

セル・オートマトンによる鋼製ラーメン橋脚の耐震補強の最適化

関西大学大学院 学生員 倉田一平\*  
 (株)ニュージェック 正会員 保田敬一\*\*\*

香川大学工学部 正会員 白木 渡\*\*  
 関西大学工学部 正会員 堂垣正博\*

1. まえがき

兵庫県南部地震以降，土木構造物の耐震設計法が見直されている．たとえば，設計荷重が変更され，荷重の割り増しがなされた，新しい荷重を満たすために既設橋脚をいかに補強するかが重要な課題となる．ここでは，この種の問題に対し，創発技術の一種であるセル・オートマトン (Cellular Automaton ; CA) を適用し，補強量を最小とするラーメン橋脚の補強最適化を試みる．さらに，既往の研究で取り扱われることが少なかった弾塑性域を考慮した CA による最適化問題について検討し，それに必要な新たなルールを提案する．

2. CA とローカルルール

CA は，細胞の増殖機能を模倣した創発システムである．CA では，細胞状に区切られたセルを空間上に設置し，セルの増殖を規定するローカルルールをセル間に導入する．これを空間全体に展開し，時刻ごとに解を求め，時間的に発展させ収束した状態での解を最適解とする．このルールは，CA の動作に直接影響し，創発された最適解の精度にも深く関係する．ここでは，応力を指標としたローカルルールを誘導した．

3. 数値解析の方法

(1)解析対象 図-1 に示すような 6 主桁からなる連続非合成 I 桁橋を支える鋼製門形ラーメン橋脚を解析の対象とする．ただし，部材を完全弾性体とみなす．ラーメンの高さ  $l_c$  と間口  $l_b$  はともに 15m である．その柱とはりの断面は正方形で，その一辺は  $b_f = b_w = 1.4m$  である．上部工の主桁間隔は  $l = 2.7m$  である．また，鋼種は SM490，許容応力度は  $\sigma_a = 186MPa$ ，ヤング率は  $E = 206Gpa$  である．

(2)解析手順 本解析の手順は，つぎのとおりである．まず，初期荷重として，上部工の死荷重と地震力に相当する水平荷重をラーメンに作用させる．その結果，初期断面が決定される．その後，水平荷重のみを係数倍し，初期設計と同様の手順で補強断面を行う．

ラーメンを図-1 に示すように多数のセル (要素) に分割し，それに表-1 の設計荷重を作用させる．各セルでの絶対最大応力を求め，その最大応力  $\sigma_{max}$  が許容応力度  $\sigma_a$  に対する収束条件

$$0.95\sigma_a \leq \sigma_{max} \leq \sigma_a \tag{1}$$

を満たせば，初期断面が決定される．一方，満たさなければ，へ進む．

ローカルルール<sup>1)</sup>

$$t^{T+1} = t^T \left( 1 + \beta \frac{\sigma_{max} - \sigma_a}{\sigma_a} \right) \tag{2}$$

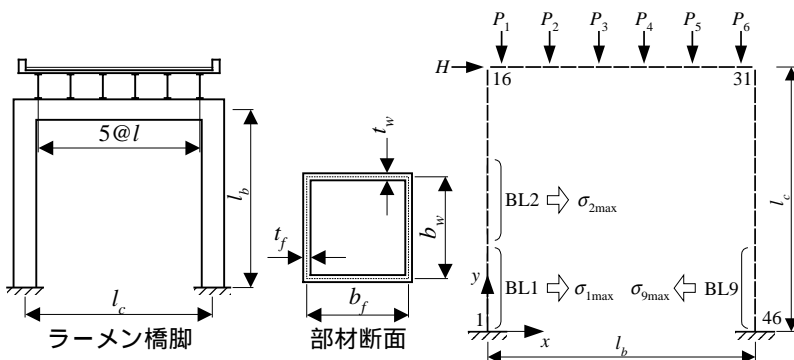


図-1 解析対象

図-2 要素の分割と補強ブロック

表-1 荷重条件と載荷点の座標

荷重	記号	大きさ (KN)	x(mm)	y(mm)
鉛直荷重	$P_1$	1,200	750	15,000
	$P_2$	1,200	3,450	15,000
	$P_3$	1,200	6,150	15,000
	$P_4$	1,200	15,000	15,000
	$P_5$	1,200	11,550	15,000
	$P_6$	1,200	14,250	15,000
水平荷重	$H$	$\alpha \sum_{i=1}^6 P_i$	0	15,000

Keywords : セル・オートマトン，補強最適化，ローカルルール，板厚

連絡先 : \* 〒564-8680 吹田市山手町 3-3-35 TEL/FAX : 06-6368-0882  
 \*\* 〒761-0396 高松市林町 2217-20 TEL/FAX : 087-864-2243  
 \*\*\* 〒542-0082 大阪市中央区島之内 1-20-19 TEL : 06-6245-4901 FAX : 06-6241-8426

によって、すべてのセルの板厚を同じ値に同時に更新した後、手順へ戻る。ここに、 $T$  は計算ステップ、 $t^{T+1}$  と  $t^T$  は更新後と更新前の板厚、 $\beta$  は収束速度に関する比例定数である。

初期設計されたラーメン構造に  $\gamma$  倍した水平荷重を作用させる（ここでは、 $\gamma=4$  とする）。ラーメンを、図-2 に示すように、9 ブロックに分割する。

それぞれのセルに生じる最大応力を比較し、各ブロックでの最大応力を探索する。すべてのブロックに対して、最大応力が式(1)を満たすか、満たさなくても許容応力度の 95% 未満かつ更新後の板厚が更新前のそれより薄くなる場合には手順へ進む。この場合、更新された板厚を更新前のそれに置き換える。それ以外の場合には、手順へ進む。

ローカルルールによって、ブロックごとに板厚を更新する。更新後、対称なブロック（たとえば、1 番と 9 番のブロック）の板厚を比較する。両者のうち、大きい板厚を両ブロックの板厚に採用する。ただし、ブロック 5 の板厚は、単独で更新する。その後、手順へ戻る。

市場に流通する鋼板データを参考に、連続量として求められた板厚を離散量へ修正し、補強断面とする。

#### 4. 数値解析結果とその考察

まず 20mm の板厚からスタートして初期断面を設計したところ、最終的に 27.02mm の板厚が得られた。この場合、計算はステップ 73 で終了した。構造系全体の最大応力が 31 番のセルに生じ、185.99MPa であった。一方、最小応力は 15 番のセルに生じ、21.04MPa であった。

はじめに決定した構造物に当初の 4 倍の水平荷重を作用させ、補強設計したところ、表-2 と 3 を得た。ここに、前者は連続量として求められた板厚と各ブロックに生じる最大応力の関係を、後者は板厚を離散量としたときの結果である。表-2 からわかるように、ブロック 5~9 の最大応力は許容応力度（186MPa）の近傍に収まった。しかし、他のブロックではそれよりもかなり低い値にとどまった。それゆえ、解は 500 回の世代交代を経ても収束しなかった。このためには、CA が動作しやすいように環境を整え、収束条件を改良すれば解決できると思われる。また、表-3 から明らかなように、修正前に比較して、すべてのブロックにおける最大応力が減少し、離散量による補強最適化の可能性があることが明らかになった。

#### 5. 弾塑性域を考慮した CA による最適化問題

構造物に荷重が作用すれば、さまざまな箇所にも塑性ヒンジの起こる恐れがある。地震後の構造物の復旧作業を想定した場合、ヒンジの発生箇所は補修工事の難易さに深く関わる。ここでは、容易に補修できる領域をあらかじめ構造物に設定し、そこに損傷が集中するように補強形態を CA で創発させることを考える。この概念図を図-3 に示す。図中、影付きの部分は、補修が容易な領域である。

たとえば、図中に示す印に塑性ヒンジが発生したとする。これは、影付きの領域ではないので、数ステップ前の状態に戻り、

のように損傷箇所を重点的に補強する。でも同様に補強が繰り返される。で初めて影付きの領域に塑性ヒンジが形成され、これが最適な補強形態となる。したがって、この時点での水平荷重を構造物に作用させても補修が容易な領域に塑性ヒンジを導く設計が可能になる。一般に、橋脚に水平荷重が作用した場合、最初に塑性化する場所は基部であるが、構造物の立地条件によっては補修が容易な領域は変化するものと考えられる。

表-2 補強設計の結果

BL 番号	板厚 (mm)	最大応力 (MPa)
1	74.42	131.34
2	33.31	143.10
3	64.73	91.66
4	62.81	107.65
5	28.68	182.26
6	62.81	185.98
7	64.73	185.98
8	33.31	185.77
9	74.42	185.87

表-3 修正後の結果

BL 番号	板厚 (mm)	最大応力 (MPa)
1	75.00	130.23
2	34.00	139.81
3	65.00	91.56
4	65.00	104.12
5	29.00	180.45
6	65.00	179.68
7	65.00	185.48
8	34.00	181.53
9	75.00	184.27

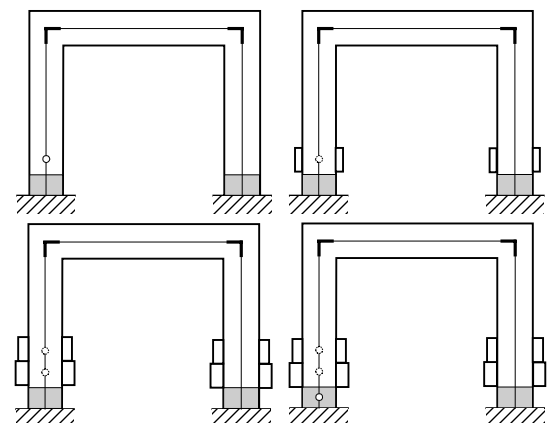


図-3 塑性ヒンジを考慮した CA の概念図