

# 近畿大学工学部建築学科卒業論文概要

平成 16 年度		番号 氏名	01168081
指導教官	藤井 大地 助教授		民谷 知之
題名	位相最適化手法を用いた損傷を有する 床スラブの最適補強に関する研究		

## 1. はじめに

近年、阪神・淡路大震災を始めとする多くの地震が発生している中、昨年の新潟県中越地震では、調査対象建物のうち、建て替え補修が必要な建物は約45%に上ったとされている。これらの地震の際に多くの建物の床スラブに亀裂が多数生じ、床剛性が大幅に低下しているため、建物の居住性及び安全性に対する不安が拭えない。このような現状から、各構造部材に対する補修・補強に関する研究が急務となっている。

そこで近年、RC 床スラブの耐震補強の方法として、テープ状の炭素繊維(CFRP 板)をコンクリートに接着する方法が開発され、森村らはこの方法を用いた中空スラブにおける実験的研究を行っている。一方、この CFRP 材は非常に高価なものであるため、昨年藤井らは CFRP の最適なレイアウトを位相最適化手法を用いた解析的方法により求め、有効性を検証した。しかしながら、現在このような耐震補強が必要なスラブにはすでに地震等で損傷を受けたものが数多く存在する。

以上の背景より、本研究では、これまでの研究を進展させ、すでに損傷を受けた床スラブにおいて、位相最適化手法を用いた CFRP 板による最適補強について解析および実験的検証を行う。

## 2. 応力仮定法

本研究では、有限要素として3次元要素(8節点6面体アイソパラメトリック要素)を用いるが、通常の板曲げ理論では CFRP 部分の要素は床スラブと比較して非常に薄くなるため、精度が落ちてしまう。そこで、関口、菊池らが提案した応力仮定法要素を用いる(図1)。この要素は、同じ8節点要素でありながら、通常アイソパラメトリック要素と比較して、垂直応力が1次高次であるため、非常に精度が良く、スラブ等の解析に適している。したがって、本研究では、この応力仮定法要素を用いて、応力解析を行う。

形状関数は、-1から1の範囲に正規化された座標 $(\xi, \eta, \zeta)$ で表し、また、要素内の座標 $(x, y, z)$ も同じ形状関数を用いて次式のように表す。ただし、 $\mathbf{N}$ は形状関数であり、 $\mathbf{u}^e, \mathbf{v}^e, \mathbf{w}^e$ は、要素の各節点における変位を成分とするベクトルである。

$$\begin{aligned} u(x, y, z) &= \mathbf{N}(\xi, \eta, \zeta) \mathbf{u}^e & x &= \mathbf{N}(\xi, \eta, \zeta) \mathbf{x}^e \\ v(x, y, z) &= \mathbf{N}(\xi, \eta, \zeta) \mathbf{v}^e & y &= \mathbf{N}(\xi, \eta, \zeta) \mathbf{y}^e \\ w(x, y, z) &= \mathbf{N}(\xi, \eta, \zeta) \mathbf{w}^e & z &= \mathbf{N}(\xi, \eta, \zeta) \mathbf{z}^e \end{aligned} \quad (2.1)$$

なお、節点の順番は図1に示されるものとする。

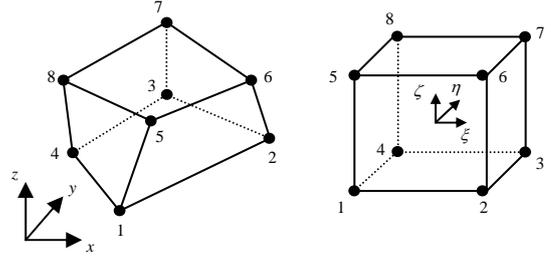


図1 8節点6面体要素

ひずみ-変位関係式は

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{B} \mathbf{d}^e \quad (2.3)$$

ここに、

$$\boldsymbol{\sigma} = \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} c_{11} + c_{12}y + c_{13}z + c_{14}yz \\ c_{21} + c_{22}z + c_{23}x + c_{24}zx \\ c_{31} + c_{32}x + c_{33}y + c_{34}xy \\ c_{41} + c_{42}z \\ c_{51} + c_{52}x \\ c_{61} + c_{62}y \end{Bmatrix} = \mathbf{N}_s \mathbf{c} \quad (2.4)$$

$$\iiint_{\Omega^e} \delta \boldsymbol{\sigma}^T [\mathbf{D}^{-1} \mathbf{N}_s \mathbf{c} - \mathbf{B} \mathbf{d}^e] d\Omega = 0 \quad (2.5)$$

(2.5)式に、(2.3)式を代入すると、

$$\delta \mathbf{c}^T \iiint_{\Omega^e} \mathbf{N}_s^T [\mathbf{D}^{-1} \mathbf{N}_s \mathbf{c} - \mathbf{B} \mathbf{d}^e] d\Omega = \delta \mathbf{c}^T [\mathbf{M}_s \mathbf{c} - \mathbf{M}_B \mathbf{d}^e] = 0 \quad (2.6)$$

要素剛性マトリックスは、次のようになる。

$$\mathbf{k}^e = \iiint_{\Omega^e} \bar{\mathbf{B}}^T \mathbf{D} \bar{\mathbf{B}} d\Omega = \mathbf{M}_B^T \mathbf{M}_s^{-1} \mathbf{M}_B \quad (2.7)$$

ただし、

$$\mathbf{M}_s = \iiint_{\Omega^e} \mathbf{N}_s^T \mathbf{D}^{-1} \mathbf{N}_s d\Omega \quad (2.8)$$

$$\mathbf{M}_B = \iiint_{\Omega^e} \mathbf{N}_s^T \mathbf{B} d\Omega \quad (2.9)$$

なお、(2.8),(2.9)式で定義される

## 3 解析例

### 3.1 解析法の概要

損傷部分のモデル化は、図2に示すように、スラブ部分の損傷部位に相当する要素のヤング係数を低下させることによって行う。

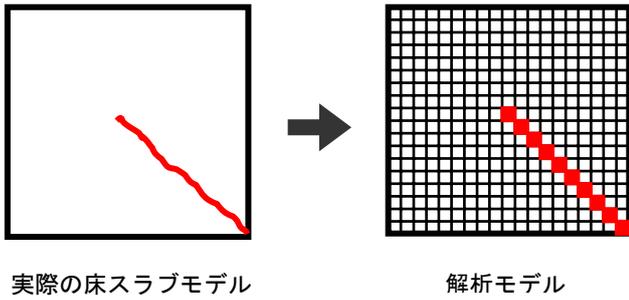


図2 損傷部分のモデル化

### 3.2 解析モデル及び解析条件

いくつかの損傷パターンを想定し、Case 1~Case 5の5つの解析モデルを作成したものを示す。ここで、Case 1は、損傷のないモデルであり、Case 2~Case 5は、それぞれ図に示すような各形状の損傷を想定したものである。境界条件は全辺完全固定とし、荷重は鉛直等分布荷重とする。

なお、本解析では、図3右に示すようにCFRPをスラブの下面に貼るものとし、スラブ部分とCFRP部分の層を分けて解析を行う。

### 3.3 解析結果

以上のような解析モデルでCFRP板のレイアウトを求める位相最適化解析を行う。ただし、損傷部分のヤング係数は、他の部分の1/50に設定した。

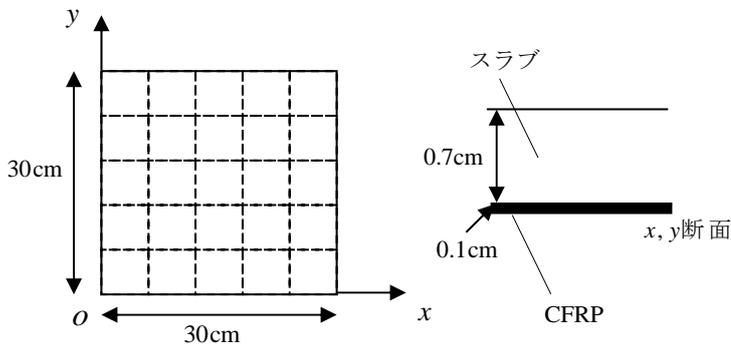


図3 解析モデル

図5は、それぞれのケースの解析結果を示している。図に示すように、損傷のパターンによって、それぞれ異なる位相が求まっていることがわかる。また、それぞれの位相は、かなり明解なものになっており、CFRP板のレイアウトに十分利用できると思われる。

### 4. 損傷を考慮しない貼り方との比較

次に、位相最適化手法で求められた解析結果の有効性を検討するために、前章で得られたCase 3の結果をもとに図6の解析モデルCase A3を作成した。図では、CFRP部分の色の濃淡で、CFRP板(テープ状)の貼り付け方向を示している。

一方、図7のCase B~Case Dは、Case Aの貼り方の有効性を検証するために考えた比較モデルである。なお、この比較モデルにおいても、実験を行った。

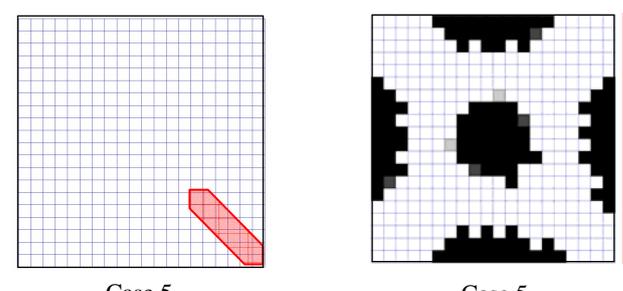
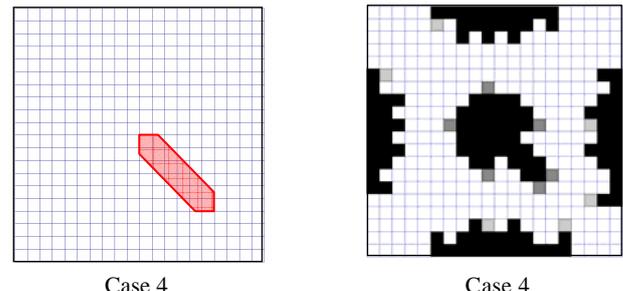
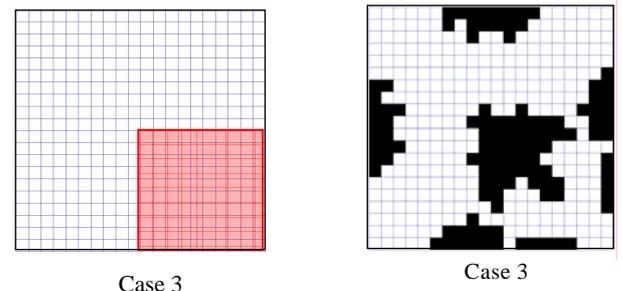
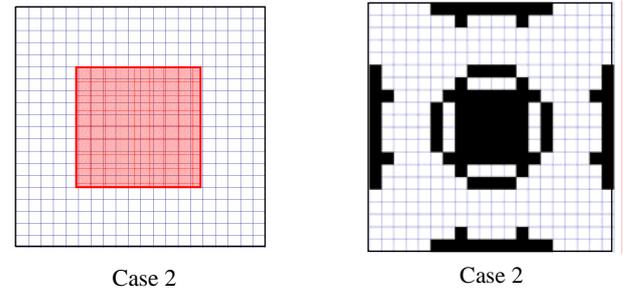
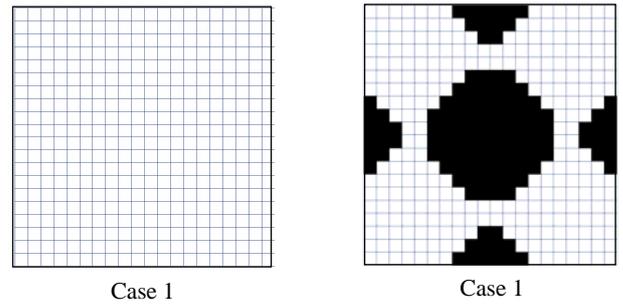


図4 解析モデルの損傷パターン

図5 解析結果

また、CFRP の面積は各ケースで若干異なり、Case B が 30%、Case C が 33%、Case D が 28%である。また、図 6 に示す Case A3 は 28.25%であり、その他 Case A2 は 27%、Case A4 は 28.75%、Case A5 は 30%である。

以上のような解析モデルで解析を行い、スラブの Mises 応力の最大値と最大たわみ変位を求めた。表 1 は、これらの結果を比較したものである。表より、Case A3 の結果が、CFRP 板の量が最小にもかかわらずもっとも高い剛性を示していることがわかる。したがって、損傷を有するスラブでは、位相最適化手法を用いた貼り方が必要であることがわかる。

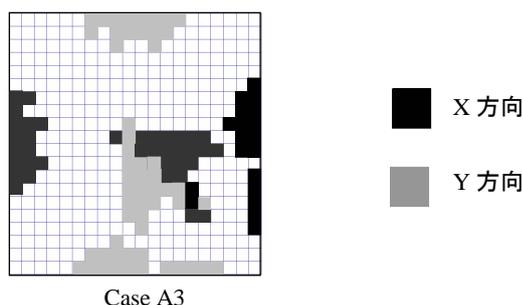


図 6 最適位相を参考にした解析モデル

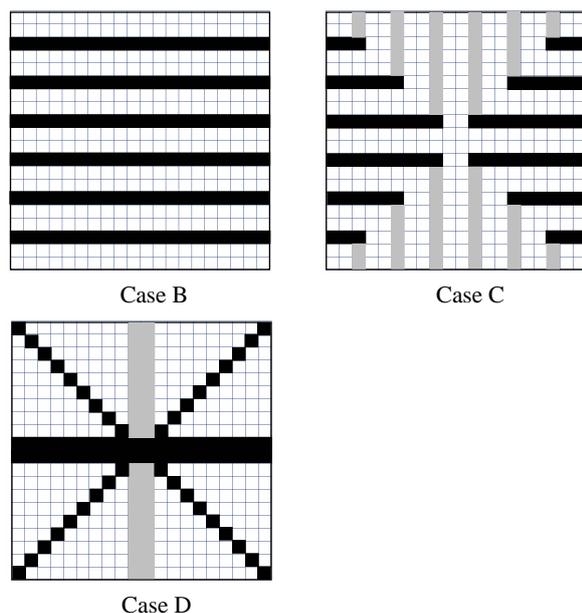


図 7 損傷を考慮しない比較モデル

表 1 最大応力値と最大たわみ変位値の比較

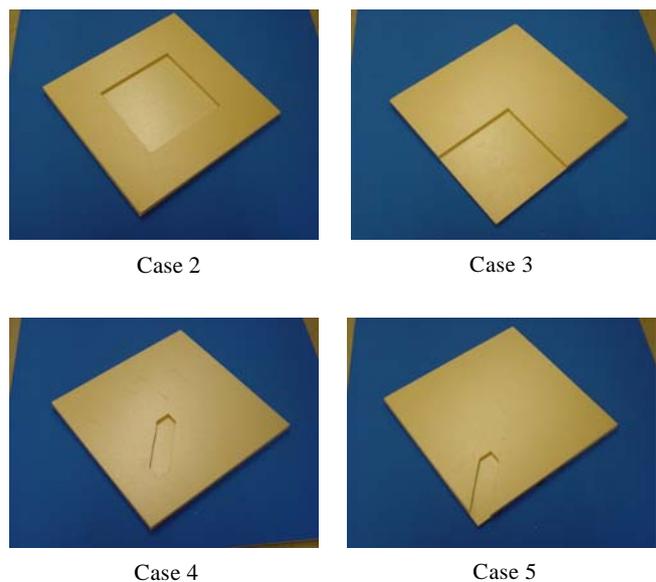
	最大変位(mm)	最大応力 ( $N/mm^2$ )
Case A3	2.152	0.7862
Case B	3.322	0.8785
Case C	2.895	0.81
Case D	3.297	0.9725

## 5. 模型実験による検証

次に、前節に示したモデルを対象として、図 8 に示すような模型を作成し、実験による検証を行った。スラブ部材にはスチレンボードを、CFRP テープは硬化エンビ板を用いて作成した。

図 10 は位相最適化モデルをおき、また損傷を考慮しない比較モデルとして Case B~Case D に対応する各模型下面の CFRP 補強の写真を示したものである。実験は、図 9 に示すような周辺固定台を作成し、等分布荷重として砂袋を用いた(図 11 参照)。なお、解析に用いた荷重値と砂袋の重さは一致させてある。

表 2 は、Case 3 の実験によって得られた各模型の最大変位値を示している。また、図 12 は、表 1 の結果と実験値の比較をグラフで表したものである。表と図より、表 1 の結果と比較して、Case C の剛性が逆転しているが、その他 3 例の比較においても、ほぼ解析結果と実験結果は同様の傾向を示していることがわかる。また、実験においても、Case A の変位が最も小さくなっている。したがって、実験においても、最適位相を参考にした CFRP の貼り方が、最も有効であることが検証された。



スラブ部分  
図 8 実験模型



図 9 周辺固定台

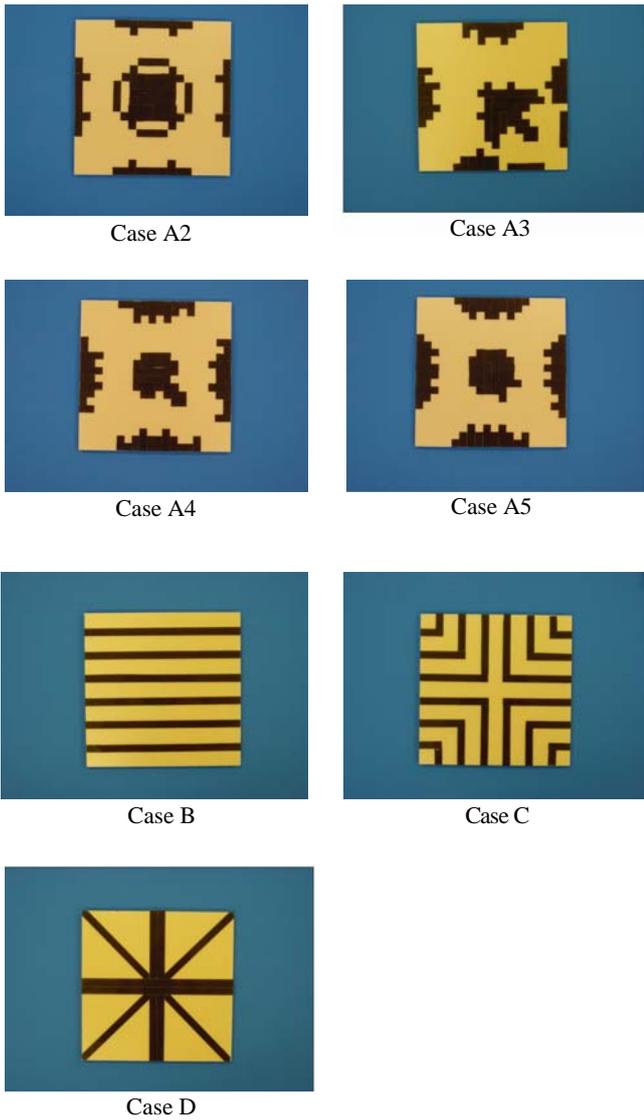


図 10 模型下面の補強の様子

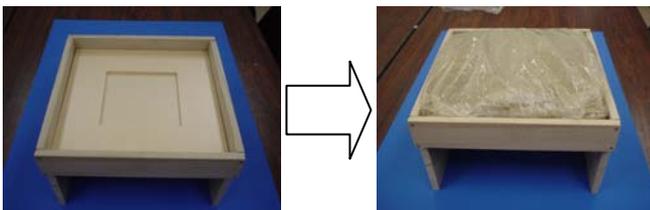


図 11 実験写真

表 2 実験による最大たわみ変位値

	Case A3	Case B	Case C	Case D
最大変位値 (mm)	3.5	4.5	4.95	3.9

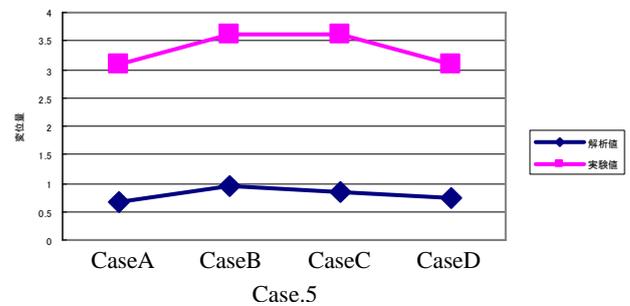
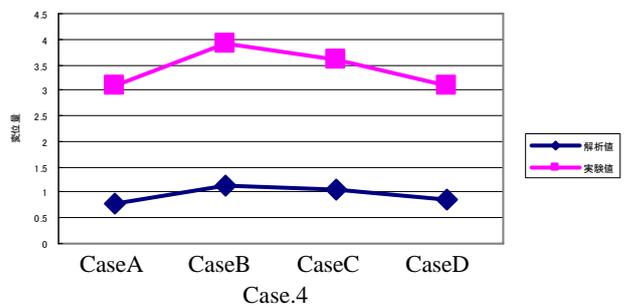
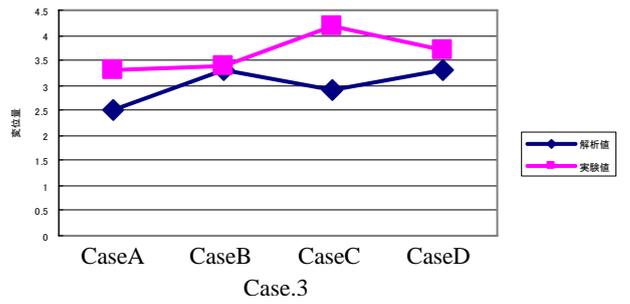
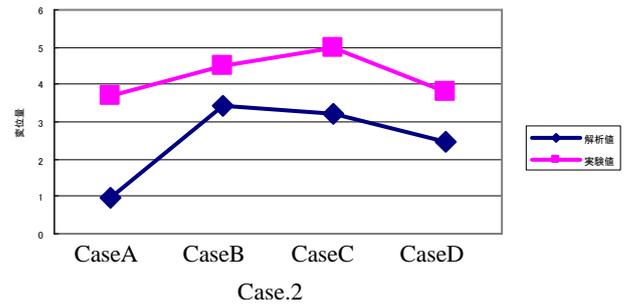


図 12 解析値と実験値の比較

#### 4. まとめ

本論文では、CFRPテープによる床スラブの耐震補強を効率よく行うために、位相最適化手法を用いてCFRPの適切な貼り付け位置を求める手法を提案した。損傷を有するスラブの補強について、解析と簡単な実験により検討した結果、損傷を有するスラブに関しても本論文で提案する手法を用いることにより、CFRPテープの最適補強レイアウトを求められることが出来、有効性が確かめられた。

#### 参考文献

- 1) 藤井大地, 小泉智彦, 森村 毅: 位相最適化手法を用いた CFRP による中空スラブの最適補強, 日本建築学会構造系論文集, 第 585 号, pp.109-114, 2004.11