

香川大学工学部 正会員 白木 渡 関西大学工学部 学生員○倉田一平
(株)ニユージェック 正会員 保田敬一 関西大学工学部 正会員 堂垣正博

1. まえがき

兵庫県南部地震後、道路橋示方書・耐震設計編が改訂され、地震時の設計法が見直された。規準が改訂され、荷重条項が見直されるような場合には、既存の橋梁を改修せねばならないこともある。杉本らは橋脚の補強を遺伝的アルゴリズムによる組合せ最適化問題に帰着させ解決する方法を提案した¹⁾。

ここでは、創発技術の一種であるセル・オートマトン (Cellular Automaton ; CA) を鋼製ラーメン橋脚の補強最適化問題に応用し、CA が構造最適化問題に有用であるかどうか検討する。

2. CA の概要

CA は、生物の形態形成を模倣して生み出された最適化手法の一種である。すなわち、ある空間に細胞状に区切られた多数のセルを設け、セル間に成り立つ単純なルール (これをローカルルールという) を設ける。これを空間全体に展開して時刻ごとの解を求め、時間発展させて収束の状態を観察しようとする方法である。

3. CA による補強最適化

(1) 鋼製ラーメン橋脚のモデル

図-1 に示すような 6 主桁と RC 床版からなる連続非合成 I 桁橋を支える鋼製 1 層門形ラーメン橋脚の補強最適化を考える。ラーメンの高さ l_c と間口 l_b はともに 15m、その柱とはりの断面は正方形で、その一辺を $b_f=b_w=1.4\text{m}$ とする。また、上部構造の主桁間隔は $l=2.7\text{m}$ である。鋼種を SM490、許容応力度を $\sigma_a=186\text{MPa}$ 、ヤング率を $E=206\text{GPa}$ とする。

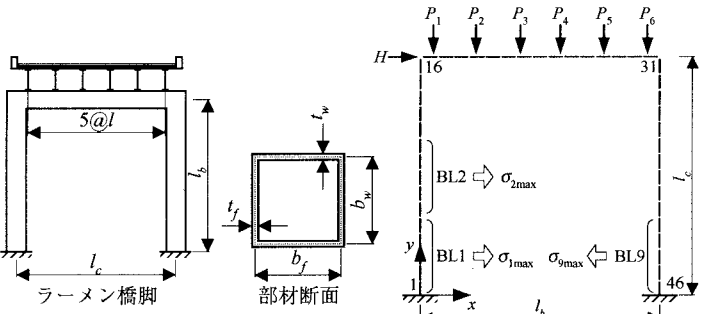


図-1 解析対象

図-2 要素の分割と補強ブロック

(2) CA による構造最適化の解析手順

CA の解析手順は、つぎのとおりである。

①門形ラーメン橋脚を図-2 のように多数のセルに離散化する。図中の数字は節点番号である。

②上部構造の死荷重・活荷重と地震荷重を想定した表-1 の設計荷重をラーメンに作用させ、許容応力度設計法に則って断面設計する (これを初期設計と称する)。ここでは設計水平震度を $\alpha=0.25$ とする。

1)各セルに生じる応力を骨組有限要素解析によって求め、その最大応力 $\sigma_{\max}$ とセルの位置を求める。

2)最大応力が許容応力度 σ_a 以下で設計条件を満足しておれば、設計規準に従って設計されているので、手順③に進む。一方、満足していなければ、つぎの手順 3)を実行する。ここでは、設計条件をつぎのように仮定する。

$$0.95\sigma_a \leq \sigma_{\max} \leq \sigma_a \quad (1)$$

3)つぎのローカルルール

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

によって全セルの板厚を更新し、手順 1)へ戻る。ここに t^T, t^{T+1} は更新前後の板厚、 γ は収束速度に関する比例定数、上添字 T は計算ステップである。③つぎに、設計規準が見直され、設計荷重の割増しがなされたとする。この場合、断面を補強しなければならないこともある (これを補強設計と称する)。ここでは、図-2 に示すように、5 つのセルを 1 つの補強ブロックと考え、総数 9 つのブロックで補

強の可否を考える。そこで、荷重の割増し係数を $\beta=4$ とし、水平荷重

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

を割増しする。

- ④ブロックごとの最大応力を求める。それが設計条件を満足しておれば手順⑥へ、満足してなければ手順⑤へ進む。ここでの収束条件は、

a) 各ブロックが式(1)を満足している場合

b) $\sigma_{\max} < 0.95\sigma_s$ ではあるが、更新後、板厚が更新前のそれより薄くなる場合

である。ただし、後者の場合、更新後に更新前の板厚に戻す。

- ⑤式(2)のローカルルールに従ってブロックごとに板厚を更新した後、手順④へ戻る。

- ⑥ブロックごとに板厚が更新され、ラーメンは変断面構造として補強される。

4. 数値解析結果とその考察

上述の解析手順をプログラミングし、先に設定した鋼製1層門形ラーメン橋脚を許容応力度設計すれば、表-2 に示す断面が初期設計される。すなわち、橋脚断面の初期板厚を 20mm に仮定し、CA で最適な板厚を探索したところ、最終的に 27.02mm の板厚に収束した。同表からわかるように、はりの中央部（セル 21 の付近）、右側の柱とはりの隅角部（セル 31）、右側の柱基部（セル 45）での応力が高い。

つぎに、初期設計時の荷重を割増し、補強設計を実施したところ、表-3 に示す結果を得た。表-3 と表-2 との比較から、補強設計ではブロック 1 と 8 で応力が大幅に増大している。すなわち、右側の柱の隅角部と左側の柱が、応力をより負担するように最適化される。式(1)を満たすブロックは 1 番と 6～9 番である。力学的には、すべてのブロックで応力がほぼ許容応力度に達するのがよいが、本解析では手順④に示すルールを設定したため、このような結果となった。このルールは、余分な板厚が過度に除去されることもなく、構造系がアンバランスにならないようにしている。

補強に必要な鋼材の量をパラメータに解の収束状況を調べると、図-3 を得る。図から明らかなように、総補強量は計算ステップとともに 7.54m^3 に漸近する。すなわち、本数値結果は、総補強量が最小となるような補強案を示していることがわかる。ただし、橋脚の補強は左右が同じ断面になるようになされるが、ここでは CA による最適化の過程が明確に現れるように、あえて両柱が同断面となるためのルールを設けなかった。それゆえ、本解析例は、若干、現実性を欠いてい

る。これは、左右で対称となるブロックの設計変数をリンクすることによって解決できる。

最後に、表-3 に示す連続量の板厚を市場で購入できる離散量に修正し、収束条件を満足する解を求めれば、表-4 のようになる。この場合、複数の板厚を状態変数として準備した。表-3 の場合と比較して、すべてのブロックで最大応力が減少している。離散量の最適化も CA によって行えることがわかった。

5. まとめ

CA では「補強量を最小にする」といった目的関数が明確に定義されていなくても、単純なローカルルールが定義されておれば、最適解の求められることがわかった。

参考文献

- 1) 杉本・満尾：構造工学論文集，土木学会，Vol.44A，pp.479-486，1998.3.

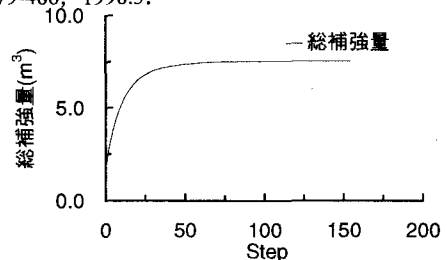


図-3 ステップと総補強量の関係

表-2 初期設計の結果（収束ステップ数 73）

セル番号	最大応力 (MPa)	セル番号	最大応力 (MPa)	セル番号	最大応力 (MPa)
1	87.61	16	47.47	31	185.99
2	82.85	17	72.48	32	1665.77
3	78.10	18	95.14	33	145.54
4	73.35	19	105.96	34	125.32
5	68.60	20	113.82	35	105.10
6	63.85	21	119.83	36	84.87
7	59.09	22	118.02	37	64.65
8	54.34	23	108.70	38	44.43
9	49.59	24	97.73	39	52.64
10	44.83	25	87.87	40	72.87
11	40.08	26	60.56	41	93.10
12	35.32	27	31.40	42	113.33
13	30.56	28	63.58	43	133.55
14	25.80	29	107.55	44	153.78
15	21.04	30	167.91	45	174.01

表-3 補強設計の結果
（収束ステップ数 154）

BL番号	板厚 (mm)	最大応力 (MPa)
1	33.34	176.94
2	27.02	104.34
3	27.02	134.69
4	27.02	174.77
5	27.02	152.91
6	71.70	185.88
7	72.46	185.79
8	48.23	185.99
9	99.09	185.96

表-4 修正後の結果

BL番号	板厚 (mm)	最大応力 (MPa)
1	34	172.44
2	28	99.69
3	28	130.31
4	28	168.89
5	28	148.38
6	75	177.83
7	75	179.74
8	52	171.52
9	100	183.96