床スラブのCFRP補強の効率化のための位相解析ツールの開発

DEVELOPMENT OF TOPOLOGY ANALYSIS TOOL FOR REINFORCEMENT OF FLOOR SLAB USING CFRP

藤井大地 — *1 中川恭一 — *2
森村 毅 — *3

Daiji FUJII — *1 Kyoichi NAKAGAWA — *2
Tsuyoshi MORIMURA — *3

キーワード：
床スラブ, CFRP, 位相最適化, 密度法, ソリッド要素, 補強

Keywords:
Floor slab, CFRP, Topology optimization, Density method, Solid element, Reinforcement

The topology optimization tool for reinforcement of floor slab using CFRP plates is developed. This tool is used to find an efficient layout of CFRP plates on a floor slab. The floor slab reinforced by CFRP plates is modeled by a laminate plate. The laminate plate is analyzed by FEM using solid element. The CFRP layer is separated by a necessary part and an unnecessary part using topology optimization method. The density method is adopted for the topology optimization analysis. By using such tool for the reinforcement of floor slabs, it is possible to efficient reinforcement using CFRP plates.

1. はじめに

近年, 地球環境保全のため, 既存建物をできるだけ長く使用することが必要な時代となってきた。このため, 既存建物の様々な補修工法が提案され, 実用化されている。このような補修工法の内, 床スラブなどを対象として, 炭素繊維をあらかじめ樹脂で硬化させた板(以下CFRP板と呼ぶ)をモルタル状の接着剤で貼り付けるトレカラミネート工法がある¹⁾²⁾。この工法は, 施工性に優れており, 床スラブの効率的な曲げ補強が可能である。現在この工法では, CFRP板を必要な長さ, ピッチで均等に貼ることで補修が行われているが, 貼り方を工夫することで, より少ないCFRP板で, 効率のよい補修が可能であると考えられる。

このような背景から, 森村ら³⁾は, 中空スラブを対象として, CFRP板の補強による剛性, 強度の変化を調べるための実験的研究を行っている。また, 藤井, 小泉, 森村ら⁴⁾は, CFRP板の最適な配置を位相最適化手法によって解析的に求める方法を提案し, CFRP板の貼り方の違い(配置方法)による剛性, 強度, 振動特性の違いを実験によって検討している。このような研究の結果, CFRP板を等ピッチで均等に貼るよりも, 解析的に求めた最適配置にしたがって貼る方が, 効率的に床スラブの剛性を高めることが可能であることが示された⁵⁾。

本報告では, これまでの研究を踏まえ, 床スラブのCFRP板補強に利用できる位相最適化ソフトを開発し, 本ソフトを利用して, 床スラブのCFRP板補強をどのように行えば効率的かを調査する。

本報告第2章では, CFRP板補強を行った床スラブの有限要素解析法を示し, 第3章では, CFRP板の最適配置を求めるための位相最適化解析の方法を示す。第4章では, 開発したソフトの概要を示す。第5章では, 正方形床スラブを対象として, 開発したソフトにより,

CFRP板の最適な貼り方を求め, 一般的な補強方法との比較・考察を行う。第6章では, 長方形床スラブの縦・横比の変化に対して, CFRP板の最適配置がどのように変化するかを調査する。第7章では, 段差付きスラブを対象として, 一般の補強方法と開発ソフトを利用した補強方法を比較し, 最適配置を参考にした補強方法の有効性を検討する。第8章では以上のまとめを述べる。

2. 床スラブの解析法

CFRP板補強を施した床スラブは, 積層板にモデル化し, ここでは, これを8節点ソリッド要素を用いて解析を行う⁶⁾。ただし, 通常の変位法による8節点アイソパラメトリック要素を用いると, 要素内で変位が線形に仮定されるため, 応力・歪みが要素内で一定値となる。この場合, 板厚方向に十分な分割を行わないと応力の精度が得られない。そこで, ここでは, 同じ8節点要素で, 変位も応力も両方線形関数で仮定する応力仮定法要素(ハイブリッド要素)⁷⁾を用いる。

この方法では, 要素内の変位と座標は通常のアイソパラメトリック要素と同様に次式で仮定する(図1参照)。

$$\begin{aligned} u(x, y, z) &= N(\xi, \eta, \zeta) \mathbf{u}^e & x &= N(\xi, \eta, \zeta) x^e \\ v(x, y, z) &= N(\xi, \eta, \zeta) \mathbf{v}^e & y &= N(\xi, \eta, \zeta) y^e \\ w(x, y, z) &= N(\xi, \eta, \zeta) \mathbf{w}^e & z &= N(\xi, \eta, \zeta) z^e \end{aligned} \quad (1) \quad (2)$$

ここに, u, v, w は x, y, z 方向の変位, N は形状関数, $\mathbf{u}^e, \mathbf{v}^e, \mathbf{w}^e$ と x^e, y^e, z^e は, 節点変位と座標のベクトルであり, 具体的には次のように表される。

$$N = [N_1 \ N_2 \ N_3 \ N_4 \ N_5 \ N_6 \ N_7 \ N_8] \quad (3)$$

*1 近畿大学工学部建築学科 助教授・博士(工学)
(〒739-2116 東広島市高屋うめの辺1番)

*2 近畿大学大学院 大学院生

*3 近畿大学工学部建築学科 教授・博士(工学)

*1 Assoc. Prof., School of Engineering, Kinki University, Dr. Eng.

*2 Graduate Student, Graduate School, Kinki University

*3 Prof., School of Engineering, Kinki University, Dr. Eng.

$$\begin{aligned}
 N_1 &= (1/8)(1-\xi)(1-\eta)(1-\zeta) & N_5 &= (1/8)(1-\xi)(1-\eta)(1+\zeta) \\
 N_2 &= (1/8)(1+\xi)(1-\eta)(1-\zeta) & N_6 &= (1/8)(1+\xi)(1-\eta)(1+\zeta) \\
 N_3 &= (1/8)(1+\xi)(1+\eta)(1-\zeta) & N_7 &= (1/8)(1+\xi)(1+\eta)(1+\zeta) \\
 N_4 &= (1/8)(1-\xi)(1+\eta)(1-\zeta) & N_8 &= (1/8)(1-\xi)(1+\eta)(1+\zeta)
 \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned}
 \mathbf{u}^e &= [u_1 \ u_2 \ u_3 \ u_4 \ u_5 \ u_6 \ u_7 \ u_8] & \mathbf{x}^e &= [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5 \ x_6 \ x_7 \ x_8] \\
 \mathbf{v}^e &= [v_1 \ v_2 \ v_3 \ v_4 \ v_5 \ v_6 \ v_7 \ v_8] & \mathbf{y}^e &= [y_1 \ y_2 \ y_3 \ y_4 \ y_5 \ y_6 \ y_7 \ y_8] \\
 \mathbf{w}^e &= [w_1 \ w_2 \ w_3 \ w_4 \ w_5 \ w_6 \ w_7 \ w_8] & \mathbf{z}^e &= [z_1 \ z_2 \ z_3 \ z_4 \ z_5 \ z_6 \ z_7 \ z_8]
 \end{aligned} \quad (5), (6)$$

図1 8節点アイソパラメトリック要素

また、応力も次式のように仮定する。

$$\boldsymbol{\sigma} = \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} c_{11} + c_{12}y + c_{13}z + c_{14}yz \\ c_{21} + c_{22}z + c_{23}x + c_{24}zx \\ c_{31} + c_{32}x + c_{33}y + c_{34}xy \\ c_{41} + c_{42}z \\ c_{51} + c_{52}x \\ c_{61} + c_{62}y \end{Bmatrix} = \mathbf{N}_s \mathbf{c} \quad (7)$$

ただし、 $c_{11}, \dots, c_{62}$ は未定係数を表す。

この場合、(1)式と(7)式から2つの歪みベクトル

$$(1) \text{式から得られる歪み} \quad \boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{B} \mathbf{d}^e \quad (8)$$

$$(7) \text{式から得られる歪み} \quad \boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{D}^{-1} \boldsymbol{\sigma} = \mathbf{D}^{-1} \mathbf{N}_s \mathbf{c} \quad (9)$$

が得られる。ただし、 $\boldsymbol{\varepsilon}$ は歪みベクトル、 $\mathbf{B}$ は歪み-変位マトリクス、 $\mathbf{D}$ は弾性マトリクスである。これら2つの歪みを適合させるため、次式の条件を課す。

$$\iint_{\Omega^e} \delta \boldsymbol{\sigma}^T [\mathbf{D}^{-1} \mathbf{N}_s \mathbf{c} - \mathbf{B} \mathbf{d}^e] d\Omega = 0 \quad (10)$$

ただし、 Ω^e は要素の領域を表す。

(10)式の $\boldsymbol{\sigma}$ に(7)式を代入すると次式が得られる。

$$\mathbf{c} = \mathbf{M}_s^{-1} \mathbf{M}_b \mathbf{d}^e \quad (11)$$

ただし、

$$\mathbf{M}_s = \iint_{\Omega^e} \mathbf{N}_s^T \mathbf{D}^{-1} \mathbf{N}_s d\Omega, \quad \mathbf{M}_b = \iint_{\Omega^e} \mathbf{N}_s^T \mathbf{B} d\Omega \quad (12)$$

また、(9)式より、

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{D}^{-1} \mathbf{N}_s \mathbf{M}_s^{-1} \mathbf{M}_b \mathbf{d}^e = \bar{\mathbf{B}} \mathbf{d}^e \quad (13)$$

したがって、要素剛性マトリクスは次式より得られる。

$$\mathbf{k}^e = \iint_{\Omega^e} \bar{\mathbf{B}}^T \mathbf{D} \bar{\mathbf{B}} d\Omega = \mathbf{M}_b^T \mathbf{M}_s^{-1} \mathbf{M}_b \quad (14)$$

(14)式の要素剛性マトリクスを用いる解析では、未知数は通常のアイソパラメトリック要素と同じ $\mathbf{d}^e$ となる。したがって、解析自由度は同じで、しかも、(7)式で示されるように垂直応力が座標に関して線形で仮定されるため、板厚方向に分割しなくても、通常の板曲げ要素と同等の精度が得られる。

3. CFRP板の最適配置を求めるための位相最適化解析

CFRP板の最適な貼り付け位置を求めるために、位相最適化手法を

利用する。位相最適化手法は、構造物の剛性の最大化を目的として、不必要な部分を除き、必要な部分を増やすことによって最適な形態（位相）を求める方法である。このような方法をCFRP板の最適配置を求めることに応用する。

この場合、まず、図2に示すように積層板の表面にCFRP板の厚さを有するCFRP層を設定し、CFRP板の使用重量の制約の下に、CFRP層の要素密度を最適化することで、CFRP層の最適位相を求める。すなわち、最適化問題を解くことにより、CFRP板が必要なところの要素密度は高くなり、必要でないところの要素密度は低くなる。

図2 CFRP板の最適配置を求める位相最適化問題

この場合、最適化問題の設計変数はCFRP層の要素密度、制約条件はCFRP板の使用重量となる。また、最適化の目的は、CFRP板補強によりスラブの剛性を高めることとし、目的関数を床スラブのコンプライアンス（歪みエネルギーの2倍）とし、これを最小化する。

以上の最適化問題を定式化すると次のようになる。

$$\begin{aligned}
 \min \quad & C(\mathbf{x}) = \mathbf{d}^T \mathbf{k}(\mathbf{x}) \mathbf{d} = \sum_{i=1}^n \mathbf{d}_i^T \mathbf{x}_i^p \mathbf{k}_i' \mathbf{d}_i' \\
 \text{subject to} \quad & W(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^n x_i v_i^e \leq \bar{W} \\
 & 0 \leq x_i \leq 1 \quad (i=1, \dots, n)
 \end{aligned} \quad (15)$$

ここに、 C はコンプライアンス、 $\mathbf{k}$ は全体剛性マトリクス、 $\mathbf{d}$ は節点変位ベクトル、 x_i は0以上1以下の要素密度を表す設計変数、 n は設計変数の総数、 $\mathbf{d}_i'$ 、 $\mathbf{k}_i'$ は i 番目要素の節点変位ベクトルと剛性マトリクス、 W は総重量、 v_i^e は i 番目要素の体積、 $\bar{W}$ は重量の制約値を表す。また、 p は、0と1の間の中間的な密度を防ぐためのペナルティ係数である（通常2~3で与える）。

ここでは、(15)式の最適化問題を、CONLIN法^{9),10)}によって解く。CONLIN法を用いる場合、目的関数と制約条件の設計変数に関する感度係数が必要となるが、これらは次式から計算される。

$$\frac{\partial C(\mathbf{x})}{\partial x_i} = -p x_i^{(p-1)} (\mathbf{d}_i^T \mathbf{k}_i' \mathbf{d}_i'), \quad \frac{\partial W(\mathbf{x})}{\partial x_i} = v_i^e \quad (16)$$

また、繰り返し計算の各ステップでは、設計変数に変動幅(move limit)の制約を課す必要がある。すなわち、

$$x_i^{(k-1)} - \xi \leq x_i^{(k)} \leq x_i^{(k-1)} + \xi \quad (17)$$

ここに、 k は最適化計算の繰り返しステップ、 ξ はムーブリミットを表す（通常0.1以下で与える）。

4. 位相最適化ソフトの概要

以上の理論にもとづく位相最適化ソフトを開発した。本ソフトでは、

GUI を Visual Basic を用いて独自に作成している。この GUI では、まず、図 3(a)の画面で、解析の種類を選択する。本ソフトでは、位相最適化だけでなく、CFRP 板補強を行ったスラブのたわみや応力を求める解析も行うことができる。次に、(b)に示す画面でスラブの縦・横の分割数、スラブ 4 隅の座標、境界条件、材料定数、板厚方向の分割数、各層の厚さなどの情報を入力すれば、データが自動生成され、図(c)に示すような解析モデルが得られる。次に、節点荷重を入力し、位相最適化の対象となる要素番号を指定する。次に、(d)に示す画面で、最適化解析の条件（CFRP の重量制約値、設計変数のムープリミット等）を入力する。以上で作成したデータを保存し、解析メニューで解析を実行すると、CFRP 層の最適位相が求められる。なお、解析プログラムは FORTRAN で作成し、実行形式に直している。解析が終了すると、図 3(a)の画面に戻る。次に、表示メニューにより、(e)に示すような最適位相の要素密度分布が示される。この場合、対称性を利用して 1/4 領域で解析を行っているが、xy 対称ボタンをクリックすることで、(f)に示すような全体位相も表示できる。また、本ソフトでは、(g),(h)に示すように、スラブの変位、応力分布も表示することができるようにしている。

図3 位相最適化ソフトの入出力画面

5. 正方形床スラブの補強に関する検討

ここでは、正方形床スラブを対象として、CFRP 板の最適な補強方法（配置）および補強効果を、本解析ソフトを用いて検討する。

5.1 解析モデル

図 4 は、床スラブの解析モデルを示している。解析は、1/4 領域で行い、

要素分割数は 20×20 とする。また、板厚方向は、床スラブの層と CFRP 板の層に分ける。境界条件は、周辺固定と周辺ピン支持の 2 種とし、荷重は、 10 kN/m^2 の鉛直等分布荷重とする。なお、周辺ピン支持の場合は、床スラブ層を 2 分割し、中立面の周辺節点のみを固定する。また、床スラブのヤング係数は $2.27 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ 、ポアソン比 0.25、CFRP 板のヤング係数は $1.5 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ 、ポアソン比は 0.3 とする。

図4 解析モデル

5.2 CFRP 板の配置（貼り方）に関する検討

図 5, 6 は、周辺固定、周辺ピン支持の場合で、CFRP 板の補強量を床全面に貼る場合の 10%~80%（10%間隔）とした場合の最適位相を示す（黒で示された部分が CFRP）。図より、周辺固定の場合は、周辺中央部と床中央部をバランスよく補強する必要があること、周辺ピン支持の場合は、隅角部と床中央部を補強する必要があることがわかる。

図5 正方形床スラブの CFRP 層の最適位相（周辺固定）

図6 正方形床スラブの CFRP 層の最適位相（周辺ピン）

5.3 CFRP 板の補強効果に関する検討

次に、最適位相を考慮した貼り方と従来型の等ピッチに貼る貼り方との比較を行う。なお、従来型では、テープ幅を 5cm としている。また、補強効果を検討するために、スラブの剛性を 20% 低下させたものを対象とし、どの程度の CFRP 板の補強で、元の剛性への復元が可能かを調査する。また、CFRP 板の厚さは、2, 4, 6mm とし、CFRP 板の厚さに対する効果も検討する。なお、5.2 節に示した最適位相は、CFRP 板の厚さには依存しないため、CFRP 板の配置は厚さに対しては同じにしている。

図 7, 8 は、周辺固定と周辺ピン支持の場合で、CFRP 板の補強量（床全面に貼る場合に対する面積比率）に対する床中央部のたわみ比（ δ_0 は剛性低下前の無補強床スラブの中央たわみ）の変化を示したものである。なお、図中の実線は、最適位相による値、破線は、従来型の貼り方による値を示す。図 7 より、周辺固定支持の場合、最適位相による補強では、4mm で 22%、6mm で 12% 程度の補強で元の剛性に回復できるのに対して、従来型では、4mm で 70%、6mm で 55% 程度補強しないと剛性が回復できない。また、図 8 より、周辺ピン支持の場合も、剛性回復のために、最適位相による補強では、4mm で 24%、6mm で 12% 程度に対して、従来型では、4mm で 65%、6mm で 58% 程度の補強が必要であることがわかる。また、最適位相による補強では、少ない補強量で効率のよい補強が可能であるのに対して、従来型では、50% 以上貼らないと効果が薄いこともわかる。また、2mm の CFRP 板補強では、床スラブの 20% 以上の剛性低下を回復することができないこともわかる。

図 7 CFRP 板の補強量と床中央部のたわみ比の関係（周辺固定）

図 8 CFRP 板の補強量と床中央部のたわみ比の関係（周辺ピン）

図 9, 10 は、床スラブの剛性を 10%～40% まで低下させた床スラブに関して、何%の補強量で元の剛性に回復できるかを示した図である。ただし、CFRP 板の厚さは 4mm としている。図から、最適位相による貼り方では、-10% の剛性低下で 7% の補強量、-20% で 22% の補強量、-30% で 60% の補強量、-40% 以下では、全面に補強しても元の剛性への回復ができないことがわかる。また、従来型では、-10% の剛性低下で 30% の補強量、-20% で 70% の補強量、-30% 以下では、ほぼ全面に補強を行う必要がある。

以上の結果から、最適位相による補強方法では、同じ補強量で、従来法に比較して 10～20% 程度剛性を高めることができ、また、その効果は特に補強量が少ない場合（床面積の 50% 以下）で大きいことがわかる。

図 9 床スラブの剛性低下と CFRP 板補強量の関係（周辺固定）

図 10 床スラブの剛性低下と CFRP 板補強量の関係（周辺ピン）

6. 長方形床スラブの補強に関する検討

次に、長方形の床スラブの縦横比が変化した場合の CFRP 板の配置（貼り方）について検討を行う。なお、諸定数は 5 章の解析例と同じである。

図 11 は、長方形床スラブの縦横比（アスペクト比）を 1:1, 1:1.5, 1:2, 1:3 とした場合の最適位相を示す。なお、境界条件は、周辺固定としている。図より、アスペクト比が大きくなるにしたがって、床スラブ中央部と、長辺境界中央部の補強量が増えていくことがわかる。

図 12 は、床スラブのアスペクト比と床スラブ中央部、境界長辺部、境界短辺部の CFRP 板補強比率（面積比率）の関係をグラフにしたものである。図より、床スラブ中央部の補強比率はほぼ一定で、アスペクト比が大きくなるほど、境界長辺部の補強比率が高くなり、境界短辺部の補強比率が低くなることをわかる。

図 11 アスペクト比による最適位相の変化 (volume25%)

図 12 アスペクト比と CFRP 補強率の関係 (volume25%)

7. 段差付き床スラブの補強に関する検討

次に、段差付き床スラブを対象として、CFRP 板の最適な補強方法（配置）および補強効果を、本解析ソフトを用いて検討する。

7.1 解析モデル

図 13 は、文献¹¹⁾を参考にした段差付き床スラブの解析モデルを示している。

図 13 段差付きスラブの解析モデル

解析は、1/2 領域で行い、要素分割数は 40×20 分割とする。また、板厚方向は、図に示すように、床スラブの層と CFRP 板の層で 4 層に分割する。境界条件は、周辺固定とし、荷重は、10kN/m² の鉛直等分布荷重とする。なお、床スラブおよび CFRP 板のヤング係数、ポアソン比は、5 章の解析例と同じであり、図 13 の段差部分は、段差空間部分の要素のヤング係数を小さくすることによって対応している（床スラブヤング係数の 1/50000）。

7.2 CFRP 板の配置（貼り方）に関する検討

図 14 は、CFRP 板の補強量を床全面に貼る場合の 10, 30, 50, 70% とした場合の最適位相を示す。図より、スラブ下層部分の補強は、主に段差部分の中央側に行う必要があること、スラブ上層部分の補強は、境界周辺中央部と床スラブ右側中央部付近に行う必要があることがわかる。

図 14 段差付き床スラブの CFRP 層の最適位相

7.3 CFRP 板の補強効果に関する検討

次に、最適位相を考慮した貼り方と従来型の貼り方との比較を行う。なお、従来型では、テープ幅を 5cm とし、短辺方向に等ピッチで貼るものとする。

図 15 は、CFRP 板の補強量（床全面に貼る場合に対する面積比率）に対する最大たわみの比 δ_0 は剛性低下前の無補強床スラブの最大たわみ）の変化を示したものである。なお、図中の実線は、最適位相による値、破線は、従来型の貼り方による値を示す。図 15 より、最適位相による補強

では、4mm で約 48%，6mm で 20% 程度の補強で元の剛性に回復できる。これに対して、従来型では、6mm で 65% 程度補強しないと剛性回復ができない。また、従来型では、4mm では、70% 以上の補強が必要であり、2mm では、全面に貼っても剛性が回復しないことがわかる。

図 15 CFRP 板の補強量と最大たわみ比の関係 (周辺固定)

図 16 は、床スラブの剛性を 10%～40% まで低下させた床スラブに関して、何%の補強量で元の剛性に回復できるかを示した図である。ただし、CFRP 板の厚さは 4mm としている。図から、最適位相による貼り方では、-10% の剛性低下で約 10% の補強量、-20% で 45% の補強量、-30% 以下では、全面に補強しても元の剛性への回復ができないことがわかる。また、従来型では、-10% の剛性低下で約 50% の補強量、-20% では少なくとも 70% 以上の補強量が必要であり、-30% 以下では、全面に補強しても元の剛性への回復はできないことがわかる。

以上の結果から、段差付きスラブの場合も、最適位相による補強方法では、同じ補強量で、従来法に比較して 10～20% 程度剛性を高めることができ、また、その効果は特に補強量が少ない場合 (床面積の 50% 以下) で大きいことがわかる。

図 16 床スラブの剛性低下と CFRP 板補強量の関係 (周辺固定)

8. まとめ

本報告では、床スラブの CFRP 板補強を効率よく行うための位相最適化ソフトを開発し、本ソフトを利用して、床スラブの CFRP 板補強をどのように行えばよいかを解析的に検討した。

その結果、以下のようなことが明らかになった。

- (1) 正方形床スラブの補強では、周辺固定の場合、スラブ中央部とスラブ境界部の中央部に補強が必要であり、周辺ピン支持の場合は、スラブ中央部と隅角部の補強が必要となる。
- (2) 最適位相を参考に補強した場合、従来の等ピッチで補強する場合と比較して、少ない CFRP 板で効率のよい補強が可能となる。具体的には、CFRP 板の量を同じにした場合、最適位相による補強では、従来型に比較して 10～20% 剛性を高めることができ、この効果は CFRP 板の補強量が床面積の 50% 以下の場合に特に顕著となる。
- (3) 長方形床スラブの補強では、主に床スラブ中央部と境界長辺部の補強が必要になる。また、床スラブ中央部と境界長辺部、短辺部の補強量の比は、アスペクト比が大きくなるほど長辺部の補強比率が増加し、その分、短辺部の補強比率が減少する。
- (4) 段差付きスラブに関しても、最適位相解析により、重点的に補強すべき箇所を知ることができる。また、従来型の貼り方に比較して、最適位相を参考にした貼り方では、10～20% 剛性を高めることができ、この傾向は正方形スラブの場合と同じになる。

参考文献

- 1) 木村耕三, 服部明生, 土屋好男, 炭素繊維補強材とコンクリートとの付着特性, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (C-2), pp.957-958, 1998
- 2) 木村耕三, 服部明生, 土屋好男, CFRP 成型板による RC 補強部材の長期たわみ性状, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (C-2), pp.633-634, 1999
- 3) 木村耕三, 土屋好男, 深川英明, CFRP 板による既存構造物の補強工法の開発 —振動下における接着剤の硬化, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (A-1), pp.637-638, 2001
- 4) 森村毅, 在永末徳: 鉄筋コンクリート梁・スラブの炭素繊維補強に関する研究, 日本建築学会中国支部研究報告集, 第 24 巻, pp.29-32, 2001.3
- 5) 森村毅, 在永末徳: 周辺拘束鉄筋コンクリート合成スラブの炭素繊維補強に関する研究, 日本建築学会中国支部研究報告集, 第 25 巻, pp.121-124, 2002.3
- 6) 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
- 7) 森村毅, 小泉智彦, 藤井大地, 周辺拘束中空スラブの炭素繊維補強に関する研究, 日本建築学会中国支部研究報告集, 第 27 巻, pp.361-364
- 8) 関口美奈子, 菊池昇, 混合的な有限要素剛性マトリックスの導き方に関する一考察—Clough 1960 年の論文を中心として—, 計算工学講演会論文集, 4(1), pp.131-134, 1999
- 9) C. Fleury and V. Braibant: Structural Optimization: A new dual method using mixed variables, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol.23, pp.409-428, 1986
- 10) 藤井大地, 鈴木克幸, 大坪英臣, 最適化手法 CONLIN を用いた骨組構造の位相最適化, 日本建築学会構造系論文集, No.548, 2001.10
- 11) 鴨川直昌, 岡田章郎, 魚住正志, 常松豪, 榎田聡太郎, 段差付き PRC スラブの長期たわみに関する実験的研究, 日本建築学会大会学術梗概集, pp.371-372, 2003.9

[2006年3月29日原稿受理 2006年7月27日採用決定]