

# 実建物を利用した新しいスラブ補強工法の長期性能試験

植木 理枝子\* 都祭 弘幸\*

## 要 旨

振動障害が生じているスラブやリニューアル等で荷重増になるスラブの剛性向上、たわみ解消を目的として開発した2種類のスラブ補強工法を実建物に施工し、長期載荷後の補強スラブの振動性状と各種測定値の経年変化を調査した。スラブの1次振動数、スラブ中央のたわみおよび補強部材のひずみの経年変化を検証した結果、長期積載荷重に対してはいずれの工法による補強スラブも安定した挙動を示し、補強効果がおおむね維持されていることがわかった。さらに、スラブの周辺支持状態を考慮した解析的検討により補強後スラブの1次振動数をほぼ推定できることから、補強による剛性増加の効果を簡易に評価できることがわかった。

## 1. はじめに

既存スラブのたわみ解消、剛性向上のためのスラブ補強工法として、従来、床下面への鋼板設置やH形鋼による小梁補強が一般的に行われている。しかし、これらの補強工法は、補強部材が重い、配管等がある場合には撤去・復旧作業を伴うといった施工上の問題や、建物を使いながらの補強が難しいといった難点があった。筆者らは、これら既往の工法に代わる合理的で施工性の良い工法としてPC鋼棒緊張床工法(以下、工法1)およびトラス筋接着床工法(以下、工法2)の2工法を開発し、構造実験によってその補強性能を確認している<sup>1,2)</sup>。本報では、これら2工法を実建物の既存スラブに施工し、補強の効果および長期間の載荷荷重による影響を把握するために実施した性能確認実験について報告する。

## 2. 建物およびスラブの概要

実験対象建物の外観を写真-1に示す。本建物は、築40年以上経過した地上5階建ての壁式鉄筋コンクリート造の集合住宅である。コンクリートの設計基準強度は $16.5 \text{ N/mm}^2$ であるのに対し、採取したコア(18箇所)の圧縮強度の平均値は $34.2 \text{ N/mm}^2$ であった。補強対象のスラブは、図-1に示すように内法寸法 $6,840\text{mm} \times 3,370\text{mm}$ 、設計厚 $110\text{mm}$ のスラ

ブである。補強対象スラブの諸元を表-1に示す。

補強は505号室、405号室の同一の2枚のスラブに対して



写真-1 実験対象建物の外観

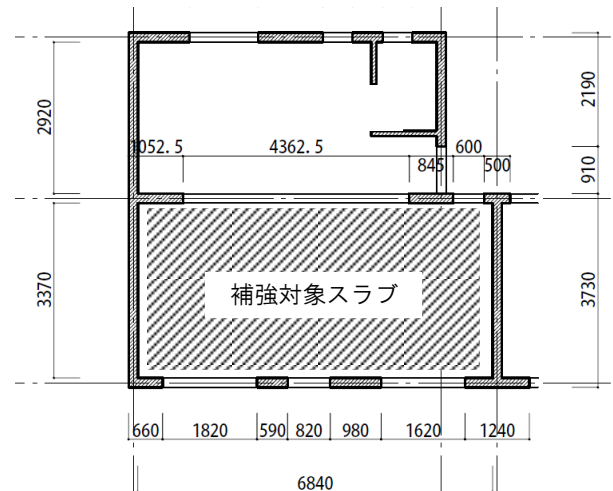


図-1 床伏図(405, 505号室共通)

表-1 実験対象スラブの諸元

コンクリート圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )		設計基準強度	16.5
		コア採取平均	34.2
鉄筋	材種	SR235	
配筋	短辺	端部	9,13 φ-200@ 9 φ-400@
		中央	- 9 φ-200@
	長辺	端部	9 φ-200@ 9 φ-400@
		中央	- 9 φ-300@

\*本社 建築エンジニアリング部

工法1および2をそれぞれ適用した。補強に先立ち、305号室の天井・間仕切り、405号室の床・天井・間仕切り、505号室の床・間仕切りの各仕上げは撤去した。

### 3. 補強工法概要

図-2および写真-2に工法1による補強ユニットの構成部材および設置状況をそれぞれ示す。補強部材は鋼製束、端部金物、PC鋼棒から構成され、各部材はボルト接合により接続されている。本工法は、下弦材または斜材のいずれかのPC鋼棒に張力を与えることにより、鋼製束に圧縮力(押し上げ力)を導入し、スラブを持ち上げる機構となっている。これにより、既存スラブと補強部材との合成効果による耐力・振動性能の改善に加え、たわみを解消して使用性を改善する効果を有している。本実験では図-3に示すように、2組の補強部材を設置し、1組あたり約30kNの張力を下弦材に導入した。

図-4および写真-3に工法2による補強ユニットの構成部材および設置状況をそれぞれ示す。補強部材はトラス筋、接着用鉄板からなり、両部材はフレア溶接により接合されている。本工法は、トラス筋と一体化された接着用鉄板をエポキシ樹脂にてスラブの下面に貼り付けることにより、スラブの剛性および耐力を増加させる工法である。トラス筋の構成要素のうちボトム筋はスラブ下面の不陸等に追従できるように切断している。本実験では、図-5に示すように8組の補強部材を設置した。

### 4. 荷重方法および測定方法

補強部材設置後、スラブに長期積載荷重を作用させるため、容量300ℓの給水タンクを各スラブ15個ずつ設置した。図-6および写真-4に給水タンクの配置および荷重状況をそれぞれ示す。約2kN/m<sup>2</sup>の積載荷重となるように、各給水

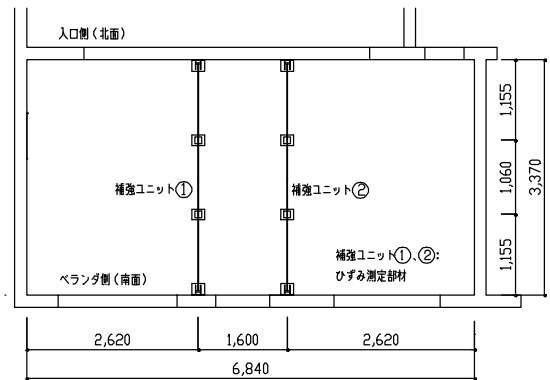


図-3 工法1補強ユニット配置(505号室)

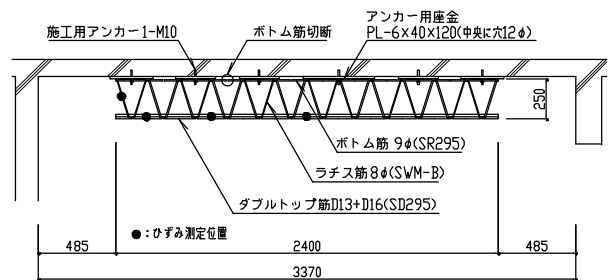


図-4 工法2補強部材

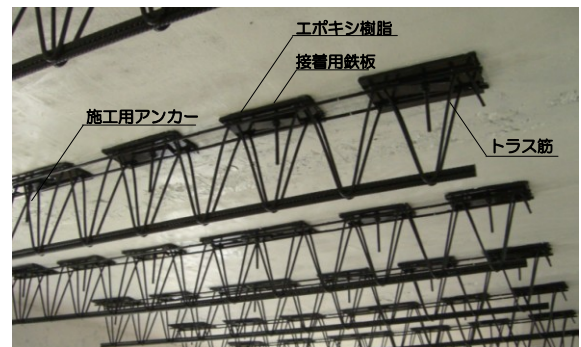


写真-3 工法2補強部材設置状況

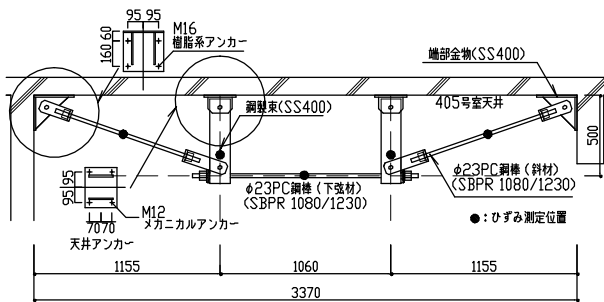


図-2 工法1補強部材

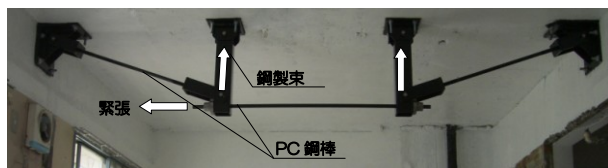


写真-2 工法1補強部材設置状況

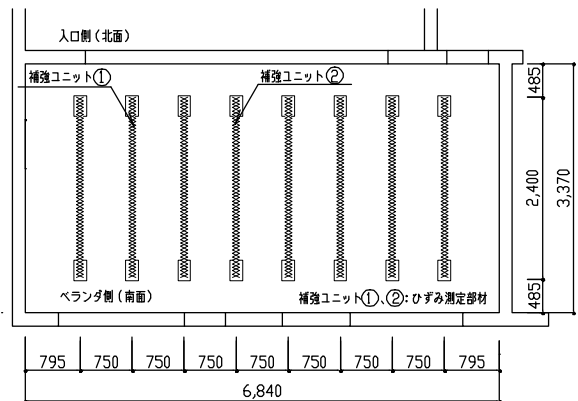


図-5 工法2補強ユニット配置(405号室)



には、実測ひずみを基に求めた初期応力を設定した。載荷荷重は給水タンク総重量(46.8kN)を、実験配置に合わせて周辺境界から500mmを除いた範囲での等分布とした。

### 5.2.2 解析結果と実測値の関係

図-7に示すように、スラブの1次振動数の実測値は周辺ピンと仮定した場合の解析結果よりも若干低い値となった。この原因としては、スラブ全面に亘るひび割れによる剛性低下や補強ユニットとスラブとの接合金具のモデル化による誤差などが考えられる。図-8に示すように、たわみの実測値は周辺ピンと仮定した場合の解析結果に近い値となった。

これより、補強後および載荷直後の1次振動数とスラブ中央のたわみは、振動測定結果より予測されるスラブの周辺固定度合い(今回ではほぼピン)を考慮した解析によってほぼ推定できると考えられる。

## 6. 工法2による補強効果

### 6.1 補強前後および載荷前後の1次振動数

図-10に補強前後および載荷後におけるタイヤ加振によるスラブの1次振動数の実測値および計算値を示す。載荷後の実測値は載荷直後の測定結果である。計算値は6.2.1項に示す式(1)によって求めた。補強前の1次振動数21.6Hzに対して、補強後(載荷前)は26.0Hz(1次振動数比で1.20倍)に上昇しており、スラブ全体の等価剛性は単純には $1.20^2=1.44$ 倍に増加したと考えられる。載荷後の1次振動数は質量増加の影響により15.1Hzに低下した。

### 6.2 解析的検討

補強前後のスラブの1次振動数、長期荷重載荷時におけるスラブ中央のたわみおよびトップ筋、ラチス筋に作用する軸力を推定するために、略算式と簡易な解析モデルを用いた検証を行った。

#### 6.2.1 補強前後のスラブの1次振動数

スラブの1次振動数はスラブ厚に比例することから、補強後の1次振動数 $f_{er}$ を式(1)によって計算した。補強後スラブの等価スラブ厚 $t_m$ は、既存スラブの端部拘束状態に関する低減率 $\eta$ と1次振動数に関する低減率 $\beta$ を考慮した補強後スラブの等価剛性から逆算される。既存スラブの剛性低下率 $\alpha$ は、スラブの周辺支持状態がピンと固定の間の状態にあると仮定し、式(2)により求めた。図-10に示すように、計算値(27.2Hz)は実測値(26.0Hz)をおおむね評価できている。

$$f_{er} = t_m / t \times f_e = (139/110) \times 21.6 = 27.2 \text{ Hz} \quad \dots\dots(1)$$

$$\alpha = (f_e - f_{vp}) / (f_{vk} - f_{vp}) = (21.6 - 16.5) / (34.1 - 16.5) = 0.29 \quad \dots\dots(2)$$

$t$  : 既存スラブ厚 (=110mm)

$t_m$  : 補強後スラブの等価スラブ厚 ( $=\sqrt[3]{(n \cdot \beta \cdot \eta) \cdot t}$ )

$n$  : 補強部材による剛性増加率 (=4.03)

$\beta$  : 1次振動数に関する低減率 (定数=0.7)

$\eta$  : 周辺支持状態による低減率 (=1- $\alpha$ =0.71)

$\alpha$  : 既存スラブの周辺支持部の剛性低下率

$f_e$  : 既存スラブの1次振動数 (計測値=21.6Hz)

$f_{vp}$  : 周辺ピンと仮定したときの1次振動数 (計算値=16.5)

$f_{vk}$  : 周辺固定と仮定したときの1次振動数 (計算値=34.1)

### 6.2.2 載荷時のスラブのたわみ

長期荷重載荷時のスラブ中央のたわみは式(2)により算出される既存スラブの周辺支持条件を考慮した式(3)から求めた。なお、スラブの周辺支持状態をピンと仮定したときのたわみ計算値( $\delta_p$ )および周辺固定支持と仮定したときのたわみ計算値( $\delta_k$ )は、任意形平面応力解析モデルを用いて求めた。解析モデルは図-11に示すように、既存スラブを補強部材の支配幅相当の一方版として線材に置換し、トップ筋およびラチス筋をスラブ厚さ $\times 1/2$ 離れたスラブ下面に配置したものである。スラブの剛性低下率を考慮して求めた式(3)の計算値(0.70mm)は実測値(0.51mm)をやや大きめに評価している。

$$\delta = \delta_k + \eta \times (\delta_p - \delta_k) = 0.24 + 0.71 \times (0.89 - 0.24) = 0.70 \quad \dots\dots(3)$$

$\delta_p$  : 周辺ピンと仮定したときのたわみ (計算値=0.89)

$\delta_k$  : 周辺固定と仮定したときのたわみ (計算値=0.24)

### 6.2.3 載荷時のトップ筋およびラチス筋の軸力

長期荷重載荷に伴い生じる軸力に関して、トップ筋(計測点①、②、③)およびラチス筋(計測点④)の実測値と計算値との比較を図-12に示す。

実測値は補強部材に貼付したひずみゲージの計測値から求めた。計算値は前項に示した任意形平面応力解析モデル

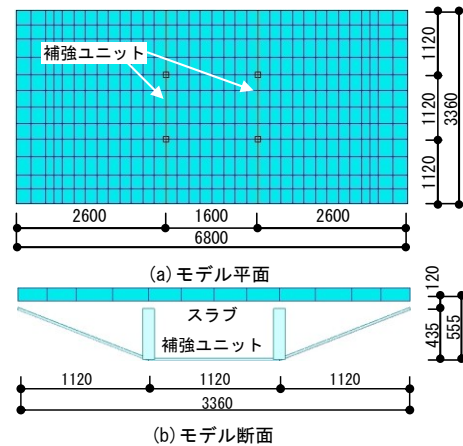


図-9 解析モデル(工法1)

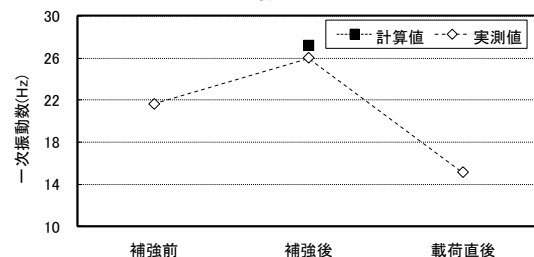


図-10 1次振動数(工法2)

を用いて算出した。なお、解析モデルのスラブの周辺支持状態は周辺ピン、周辺固定、およびスラブ中央のたわみが実測値と等しくなるように周辺支持状態のバネ値を調整した場合(図-12の「解析バネ値調整」)の3通りの仮定に基づき解析を行った。図-12より補強部材に生じる軸力はスラブ周辺支持部のバネ値を調整して求めた計算値とほぼ一致し、周辺ピンと仮定して計算することによってほぼ安全側に評価できることがわかった。

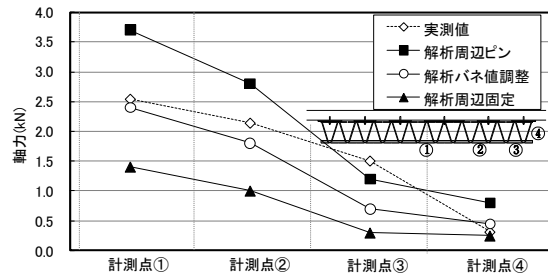


図-12 補強部材の軸力(工法2)

## 7. 長期性状

### 7.1 スラブのひび割れ状況

図-13および図-14に505号室(工法1)および405号室(工法2)のスラブ上面のひび割れ状況をそれぞれ示す。いずれのスラブも既存のひび割れは短辺方向に平行でスラブ全断面に及ぶ収縮ひびわれが多く認められたが、構造上有害ではないひび割れ幅であった。

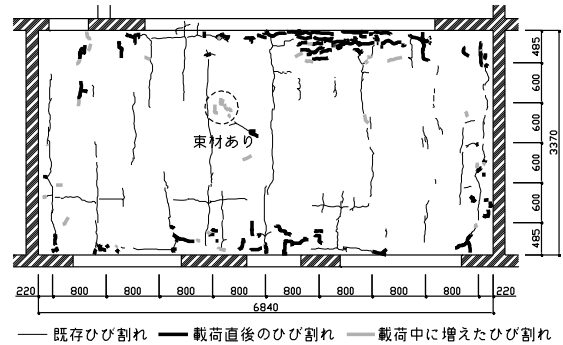


図-13 スラブ上面のひび割れ状況(工法1)

載荷に伴って発生したひび割れは、主にスラブ上面で観察され、周辺の梁に沿ったヘアクラック程度のものが多かった。スラブ下面ではほとんどひび割れは発生しなかった。このひび割れ状況はいずれのスラブにおいても共通しており、補強部材をスラブ下面に設置していることにより図心の位置が下がっているためであると考えられる。505号室のスラブ上面では束材4ヶ所のうち1ヶ所で、載荷による突き上げ力増加の影響とみられる微小幅のひび割れが生じた。また、いずれのスラブにおいても長期載荷中に新たに発生したひび割れはほとんど見られなかった。

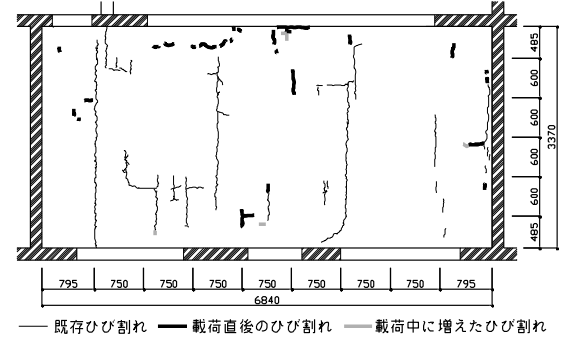


図-14 スラブ上面のひび割れ状況(工法2)

### 7.2 スラブの1次振動数

図-15および図-16に505号室(工法1)および405号室(工法2)の長期載荷中の1次振動数の推移を、振動測定時のスラブ温度と併せてそれぞれ示す。

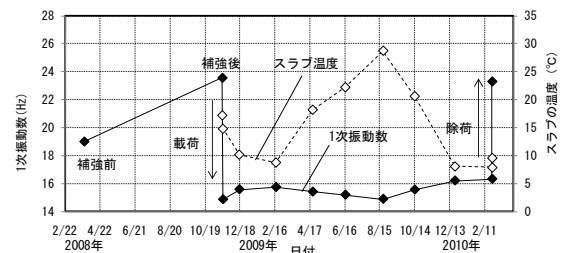


図-15 1次振動数の推移(工法1)

いずれのスラブも載荷後の1次振動数は14~17Hzの範囲で変動が大きく、スラブ温度に対して逆相関を示している。振動数の温度依存性には、躯体および補強部材の温度伸縮によるスラブ面内張力変化、材料ヤング率の温度依存に加えて、面内張力変化に伴うひび割れ開閉で断面性能が変化することが考えられる。除荷後の1次振動数はいずれのスラブにおいても補強後載荷前の状態に復帰している。

### 7.3 スラブのたわみ

図-17および図-18に505号室(工法1)および405号室

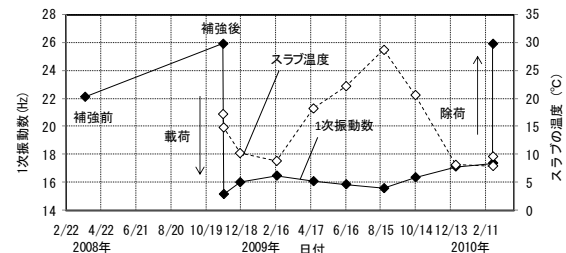


図-16 1次振動数の推移(工法2)

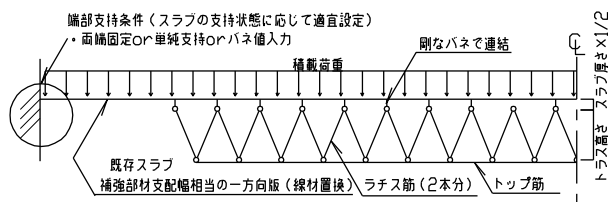


図-11 解析モデル(工法2)

(工法 2)のスラブ中央のたわみの推移を、載荷直後を基準(たわみ=0)としてスラブ温度とともにそれぞれ示す。いずれのスラブにおいても、たわみは 1~2日程度の短期間では温度に対して正相関の傾向がみられるが、測定期間全体を通しての相関は認められなかった。スラブ自体の長期たわみは経年によって収束していると考えられ、補強部材のリラクゼーションやアンカー部の抜け出し等による補強効果の低下はほとんどないと考えられる。

#### 7.4 補強部材のひずみ

図-19および図-20に 505 号室(工法 1)の補強ユニット①(図-3参照)および 405 号室(工法2)の補強ユニット②(図-5参照)の各部のひずみの推移を載荷直後を基準(ひずみ=0)として室温とともにそれぞれ示す。正側が引張ひずみを表す。データは各日深夜 2 時のデータを抽出している。

工法 1 の補強部材各部のひずみは短期および長期の温度に依存しており、束材では $\pm 15 \mu$ ( $\pm 6.7 \text{kN}$ )程度、PC 鋼棒の斜材および下弦材は  $0 \sim -35 \mu$ ( $0 \sim -3.0 \text{kN}$ )程度で変動している。PC 鋼棒は載荷初期に比べて $-10 \mu$ ( $-0.9 \text{kN}$ )を中心にした変動であり、ひび割れなどによる張力減退はほとんど生じていない。

工法 2 においては、補強ユニット①および補強ユニット②(図-5参照)のひずみは同程度であることから、補強部材の配置範囲においては、スラブはほぼ一方版としての応力状態にあったと考えられる。ひずみは計測点①~④(図-12参照)のいずれにおいてもほぼ同様の変動であったため、図-20には補強ユニット②のトップ筋中央ひずみ(計測点①)およびラチス筋ひずみ(計測点④)を示す。トップ筋は載荷に伴う  $20 \mu \sim 40 \mu$ ( $1.3 \text{kN} \sim 2.7 \text{kN}$ )程度の引張ひずみが生じた後は、 $\pm 20 \mu$ ( $\pm 1.3 \text{kN}$ )程度の変動が認められた。ラチス筋は載荷に伴う  $30 \mu$ ( $0.3 \text{kN}$ )程度の引張ひずみが生じた後は、 $\pm 20 \mu$ ( $0.2 \text{kN}$ )程度の変動が認められた。ひずみの変動は温度の影響によって生じていると考えられ、長期、短期ともに正相関がみられる。

#### 8. まとめ

新しいスラブ補強 2 工法による補強を施したスラブの振動測定を行い、スラブの剛性増加の効果を確認できた。長期積載荷重に対しては、いずれの補強工法も安定した挙動を示し、補強効果は長期的に維持されていると考えられる。また、スラブの周辺支持状態を考慮した推定式および解析によって求めた 1 次振動数およびスラブのたわみの計算値は実験値とほぼ一致しており、計算により補強効果がおおむね評価できることを確認した。

#### 【参考文献】

1) 村田義行他:鋼製束と PC 鋼棒を用いたスラブ補強工法

の開発その1~4,日本建築学会大会(関東)学術講演梗概集 C-2,pp.195~200,2006,日本建築学会大会(九州)学術講演梗概集 C-2,pp.159~160,2007

2) 加藤広宣他:トラス筋を用いたスラブ補強工法の開発その1~2,日本建築学会大会(関東)学術講演梗概集 C-2,pp.155~158,2007

#### 【謝辞】

本研究は、当社を含む計 6 社(五洋建設、鴻池組、銭高組、大日本土木、飛鳥建設、都市再生機構)の共同研究により実施したものです。関係者各位に深く感謝いたします。

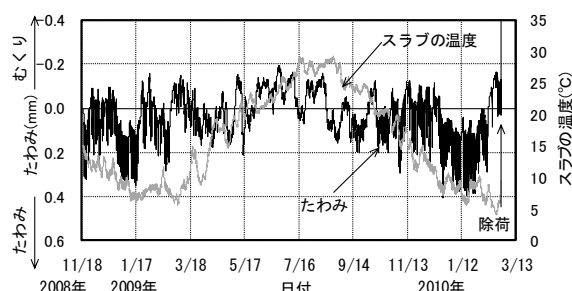


図-17 スラブ中央たわみの推移(工法1)

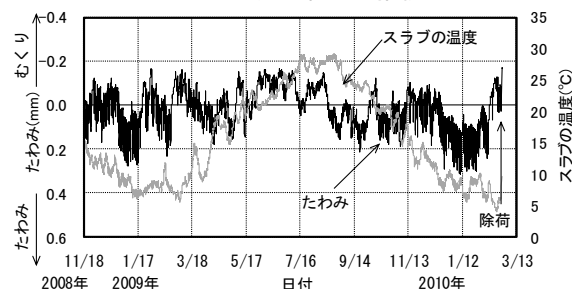


図-18 スラブ中央のたわみの推移(工法2)

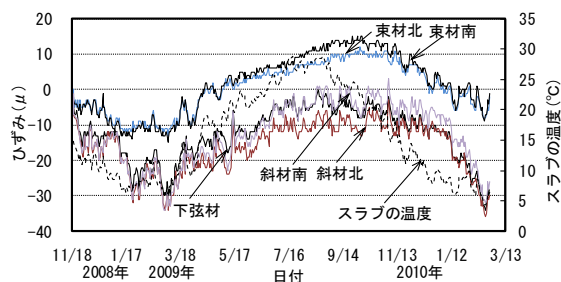


図-19 補強部材のひずみの推移(工法1)

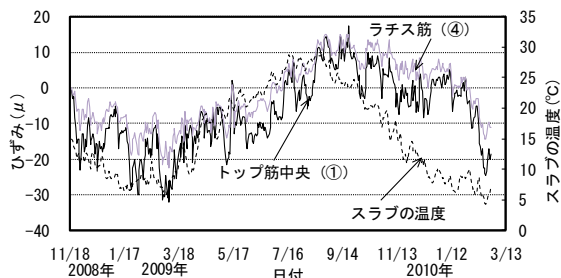


図-20 補強部材のひずみの推移(工法2)