

論文 PC 外ケーブルによる既存 RC スラブの補強工法について

森廣 和幸^{*1}・上田 正生^{*2}・越川 武晃^{*3}・菊地 優^{*4}

要旨：本研究は、過去に受けた過大な載荷履歴により、たわみやひび割れ障害を受けたスラブを、PC外ケーブルによって再生をはかる補強工法について報告するものである。即ち、補強と同時に、当初の設計荷重を上回る積載を可能とするレトロフィットを意図した補強設計の考え方と、実際の試行・施工手順、更にはその後の載荷実験結果について考察をくわえている。

キーワード：外ケーブル，プレストレス，スラブ補強，再活用，試行緊張

1. はじめに

近年、土地・建物・施設に求められる機能がますます多様化・高度化する一方で、地球環境問題がクローズアップされている。効率性のみを追及する「使い捨て時代」から、これまで蓄積された大量のストック建築を、改修や改築するなどの「再活用（リノベーション）」することが望まれるように変化しつつある。

そのためには、使用者のニーズを的確に満たす施設に改築・改修し、再生・再利用する技術の開発を行っていくことが重要となる。

本報告は、施設の有効活用として耐震補強工事が行われることになった建物に対し、一部の部屋において、用途変更による当初設計時の積載荷重を超えた使用を可能とする、新たな床補強工法について論じたものである。

2. 施設概要

2.1 施設緒元及び工事の経緯

表-1 施設概要

施設用途	事務庁舎	完成年次	1975年
施設規模	RC造、地上3階、PH2階	コンクリート 設計基準強度	20.6N/mm ² (210kg/cm ²)
架構形式	耐震壁付ラーメン構造		
建築面積	962m ²	D19以上	SD345
延面積	2870m ²	鉄筋 D16以下	SR235

本施設の諸元を表-1に示す。本建物は、新築当時から防災官署が入居していたが、新築時の要求性能は、当時の建築基準法と同程度の耐震性能しか求めておらず、その後の法律改正により、既存不適格建物と判定されていたものである。

しかし、近年の地震災害の増加から、詳細な耐震診断が行われ、耐震補強が計画された。その結果、施設には、顕著な劣化が見られなかったことから（表-2参照）、耐震改修工事を行うと同時に、建物内の収容能力の向上を意図として、移動書架を設置することとなったものである。

表-2 調査結果

調査年度	採取階	圧縮強度 N/mm ²	中性化深さ mm
2001	PH階壁	32.2	0~2
	3階壁	24.9~31.9	0~5
	1階壁	28.5~34.4	0
設計基準 強度	全階	20.6 (210kg/cm ²)	

2.2 補強床の概要

移動書架の設置場所として、本施設が新築当時から倉庫として使用されてきた電気室上部の2階部分が検討対象となった。断面を表-3に示す。新築当時の積載荷重は、倉庫として、床

*1 国土交通省 北海道開発局営繕部建築課 営繕監督官 (正会員)

*2 北海道大学大学院 工学研究科建築都市空間デザイン専攻 教授 博士 (工学) (正会員)

*3 北海道大学大学院 工学研究科建築都市空間デザイン専攻 助手 博士 (工学) (正会員)

*4 北海道大学大学院 工学研究科建築都市空間デザイン専攻 助教授 博士 (工学)

表-3 断面リスト

部位	小梁(B1)	
位置	両端	中央
断面		
上端筋	3-D22	2-D22
下端筋	2-D22	3-D22
STP	9φ-200@	
部位	スラブ	
版厚	150	
短辺方向配筋	φ9.13-150@ダブル	
長辺方向配筋	φ9-150@ダブル	

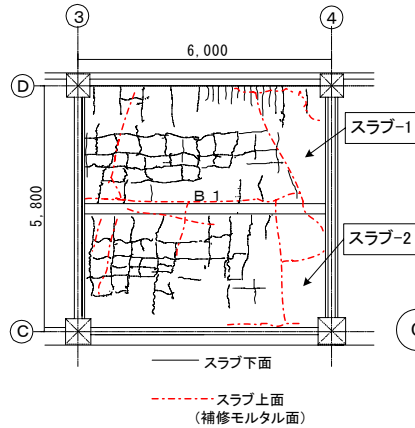


図-1 ひび割れ状況

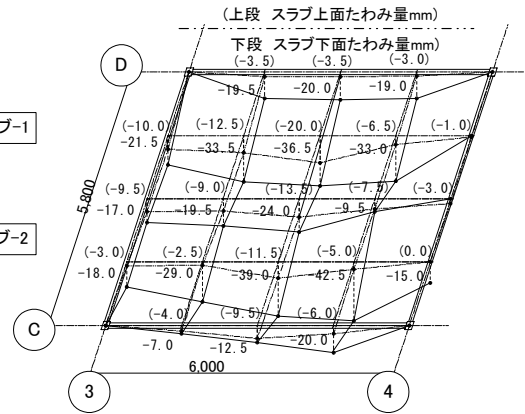


図-2 スラブのたわみ図

構造計算用に 800kg/m^2 (7800N/m^2)¹⁾ が採用されて構造計算がされていた。しかし、実際の断面は、スラブでは隣接する部位との取り合いの関係で、必要とされる断面以上が配置されたが、小梁については、計算上の必要最低限の断面となっていた。

(1) スラブの現状調査

改修工事が開始され、アスベスト除去後、スラブ下面を観察すると、当該部分のスラブ及び小梁に多数のクラックが認められた(図-1)。

そのため、クラックの発生原因の調査と同時に、安全性を確認するため、スラブの下向きの鉛直変位(以下たわみ)の計測と、鉄筋の間隔及びかぶりの調査を行った。この際、後の設計の便に供するため、小梁によって隔てられた2つのスラブパネル部分を、図-1に示すように、それぞれスラブ-1、スラブ-2と呼称することとする。

レーザーレベルを利用した無積載状態でのスラブのたわみの計測結果を図-2に示す。下面で最大42.5mm、上面では最大20mmとなっていた。また、両者の差は3~37.5mmあり、これが前回の補修前に生じていた「たわみ障害によるたわみ量」である可能性が高い。スラブ上面のモルタルには塗り替えの跡が明らかであることは、これを傍証しているものと考えられる。

また、電磁誘導法による鉄筋のかぶりの調査を行った。上面で43~122mm、モルタルの厚さ

を30mmと仮定すると、平均39.1mmとなり、仕様書の規定値より10mm程度沈下していることになる。また、下面では10~23mm、平均15.3mmと仕様書より15mm程度不足していた。なお、鉄筋の径は設計どおりであり、間隔も概ね150mmとなっており、問題は見られなかった。

このスラブの下面の現状を見る限りでは、筆者らが過去に実施した障害の発生したスラブの調査実績²⁾と比較しても、当該スラブの配筋間隔や有効せいの施工精度が主因で、たわみやクラックに影響を及ぼしたものとは判断できない。

以上のことから、スラブ下面のクラックは、鉄筋の下端筋のかぶり不足と乾燥収縮によるものと推測される。さらに、スラブ上面のモルタル亀裂から、スラブ上面の支持梁近傍にも、恐らくは支持辺に沿うかなり大きな亀裂が生じているであろうことが予測される。

(2) 小梁の現状調査

小梁には図-3に示すように0.7mm~3mmの曲げ・せん断ひび割れが生じていおり、この小梁自体の剛性低下は大きいことが伺える。なお、小梁の主筋のかぶり、本数は設計図・仕様書通

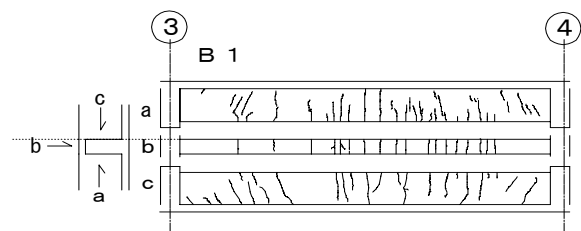


図-3 小梁のひび割れの状況

表-4 床補強工法の比較

工法	ひび割れエポキシ注入	鋼板又は炭素繊維シート貼付け(スラブ下面)	鉄筋増設(スラブ上面)	鉄骨小梁新設	外ケーブル新設
モデル図					
目的	初期剛性の回復	床スラブ中央下面の引張鉄筋量の充足	床スラブ端部上面の引張鉄筋量の充足	床スラブ全体を鉄骨小梁で受け換える	床スラブ全体に逆方向の鉛直荷重を加える

りであり問題はなかった。

以上のことから、当該スラブは、当初の設計で仮定した以上の過大な積載により、スラブ上面の固定辺に沿う曲げ亀裂の発生、更には小梁にひび割れが生じて、その上更に、経年によるコンクリートの乾燥収縮ひびわれがスラブの剛性を低下させ、現状に至ったものと推測される。

3.補強設計

3.1 補強工法の選定

一般に、積載荷重を増加させる場合や、障害が発生したスラブにおいては、表-4に示すように、ひび割れ部のエポキシ注入や、スラブの表面に鉄筋や鋼板・炭素繊維シートの貼付けなどで補修・補強される場合が多い。しかし、当該スラブのように大きな損傷を受けると同時に、小梁端部の主筋およびせん断補強筋が不足しているような事例では、樹脂の注入やスラブ自重を増すような補強方法は好ましくない。又、スラブ下に鉄骨を設置するには、電気室内部のケーブルを切り回すの必要があり、本施設の用途上、長時間の停電作業が不可能であること、さらに、書架の設置に必要な面積を確保する必要があることから、当該スラブ構造に最適の補強工法として、外ケーブル工法を選定することとした。

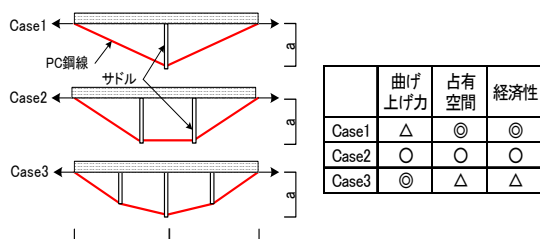


図-4 外ケーブル工法の配線方法の比較

3.2 補強設計の詳細

構造物の外側に PC 鋼線を配置し、ケーブルの曲げ上げ力を利用する工法は土木の橋梁などでは多く用いられているが、RC 建物の床補強に用いられた例は多くはないようである。

補強設計の目標として、まず、移動書架の積載時での曲げ・せん断応力度は当初設計時での積載荷重以下に収めると同時に、自重によるたわみと PC 力導入に伴うむくりをバランスさせ、さらに小梁の負担応力を下げる必要がある。

設計の目標は、移動書架が載った状態で当初設計の応力度以下となり、なおかつ、弾性たわみが現状を維持することを目的に、曲げ上げ力を設定することとした。

ライズ・緊張力を一定とした時の、PC 鋼線の配線方法の比較を図-4に示す。設計に当たり事前に現状を調査した結果、サドルの設置箇所やケーブルの配線スペースの関係で、本工事で

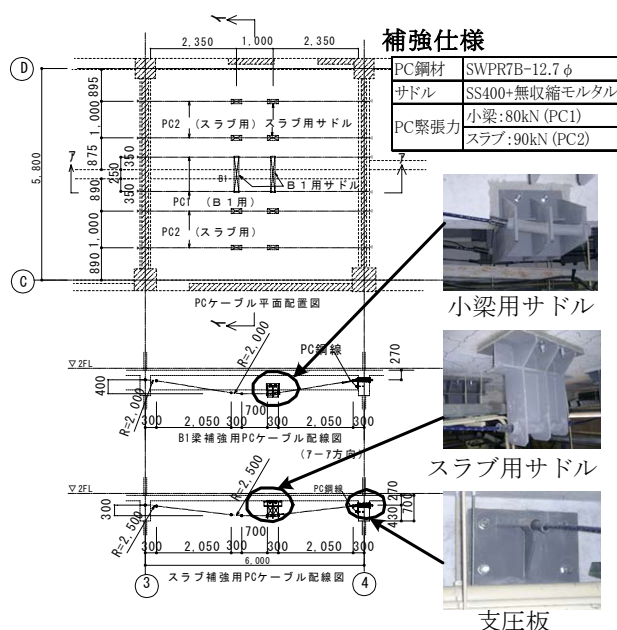


図-5 補強詳細

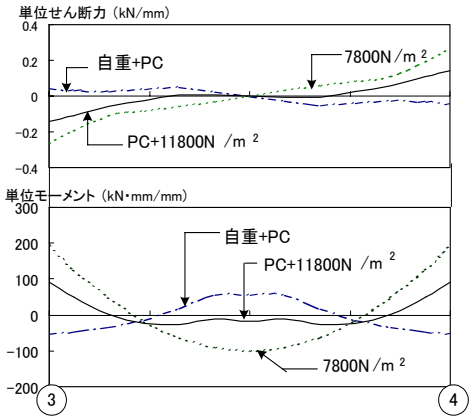


図-6 小梁の単位応力

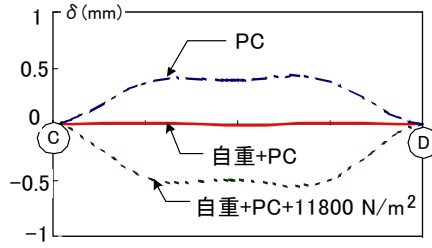


図-7 I-I断面の鉛直変位曲線

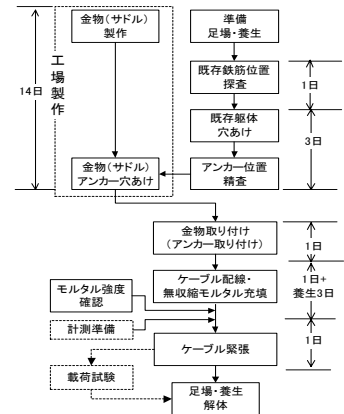


図-8 施工フロー

は2点支持の方法を採用することとした。

補強方法は、図-5に示すように小梁を中心に、スラブ-1，-2を対称に補強することとし、それぞれにPC鋼線を2本配置して補強することとした。PC鋼線は、セトロス等³⁾を考慮し小梁は80kN/本、スラブは90kN/本とした。

移動書架が満載の状態（積載荷重=11,800N/m²）での解析結果⁴⁾を、図-6，7に示す。小梁の応力は、当初設計時の応力を下回っており、鉛直変位も、PC鋼線による上向きのむくりが、自重によるたわみとバランスし、移動書架が満載の状態でも、最大0.5mmのたわみに留まることが分る。

4. 施工概況

4.1 施工計画

スラブ補強の全体工程を図-8に示す。今回、施工実績が少ないことと、スラブ・小梁に無数のクラックが認められたため、これらによる剛性低下が想定されることから、図-9に示すように、ケーブルの緊張を、小梁・スラブ用のそれぞれ2本ずつを1組とし、それぞれの最終緊張力を6段階に分割して試行緊張を繰り返しながら決定することとした。また、図-10に示す各点の変位を、最初の3段階は緊張後15分間を保持し、その後の3段階では、それぞれ30分を保持して、計測を行うこととした。なお、当該スラブはクラック等による剛性の低下が想定されるが、その度合いを適切に評価すること

が困難なため、小梁の緊張がdステップまで進んだ段階で、スラブ・小梁の各点の変位を基に、全体の剛性低下を先の有限要素解析結果と比較しながら評価し、最終的な緊張力を調整・決定することにした。

4.2 試行緊張による補強計画の調整・変更

緊張段階b～dまでの鉛直変位の推移を、図-11に示す。この段階まで緊張を行った時点で、設計段階に想定した変位の約5.4倍のむくりが生じた。

これを基に、施工中の現場において有限要素解析⁴⁾をやり直し、当該スラブ構造の剛性低下の割合を、健全な状態の4辺完全固定と仮定した場合に比べて、スラブ-1では1/3.6，スラブ-2は1/5.1，小梁では1/6.5が適切な剛性低下率であると推定し、仮定した。

この仮定に基づき、移動書架の設置時点での最終弾性変位を解析すると、スラブには最大2mm程度の即時たわみが生じ得ることが予測さ

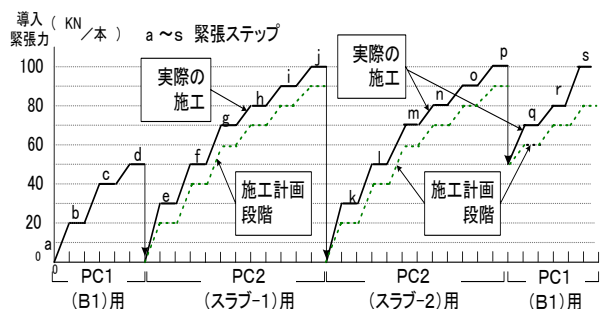


図-9 PC鋼線緊張力計画図

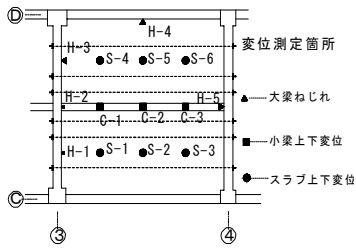


図-10 計測位置図

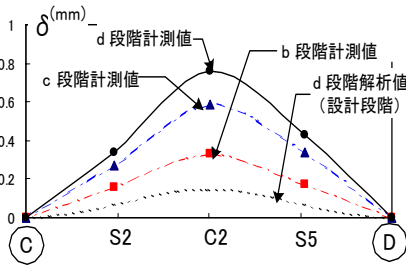


図-11 緊張初期のむくり変位の変化

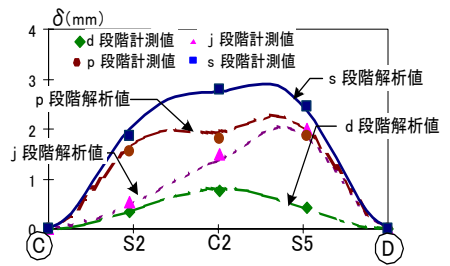


図-12 緊張段階のむくり変位の変化

れた。

この結果に基づき、小梁用・スラブ用の緊張力を共に 100kN/本に変更することとした。なお、前述の剛性低下の仮定に基づき、緊張ステップ d, j, p, s 段階の鉛直変位の解析値と計測値との比較を図-12に示す。図の結果から前述の仮定は、スラブのむくりの性状を、ほぼ正確に把握していることが判る。

5. 載荷試験

5.1 実験概要

施工実績が少ないことと、補強効果を確認するために、当該スラブにおいて載荷試験を実施した。

積載荷重は、想定される積載荷重の半分とし、試験の工程を図-13に示す。荷重は図-14に示すように、床の上面に乾燥砂を入れた土嚢袋(形状:600×600×100, 荷重:201.5N(20.56kgf)/袋)を、1段に81袋を6段ごとに積み重ねることによって載荷することとした。

5.2 試験結果

各測定点における鉛直変位の推移状況を図-15に示す。なお、除荷作業が庁舎の執務に影響するため、作業を執務後に行ったため、6000N

の載荷時間が半日ほど長くなった。

また、緊張補強完了後の載荷試験の前の無載荷段階で、クリープ変形は、1日を経過した段階で各測定点の平均で約4%むくりが増加し、載荷3000Nでは同じく1日で約9%むくりが増加した。なお、6000Nでは3日で約3%むくりが減少した。

除荷後は、すべての計測点で載荷前の状態にほぼ等しい状態に戻り、その後クリープにより4日で約10%むくりが増加した。

6. 考察

6.1 補強効果

緊張段階で仮定したスラブ・小梁の剛性低下

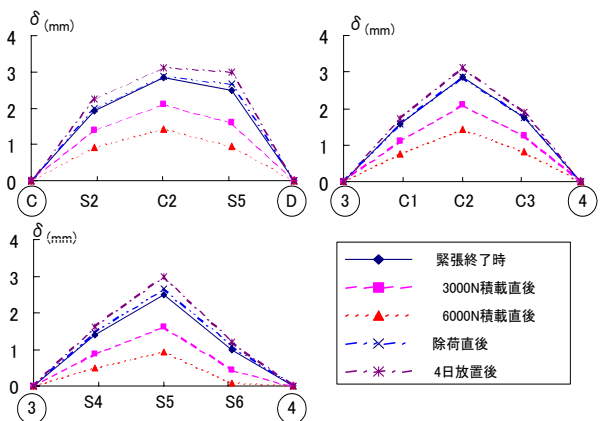


図-15 各測定点におけるむくり変位の推移状況

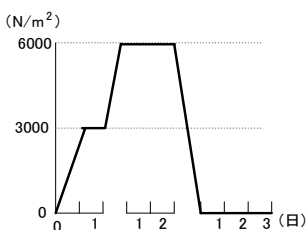


図-13 試験工程

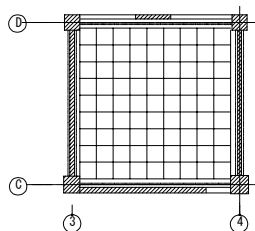


図-14 土嚢配置図

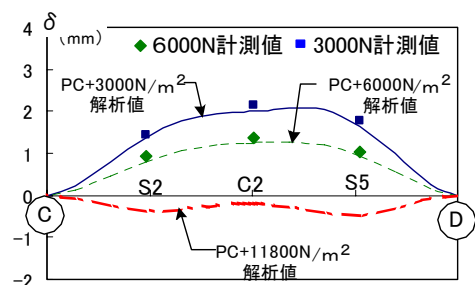


図-16 載荷試験における鉛直変位の解析

を基に、鉛直変位の解析結果と計測値の比較を図-16に示す。緊張時に仮定した剛性低下率は、載荷試験の変形性状をほぼ正確に把握していると判断できる。

以上のことから、補強後のスラブはほぼ弾性状態で変形を行っていると思なすことが可能であり、従って移動書架の設置時の即時弾性たわみは最大0.5mm程度と想定され、クリープ係数を1.6とした場合、最終たわみ(δ_L)は8mm($\delta_L/lx=1/356$)となり、設計段階での要求性能($\delta_L/lx \leq 1/250$)を満足している⁵⁾ことが判る。

なお、積載荷重が少ない状態では、PC鋼線の曲げ上げ力によるクリープ変形で“むくり”が通常とは逆の方向に生じる。しかし、平均積載荷重が6000Nを超えると、通常のスラブと同じような変形性状を示すようになった。今回、載荷試験終了後のクリープ変形が載荷試験前よりも大きくなった原因としては、当該スラブは過去に行われた補修によって、端部上端に生じていたクラックが補修されたものと推定される。しかし今回、PC鋼線による“曲げ上げ”によって、通常の状態では生じない逆方向での変形を生じさせたため、その補修されたクラックが再び開いたことで、載荷試験終了後におけるクリープ変形が大きくなった可能性が考えられる。

6.2 設計上の留意点

PC鋼線の曲げ上げ力を利用した補強を既存スラブに応用する場合、通常曲げモーメントとは反対の応力が生じる。曲げ上げ力が大きく自重を上回る場合、スラブ中央上端に引張力が生じることとなる。中央上端が無筋のスラブにおいては、無載荷の状態での応力度の確認が必要である。更に、過度な“むくり”が生じると、クリープ変形により、その“むくり”が増大することに注意しなければならない。

また、既存の躯体だけでなく、設備配管などを含め、サドルの設置場所や配線ルートが限定されることにより、当初の設計通りに補強が行

えないことが想定されるため、設計の当初に十分な現地調査を行ったうえで、配線計画を含めた補強方法を検討する必要がある。

6.3 施工上の留意点

本工法は、既存のRC躯体にPCケーブル用の穴のほかに、サドルの止め付けアンカー用の穴を多数開ける必要がある。従って、これらのために行う削孔作業には注意が必要であり、アンカーの設置に工程上の余裕を見込み、あらかじめサドルの加工工程を調整する必要がある。

7. おわりに

本工事は、現在使用中の建物に対し、なんらの執務上の影響を与えずに無事に終了することができた。また、従来の鉄骨による補強工法に比べ現場施工期間が短く、軽量かつ小型な資材しか用いないことから、施工性・安全管理の上でも非常に有効な工法であることが実証できた。なお、現時点では、設計手法などに関する確立された手法が無いことから、この種の補強工法の洗練化にはさらに多くの実例を重ねる必要があるように思われる。

参考文献

- 1) 構造設計指針：建設省官庁営繕部（昭和50年版）
- 2) 森廣和幸、井野智ほか：ある事務所庁舎床スラブの積載荷重調査（その1～3）日本建築学会大会学術講演梗概集1990年、C分冊
- 3) プレストレストコンクリート設計施工規準・同解説（1998.11）
- 4) 上田正生ほか：補強筋の付着すべりを考慮した鉄筋コンクリート床版の変形挙動解析、日本建築学会構造系論文集S62.
- 5) 建築物の使用上の支障が起らないことを確かめる必要がある場合及びその確認方法を定める件：建設省告示第1459号（平成12年5月31日）