

床版の損傷機構と疲労寿命予測について考える

早稲田大学
佐藤 靖彦

内容

- ・損傷機構
- ・寿命の定量評価の考え方
- ・移動輪荷重試験結果の評価法
- ・おわりに

内容

- ・損傷機構
- ・寿命の定量評価の考え方
- ・移動輪荷重試験結果の評価法
- ・おわりに

進行形態

土木学会 道路橋床版の維持管理マニュアル2016

段階	発生状況	特徴
ステップ1	横軸主方向ひび割れ	主に載荷輪間に、主軸方向に一方通行ひび割れが最も多く発生している現象
ステップ2	複数のひび割れ網の形成	主軸方向に、横軸方向に二方向ひび割れが発生する現象。横軸方向にひび割れが発生する現象は、主軸方向にひび割れが発生する現象よりも発生率が高くなる現象ではない。
ステップ3	ひび割れの網目化の進行	ひび割れの網目化が進み、ひび割れの網目化ひび割れの進行が確認できる現象
ステップ4	角張りひび割れの発生	ひび割れのリッパや角張りが生じコンクリート断面の剥離が現れる現象
ステップ5	抜け落ち	床版断面にひび割れが進むことで床版の構造が弱まる現象。車輪の荷重によって床版が剥離する現象である。

段階	発生状況	特徴
健全	As舗装 RC床版	アスファルト舗装の荷重が受容する能力を超過して現れる現象
ステップ1	舗装のひび割れ発生 As舗装 RC床版	舗装の荷重が現れる現象
ステップ2	床版内への水浸透 降雨 舗装ひび割れ	舗装体の底面に水が入る現象
ステップ3	周辺的ひび割れ発行 As舗装 RC床版	シグラーに水が入り舗装の荷重が受けられない現象
ステップ4	抜け落ち	周辺の現象に隣接され抜け落ちが現れる現象

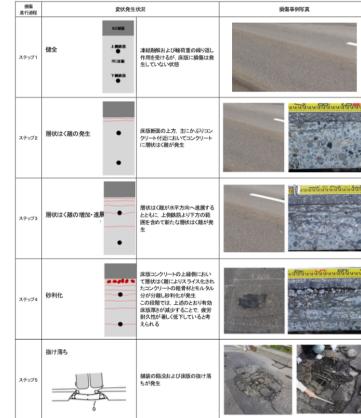
進行形態

土木学会 道路橋床版の維持管理マニュアル2016

塩害に起因した損傷の進行形態

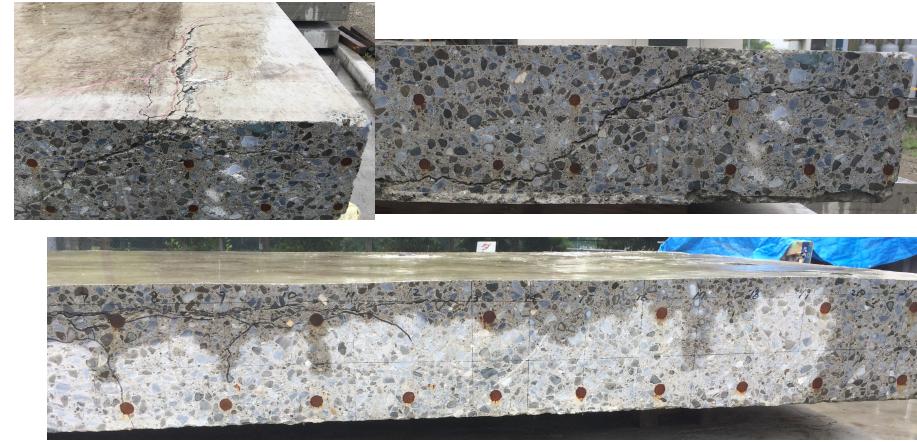


凍結融解による凍害の進行形態



2019/6/4 PC技術講習会 5

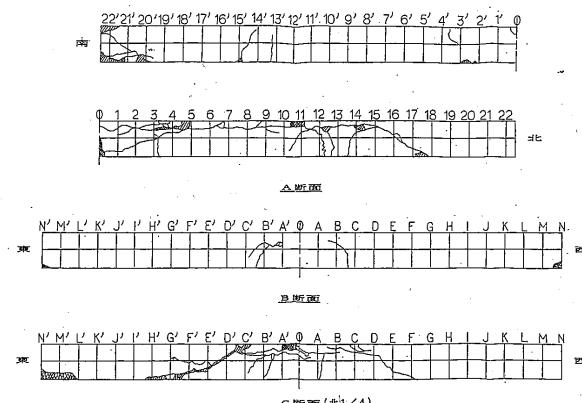
輪荷重走行試験における損傷形態



2019/6/4 PC技術講習会 6

輪荷重走行試験における損傷形態

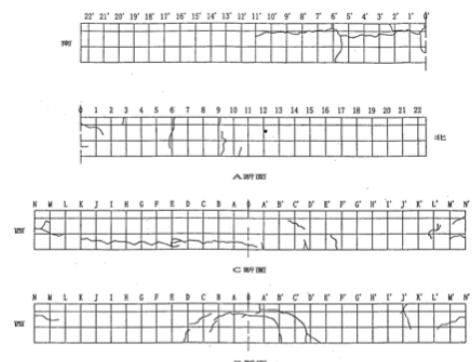
国土技術政策総合研究所資料 道路橋床版の疲労耐久性に関する試験



2019/6/4 PC技術講習会 7

輪荷重走行試験における損傷形態

国土技術政策総合研究所資料 道路橋床版の疲労耐久性に関する試験



2019/6/4 PC技術講習会 8



土木学会 道路橋床版の維持管理マニュアル2016

損傷機構の整理

輪荷重走行試験

観察されている損傷

- ・曲げひび割れ
- ・水平ひび割れ
- ・せん断ひび割れ
- ・押し抜け

道路橋床版

観察されている損傷

- ・曲げひび割れ
- ・水平ひび割れ
- ・土砂化（砂利化）
- ・押し抜け

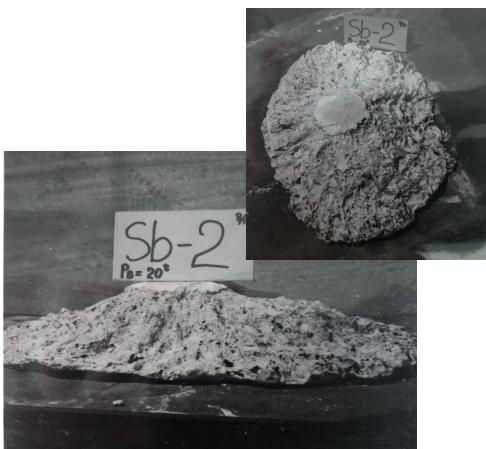
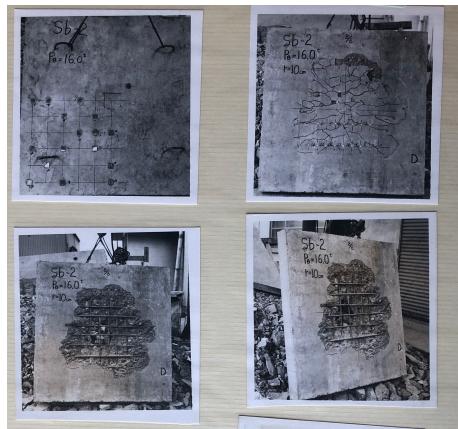
観察されていない損傷

- ・鉄筋破断
- ・せん断ひび割れ

2019/6/4 PC技術講習会 9

2019/6/4 PC技術講習会 10

静的押抜きせん断破壊性状



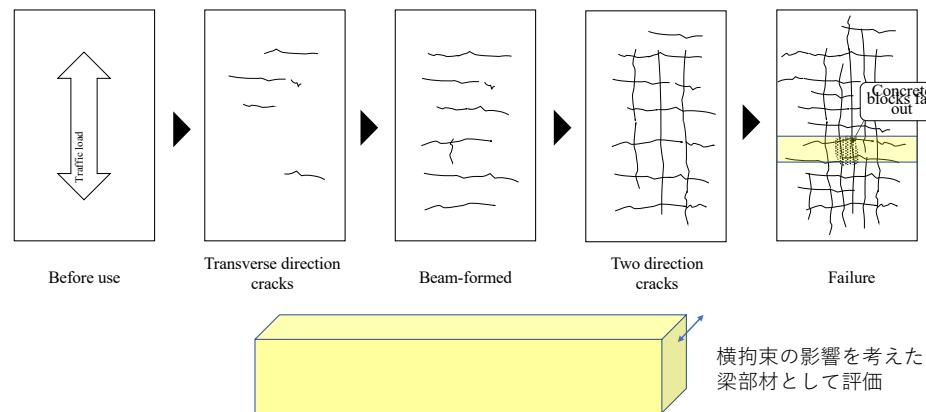
2019/6/4 PC技術講習会 11

内 容

- ・損傷機構
- ・寿命の定量評価の考え方
- ・移動輪荷重試験結果の評価法
- ・おわりに

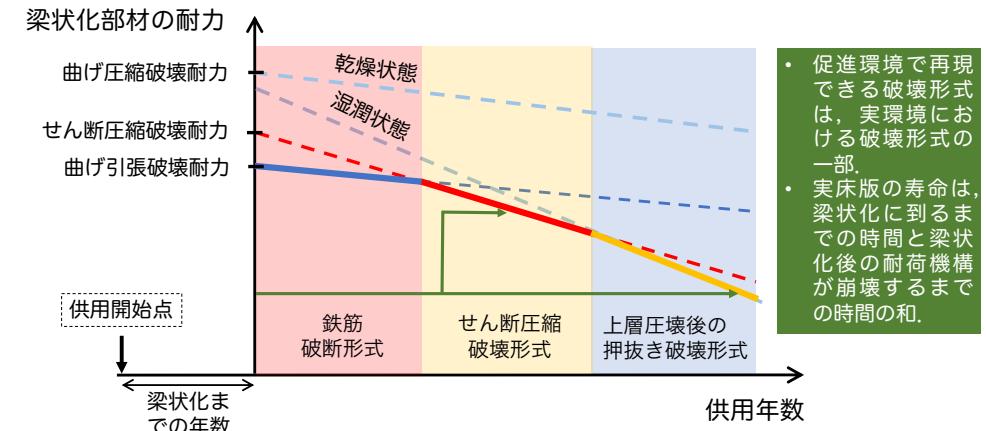
2019/6/4 PC技術講習会 12

損傷プロセス



2019/6/4 PC技術講習会 13

寿命の定量評価の方法



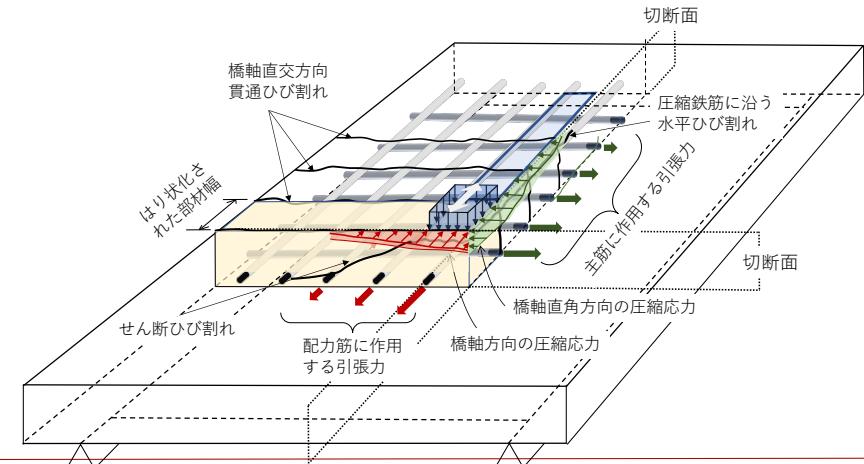
2019/6/4 PC技術講習会 14

内 容

- ・損傷機構
- ・寿命の定量評価の考え方
- ・移動輪荷重試験結果の評価法
- ・おわりに

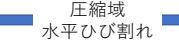
2019/6/4 PC技術講習会 15

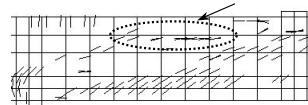
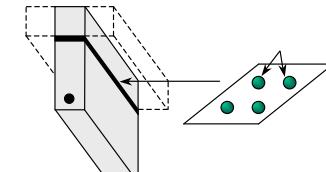
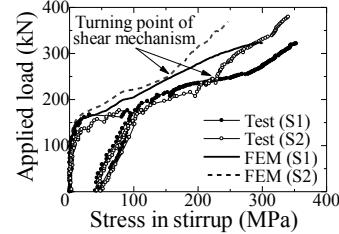
床版の抵抗機構



2019/6/4 PC技術講習会 16

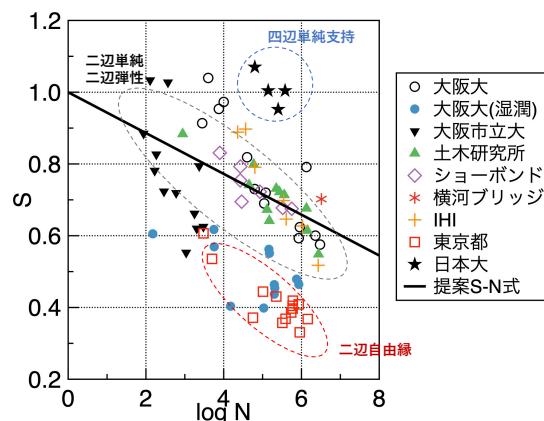
水平ひび割れの力学的意味

T型はりのせん断耐荷機構  圧縮域 水平ひび割れ → ト拉斯からアーチ機構へ移行



2019/6/4 PC技術講習会 17

実験結果との比較



2019/6/4 PC技術講習会 19

せん断耐力式とS-N曲線

■はりに分割したRC床版のせん断耐力式

$$V_{bc} = \beta_{p1} \cdot \beta_{p2} \cdot \beta_d \cdot f_{vmcd} \cdot b_{w-e} \cdot d$$

■S-N曲線

$$S = \frac{P}{2V_{bc}} = 1 - 0.057 \log N$$

■梁状化の梁幅

$$B = b + 2d_a$$

$$\beta_d = \sqrt[4]{1/d}$$

d : 主鉄筋の有効高さ

$$\beta_{p1} = (100p_1)^{\frac{1}{13} + 0.5(100p_2)}$$

$$\beta_{p2} = 1 + 0.125 \frac{p_2}{p_1}$$

p_1 : 主鉄筋比, p_2 : 配力鉄筋比

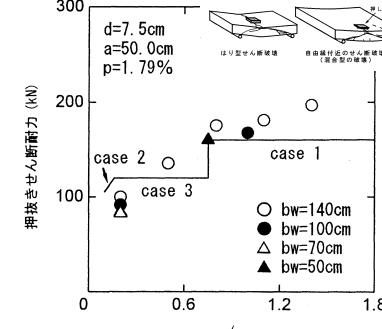
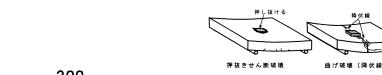
$$f_{vmcd} = 0.32 \sqrt[3]{f'_{ca}}$$

f'_{cd} : コンクリート圧縮強度

2019/6/4 PC技術講習会 18

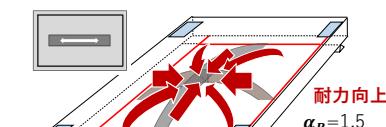
境界条件の影響

■一定荷重を受けるRC床版のせん断耐力式
 $V_{bc} = \alpha_B \cdot \beta_{p1} \cdot \beta_{p2} \cdot \beta_d \cdot f_{vmcd} \cdot b_{w-e} \cdot d$

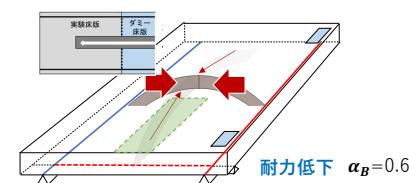


古内, 高橋, 角田: 土木学会論文集 (1996)

四辺単純支持

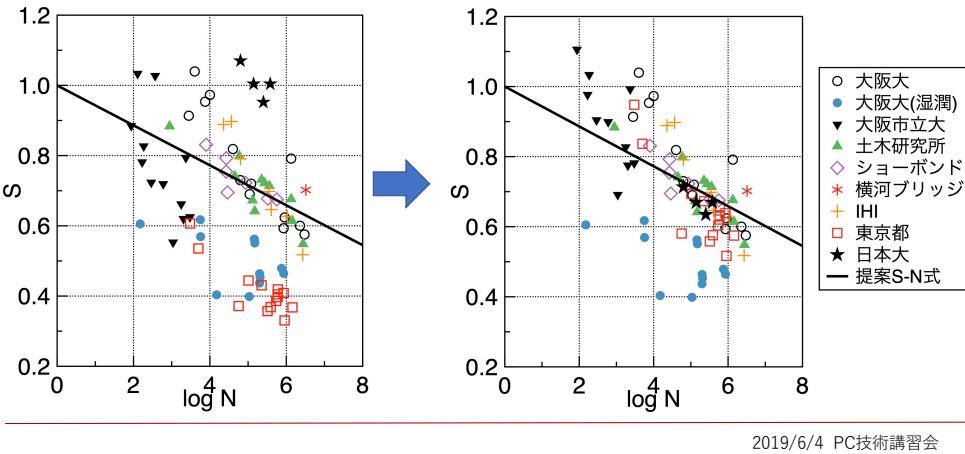


二辺弾性
二辺自由縁

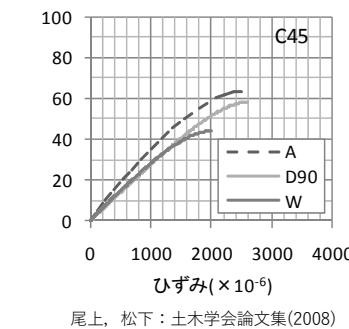


2019/6/4 PC技術講習会 20

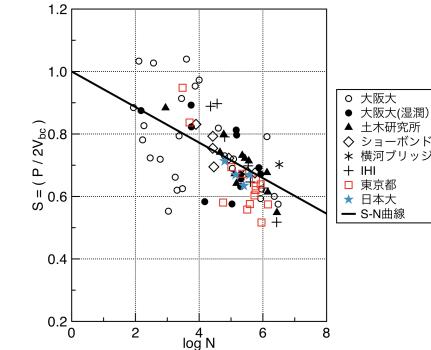
実験結果との比較



湿潤の影響



■一定荷重を受けるRC床版のせん断耐力式
 $V_{bc} = \alpha_e \cdot \alpha_B \cdot \beta_{p1} \cdot \beta_{p2} \cdot \beta_d \cdot f_{vmcd} \cdot b_{w,e} \cdot d$
 α_e : 環境係数 (乾燥条件で1.0, 湿潤条件で0.69)



松井式による評価

■ 梁状化したRC床版の押抜きせん断耐荷力

- $P_{sx} = 2B(f_v x_m + f_t C_m)$

■ 梁状化の梁幅

- $B = b + 2d_d$

f_v : コンクリートのせん断強度

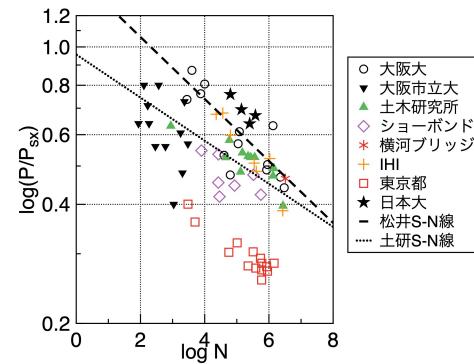
f_t : コンクリートの引張強度

x_m : 主鉄筋に直角な断面の引張側コンクリートを無視した時の中立軸深さ

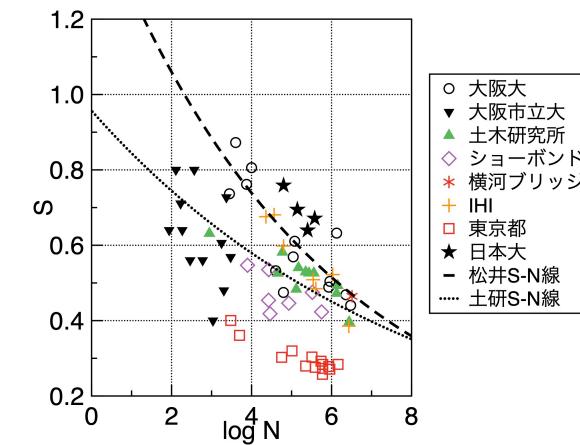
C_m : 引張側主鉄筋のかぶり深さ

b : 載荷板の橋軸方向の辺長

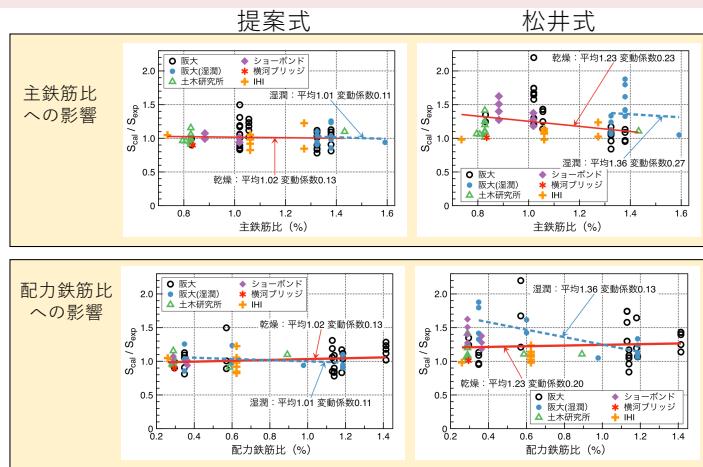
d_d : 配筋の有効高さ



松井繁之: 橋梁の寿命予測(RC床版の疲労寿命予測), 安全工学Vol.30(6), 1991

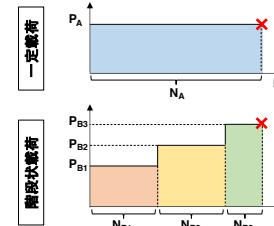


提案法と松井式との比較



2019/6/4 PC技術講習会 25

階段状漸増載荷試験の評価



- 階段状漸増載荷試験 :**
 - 徐々に荷重を上げる疲労試験
 - 一定載荷とは別の評価法が必要
 - 先行荷重による損傷の蓄積に着目し、階段状載荷の評価法を開発

■ 階段状載荷の実験データ

研究機関	大阪大 (6体)	土木研究所 (6体)	日本大 (13体)
階段数	2~3	7~13	2~5
第一載荷S	0.35~0.51	0.36~0.42	0.60~0.78
破壊時S	0.58~0.70	0.71~0.95	0.73~1.16

2019/6/4 PC技術講習会 26

マイナー則による階段状載荷の評価

• マイナー則（線形累積損傷則）：

$$M = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \dots = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} \quad \left\{ \begin{array}{l} M < 1 \text{ 破壊しない} \\ M \geq 1 \text{ 破壊} \end{array} \right.$$

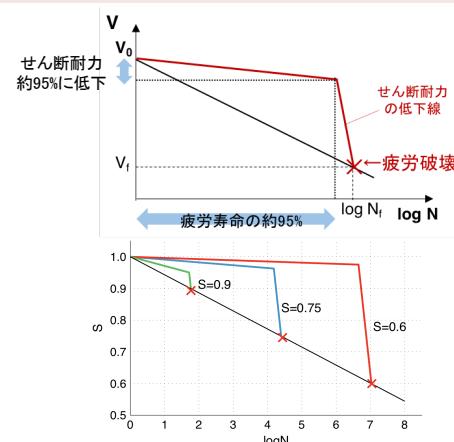
• M : 累積損傷度
• n_i : 番目の作用荷重 P_i の繰返し回数
• N_i : 番目の作用荷重 P_i で一定疲労載荷をする場合の破壊時繰返し回数

2019/6/4 PC技術講習会 27

せん断耐力の低下を考慮した評価法

■ 床版の疲労破壊の定義
繰返し回数の増加に伴い、せん断耐力が低下
→作用荷重を下回ることで破壊

■ せん断耐力の低下線
疲労損傷が破壊直前に急激に進行することから2直線を想定
作用荷重が大きいほど、静的破壊に近い挙動を示すことを想定

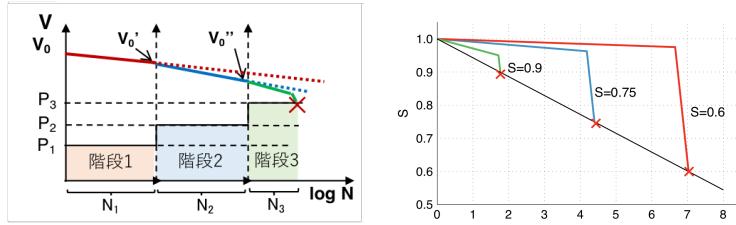


2019/6/4 PC技術講習会 28

せん断耐力の低下を考慮した評価法



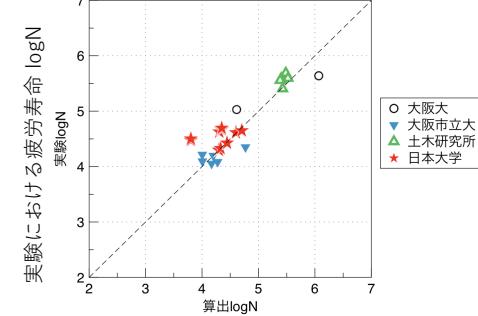
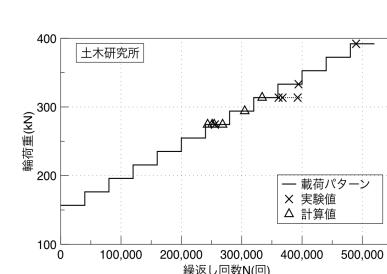
■ 階段状漸増載荷におけるせん断耐力低下の考え方



荷重レベルを上げる際、せん断耐力がある程度低下した点から、新たにせん断耐力低下線を描く
= 前の階段の疲労損傷の蓄積をせん断耐力の低下として考慮

2019/6/4 PC技術講習会 29

実験結果との比較



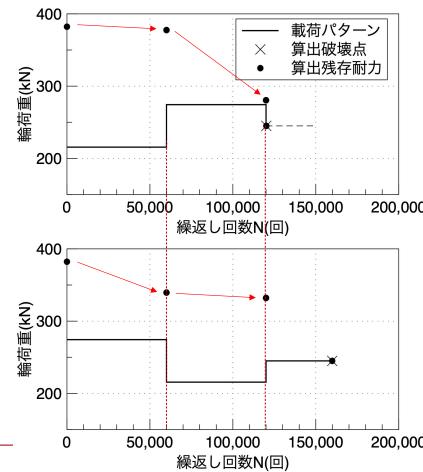
算出された疲労寿命 $\log N$

2019/6/4 PC技術講習会 30

荷重の順番の影響



【小→大→中】



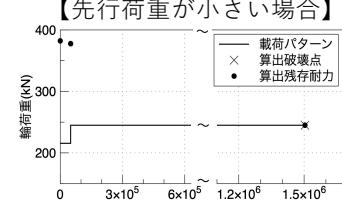
【大→小→中】

2019/6/4 PC技術講習会 31

先行荷重の影響

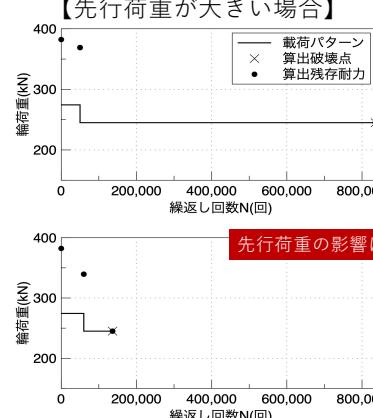


【先行荷重が小さい場合】



先行荷重の影響は小さい

【先行荷重が大きい場合】



先行荷重の影響は大きい

2019/6/4 PC技術講習会 32

PC床版の疲労寿命予測法

▶ 土木学会の棒部材のせん断耐力式を活用

棒部材のせん断耐力式に β_n を導入することで
RC床版の疲労評価法をPC床版へと拡張

■一定荷重を受けるPC床版のせん断耐力式

$$V_{bc} = \alpha_e \cdot \alpha_B \cdot \beta_{p1} \cdot \beta_{p2} \cdot \beta_n \cdot \beta_d \cdot f_{vmcd} \cdot b_{w-e} \cdot d$$

b_{w-e} : 梁状化の梁幅
 d : 主鉄筋の有効高さ

[主たるパラメーター]

α_e : 環境係数

α_B : 支持条件の影響

β_{p1}, β_{p2} : 主鉄筋比・配筋比の影響

プレストレスの影響を考慮する項³⁾:

$$\beta_n = \sqrt{1 + \sigma_{cg}/f_{vtd}}$$

σ_{cg} : 断面の1/2の高さにおける平均プレストレス

$$f_{vtd} = 0.23 \sqrt{f'_{cd}}^{2/3}$$

³⁾土木学会:コンクリート標準示方書 設計編、土木学会、2012

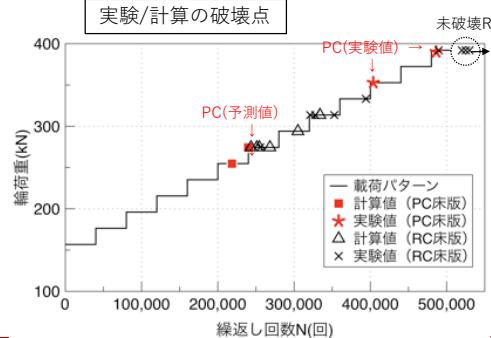
2019/6/4 PC技術講習会 33

PC床版の階段状漸増載荷試験への適用

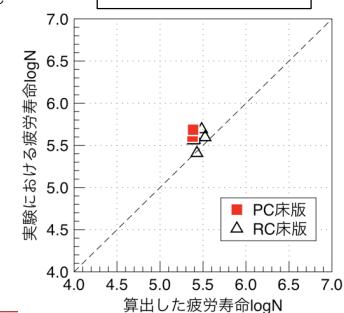
実験データのせん断耐力

供試体	提案式 V_{bc}	$V_{bc}(\beta_n\text{無し})$
PC	181～184 kN	106～111 kN
RC	186～216 kN	

実験/計算の破壊点

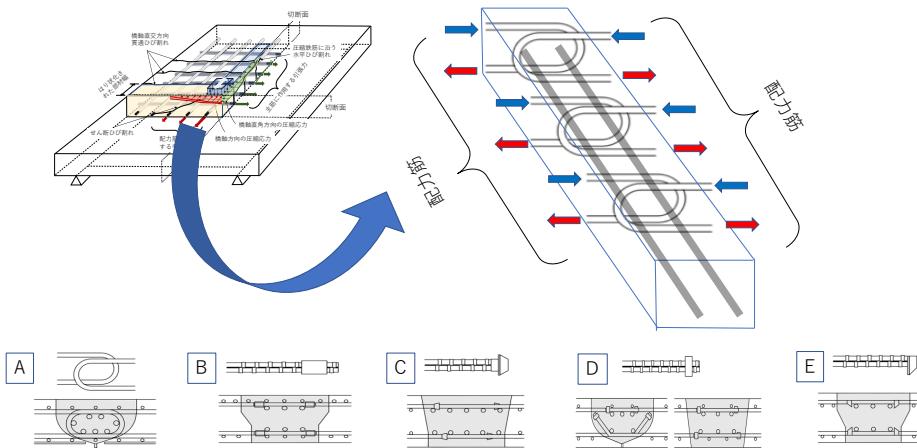


実験-計算の寿命比較



2019/6/4 PC技術講習会 34

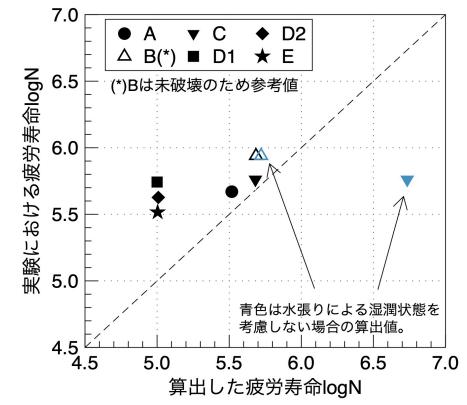
接合部の疲労寿命予測法



2019/6/4 PC技術講習会 35

接合部の疲労寿命予測法

	疲労寿命の実験値(回)	疲労寿命の計算値(回)	$V_{bc}(kN)$
A	約 467800	329534	222
B	約 870000(*)	484870	245
C	577000	480619	397
D1	552565	100009	215
D2	423500	101964	248
E	328000	100842	213



2019/6/4 PC技術講習会 36