



# 非線形有限要素解析による高サイクル疲労シミュレーション

2009. 4. 6

## 1. 3次元有限要素プログラム COM3

### (1) 基本構成則

ひび割れを内在する有限体積に適用される鉄筋コンクリート (RC) 要素を再現するプログラムである。ひび割れ後の直応力およびせん断応力伝達機構、鉄筋とコンクリート間の付着とひび割れ位置での鉄筋の塑性局所化が、有限要素内に展開される平均ひずみ-平均応力関係の中で規定される。これをひずみ経路に沿って経路積分することにより、応力とあわせて塑性・損傷状態を直接算出することが可能となる。

RC 要素の平均ひずみ-平均応力関係は、1次元圧縮、引張、ひび割れ面せん断伝達のモデルから構成され、これらが多方向非直交固定ひび割れモデルの枠組みに組み込まれ、3次元の非線形構造解析に適用される。圧縮と引張の構成則では、高応力クリープ変形と荷重の繰返しによる損傷の累積（塑性化と剛性低下）が考慮される。ひび割れ面でのせん断力伝達モデルでは、繰返し回数に応じてせん断力伝達機能を低下させる微小損傷項が導入されている。

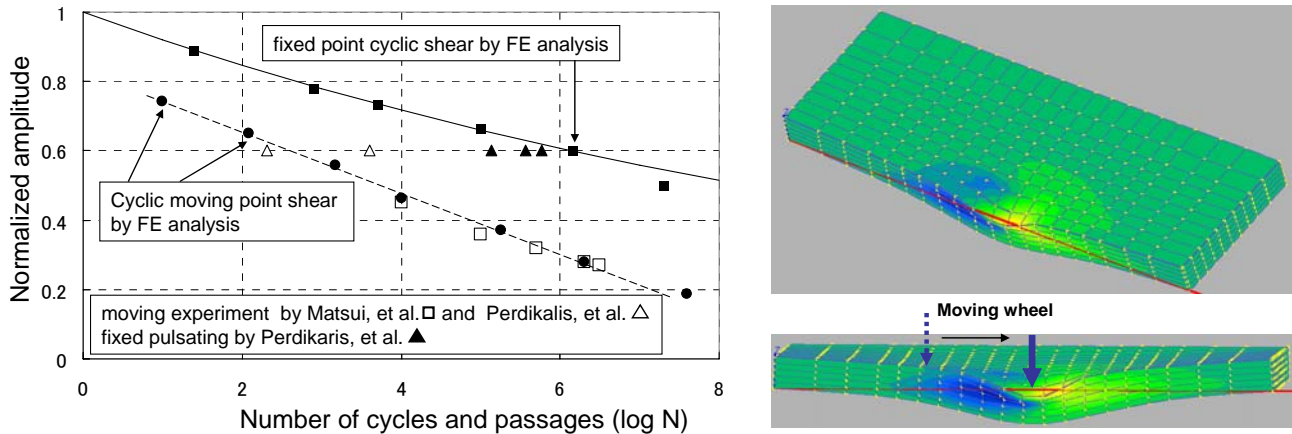
### (2) 高サイクル疲労解析

下図に、高サイクル疲労損傷を考慮したコンクリートの基本構成則の概要を示す。対数導関数を導入し、高サイクルの計算高速化を実現しており、これらの構成則からなる非線形応答解析で RC 床版の高サイクル疲労破壊を再現できることは、既に報告されている。実際の梁やスラブを対象とした高サイクル疲労シミュレーションが、次々に実現している。

	圧縮モデル	引張りモデル	せん断伝達モデル
基本構成則	<p>応力-ひずみ曲線</p> <p><math>\sigma = E_0 K_C \varepsilon_e</math>  <math>\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_p</math></p>	<p>応力-ひずみ曲線</p> <p><math>\sigma = E_0 K_T \varepsilon_e</math>  <math>\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_p</math></p>	<p>せん断力-せん断変形/せん断ひずみ関係</p> <p><math>\tau = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} R'_c(\omega, \delta, \theta) \sin \theta d\theta</math></p>
高サイクル疲労拡張モデル	<p>破壊パラメータ <math>K_C</math> に高サイクル疲労を表現する関数 <math>\lambda</math> を導入</p> <p><math>dK_C = \left(\frac{\partial K_C}{\partial t}\right) dt + \left(\frac{\partial K_C}{\partial \varepsilon_e}\right) d\varepsilon_e</math></p> <p>時間依存項    ひずみ依存項</p> <p><math>\left(\frac{\partial K_C}{\partial \varepsilon_e}\right) = \lambda \sim \text{when } F_k = 0</math></p> <p><math>\left(\frac{\partial K_C}{\partial \varepsilon_e}\right) = -\left(\frac{\partial F_k}{\partial \varepsilon_e}\right) \left(\frac{\partial F_k}{\partial K}\right) + \lambda \sim \text{when } F_k = 0</math></p> <p><math>\lambda = K^3 \cdot (1 - K^4) \cdot g \cdot R</math></p> <p>El-Kachif and Maekawa 2004</p>	<p>破壊パラメータ <math>K_T</math> に、繰返し荷重による損傷を表す項が含まれる</p> <p><math>dK_T = F dt + G d\varepsilon_e + H d\varepsilon_e</math></p> <p>時間依存項    繰返し荷重によるコンクリート応力低下を示す項</p> <p>引張クリープの影響</p> <p>Maekawa et al. 2003, Hisasue 2005</p>	<p>オリジナルのモデルに、繰返し荷重による応力低下を示す係数 <math>X</math> を導入</p> <p>導入した係数    オリジナルモデル</p> <p><math>\tau = X \cdot \tau_0(\delta, \omega)</math></p> <p><math>X = 1 - \frac{1}{10} \log_{10} \left\{ 1 + \int  d(\delta/\omega)  \right\} \geq 0.1</math></p> <p>Li &amp; Maekawa 1989, Gebreyouhannes 2006</p>
物理的意味	コンクリート組織の連続的な破壊に伴う 圧縮剛性の低下	鉄筋とコンクリートの付着疲労で生じる 引張剛性の低下	繰返し荷重によりかみ合うひび割れ表面が破壊    せん断伝達力低下
水の影響	水中では、コンクリートの圧縮強度が約30%低下(既往の研究多)	(水による付着疲労低下は、報告されていない)	水によるせん断面の破壊と摩擦低下
	$\lambda = 100(1 - K_c) \cdot g \cdot R$		$X = 1 - \frac{1}{10} \log_{10} \left\{ 1 + \int d \left( \xi \left[ \frac{\delta}{\omega} \right] \right) \right\} \geq 0.1$

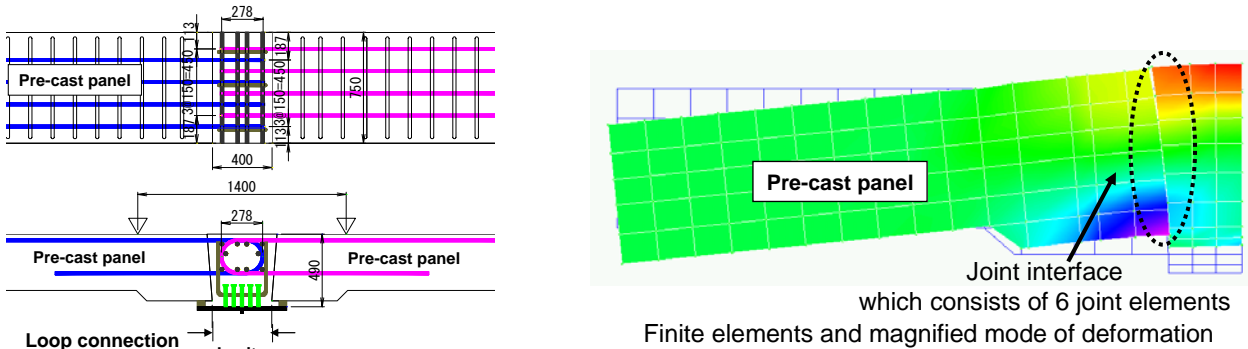
2. 床版の移動荷重による疲労損傷 解析事例

(1) RC 床版の移動荷重による数値解析～実験との比較検証



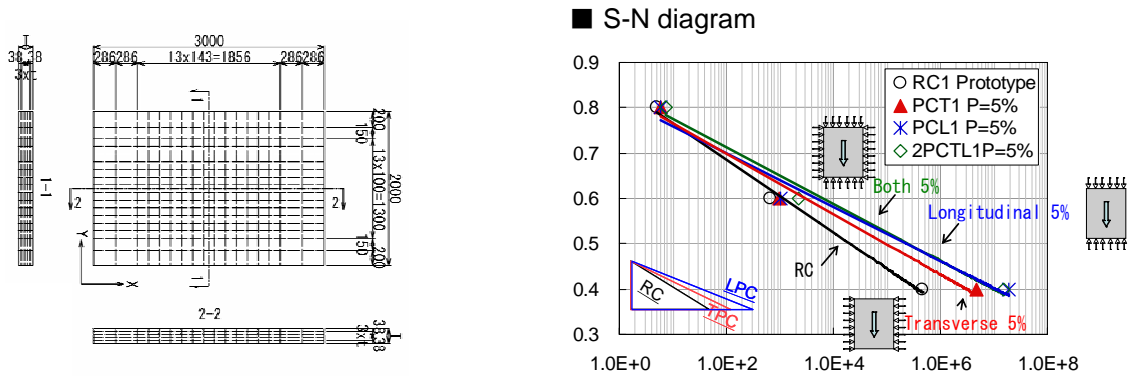
Three-Dimensional Fatigue Simulation of RC Slabs under Traveling Wheel-Type Loads , Maekawa, K., Gebreyouhannes, E., Mishima, T. and An, X., Journal of Advanced Concrete Technology, 4(3) 445-457, 2006.

(2) プレキャスト PC 床版（継手後打ち部を含む）数値解析事例～羽田空港拡張滑走路の検討



Path-Dependent High Cycle Fatigue Modeling of Joint Interfaces in Structural Concrete , Maekawa, K., Fukuura, N. and Soltani, M., Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.6, No.1, 227-242, February 2008.

(3) 各種影響要因の評価～版厚、鉄筋量、プレストレス、荷重荷位位置等を変更した場合の寿命予測



移動荷重下の床版疲労寿命に影響を及ぼす各種要因の数値解析に基づく分析, 藤山知加子, GEBREYOUHANNES Esayas, 千々和伸浩, 前川宏一, コンクリート工学年次論文集, 第 29 巻, 第 3 号, pp727-732, 2007

## [主要参考文献]

- 1) Gebreyouhannes, E., Kishi, T. and Maekawa, K., Shear fatigue response of cracked concrete interface, *Journal of Advanced Concrete Technology*, 6(2), pp.365-376, 2008.
- 2) Gebreyouhannes, E., Chijiwa, N., Fujiyama, C. and Maekawa, K., Shear Fatigue Simulation of RC Beams Subjected to Fixed Pulsating and Moving Loads, *Journal of Advanced Concrete Technology*, 6(1), pp.215-226, 2008.
- 3) Maekawa, K., Pimanmas, A. and Okamura, H. , *Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete*, Spon Press, 2003.
- 4) Maekawa, K., Ishida, T. and Kishi, T., *Multi-Scale Modeling of Structural Concrete*, Taylor and Francis, 2008.
- 5) Maekawa, K., Toongoenthong, K., Gebre-youhannes, E. and Kishi, T. , Direct Path-Integral Scheme for Fatigue Simulation of Reinforced Concrete in Shear, *Journal of Advanced Concrete Technology*, 4 (1), pp.159-177, 2006.
- 6) Maekawa, K., Gebreyouhannes, E., Mishima, T. and An, X. , Three-Dimensional Fatigue Simulation of RC Slabs under Traveling Wheel-Type Loads, *Journal of Advanced Concrete Technology*, 4 (3), pp.445-457, 2006.
- 7) Maekawa, K., Fukuura, N. and Soltani, M., Path-Dependent High Cycle Fatigue Modeling of Joint Interfaces in Structural Concrete, *Journal of Advanced Concrete Technology*, 6(1), pp.227-242, 2008.
- 8) Soltania, M., and Maekawa, K, Path-dependent mechanical model for deformed reinforcing bars at RC interface under coupled cyclic shear and pullout tension. *Engineering Structures*, 30, pp.1079-1091, 2008.
- 9) 藤山知加子, GEBREYOUHANNES Esayas, 千々和伸浩, 前川宏一, 移動荷重下の床版疲労寿命に影響を及ぼす各種要因の数値解析に基づく分析, *コンクリート工学年次論文集*, 第29巻, 第3号, pp.727-732, 2007.

*Journal of Advanced Concrete Technology* : <http://www.j-act.org/>

関連論文検索 : <http://www.jstage.jst.go.jp/search/?name=&searchtitles.x=45&searchtitles.x=40&searchtitles.y=20>