

鋼製束と PC 鋼棒を用いたスラブ補強工法の開発

植木 理枝子* 都祭 弘幸*

要 旨

既存スラブのたわみ解消、剛性向上を目的として、鋼製束と PC 鋼棒を用いた安価で簡潔なスラブ補強工法を開発した。既往のスラブ補強工法として一般的な床下面への鋼板貼付工法や H 形鋼による小梁補強工法などと比べて、配管の撤去・復旧が不要であること、補強部材が比較的軽量であるため作業性及び安全性が向上すること、建物を使用しながらの補強が可能であること等が特長である。

機構確認実験の結果、張力の伝達状況及び PC 鋼棒の緊張量とスラブのたわみ量の関係が確認できた。パングマシンの用いた動的試験では、本補強工法が剛性増加に寄与し、振動性能を改善する効果を有することが確認できた。長期計測試験では、張力を調整することにより端部アンカーの抜け出しを防止することができることを確認した。また、本補強工法を実構造物に試験的に適用した事例では施工性が良好であることを確認できた。

1. はじめに

従来、過大なたわみや振動等が生じているスラブを補強する場合、床下面へ鋼板を貼付したり、H 形鋼による小梁で補強するのが一般的であった。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、これら既往のスラブ補強工法に代わる合理的で施工性の良い工法として、鋼製束と PC 鋼棒を用いた補強工法を開発した。本工法の補強効果の確認を目的とした一方向版による各種実験とその結果、及び本工法を実構造物に試験的に適用した事例について報告する。

2. 工法概要

図-1に工法概念図を示す。本工法は、スラブの下面に 2 本の鋼製束を設置し、スラブの一方の端部から束の頂部を通過して反対側のスラブの端部をつなぐようにプレートや PC 鋼棒を配置し、その PC 鋼棒を緊張することによってスラブの補強を行う。各部材はボルト接合によって接続されており、PC 鋼棒の緊張は小型油圧ジャッキまたは人力にて行うことができるため作業性が非常に優れている。PC 鋼棒を緊張することによって鋼製束には圧縮力(押し上げ力)が導入され、スラブが持ち上げられる。これによりたわみが改善されるだけでなく、スラブの剛性が向上するため振動性能を改善する効果も有している。

補強形態として、図-1には端部金物を鉄筋コンクリート(RC)梁に樹脂アンカーで固定した例を示したが、PC 鋼棒に大きな張力を導入する場合には RC 梁を貫通して端部金物を固定する方法が考えられる。架構が鉄骨造の場合も鉄骨梁に端部金物をボルト等で固定することも可能である。また、

施工誤差等による斜材の角度の修正に対しては、ボルト接合部に球面ナットと球面座金を用いることにより対応が可能である。

3. 各種実験概要及び結果

3.1 試験体

試験体は、当社技術研究所で長期クリープ試験を継続中の球状中空部を有するボイドスラブ試験体を用いた¹⁾。図-2に試験体の形状、表-1、2に試験体の各諸元とコンクリートの材料試験結果をそれぞれ示す。なお、コンクリートには軽量コンクリートが用いられている。コンクリートは 2001 年 8 月 27 日に打設され、材令として約 4 年が経過している。また、試験体にはコンクリートブロックにより 2.5kN/m²の積載荷重が与えられており、2005 年 9 月時点で 14~15mm のたわみが生じている。

3.2 機構確認実験

3.2.1 実験概要

PC 鋼棒の緊張は小型油圧ジャッキを用いて行い、張力の伝達状況及び緊張量とスラブのたわみ量の関係を確認するために、スラブ変位と PC 鋼棒及び鋼製束の歪を測定した。

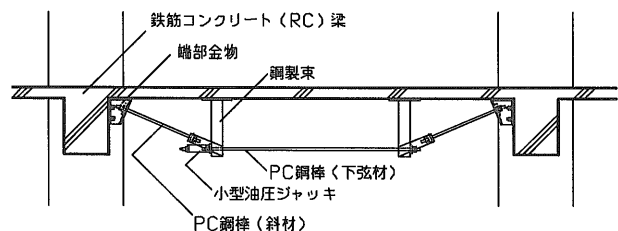


図-1 工法概念図

*本社 建築エンジニアリング部

図-3に実験に用いた鋼製束のタイプを示す。鋼製束は2種類とし、(a)は固定式で斜材を緊張するタイプ、(b)は回転式で下弦材を緊張するタイプである。また、左右の鋼製束の設置位置は、端部からスパンの1/3の位置とし、斜材・下弦材ともにφ26のPC鋼棒を用いた。さらに、斜材の両側には、角度の調整に対応できるように球面ナットおよび球面座金を用いた。また、端部金物は、M20・埋込み長さ120mmの樹脂アンカーを5本用いて固定した。

図-4に変位測定位置を示す。変位の測定は、電気式変位計を用い、歪の測定は、鋼製束および各PC鋼棒の両面に歪ゲージを貼付して行った。実験はスラブ中央の変位制御により行い、変位が2、4、6、8mmの各時点で計測を行った。

3.2.2 実験結果

図-5にPC鋼棒への導入張力とスラブ中央鉛直変位との関係を示す。PC鋼棒導入張力は(a)固定式鋼製束(以下、鋼製束(a)と記す。)では斜材、(b)回転式鋼製束(以下、鋼製束(b)と記す。)では、下弦材の歪から求めた。スラブの変形(むくり量)は導入張力にほぼ比例して大きくなり、鋼製束(a)を使用した場合には約100kN、鋼製束(b)を使用した場合には約70kNの張力を導入したときに8mmに達した。

図-6に最大変位時(8mm)におけるスラブ全体の鉛直変位の分布を示す。鋼製束(a)、(b)の場合ともに変位は放物線状に分布しているが、鋼製束(a)の場合は張力導入部材側の変位量が大きく、均等に分布していないのに対して、鋼製束(b)の場合は左右対称に変位が分布している。

図-7に鋼製束(a)、(b)におけるPC鋼棒導入張力と2本の鋼製束(北側、南側)それぞれに作用する軸力の関係を示す。PC鋼棒に導入した張力に対して、鋼製束(a)を用いた場合には北側は約1/5、南側は約1/6程度、鋼製束(b)を用いた場合には南北の鋼製束ともに約1/6程度の圧縮力が作用している。

表-1 試験体諸元

スラブ		内法スパン (mm)	ポイド	
厚さ (mm)	幅 (mm)		径 (mm)	間隔 (mm)
240	650	6000	180	205

表-2 コンクリートの材料試験結果

供試体	封かん	コア抜き
材令(日)	28	1481
圧縮強度(N/mm ²)	25.6	32.4
弾性係数(kN/mm ²)	15.6	16.1
割裂強度(N/mm ²)	2.25	-
比重(g/cm ³)	1.88	1.79

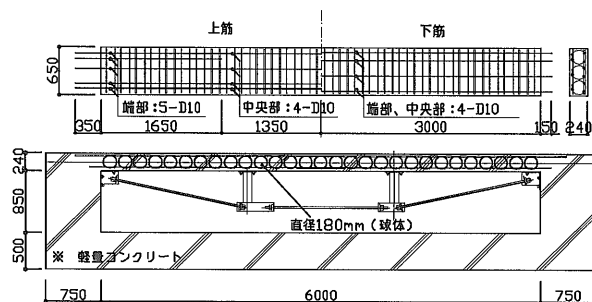


図-2 試験体形状

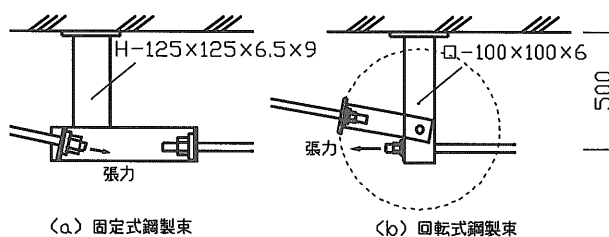


図-3 鋼製束タイプ

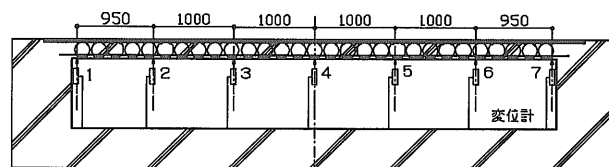


図-4 変位測定位置

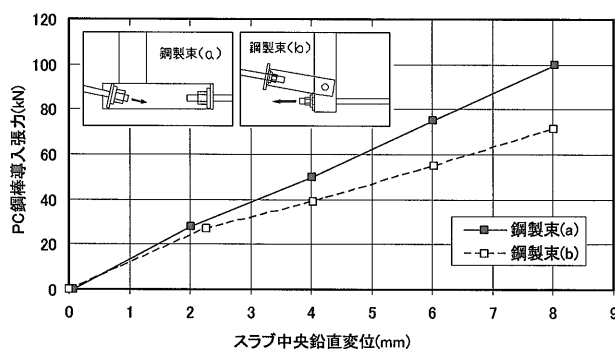


図-5 PC鋼棒導入張力-スラブ中央変位関係

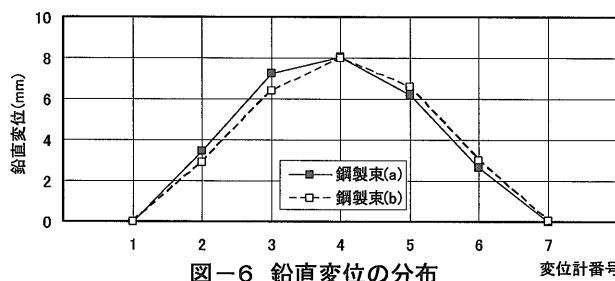


図-6 鉛直変位の分布

鉛直変位の分布及び導入張力と鋼製束軸力の関係から、スラブのたわみを改善するには、斜材を緊張するタイプの鋼製束(a)よりも下弦材を緊張するタイプの鋼製束(b)の方が効率が良いことがわかる。

3.3 動的試験

3.3.1 試験概要

本試験では、微動、バングマシンによる衝撃加振及び1人歩行時の振動を測定し、補強による振動特性の変化を確認する。

表-3に試験変数を示す。試験変数は、補強の有無、導入張力量、鋼製束の設置位置、PC 鋼棒の径とした。導入張力は 10kNごとに 70kNまでとし、鋼製束は、端部からスパンの 1/3、1/4 及び 1/3 と 1/4 の位置の組み合わせとした、また、PC 鋼棒の剛性の影響を確認するため、 $\phi 17$ 及び $\phi 26$ を用いた。断面積はそれぞれ 227.0mm^2 ($\phi 17$)、 530.9mm^2 ($\phi 26$) である。なお、本実験には鋼製束(a)を使用した。

図-8に振動計設置位置及びバングマシンによる加振位置を示す。振動計は 8ヶ所に設置し、加振位置は中心から 600mm 離れた位置とした。

3.3.2 PC 鋼棒導入張力と床の1次振動数関係

微動測定時の PC 鋼棒の径と設置スパンの異なる 4 通りの実験における導入張力と 1 次振動数の関係を図-9に示す。

導入張力の増加にほぼ伴って1次振動数が増加していることがわかる。また、PC 鋼棒径 26φを用いて補強した場合に比較して17φを用いた場合では1次振動数の増加割合が小さい。一次振動数の増加割合を床全体の剛性増加に換算すると(振動数の増加割合の二乗)すると、26φで 43~48%、17φで 18%の増加に相当する。

3.3.3 床補強と床応答の関係

表-4に張力 70kN 導入時の衝撃加振による最大加速度、最大変位、フーリエ振幅とそれぞれの無補強時に対する比率をそれぞれ示す。測定値は 3 回の試験の平均値とした。

補強によって、加速度及びフーリエ振幅は増加し、変位は減少する。4 種類の試験の中では、26φ・1/3・1/3 の場合が変位低減割合が 0.69 倍と最も大きく、加速度増加も 1.13 倍で比較的小さい。17φ・1/3・1/3 の場合も変位低減割合 0.74、加速度増加割合 1.07 であり、比較的補強の効率が良い。1/4 スパン設置では加速度が最も増加しているうえに、変位の低減も小さいことから、中央支点距離の広い場合には全体剛性が増えても中央部剛性が増加しにくいという傾向が認められる。

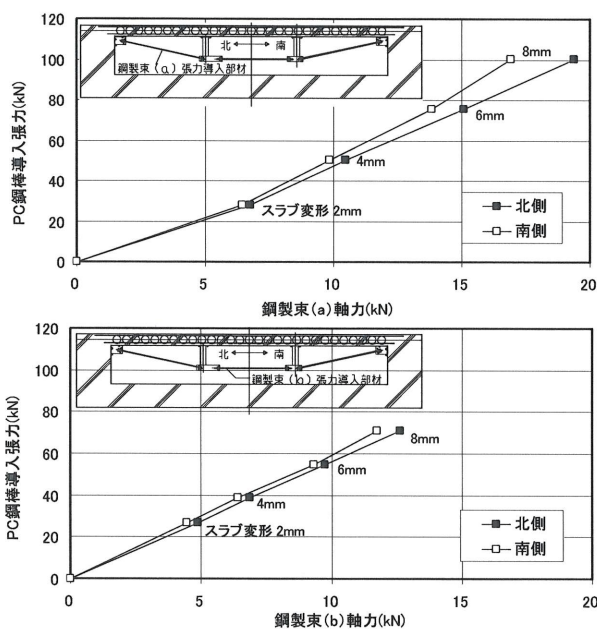


図-7 PC 鋼棒張力-鋼製束軸力関係

表-3 試験変数(動的試験)

ケース	PC 鋼棒径	鋼製束の端部からの位置	
		北側	南側
1	—	補強部材無	
2	17φ	スパンの 1/3	スパンの 1/3
3	26φ	1/4	1/4
4	26φ	1/3	1/4
5	26φ	1/3	1/3

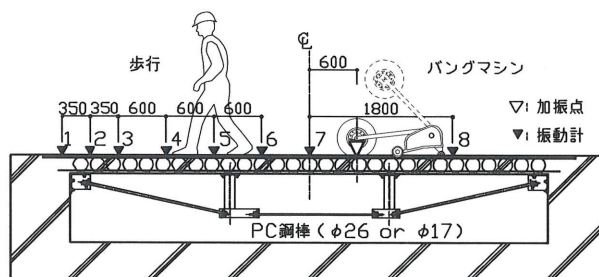


図-8 振動計設置位置及び加振位置

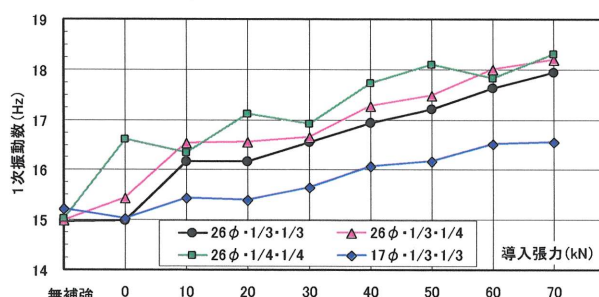


図-9 PC 鋼棒導入張力-1次振動数関係

同様に 1 人歩行の場合を表-5に示す。補強後の歩行振動は変位で 61~77%に低減される。また、1/4 スパン設置では他に比べて振幅が大きいこと、全体傾向として 26φ・1/3・1/3 の場合に振幅が小さいことや、鋼棒径の小さい 17φ・1/3・1/3も比較的効率が良いという傾向は衝撃加振の場合と同様である。

図-10に補強の効率が最も良い26φ・1/3・1/3について、衝撃加振実験時の補強前後における応答波形の比較を示す。補強によって変位振幅が低減され、周期が短くなっていることがわかる。

図-11に衝撃加振及び一人歩行による動的試験の結果を日本建築学会の性能評価曲線²⁾と重ねてプロットした状況を示す。これより、補強後の振動性能が高いランクの方向に変化することが確認できる。

3.4 長期計測試験

本試験は、主として端部アンカーの抜け出しの有無を確認することを目的とする。

図-12に長期計測試験の状況を示し、図-13に気温変化とアンカー変位量の推移を示す。本試験には鋼製束(a)を使用し、鋼製束の設置位置は端部からスパンの1/3の位置とした。また、PC鋼棒はφ26とし、張力はアンカーの長期許容(静的引張耐力の0.4倍)に相当する約70kNとした。なお、積載荷重は長期クリープ試験と同様にコンクリートブロックにより与えた。

表-4 衝撃加振による床の応答値

補強部材構成	最大加速度		最大変位		フーリエ振幅	
	Gal	比率	μ	比率	gal・sec	比率
補強部材無	575	1.00	938	1.00	103	1.00
17φ・1/3・1/3	616	1.07	699	0.74	129	1.25
26φ・1/4・1/4	702	1.22	761	0.81	143	1.38
26φ・1/3・1/4	653	1.14	718	0.77	134	1.30
26φ・1/3・1/3	647	1.13	652	0.69	142	1.37

表-5 一人歩行による床の応答値

補強部材構成	最大加速度		最大変位		フーリエ振幅	
	Gal	比率	μ	比率	gal・sec	比率
補強部材無	140	1.00	301	1.00	56	1.00
17φ・1/3・1/3	128	0.91	191	0.64	56	0.99
26φ・1/4・1/4	148	1.06	232	0.77	64	1.14
26φ・1/3・1/4	117	0.84	183	0.61	52	0.92
26φ・1/3・1/3	101	0.72	237	0.79	41	0.73

図-13に示すアンカーの変位量の推移を見ると、抜け出し量は気温に応じて若干変化するが、顕著な抜け出しは認められない。文献3には静的引張耐力に対する長期引張荷重の比が0.5以下であれば長期に渡って安定して挙動することが示されており、本試験でも同様の結果が得られた。

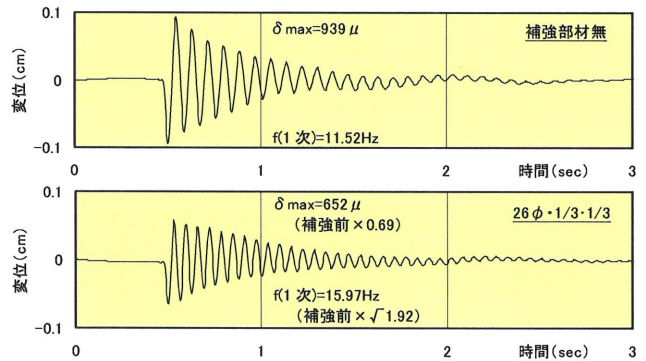


図-10 衝撃加振実験による応答変位波形の比較

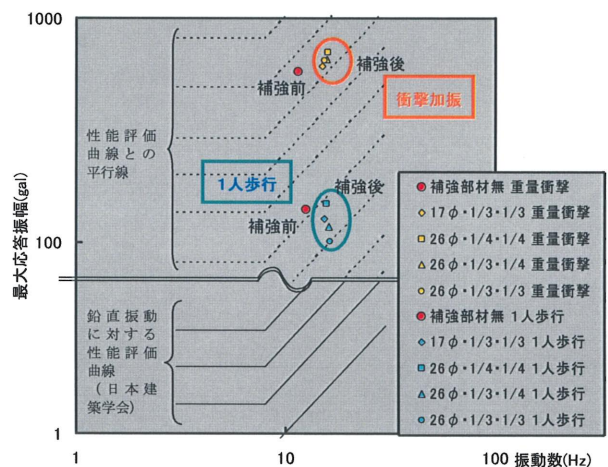


図-11 補強前後の振動性能の比較

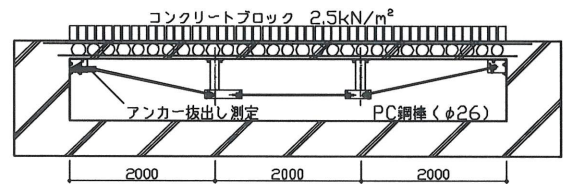


図-12 長期計測試験

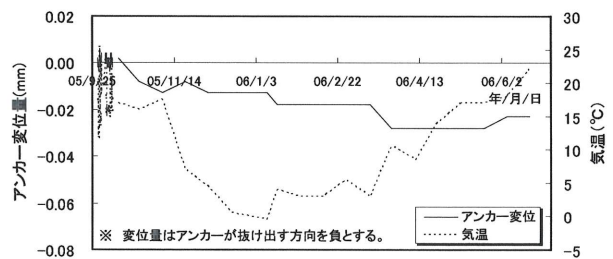


図-13 気温変化とアンカー変位量の推移

4. 実構造物への適用

本工法を実構造物に適用した事例について報告する。この試験施工は、一方向版実験後に行ったもので、施工性や意匠性を向上させることを目的として、実験時に比べて補強部材の仕様を若干変更している。以下に、この試験施工を通して得られた施工性や補強効果に関する知見を記す。

4.1 建物概要

試験施工の対象建物は1964年に竣工したRC造3階建ての事務所ビルである。2、3階のスラブの厚さは120mmであり、中央部分の配筋は下端のみである。コアボーリングで調べたコンクリート強度は 16.5N/mm^2 であった。

4.2 補強部材の構造

今回の試験施工ではスパン $6.7\text{m} \times 4.7\text{m}$ の2階の床に1組の補強部材を取り付けた。写真-1に補強部材の取り付け状況を示す。図-14に補強部材の取り付け位置を、図-15に補強部材の詳細をそれぞれ示す。鋼製束は、スパンをほぼ3等分する位置に2本設け、2本の束の頂部間に $\phi 26$ のPC鋼棒を配し、このPC鋼棒の中央にターンバックルを組み込んだ。PC鋼棒への張力の導入は、このターンバックルによって行うこととした。ターンバックルで導入できる張力の最大値を 60kN と仮定して各部材の断面や端部金物を固定する樹脂アンカーの仕様を決定している。スラブ端部と束の頂部をつなぐ斜材には厚さ 4.5mm のプレート 2 枚平行に配置し、端部金物は梁側面に打ち込んだ樹脂アンカー(M16)4本によって固定した。補強部材一式は重量合計約 80kg と軽量である。また、写真-1に示すようにスラブ下の配管を撤去することなく取り付けることが出来、施工性は非常に良好であった。

4.3 補強効果

スラブのむくりを測定した位置を図-16に、スラブ中心線のむくりの分布を図-17にそれぞれ示す。

むくりの分布は、X方向は懸垂状、Y方向は三角形状となっており、どちらも中央をはさんで左右対称の分布となっている。図-17中に、有限要素法(周辺固定)による、張力 75.2kN の時の解析値を太い実線で示した。これによると実験値と解析値はよく一致している。

PC鋼棒の張力とスラブ中央のむくりの関係を図-18に示す。両者はほぼ比例する結果となり、最大で 75.2kN の張力に対して、スラブ中央のむくりは 1.49mm であった。また、張力とむくりの関係も解析値とよく一致している。

人の歩行を加振源として行った振動測定の結果を表-6に示す。補強前後で比較すると、最大加速度は増加し、最大変位は減少し、フーリエ振幅も減少している。

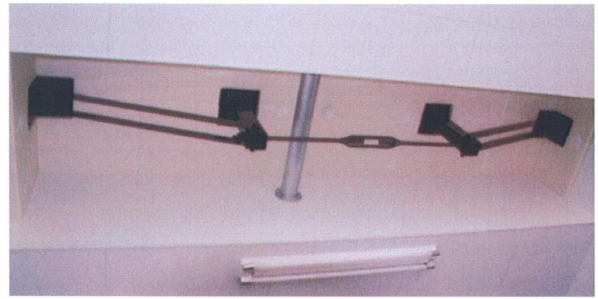


写真-1 補強部材取り付け状況

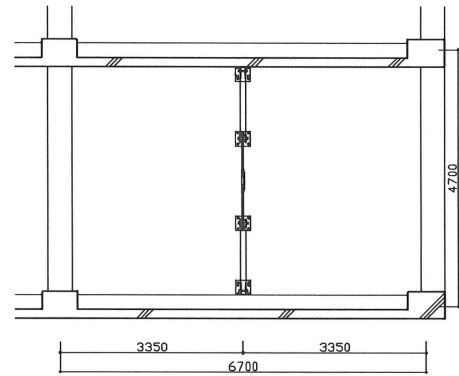


図-14 補強部材取り付け位置(見上げ)

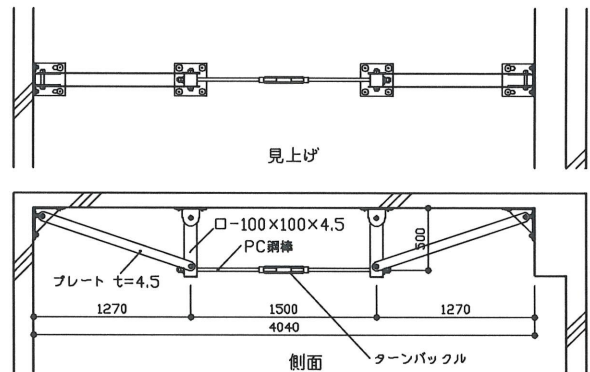


図-15 補強部材

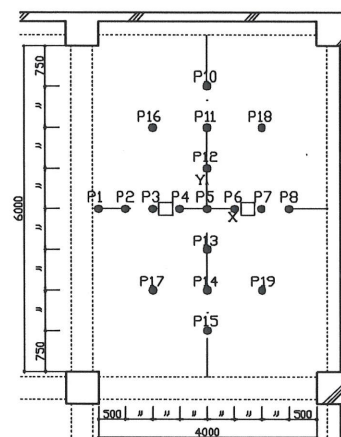


図-16 変位測定ポイント

バンダマシンによる衝撃加振時のスラブ中央の応答変位波形を図-19に、フーリエスペクトルを図-20にそれぞれ示す。図-19中の黒丸は10サイクル分のピーク位置を示している。補強後は振動数が若干増加し、減衰が大きくなっていることがわかる。図-20より1次固有振動数は補強前が22.8Hz、補強後は24.2Hz(1.06倍)であり、剛性に換算すると約13%増加した。

5. 終わりに

鋼製束とPC鋼棒を用いたスラブ補強工法について、各種実験を行った結果、本工法は既存スラブのたわみ解消及び剛性増加に寄与し、振動性能を改善する効果を有することが確認できた。また、本工法を実構造物に試験施工した結果、本工法の施工性が良好であることが確認できた。

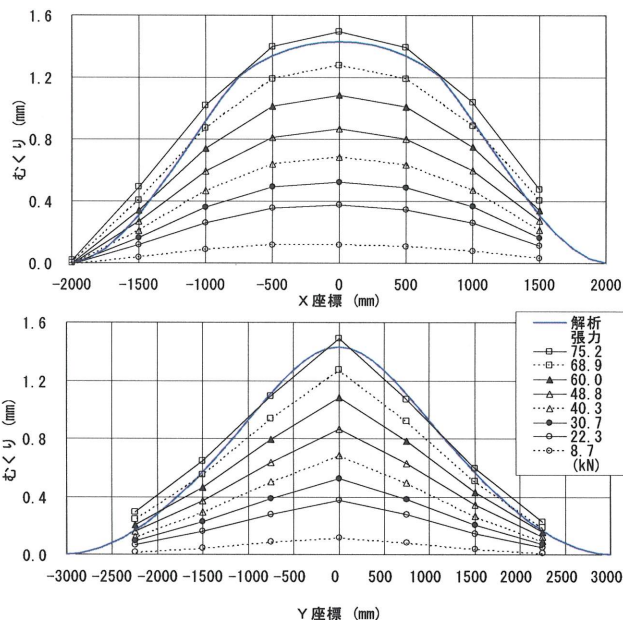


図-17 スラブ中心線上のむくり分布

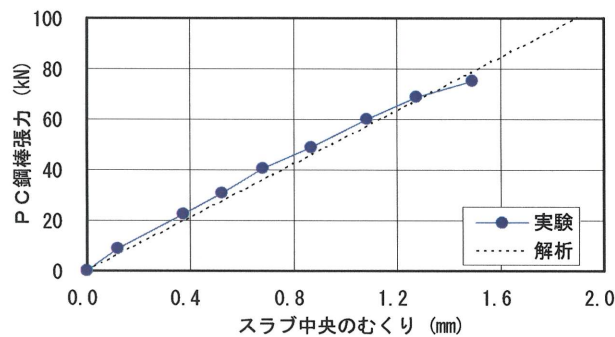


図-18 張カースラブ中央むくり関係

【参考文献】

- 1)小田康弘, 阪野彰, 村田義行, 瀧口雅己, 細井泰行:球状中空部を有するボイドスラブ工法の開発(その2)長期たわみ実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.117~118, 2002年8月
- 2) 日本建築学会「建築物の振動に関する居住性能評価指針同解説」2004.5
- 3)岡田恒男, 田中礼治, 松崎育弘, 坂本功, 河村壮一:あと施工アンカー・設計と施工, 技術書院, pp.78~79, 1990.6

【謝辞】

本研究は、当社を含む計6社(五洋建設、高周波熱錬、鴻池組、銭高組、大日本土木、飛鳥建設)の共同研究により実施したものである。関係者各位に深く謝意を表します。

表-6 スラブ振動測定結果(1人歩行時)

下弦材 張力 (kN)	最大加速度		最大変位		フーリエ振幅	
	実験値 (cm/s ²)	増減比	実験値 (μm)	増減比	実験値 (cm/s)	増減比
0.0	2.64	1.000	4.6	1.000	0.64	1.000
75.2	2.79	1.057	3.2	0.685	0.52	0.811

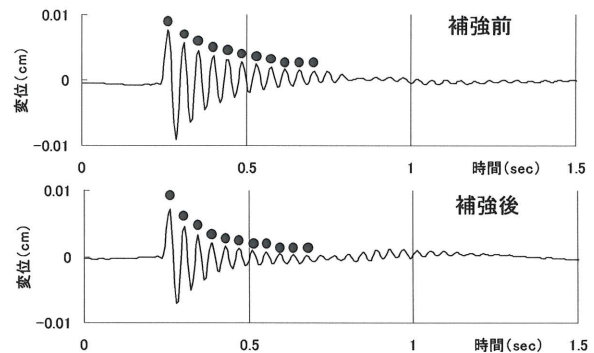


図-19 スラブ中央の応答変位波形(JIS重量衝撃時)

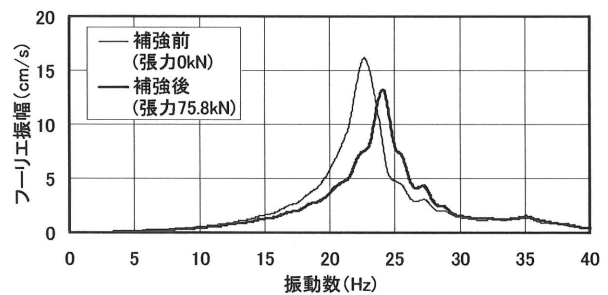


図-20 フーリエスペクトル(JIS重量衝撃時)