

実建物におけるスラブ補強工法の性能確認実験

Verification Tests on Slab Strengthening Methods Using an Actual Building

櫻井 臣 央^{※1}
Tamio Sakurai

土屋 芳 弘^{※2}
Yoshihiro Tsuchiya

【要旨】

前報では、既往のスラブ補強工法の施工性が悪い等の問題点を改善し、補強部材がコンパクトで施工性に優れた「トラス筋接着床補強工法」と「PC 鋼棒緊張床補強工法」の2つのスラブ補強工法の開発し、その際に一方向版スラブで構造実験を行って補強効果を確認したことを報告した。

本報では、実建物の既存スラブに上記2工法を施工し、四辺固定スラブでの補強効果や、長期載荷による影響を把握するために性能確認実験を実施したので、ここにその概要を報告する。

【キーワード】 スラブ補強, トラス筋, PC 鋼棒, 振動計測, 長期載荷実験

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が、これら既往の工法に代わる合理的で施工性の良いスラブの補強工法として「トラス筋接着床補強工法」および「PC鋼棒緊張床補強工法」の2工法を開発した。開発の際には、補強効果を確認し、設計に必要な各種構造的性状を把握するために一方向版スラブで構造実験を行った。

本報では、上記2工法を実建物の既存スラブに施工し、四辺固定スラブでの補強効果や、長期間の積載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。



写真-1 実験対象建物の外観

2. 建物および床スラブの概要

実験対象建物の外観写真を写真-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 16.5N/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 34.2N/mm^2 であった。

補強対象スラブの内法寸法は図-1に示すように $6,840\text{mm}\times 3,370\text{mm}$ で、設計スラブ厚は 110mm である。補強対象スラブの配筋を表-1に示す。鉄筋の材種はSR235である。

405号室と505号室の同一の2枚の床スラブに対し、それぞれ「トラス筋接着床補強工法」と「PC鋼棒緊張床補強工法」の2種類のスラブ補強工法で補強した。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て、振動計測やスラブのたわみ測定に対して仕上げ材が関与しないようにスラブを構造体だけのスケルトンの状態にした。

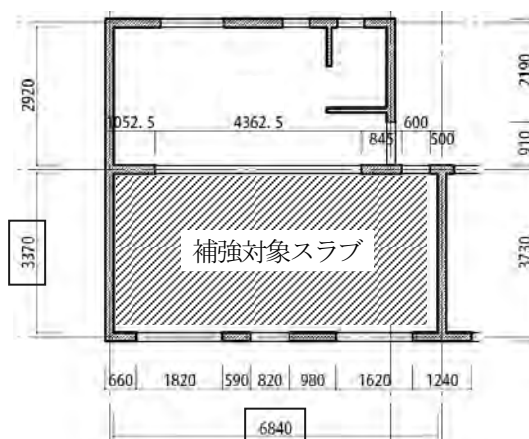


図-1 床伏図 (405, 505号室共通)

表-1 補強対象スラブの配筋

	短辺		長辺	
	端部	中央	端部	中央
上端筋	9, 13 ϕ @200	—	9 ϕ @200	—
下端筋	9 ϕ @400	9 ϕ @200	9 ϕ @400	9 ϕ @300

3. 補強工法概要

トラス筋接着床補強工法は、写真-2や図-2に示すように、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、その補強部材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既存スラブと一体化させ、スラブの剛性および耐力を増加させる工法である。トラス筋のボトム筋について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-3に示すように405号室床下面に8組の補強部材を設置した。



写真-2 補強部材取付状況 (トラス筋)

PC 鋼棒緊張床補強工法は、写真-3や図-4に示すように、鋼製束、端部金物、PC 鋼棒からなり、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で、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、合成効果による耐力・振動性能の改善に加え、たわみ解消による使用性を改善する効果を有している。本実験では、図-5に示すように505号室床下面に2組の補強部材を設置し、PC 鋼棒の導入張力は30kNとした。



写真-3 補強部材取付状況 (PC 鋼棒)

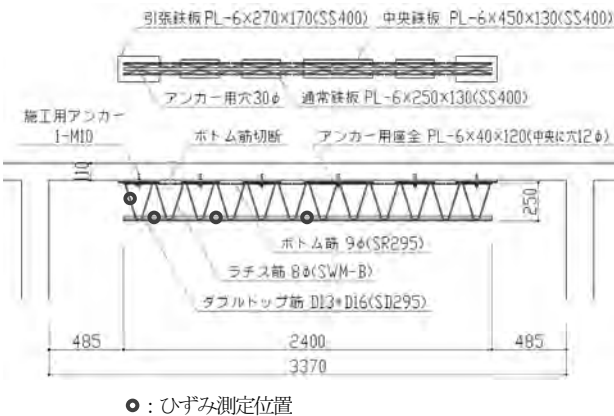


図-2 補強部材およびひずみ測定位置 (トラス筋)

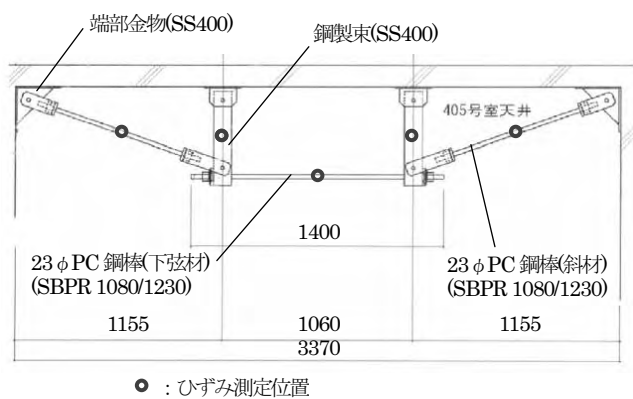


図-4 補強部材およびひずみ測定位置 (PC 鋼棒)

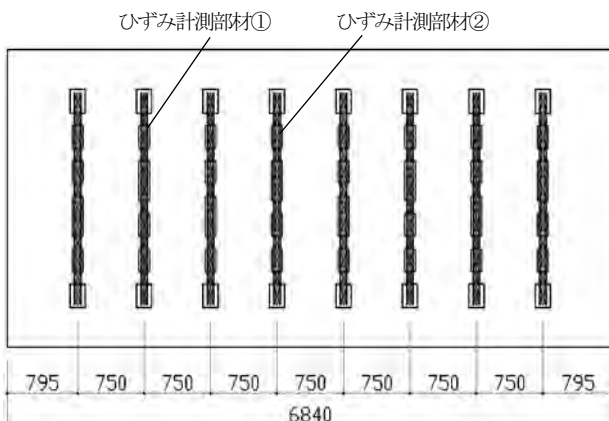


図-3 補強部材配置図 (トラス筋)

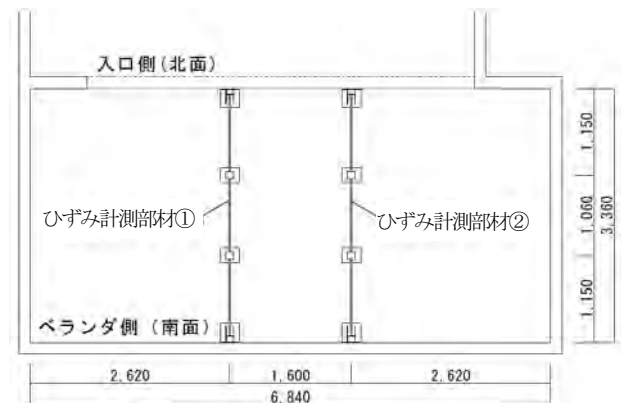


図-5 補強部材配置図 (PC 鋼棒)

4. 載荷方法および測定方法

補強部材設置後、図-6に示すように、容量300ℓの給水タンクを405号室および505号室の床に各15個設置し、各300ℓ注水した。積載荷重としては約2kN/m²に相当する。給水タンクによる載荷状況を写真-4に示す。

図-2～図-5にひずみ測定位置、図-6に変位測定位置を併せて示す。測定は、405号室室温、405号室床表面温度を熱電対で、405号室および505号室の床中央部の変位を電気式変位計で、補強部材のひずみをひずみゲージで、2008年11月から2010年2月までの約15ヶ月間、1時間間隔で自動計測した。

また、スラブの振動測定を、仕上げ材撤去後、補強部材設置前に1回、補強部材設置後、積載荷重載荷前に1回、積載荷重載荷後、約2ヶ月毎に9回、積載荷重除荷後に1回、計12回実施し、振動性状の経年変化を確認した。

振動計測は、重量約165Nの古タイヤを約300mmの高さから自由落下させ、圧電型加速度計(3箇所)の応答波形をデータレコーダーに記録した。図-6に加振点、加速度計設置位置を併せて示す。

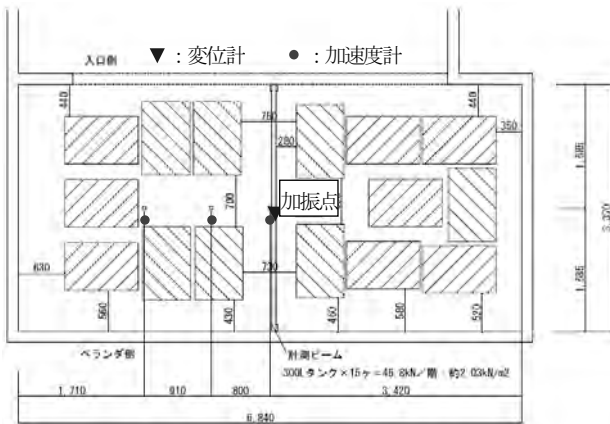


図-6 タンク配置、変位、振動計測位置図



写真-4 給水タンクによる載荷状況

5. トラス筋接着床補強工法の結果

5.1 補強前後および載荷後の1次振動数

図-7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。計算値は5.2の(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(1.00)に対して、補強後(載荷前)は26.0Hz(1.20)に上昇しており、スラブ全体の等価剛性は単純には1.202=1.44倍に増加したと考えられる。載荷に伴い1次振動数は15.1Hzに低下しており、質量増加の影響であると考えられる。

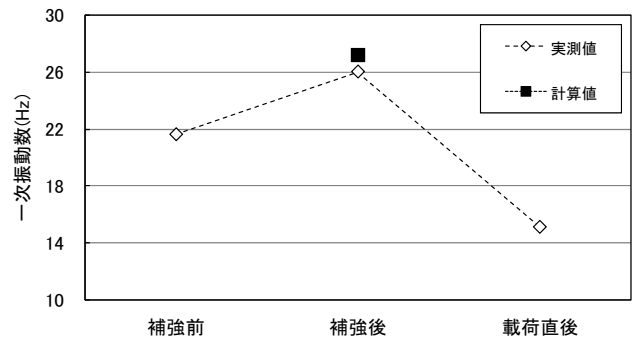


図-7 1次固有振動数(トラス筋)

5.2 解析的検討

補強前後のスラブの1次振動数、載荷時におけるスラブ中央のたわみおよびトラス筋、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による検証を行った。

(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_{cr} 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 η と1次振動数に関する低減率 β 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 α は、スラブの周辺支持状態がピンと固定の間であると仮定し、式(2)により求めた。図-7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。

$$f_{cr} = t_m / t \times f_c$$

$$= (138.7 / 110) \times 21.6 = 27.2 \text{ Hz} \dots\dots\dots (1)$$

$$\alpha = (f_c - f_{ip}) / (f_{ik} - f_{ip})$$

$$= (21.6 - 16.5) / (34.1 - 16.5) = 0.29 \dots\dots\dots (2)$$

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)

β : 1次振動数に関する低減率 (定数=0.7)

- η : 周辺支持状態による低減率 (=1- α =0.71)
- α : 既存スラブの周辺支持部の剛性低下率
- f_c : 既存スラブの振動数 (計測値=21.6Hz)
- f_{p} : 周辺ピンと仮定したときの振動数 (計算値=16.5)
- f_{k} : 周辺固定と仮定したときの振動数 (計算値=34.1)

(2) 載荷時のスラブのたわみ

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したときのたわみ計算値 (δ_p) および周辺固定支持と仮定したときのたわみ計算値 (δ_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-8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×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。

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

- δ_k : 周辺固定と仮定したときのたわみ (計算値=0.24)
- δ_p : 周辺ピンと仮定したときのたわみ (計算値=0.89)

(3) 載荷時のトップ筋およびラチス筋の軸力

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-9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。計算値は図-8に示す任意形平面応力解析モデルを用いて算出した。なお、解析モデルのスラブの周辺支持条件は周辺ピン, 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-9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-9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、周辺ピンに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。

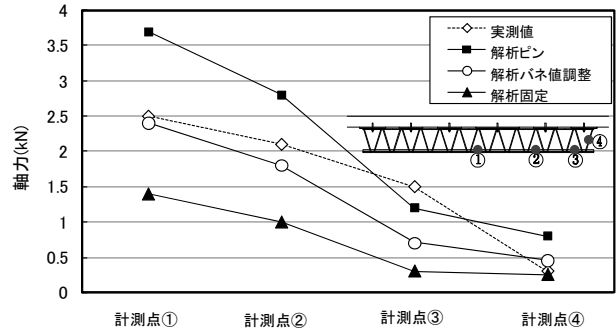


図-9 補強部材の軸力 (トラス筋)

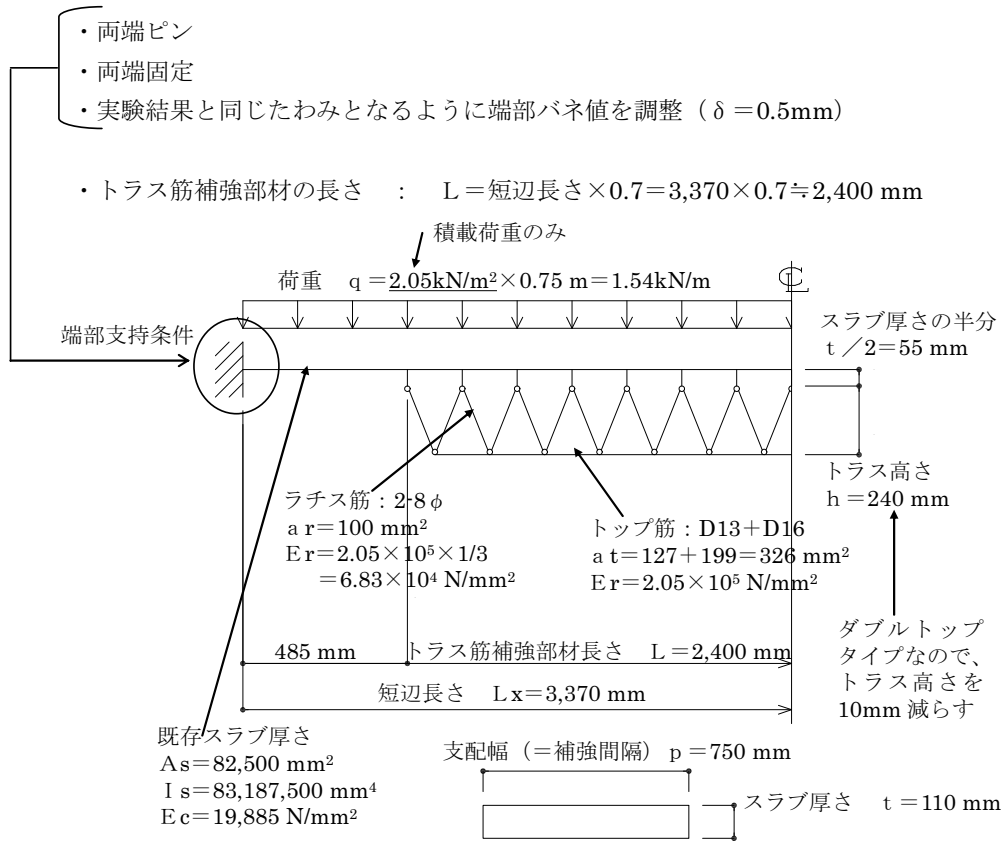
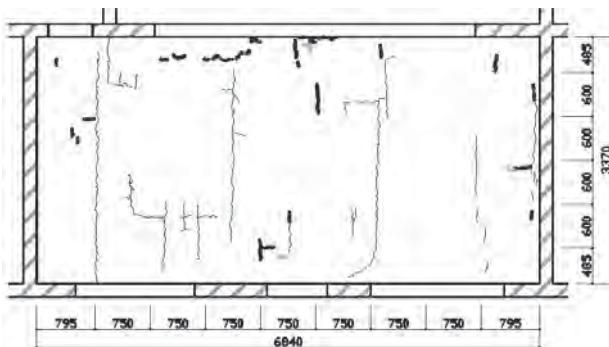


図-8 解析モデル (トラス筋)

5.3 長期性状

(1) スラブのひび割れ状況

図-10にスラブのひび割れ状況を示す。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割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。载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。これは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。長期载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。



— : 既存ひび割れ - - - : 長期载荷中に増えたひび割れ
 — : 载荷直後のひび割れ

図-10 スラブ上面のひび割れ状況 (トラス筋)

(2) スラブの1次振動数

長期载荷中の1次振動数の推移を、振動測定時のスラブの温度とともに図-11に示す。1次振動数は15~17Hzの範囲で変動しており、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性に加えて、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次振動数は载荷前にほぼ復帰している。

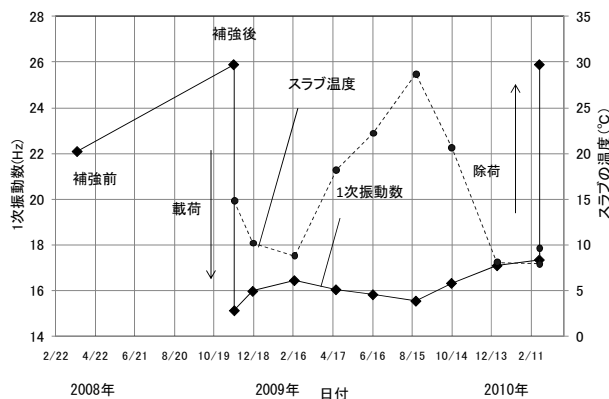


図-11 1次振動数の推移 (トラス筋)

(3) スラブのたわみ

载荷直後を0としたスラブ中央のたわみの推移をスラブの温度とともに図-12に示す。载荷に伴う0.5mm程度のたわみが生じた後は、温度による影響を受けて±0.2mm程度の幅で変動している。温度依存の傾向は短期間においては、正相関となっているが、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、補強効果の低下も認められなかった。

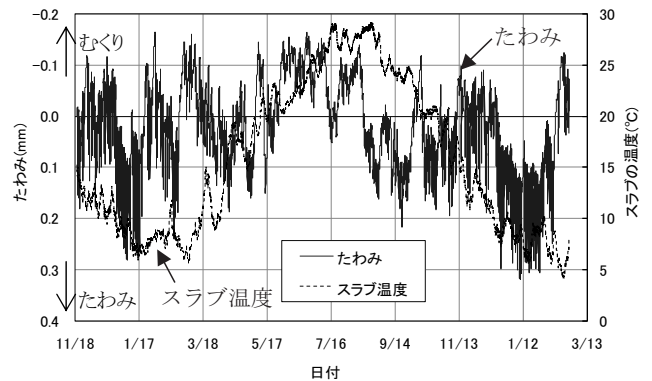


図-12 スラブ中央のたわみの推移 (トラス筋)

(4) 補強部材のひずみ

図-13に载荷直後を0とした補強部材のひずみの推移を室温とともに示す。正側が引張ひずみを表す。図-13に示す2つのひずみ計測部材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、スラブはほぼ一方向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-9参照) のいずれにおいてもほぼ同様の変動であったため、図-13にはひずみ計測部材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。トップ筋は载荷に伴う20 μ ~40 μ (1.3kN~2.7kN) 程度の引張ひずみが生じた後は、±20 μ (±1.3kN) 程度の変動が認められた。ラチス筋は载荷に伴う30 μ (0.3kN) 程度の引張ひずみが生じた後は、±20 μ (0.2kN) 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。

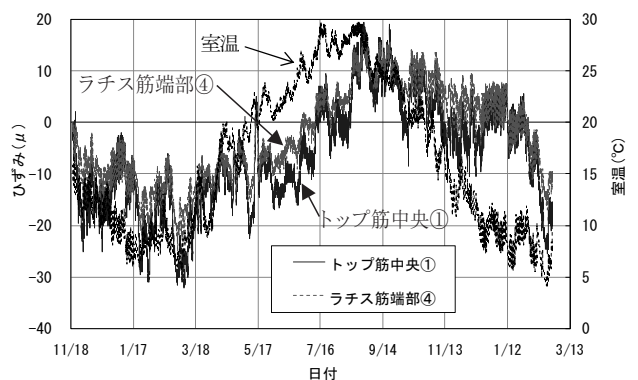


図-13 補強部材のひずみの推移 (トラス筋)

6. PC鋼棒緊張床補強工法の結果

6.1 補強前後および載荷後の1次振動数

(1) スラブの1次振動数

補強前後と給水タンクによる載荷前後のタイヤ加振による1次振動数を図-14に示す。図より、補強前の1次振動数19.00Hz(1.00)に対して、補強後・載荷前(以下、補強後と称す)は23.75Hz(1.25)に上昇しており、スラブ全体の等価剛性は単純には $1.25^2 \approx 1.5$ 倍に増加したと考えられる。載荷に伴い1次振動数は14.88Hzに低下しており、質量増加の影響であると考えられる。

(2) スラブのたわみ

補強前後と載荷前後のスラブ中央のたわみを図-15に示す。目視にて既存床にはたわみが無いと判断したので、補強時の張力導入は補強ユニットにゆるみが起きない程度とした。図より、スラブ中央は約1.5mmむくり上がり、載荷によって約0.7mm沈下した。これらのたわみの大きさはスパンに対して1/3000程度であり、スラブの弾性範囲に十分収まっているといえる。

6.2 解析的検討

(1) 解析方法

補強前後および載荷前後のスラブおよび補強部材の実測挙動を解析と比較した。解析にはFEMを用い、スラブ周辺境界の固定度合いをベースとした設計法との対応

を確認するため、境界条件を周辺固定および周辺ピンの2通りとし、図-16に示すようにモデル化した。

スラブ($t=110\text{mm}$, $E_c=25,510\text{N/mm}^2$, 圧縮強度より算定)を薄板要素, 補強部材(PC鋼棒: $\phi 23\text{mm}$, 束材: $\square 100 \times 100 \times 6\text{mm}$, $E_s=205,000\text{N/mm}^2$, 定数)をトラス要素とし, スラブ厚芯と補強ユニット間のオフセット距離を剛体連結要素とした。束材圧縮力には, 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(6.8kN)を, 実験配置に合わせて周辺境界から500mmの範囲を除いた範囲での等分布とした。

(2) 解析結果と実測の関係

解析結果のうち, 図-14に各状態の1次振動数を, 図-15にスラブ中央たわみをそれぞれ実測値と合わせて示す。これらの図より, 実測値は1次振動数およびたわみともに周辺ピンでの解析結果に近いことがわかる。周辺ピンの結果よりも実測振動数の方が若干下回っているのは, 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などに起因すると考えられる。

本結果より, 補強後および載荷後の実測値は1次振動数およびたわみ共に, 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)を考慮した解析でほぼ推定できると考えられる。

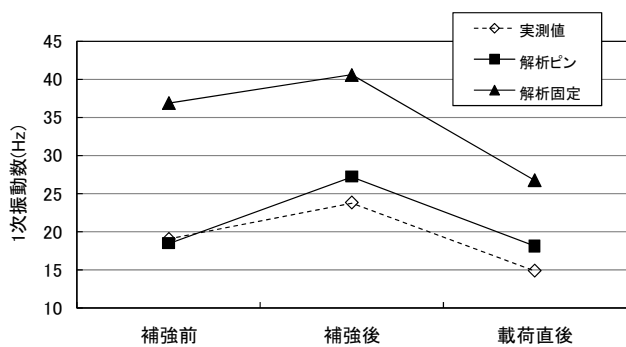


図-14 1次固有振動数 (PC 鋼棒)

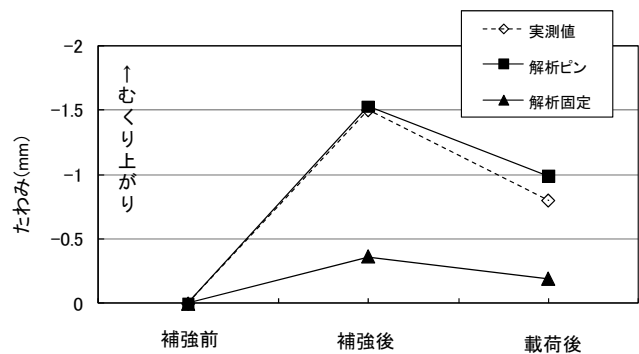
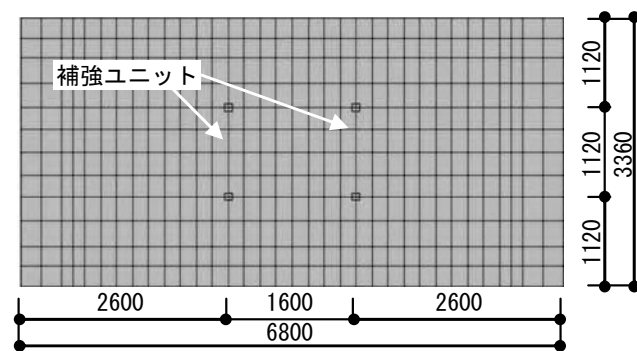
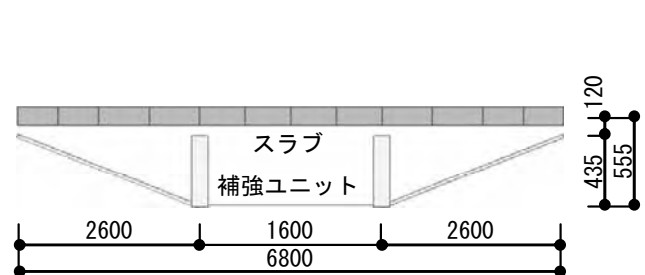


図-15 スラブ中央のたわみ (PC 鋼棒)



(a) モデル平面



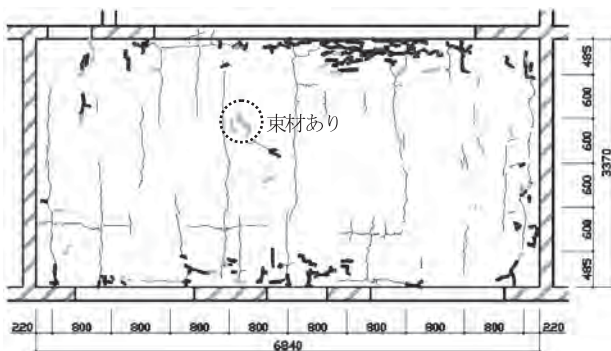
(b) モデル断面

図-16 解析モデル (PC 鋼棒)

6.3 長期性状

(1) スラブのひび割れ状況

既存のひび割れを含め、載荷前後のスラブ上面のひび割れ分布を図-17に示す。既存のひび割れは短辺に平行でスラブ全断面に及ぶ収縮ひび割れが多いが、構造上有害ではないひび割れ幅であった。載荷直後には周辺梁に沿った多数のひび割れが発生したが、いずれもひび割れ幅はヘアクラック程度であった。長期載荷によりヘアクラックはわずかながら増加・進展した。また、束材4ヶ所のうち1ヶ所にも、載荷による突き上げ力増加によるとみられる微小幅のひび割れが生じた。なお、スラブ下面にはひび割れはほぼ生じていない。スラブ上面のみにひび割れが生じたことは、下面側での補強によりスラブ全体での図心位置が下がったためと考えられる。



— : 既存ひび割れ - - - : 載荷直後のひび割れ
 - - - : 長期載荷中に増えたひび割れ

図-17 スラブ上面のひび割れ状況 (PC 鋼棒)

(2) スラブの1次振動数

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合わせて図-18に示す。図より、1次振動数は14~17Hzの範囲で変動しており、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それぞれ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

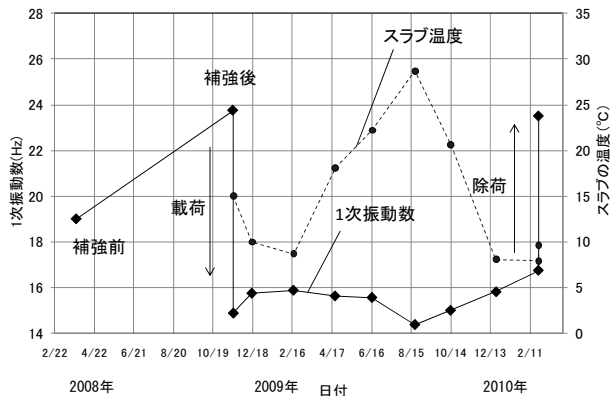


図-18 1次振動数の推移 (PC 鋼棒)

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。なお、除荷後の1次振動数は載荷前にはほぼ復帰している。

(3) スラブのたわみ

長期載荷中のスラブ中央たわみの推移を、載荷直後を基準(たわみ=0)としてスラブ温度とともに図-19に示す。たわみ変動には1~2日での短期での温度との相関は認められたが、1年という長期間での温度と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減は認められなかった。

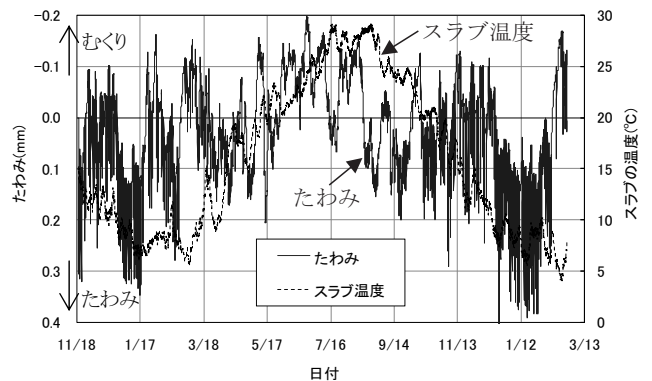


図-19 スラブ中央のたわみ (PC 鋼棒)

(4) 補強部材のひずみ

ひずみ計測部材①(図-5参照)の各部位のひずみの推移を載荷直後を0として室温とともに図-20に示す。正側が引張ひずみを表す。

各部位のひずみは短期・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 鋼棒の水平材0~-35 μ (0~-3.0kN)程度で変動している。斜材のひずみの推移は水平材とほぼ同じような変動を示していた。PC 鋼棒は載荷初期より-10 μ (-0.9kN)を中心にした変動を示しており、ひび割れなどによる張力減退は生じていないと考えられる。

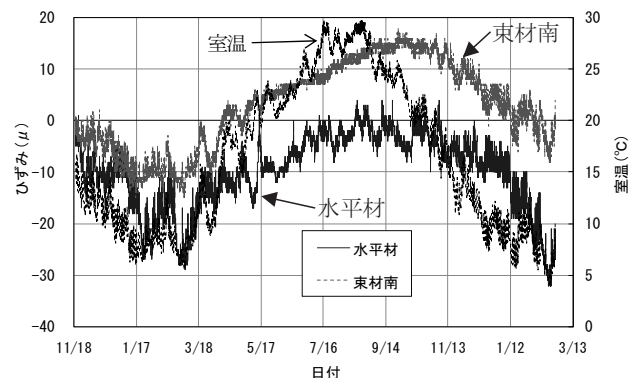


図-20 補強部材のひずみの推移 (PC 鋼棒)

7. まとめ

「トラス筋接着床補強工法」と「PC 鋼棒緊張床補強工法」を実建物の四辺固定スラブに施工し、各種計測や解析を行い、いずれの補強工法とも以下が確認された。

- 1) スラブの振動測定を行い、補強による剛性増加の効果を確認できた
- 2) 長期载荷に対し、安定した挙動を示し、補強効果は長期的に維持されていた。
- 3) スラブの周辺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をおおむね評価できる。

謝辞：本開発は、当社を含む計6社（鴻池組，五洋建設，銭高組，大日本土木，都市再生機構，飛島建設）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致します。

【参考文献】

- 1) 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(九州)学術講演梗概集C-2, pp.155～158, 2007
- 2) 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1～2，日本建築学会大会(関東)学術講演梗概集C-2, pp.195～198, 2006
- 3) 加藤広宣他：実建物に施工したスラブ補強工法の性能確認実験その1～3，日本建築学会大会(北陸)学術講演梗概集C-2, pp.671～676, 2010

Summary : The preceding paper described that a “method for reinforcing the floor by attaching truss reinforcing bars” and another “method for reinforcing the floor by tensioning pre-stressing steel”, both of which require compact reinforcing members and can be implemented easily, were developed to solve the problems involved in existing slab reinforcing methods such as poor construction; and that structural tests were conducted using one-way slabs to verify the reinforcing effect.

Keyword : *Slab Strengthening, Truss, PC Bars, Vibration Measurement, Long-term Loading Test*