

# コンクリート標準示方書における 非線形有限要素解析による照査について

技術部 大滝 健

## 1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物の非線形有限要素解析を性能照査の基幹技術として設計標準に取り入れる動きは2002年のコンクリート標準示方書[耐震性能照査編]<sup>1)</sup>より始まり、2007年のコンクリート標準[設計編：参考資料]3編：非線形解析による構造解析<sup>2)</sup>において、その適用性や材料、形状のモデル化および結果の妥当性評価等について詳細に述べられている。ただし、ここまでは照査の目安は主圧縮ひずみ等の評価に留まっており、任意の構造物に対する具体的な照査指標およびその限界値については示されてこなかった。一方、2012年コンクリート標準[設計編：標準]「第9編：非線形解析有限要素解析による照査」<sup>3)</sup>においてはじめて有限要素法における損傷指標が示され、破壊、修復性に対する照査指標とその限界値が提示されている。ここでは2012年コンクリート標準示方書（以下、標準示方書）で示された損傷指標を概説するとともに簡単な試算例を示す。なお、標準示方書における非線形有限要素法の照査指標およびその限界値の詳細については文献4)～6)に詳しい。

## 2. コンクリート標準示方書における照査の指標

### 2.1 応力、ひずみによる指標

標準示方書では、非線形有限要素解析による構造物あるいは部材の損傷表として、表-1に示す指標を挙げている。これらはいずれも有限要素法によって得られる応力およびひずみに基づくものであって、有限要素法の特徴を生かした評価指標と言える。

鉄筋の降伏については、軸方向鉄筋およびせん断補強筋のひずみを照査すればよく、座屈については軸方向鉄筋の応力またはひずみに基づいて評価すればよい。

コンクリートの指標については式(1)および式(2)で求まる偏差ひずみ第2不変量 $\sqrt{J_2}$ と正規化累加ひずみエネルギー $W_n$ を損傷指標としてよいとしている。ここで、偏差ひずみ第2不変量は曲げひび割れの開口や斜めひび割れの発生といった引張損傷に対応しており、主圧縮ひずみや正規化累加ひずみエネルギーはコンクリートの圧縮損傷に対応するものである。

表-1 有限要素法による損傷指標<sup>3)</sup>

事 象	指 標
軸方向鉄筋降伏	軸方向鉄筋ひずみ
斜めひび割れ発生	偏差ひずみ第2不変量*
圧縮損傷	正規化累加ひずみエネルギー*
	主圧縮ひずみ
圧縮破壊	正規化累加ひずみエネルギー*
軸方向鉄筋座屈	軸方向鉄筋の応力またはひずみ
せん断補強鉄筋降伏	せん断補強鉄筋ひずみ

※重み付き平均化処理を行った指標

$$\sqrt{J'_2} = \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2}\right)^2 + \left(\frac{\gamma_{xy}}{2}\right)^2} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} W_n &= \frac{1}{f} \sum_{k=1}^n (\sigma_{ij} \cdot d\varepsilon_{ij})^{(k)} \\ &= W_{n-1} + \frac{1}{2f} (\sigma_{ij}^{(n-1)} + \sigma_{ij}^{(n)}) \cdot (\varepsilon_{ij}^{(n)} - \varepsilon_{ij}^{(n-1)}) \end{aligned} \quad (2)$$

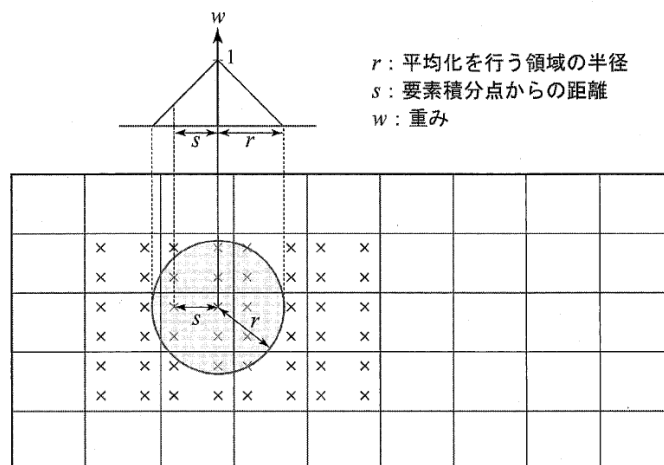
ここに、 $\sigma, \varepsilon, \gamma$  は要素積分点における応力およびひずみを表す。また、 $f$  は正規化パラメータであり、一般に  $f = f_c$  (コンクリートの圧縮強度) とする。ここで注意しなければならないのは、有限要素法で得られる応力度やひずみは、使用する材料の力学モデルや要素分割の影響を受けるため、特に要素寸法依存性を考慮してこれらの物理量を算出する必要がある。

そのため標準示方書では、ひずみや応力を照査応答値として用いる場合には、これらの物理量について、適切に定めた領域で重み付き平均化した指標  $\overline{D_d}$  (式(3)) を用いるものとしている。

$$\overline{D_d} = \frac{\int_V D_d \cdot w(s) dV}{\int_V w(s) dV} \quad (3)$$

ここに、 $D_d$  は局所的な損傷指標、 $s$  は要素積分点からの距離、 $w(s)$  は式(4)に示す重み関数である。損傷指標の平均化の概念を図-1に示す。式(4)の  $L$  に物理的な意味は乏しく、標準示方書では、要素寸法が 200mm 程度とすると、それを包含する長さとして  $L=150\text{mm}$ 、すなわち直径 300mm の円に囲まれる領域で平均化することを推奨している。実際の照査に当たっては、全解析ステップにおいて破壊想定領域の全積分点について領域平均化した指標を算出し、その中の最大値を指標の評価値とする。

$$w(x) = \begin{cases} 1 - x/L & x \leq L \\ 0 & x > L \end{cases} \quad (4)$$



解説 図 3.5.1 損傷指標平均化の概念 (2次元解析の場合)

図-1 損傷指標平均化の概念<sup>3)</sup>

## 2.2 照査指標と限界値

非線形有限要素法を用いた材料の損傷による照査は、断面力等による照査と同様であり、解析により得られたひずみや応力度より算定される指標の照査応答値  $S_d$  の照査限界値  $R_d$  に対する比に構造物係数  $\gamma_i$  を乗じた値が 1.0 以下であることを確かめることによって行う（式(5)）。ここでコンクリートの損傷によって照査する場合の応答値  $S_d$  は、式(3)によって平均化した指標  $\overline{D}_d$  であり、鉄筋の損傷によって照査する場合は  $S_d$  は鉄筋のひずみあるいは応力を用いればよい。また、破壊に対する照査限界値  $R_d$  は標準示方書では表-2 に示す値を用いてよいとしており、正規化累加ひずみエネルギーについて  $1500\mu$ 、偏差ひずみ第2不変量について  $1000\mu$  としている。また、解析係数  $\gamma_{na\_lim}$  は 1.0 としている。

$$\gamma_i S_d / R_d \leq 1.0 \quad (5)$$

表-2 材料の損傷に基づく破壊の照査指標と限界値<sup>3)</sup>

表 4.2.1 材料の損傷に基づく破壊の照査指標と限界値

材料	事象	指標	限界値	評価項目
コンクリート	圧縮破壊	正規化累加ひずみエネルギー*1	1500 $\mu$	曲げ破壊 せん断圧縮破壊
	斜めひび割れ発生	偏差ひずみ第2不変量*1	1000 $\mu$	斜め引張破壊
鉄筋	軸方向鉄筋座屈	軸方向鉄筋の応力またはひずみ	座屈挙動に対応する応力またはひずみ*2	曲げ破壊

\*1 平均化領域  $r$  で重み付き平均を取った指標（ここでは  $r=150\text{mm}$  の場合を示した）

\*2 応力-ひずみ関係に応じて適切に定める

## 3. 損傷指標の試算例

既往の解析<sup>7)</sup>によりせん断破壊すると判定された鉄筋コンクリート梁の結果を用いて上記の損傷指標、偏差ひずみ第2不変量  $\sqrt{J_2}$  および正規化累加ひずみエネルギー  $W_n$  を試算した。ここでは多数の解析ケースのうち、破壊形態（荷重変形関係）の異なる No. 3 および No. 10 の解析ケースを取り上げた。解析モデルおよび解析の結果得られたひび割れ状況および損傷判定結果は図-2 および図-3 の通りである。図-3 の損傷判定は使用した解析コード (WCOMD Ver2.0) の最大ひずみによるものであり、本論で述べた損傷指標とは異なる。

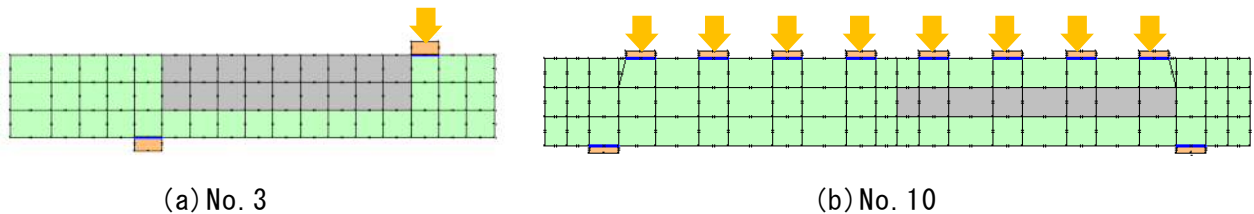


図-2 解析モデル<sup>7)</sup>

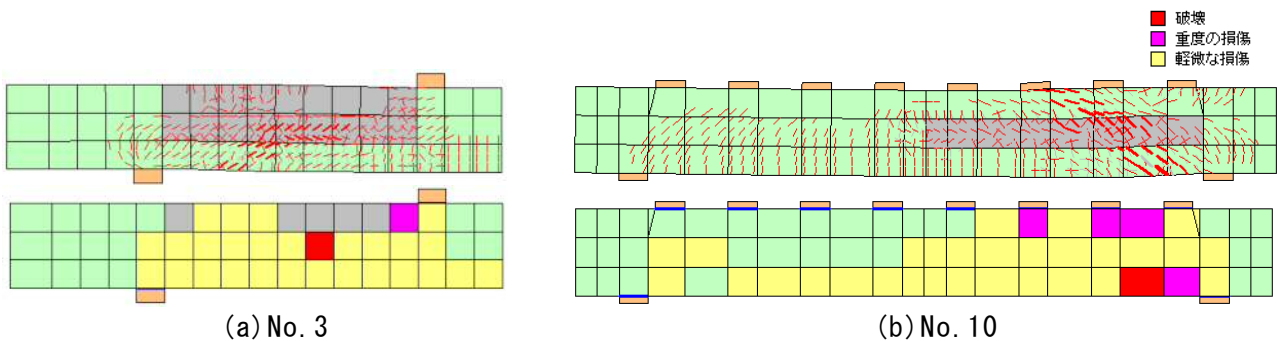


図-3 解析結果（ひび割れおよび損傷判定）<sup>7)</sup>

図-4にそれぞれの荷重変形関係に $\sqrt{J'_2}$ および $W_n$ の計算結果を併記した。ただし、ここでは簡単のため、 $\sqrt{J'_2}$ および $W_n$ の領域平均化は行わず、破壊と判定された要素中心の積分点の応力およびひずみの計算結果を用いて算定している。また荷重変形と併記するため、縦軸を調整しているため両指標の大きさは意味を持たず、その挙動だけに着目されたい。両ケースとも破壊と判定された要素は最大せん断ひずみが10%を超え、せん断破壊と判定されているが、図より明らかな様に $\sqrt{J'_2}$ および $W_n$ の挙動は明らかに異なる。せん断破壊と考えられるNo.3では、荷重低下とともに $\sqrt{J'_2}$ と $W_n$ の値が急増しているのに対し、緩やかな荷重低下を示したNo.10では $W_n$ が徐々に増加している。このように、両指標を用いることによって、構造物あるいは部材の破壊モードや損傷の判定をより合理的に行うことができると考えられる。なお、現時点で最新版のWCOMD Studio Ver 1.01は領域平均化した偏差ひずみ第2不変量および正規化累加ひずみエネルギーの算出が可能である。

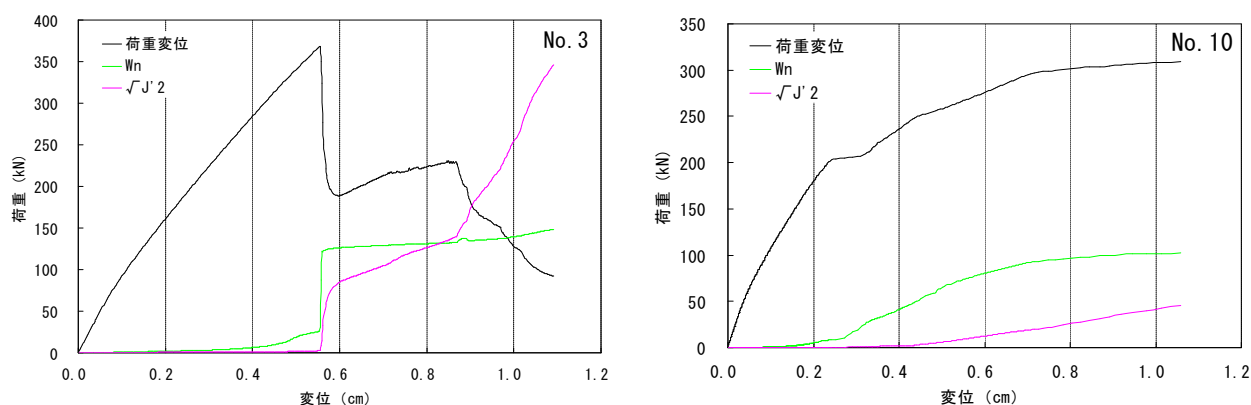


図-4 荷重変形関係および損傷指標 ( $\sqrt{J'_2}$  および  $W_n$ )

#### 4. おわりに

本論では、非線形有限要素解析による鉄筋コンクリート構造物の損傷評価について、コンクリート標準示方書に示される損傷評価指標を概説するとともに、試算例を呈示した。非線形有限要素解析は、土木構造物の設計や耐震性能評価において、いまや必須のツールであるが、その照査指標は未だ定着しているとは言えない。しかしながら、来年度改訂予定の「屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針」に取り込まれることも十分に考えられ、今後ますます重要となることが予想される。それに伴い、これら指標の意味を理解するとともに実際に計算することによって、その妥当性を判断できるようにしておくことが必要である。

#### 参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書[耐震性能照査編]，2002
- 2) 土木学会：コンクリート標準示方書[設計編]，2007
- 3) 土木学会：コンクリート標準示方書[設計編]，2012
- 4) 齊藤成彦ほか：非線形有限要素解析によるRCはり部材の損傷指標，土木学会論文集E2(材料・コンクリート構造)，Vol. 67, NO. 2, 166-180, 2011.
- 5) 土屋智史ほか：非線形有限要素解析によるRC面部材の損傷指標と耐力評価，土木学会論文集E2(材料・コンクリート構造)，Vol. 68, NO. 3, 209-224, 2012.
- 6) 牧剛史ほか：正負交番載荷を受けるRC骨組み構造物の非設計有限要素解析による損傷評価，土木学会論文集E2(材料・コンクリート構造)，Vol. 69, NO. 1, 33-52, 2013.
- 7) 大滝健：原子力施設の材料非線形解析によるせん断照査のための部材係数の算定，(株)クレアテック第2回技術発表報告会講演論文集，2014. 11