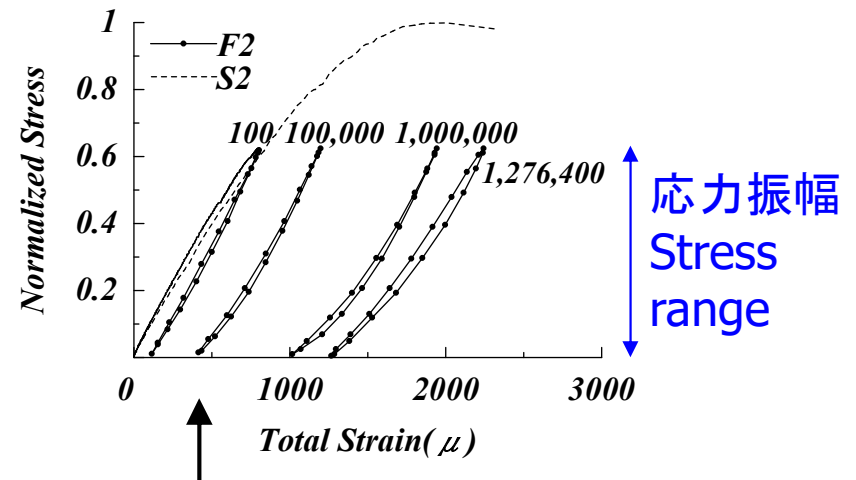
劣化現象と要因 — 疲労 —

Deterioration and factors – Fatigue –

疲労現象とは What is fatigue?

材料の静的強度（いわゆる材料強度）より小さい応力が繰返し作用することで、材料が破壊すること fracture of material under many cycles of stress less than its strength

- 鋼材の疲労引張破壊 fatigue fracture in tension of steel
- コンクリートの疲労圧縮破壊 fatigue fracture in compression of concrete
- コンクリートの疲労引張破壊 fatigue fracture in tension of concrete



疲労亀裂
fatigue crack

静的強度の60%の応力が、127.64万回作用した後に疲労破壊が生じた例 Example of fatigue fracture occurred after 1.2764 mil cycles of stress with 60% of static strength

劣化現象と要因 — 疲労 —

Deterioration and factors – Fatigue –

材料の疲労破壊の予測 prediction of fatigue fracture

- 鋼材の亀裂進展予測式(半実験式) prediction of crack propagation in steel (semi-experimental equation)

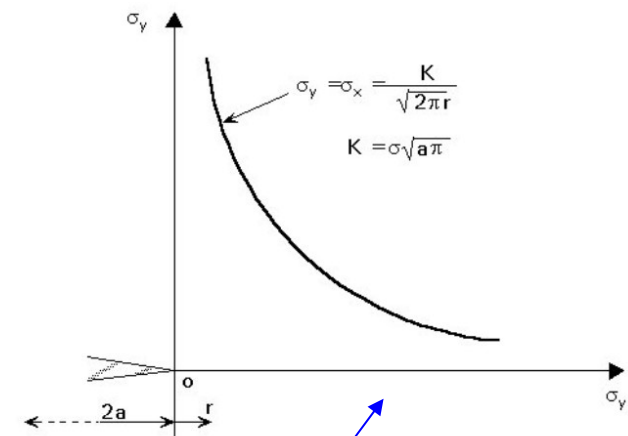
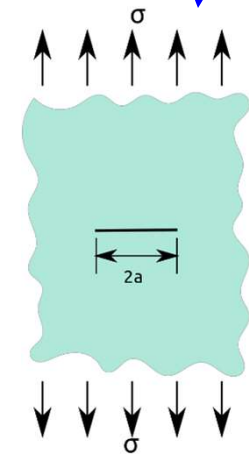
$$\frac{da}{dN} = C \cdot \Delta K^m \dots (1) \text{ 実験式(experimental eq)}$$

パリス則と呼ばれる so-called Paris's law

$$\Delta K = \Delta\sigma\sqrt{\pi a} \dots (2) \text{ 理論式(theoretical eq)}$$

ここに, a : 亀裂長さcrack length, N : 繰返し回数
number of cycles, C and m : 材料係数material
constants, ΔK : 応力拡大係数stress intensity factor,
 $\Delta\sigma$: 応力振幅stress range

興味があれば, パリス則をインターネットで調べてみよう.
If you are interested, you can check internet for the details
of Paris's law.



劣化現象と要因 — 疲労 —

Deterioration and factors – Fatigue –

材料の疲労破壊の予測 prediction of fatigue fracture

- パリス則を用いた寿命予測 **Life-prediction by Paris's law**

式(1)(2)より From eqs (1) and (2),

$$dN = \frac{1}{C(\Delta\sigma\sqrt{\pi a})^m} da = \frac{1}{C(\Delta\sigma\sqrt{\pi})^m} a^{-m/2} da \quad \dots(3)$$

$$N = \frac{1}{C(\Delta\sigma\sqrt{\pi})^m} \int_{a_0}^{a_c} a^{-m/2} da \quad \leftarrow \begin{array}{l} \text{亀裂長さが } a_0 \text{ から } a_c \text{ になるまでの疲労応力の繰} \\ \text{返し数 Number of cycles when crack length} \\ \text{changes from } a_0 \text{ to } a_c \end{array}$$

ただし、これは応力振幅が一定の場合 However, this is the case that the stress range is constant.

応力振幅が変化する場合は、積分区間を分割したり、式(3)の増分形を直接用いて、1ステップごとに計算する。 In the case that the stress range is not constant, the integral interval is divided, or N is calculated step by step using the incremental form eq (3) directly.

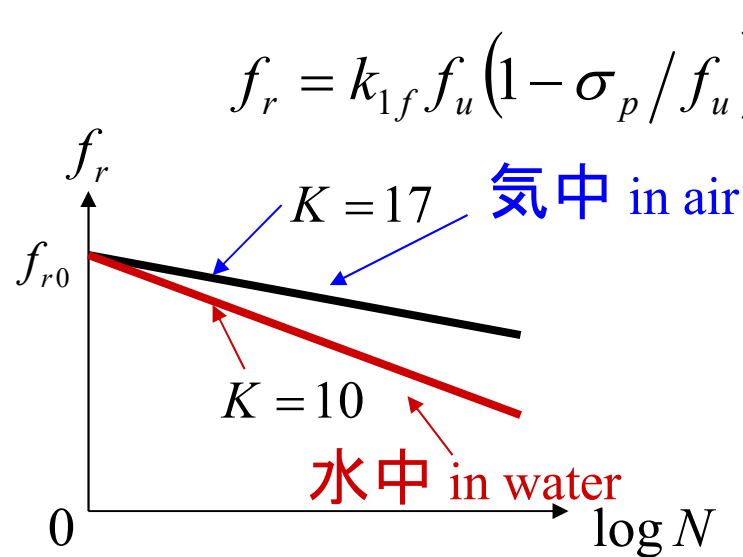
a_c について上式を解けば、 $\Delta\sigma$ と N から亀裂長さの進展を予測できる。 By solving the above eq for a_c , crack length development can be predicted by $\Delta\sigma$ and N .

劣化現象と要因 — 疲労 —

Deterioration and factors – Fatigue –

材料の疲労破壊の予測 prediction of fatigue fracture in material

- 実験に基づくコンクリートの疲労強度の推測式 (S-N線図)
prediction formula for fatigue strength of concrete obtained from tests (S-N diagram)



$$f_r = k_{1f} f_u \left(1 - \sigma_p / f_u\right) \left(1 - \frac{\log N}{K}\right)$$

f_r : 疲労強度 fatigue strength,
 N : 繰返し回数 number of cycles,
 f_u : 静的強度 static strength,
 σ_p : 永久応力 (下限応力) permanent stress (lower stress),
 k_{if} : constant

$$f_{r0} = k_{1f} f_u \left(1 - \sigma_p / f_u\right)$$

劣化現象と要因 — 疲労 —

Deterioration and factors – Fatigue –

疲労に伴う劣化現象 deterioration due to fatigue

- ひび割れの進展の後，部材の破壊 crack propagation followed by member failure

例 Example

増厚補強された鉄筋コンクリートはりの
疲労破壊 Fatigue failure of a RC beam
strengthened by overlaying



https://youtu.be/0kHk_RGKrf0

劣化現象と要因 — 疲労 —

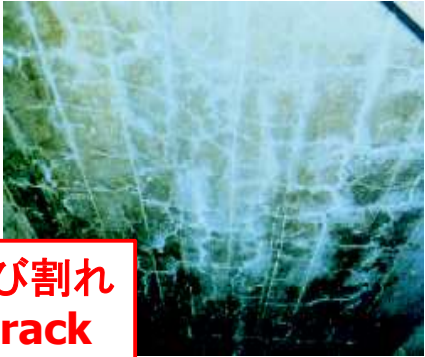
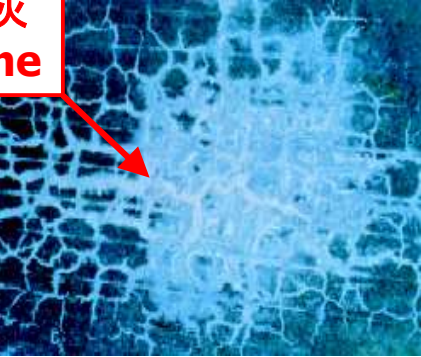

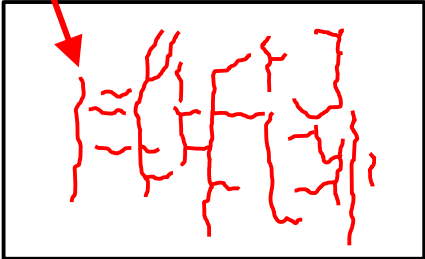
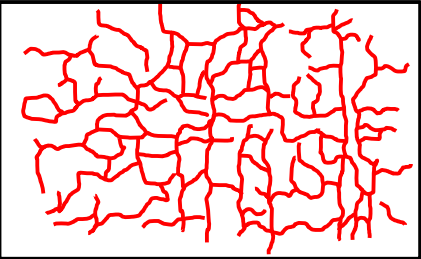
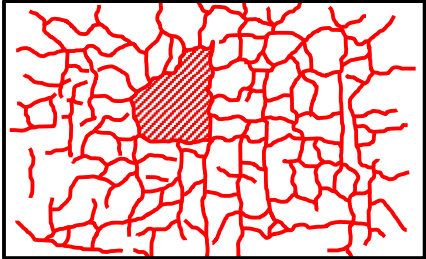
Deterioration and factors – Fatigue –

疲労に伴う劣化現象 deterioration due to fatigue

- 鋼構造の場合，1本の亀裂が徐々に進展，最後は，部材の破壊となる in steel structures single crack propagates gradually causing member failure at end
- コンクリート構造の場合，ひび割れの数と長さが徐々に増え，最後は，部材の破壊が起こる in concrete structures number and length of crack gradually increase resulting in member failure

劣化現象と要因 — 疲労 —

Deterioration and factors – Fatigue –

 <p>ひび割れ Crack</p>	<p>遊離石灰 Free lime</p> 	<p>押抜き せん断破壊 Punching shear failure</p> 
		
<p>二方向ひび割れの発生 Two-directional cracks occur.</p>	<p>二方向ひび割れの進展・遊離石 灰の発生と漏水 Progress of the two-directional cracks and occurrence of free lime and water leakage.</p>	<p>漏水が顕著となり、押抜き せん断破壊が発生 After the increase of the water leakage, punching shear failure occurs.</p>

典型的なコンクリート床版の疲労破壊プロセス
Typical progress of fatigue failure of RC slabs

レポート課題

Report Assignment

鋼桁の点検をしたところ、引張の応力振幅 $\Delta\sigma = 100\text{MPa}$ が作用する箇所に、長さ**10mm**の亀裂が見つかった。この鋼材のパリス則に用いる各係数は、以下の値であることが知られている。 From an inspection of a steel girder, a crack whose length is 10 mm was found at the location where stress range $\Delta\sigma = 100\text{ N/mm}^2$ in tension. It is known that coefficients used in the Paris's law for this steel are as follows.

$$m = 3, \quad C = 1.0 \times 10^{-12}$$

(注: 長さと応力の単位をそれぞれ**m**と**MPa**にする場合 unit of length and stress should be in m and MPa, respectively)

また、亀裂長さが**30mm**に達した時点を経済限界とする。 It is assumed that it reaches to the fatigue limit when the crack length exceeds 30 mm.

シナリオ Scenario 1

将来、応力振幅は変わらないものとする。パリス則を用いて、経済限界に至るまでの繰返し数を推定しなさい。 It is assumed that the stress range does not change in the future. Calculate the estimated number of cycles at the fatigue limit by using the Paris's law.

レポート課題（続き）

Report Assignment (cont.)

シナリオ Scenario 2

10年後に、交通荷重が増加することが予想されている。そこで、今後の100万回までは応力振幅は変わらず $\Delta\sigma = 100MPa$ であるが、100万回以降は $\Delta\sigma = 150MPa$ に増加すると仮定する。

疲労限界に至るまでの繰返し数が合計で何回になるか、パリズ則を用いて計算しなさい。

It is expected that transportation load will increase after 10 years. Therefore, it is assumed that the stress range will keep constant ($\Delta\sigma = 100MPa$) in the first 1 million cycle, while it will increase up to $150MPa$ after the 1 million cycles.

Calculate total number of cycles at the fatigue limit by using the Paris's law.

提出期限: 2020年7月13日

Due date: 13th July, 2020