

論文 ハーフプレキャスト部材を用いた鉄筋コンクリート片持ち床スラブの長期載荷試験

永 良太郎*1・知久 宏行*2・日高 雅樹*3・金子 樹*1

要旨：本研究では、ハーフプレキャスト部材を用いた片持ち形式の鉄筋コンクリート床スラブの長期たわみ性状を把握するため、実大の床スラブを用いて約2年間にわたり長期載荷試験を行った。ハーフプレキャスト部材を用いた試験体は、温湿度が上昇する期間に先端たわみが減少する傾向が見られた。ハーフプレキャスト部材を用いた試験体の長期たわみ倍率は、一体打ちの試験体の長期たわみ倍率の70~85%程度となっており、ハーフプレキャスト部材適用による長期たわみの抑制効果が確認できた。

キーワード：ハーフプレキャスト, 長期載荷, 片持ちスラブ, 長期たわみ

1. はじめに

集合住宅の廊下やバルコニー等に用いられる片持ち形式の鉄筋コンクリート床スラブ(以下、片持ちスラブ)は、先端の形状や配筋が煩雑であり、施工の合理化のためにはプレキャスト(以下、PCa)部材の採用が有効となる。

片持ちスラブを含む床スラブは、使用上支障をきたすような過大なたわみが生じないように、長期たわみを制御する必要がある。床スラブの長期たわみは、コンクリートのひび割れやクリープ、乾燥収縮のほか、端部筋の抜け出しの影響により増加することが知られており、これらの影響を考慮した長期たわみの予測法も提案されている¹⁾。

一方で、ハーフPCa部材を用いた床スラブの場合、PCa部材を前もって工場で製作するため、上面の現場打ちコンクリートを打ち込むまでにコンクリートの乾燥収縮がある程度収束することから、乾燥収縮が長期たわみ倍率におよぼす影響は小さくなると考えられる。既往の長期載荷試験の実験結果と長期たわみ倍率の計算値の適合性を調査した研究²⁾では、RC規準³⁾付7ではハーフPCa部材を用いた床スラブの長期たわみを過大評価することが指摘されている。しかし、文献²⁾で対象とした床スラブは一方向帯床スラブであり、ハーフPCa部材を用いた片持ちスラブの長期たわみ性状を実験的に確認した例は少ない。また、床スラブには施工時に支保工が設置され、

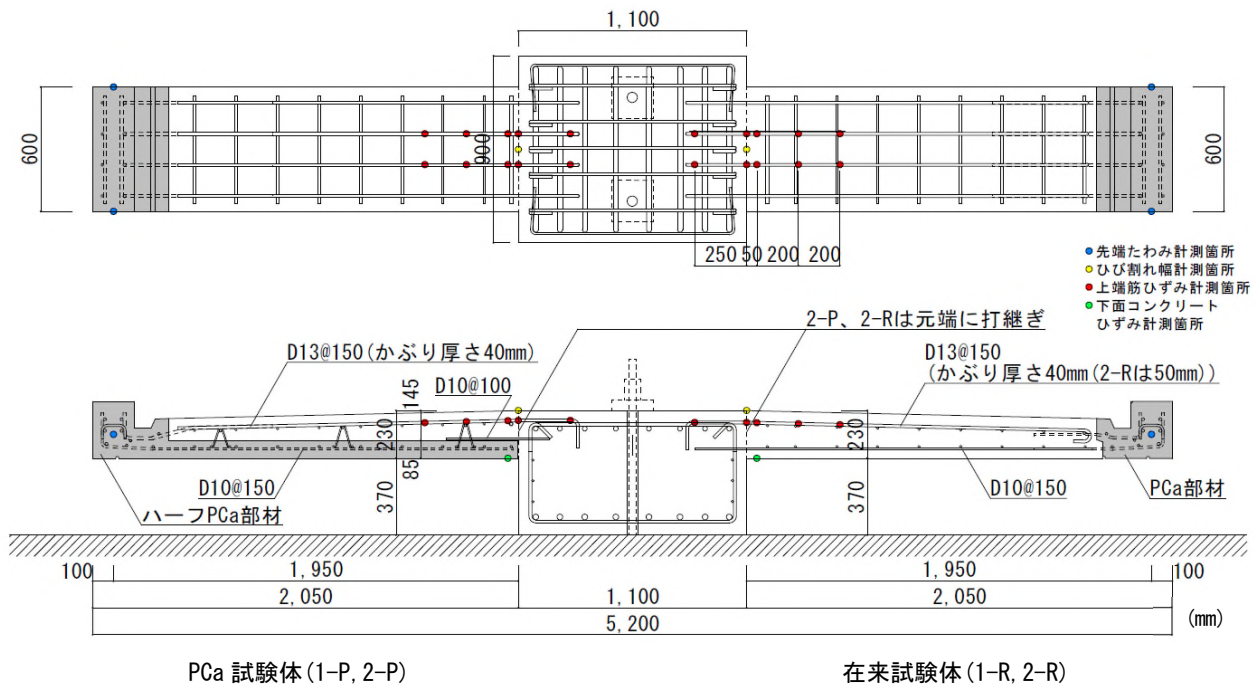


図-1 試験体配筋図

*1 (株)長谷工コーポレーション 技術研究所 (正会員)

*2 (株)長谷工コーポレーション 工業化推進部

*3 (株)長谷工コーポレーション エンジニアリング事業部

上階のスラブ重量を負担する期間があるが、上階のスラブ重量が長期たわみにおよぼす影響を確認した例は見当たらない。

そこで本研究では、ハーフ PCa 部材を用いた片持ちスラブの長期たわみについて、実大の片持ちスラブ試験体を用い、実施工の過程を模擬した長期載荷試験を行った。加えて、現場打ちを想定した一体打ちの片持ちスラブ試験体との長期たわみの比較から、ハーフ PCa 部材における長期たわみの抑制効果について検討した。

2. 実験概要

2.1 試験体計画

試験体配筋図を図-1 に、試験体パラメータ一覧を表-1 に示す。

試験体は集合住宅の開放廊下を想定した実大寸法で、スラブスパンが 2,050mm、元端のスラブ厚さが 230mm の床スラブを幅 600mm で取り出した形状とし、先端に向かって約 1/45 の勾配とした。

大梁を模したスタブから 2 方向に片持ちスラブを跳ね出し、一方はハーフ PCa 部材を用いた試験体(以下、PCa 試験体、記号：P)、他方は在来工法を想定した一体打ちの試験体(以下、在来試験体、記号：R)とした。またそれぞれにおいて、標準試験体(記号：1)およびスラブ元端に初期ひび割れを想定した打継ぎを設けた試験体(記号：2)をパラメータとした。打継ぎを設けた試験体は、スタブを先打ち、スラブを後打ちとすることで打継ぎを設けており、打継ぎ面は表面処理しておらず平滑である。1-P、1-R、2-P は上端筋のかぶり厚さを 40mm とし、2-R は施工時の歩行等による上端筋の下がりを想定し、かぶり厚さを 50mm とした。なお、在来試験体の 1-R および 2-R についても、実状に合わせ、形状が複雑なスラブの先端部分には PCa 部材を用いた。

2.2 載荷方法

載荷計画を図-2 に、載荷荷重一覧を表-2 に、載荷方法を図-3 に示す。長期載荷は、実施工の施工過程を模擬した載荷計画とし、想定する施工サイクルは 1 フロアーを 14 日とした。現場打ちコンクリートの打込みから 31 日後に試験体下の支保工が解体されたことを想定した。試験体下の支保工が解体されると、上階 2 フロアー分のスラブ重量(以下、施工時荷重)を試験体が負担するため、施工時荷重に相当する重量の鉄筋を試験体に載せることで載荷した。施工時荷重は支保工から試験体に伝達されるため、支保工位置を想定した位置に鉄板を設置し、その上に鉄筋を載せることにより集中荷重を再現した。その後、試験体上の支保工が解体されたことを想定し、10 日後に施工時荷重を除荷した。施工時荷重を除荷した 14 日後に仕上げ等の積載荷重(以下、長期荷重)を載

表-1 試験体パラメータ一覧

| | | 上端筋かぶり厚さ | 施工条件 | 位置付け |
|-----|--------|----------|--------|---------------------|
| 1-P | ハーフPCa | 40mm | 打継ぎなし | ハーフPCa 標準試験体 |
| 1-R | 在来工法 | 40mm | 打継ぎなし | 在来工法 標準試験体 |
| 2-P | ハーフPCa | 40mm | 元端で打継ぎ | 初期ひび割れ想定 |
| 2-R | 在来工法 | 50mm | 元端で打継ぎ | 初期ひび割れ想定 主筋下がり想定 |

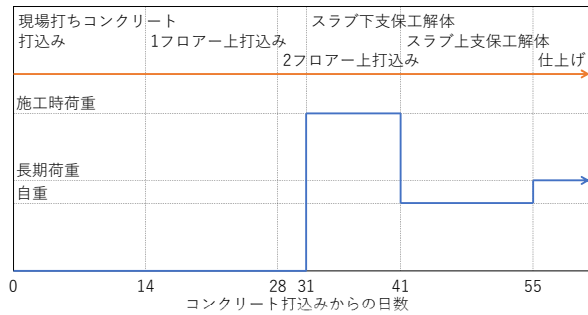


図-2 載荷計画

表-2 載荷荷重一覧

| 積載荷重 | 等分布荷重 (kN/m ²) | 面積※ (m ²) | 載荷荷重 (kN) | 載荷方法 |
|-------|----------------------------|-----------------------|-----------|---|
| 施工時荷重 | 6.38 | 1.23 | 7.84 | 鉄筋：D22,L=1650mm,157本 7.72kN 鉄板：200×200×25mm,6枚 0.46kN 合計 8.19kN |
| 長期荷重 | 1.92 | 1.23 | 2.36 | 鉄筋：D22,L=1650mm,45本 2.21kN 鉄板：200×200×25mm,3枚 0.23kN 合計 2.45kN |

※面積=0.6m×2.05m

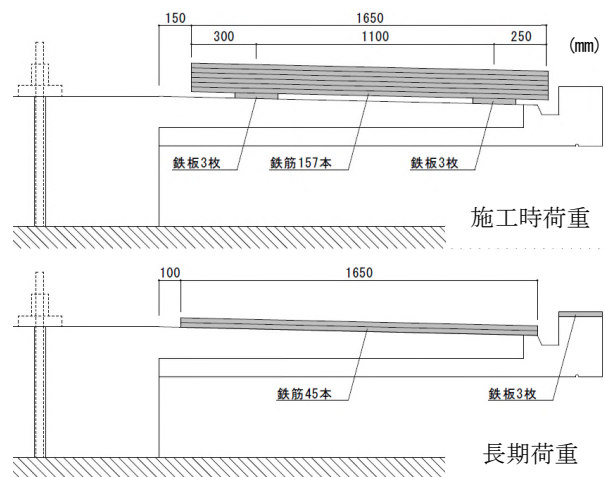


図-3 載荷方法

表-3 計測項目

| 計測項目 | 測定器 | |
|------------|--------|-----------|
| スラブの先端たわみ | 高感度変位計 | CDP-50 |
| 元端のひび割れ幅 | パイ型変位計 | PI-2-50 |
| 鉄筋のひずみ | ひずみゲージ | ゲージ長さ2mm |
| コンクリートのひずみ | ひずみゲージ | ゲージ長さ60mm |
| 気温 | 熱電対 | |
| 湿度 | 置き型湿度計 | |

荷した。長期荷重に相当する重量の鉄筋をスラブに直接載せることにより、等分布荷重を再現した。計測期間は長期荷重載荷から2年間とし、外気環境に近い屋内で実施した。

2.3 計測方法

計測項目を表-3に示す。また、計測位置を図-1に併記する。スラブ元端から1,950mmの位置の側面に設けたインサートにターゲットを設置し、ターゲットの鉛直移動量を変位計により計測し、スラブの先端たわみとした。スラブ元端の上面に設置した計測区間50mmのパイ型変位計によりひび割れ幅を計測したほか、ひずみゲージにより鉄筋およびコンクリートのひずみを計測した。熱電対により気温を計測し、置き型の湿度計により湿度を計測した。

2.4 コンクリート

コンクリートの使用材料を表-4、計画調査を表-5、圧縮試験結果を図-4、図-5に示す。コンクリートの調査は、施工時荷重の載荷時にハーフ PCa 部分は42N/mm²(記号:42N)、現場打ち部分は30N/mm²(記号:30N)の圧縮強度発現を目標とした。実際のコンクリート強度は、42Nが42.4~46.2N/mm²、30Nが30.9N/mm²で概ね目標通りであった。本実験におけるたわみ等の計算に用いるコンクリート強度およびヤング係数は施工時荷重載荷時の値とし、コンクリート強度は42N-1が42.4N/mm²、42N-2が46.2N/mm²、30Nが30.9N/mm²、ヤング係数は42N-1が34.0kN/mm²、42N-2が34.1kN/mm²、30Nが30.1kN/mm²である。

なお、後述するように、長期載荷試験中は温湿度の上昇下降に伴い、PCa試験体の先端たわみが増減する傾向が見られたため、各調査のコンクリートの物性を把握する目的でテストピースのひずみを計測した。ひずみの計測は、施工時荷重載荷の425日後から開始し、コンクリートの各調査のテストピース1本に2枚のひずみゲージを貼付して行った。

各調査の2枚のひずみゲージの平均値および温湿度の推移を図-6に示す。42Nのひずみはほぼ横ばいとなっており、30Nのひずみは、細かい増減はあるものの、概ね一様に収縮する傾向が見られた。

3. 実験結果

3.1 先端たわみ

試験環境の温湿度の推移を図-7に、各試験体の先端たわみの推移を図-8に示す。図-8においては、自重によるたわみを考慮しておらず、施工時荷重載荷直前をたわみ0mm、経過日数0日とした。

経過日数24日目の長期荷重載荷開始以降、いずれの試験体も先端たわみは増加傾向を示したが、PCa試験体

表-4 使用材料

| 42N (PCa) | セメント | 普通ポルトランドセメント |
|---------------|------|--------------------------|
| | 細骨材 | 千葉県君津産(陸砂) |
| | 粗骨材 | 栃木県佐野産(砕石) |
| | 混和剤 | 高性能AE減水剤 遅延形I種 |
| 30N (現場打ち) | セメント | 普通ポルトランドセメント |
| | 細骨材 | 千葉県君津産(砂) 大分県津久見産(砕砂) |
| | 粗骨材 | 大分県津久見産(石灰岩砕石) |
| | 混和剤 | AE減水剤 遅延形I種 |

表-5 コンクリートの計画調査

| | 目標強度 (N/mm ²) | 水セメント比 (%) | 細骨材率 (%) | セメント (kg/m ³) | 水 (kg/m ³) | 細骨材 (kg/m ³) | 粗骨材 (kg/m ³) | 混和剤 (kg/m ³) |
|-----|------------------------------|---------------|-------------|------------------------------|---------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 42N | 42 | 40 | 44.5 | 433 | 173 | 741 | 967 | 4.3 |
| 30N | 30 | 58.5 | 48.3 | 313 | 183 | 840 | 940 | 3.1 |

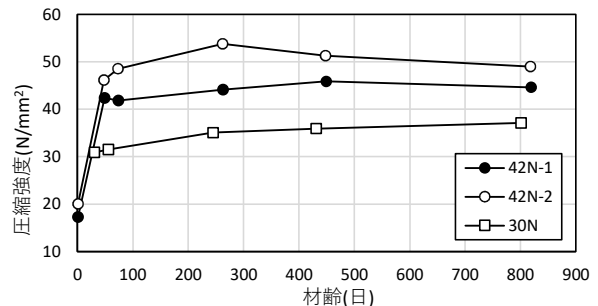


図-4 コンクリートの圧縮強度

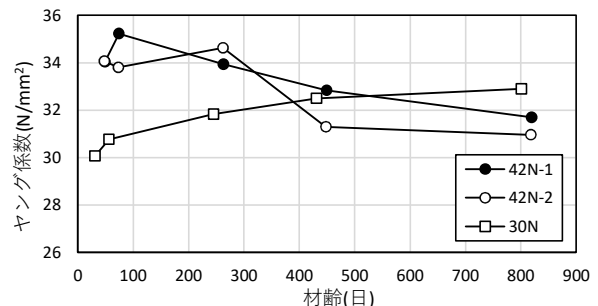


図-5 コンクリートのヤング係数

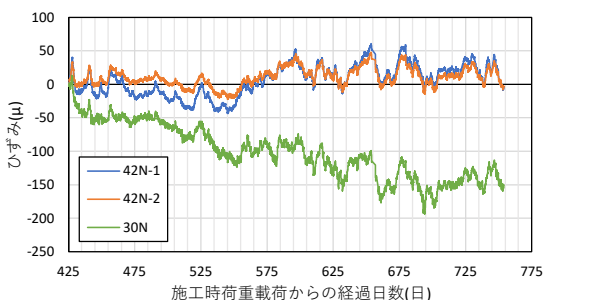
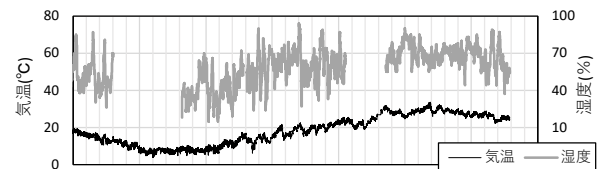


図-6 テストピースのひずみ

である 1-P および 2-P は、経過日数 170 日付近から 320 日付近まで、540 日付近から 670 日付近まで先端たわみが減少傾向を示した。この期間は温湿度が上昇する期間と概ね一致している。図-6 に示すように、温湿度が上昇する期間においては現場打ち部分の 30N のみ収縮する傾向にあることから、スラブ上面が収縮することにより先端たわみが戻る傾向を示したと考えられる。これに対して、在来試験体の 1-R および 2-R は、温湿度の上昇下降の影響はみられず、2 年間の計測期間中、一様に先端たわみが増加し続けた。

3.2 ひび割れ幅

スラブ元端の上面のひび割れ幅の推移を図-9 に示す。なお、2 年間の計測期間中、1-P、1-R にひび割れは発生しなかったため、図-9 における 1-P、1-R の値は、パイ型変位計の計測区間 50mm における上面コンクリートの変形を表す。

いずれの試験体も温湿度が上昇する期間において、計測値が減少傾向を示した。ハーフ PCa の標準試験体である 1-P では、コンクリートに伸長収縮は見られるものの、最大値は 0.04mm 程度であり、経過日数 300 日、650 日付近の変形は 0mm 程度であった。在来試験体の標準試験体である 1-R は、施工時荷重の載荷時に 1-P よりも大きく変形し、その後は 1-P と同程度の振幅で変形が増減した。初期ひび割れを想定した 2-P および 2-R の長期載荷開始直後のひび割れ幅はそれぞれ 0.15mm、0.2mm 程度であった。経過日数 650 日付近でのひび割れ幅の最小値はそれぞれ 0.2mm、0.3mm 程度であったことから、2-P および 2-R のひび割れ幅は、温湿度の変化に伴い増減しながら、徐々に拡幅していることがわかる。

3.3 下面コンクリートひずみ

下面コンクリートのひずみの推移を図-10 に示す。計測期間中はいずれの試験体もコンクリートの収縮が徐々に進行する傾向を示したが、温湿度が上昇する期間においては収縮の進行度合いが緩やかになる傾向が見られた。特に、PCa 試験体である 1-P および 2-P については、温湿度が上昇する期間においてひずみの推移がほぼ横ばいかやや伸長する傾向が見られた。

3.4 上端筋ひずみ

上端筋のひずみの推移を図-11 に示す。1-P および 1-R は、いずれの計測箇所も同程度の振幅でひずみが増減する傾向が見られた。温湿度が上昇する期間において、ひずみが減少する傾向を示し、経過日数 350 日付近および 700 日付近では負側(圧縮側)の値を示す計測箇所もあった。特に 1-P では、経過日数 266~441 日および 601~754 日の期間で全ての計測箇所が負側の値を示した。初期ひび割れを想定した 2-P および 2-R は、ひび割れ付近の計測点②、③のひずみはほぼ横ばいの推移となった。

対して元端から 200mm 以上離れた計測点では、1-P、1-R と同様、温湿度が上昇する期間にひずみの値が減少する傾向が見られた。

4. 長期たわみの評価

ここでは、各試験体の先端たわみの予測値を示すとともに、長期たわみおよび長期たわみ倍率を用いた評価を行う。先端たわみの予測には双曲線法を用いた。予測式

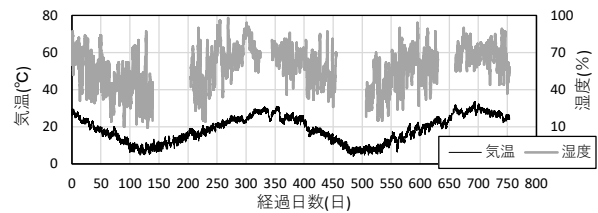


図-7 温湿度の推移

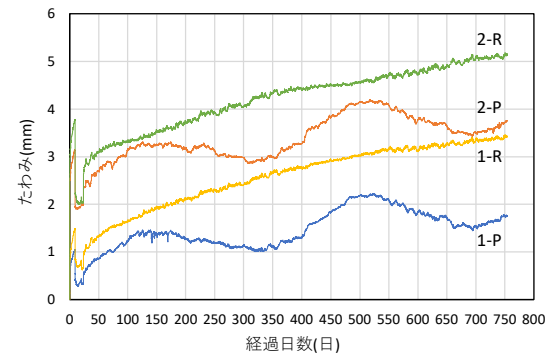


図-8 先端たわみの推移

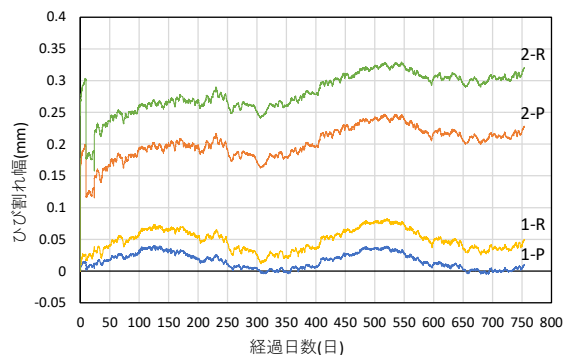


図-9 ひび割れ幅の推移

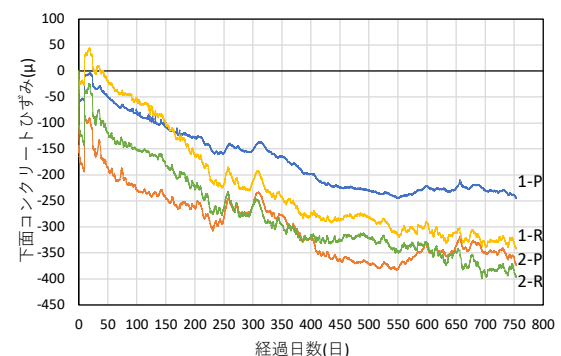


図-10 下面コンクリートひずみ
および温湿度の推移

を式(1), 式(2)に示す。

$$\delta_t = \delta_s + t / (\alpha + \beta \cdot t) \quad (1)$$

$$\delta_t = \delta_s + t / (\alpha + \beta \cdot t) + \gamma \quad (2)$$

ここで、

δ_t : 経過日数 t の時の先端たわみ予測値(mm)

δ_s : 基準日における先端たわみ実験値(mm)

t : 基準日からの経過日数

α, β : 先端たわみ実験値から求まる係数

γ : 補正係数

係数 α, β については、先端たわみの実験値を最小二乗法により近似することで決定した。係数決定における基準日は、経過日数 38 日(長期荷重開始から 14 日後)とした。PCa 試験体の 1-P および 2-P は、温湿度の上昇下降に伴う先端たわみの増減が見られたため、双曲線法による式(1)と、補正係数 γ により式(1)を上方に補正した式(2)を用いた。補正係数 γ は、1-P、2-P それぞれの先端たわみと予測値の差の最大値とした。

各試験体の先端たわみの推移および予測式を図-12に示す。図-12には、予測式の収束値を併せて示す。PCa 試験体の 1-P および 2-P は、経過日数 150 日付近および 500 日付近で、先端たわみが式(1)の予測値を大きく上回った。いずれの試験体も経過日数 500 日付近で先端たわみと予測値の差が最大となり、その差は 0.6mm 程度であった。在来試験体の 1-R および 2-R についても、実験値が予測式に対してやや増減してはいるものの、近似範囲における予測値との差は最大で 0.3mm 程度であった。

次に、図-12 の予測式の収束値を用いて、各試験体の長期たわみおよび長期たわみ倍率を求めた。長期たわみおよび長期たわみ倍率は、式(3)、式(4)による。

$$\eta = \delta_L / \delta_e \quad (3)$$

$$\delta_L = \delta_0 + \delta_L' \quad (4)$$

ここで、

η : 長期たわみ倍率

δ_L : 長期たわみ(mm)

δ_e : 弾性たわみ計算値(mm)

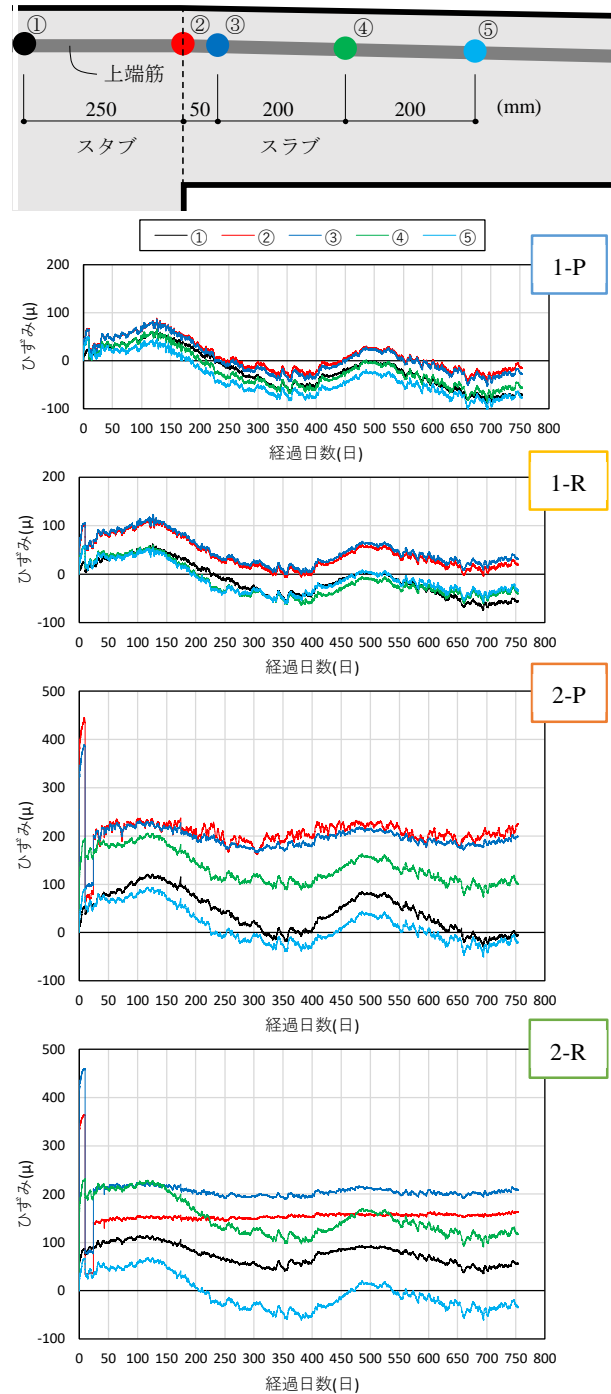


図-11 上端筋ひずみの推移

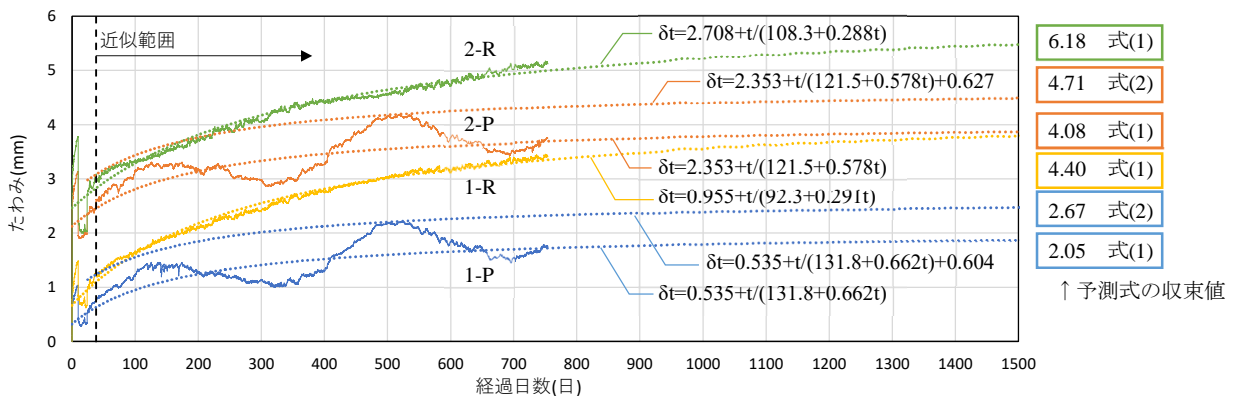


図-12 先端たわみの推移および予測式

表-6 長期たわみおよび長期たわみ倍率

| | 弾性たわみ 計算値 δ_e (mm) | 自重たわみ 計算値 δ_0 (mm) | 予測式の収束値 δ_L' (mm) | | 長期たわみ δ_L (mm) | | 長期たわみ倍率 η | |
|-----|---------------------------------|---------------------------------|-----------------------------|------|--------------------------|------|-------------------|-------|
| | | | 式(1) | 式(2) | 式(1) | 式(2) | 式(1) | 式(2) |
| | | | 1-P | 0.50 | 0.37 | 2.05 | 2.67 | 2.42 |
| 1-R | 0.55 | 0.41 | 4.40 | - | 4.81 | - | 8.74 | - |
| 2-P | 0.50 | 1.26 | 4.08 | 4.71 | 5.34 | 5.97 | 10.69 | 11.94 |
| 2-R | 0.56 | 1.57 | 6.18 | - | 7.75 | - | 13.84 | - |

δ_0 : 自重たわみ計算値(mm)

δ_L' : 施工時荷重載荷前を 0mm とした予測式の収束値
(mm)

弾性たわみは自重および長期荷重により生じるたわみの計算値であり、鉄筋を考慮した等価弾性二次モーメントを用いてたわみを求めた。自重たわみについても計算値とし、元端に打継ぎを設けた 2-P および 2-R は、ヤング係数に剛性低下率 α_y を乗じることで、ひび割れを考慮した。なお、PCa 試験体の弾性たわみおよび自重たわみは、42N のヤング係数を用いて求めた。

各試験体の長期たわみおよび長期たわみ倍率を表-6 に示す。式(1)、式(2)によらず、長期たわみおよび長期たわみ倍率は 2-R が最大となり、次いで 2-P、1-R、1-P の順となった。式(2)を用いた場合、1-P は 1-R の 70% 程度、2-P は 2-R の 85% 程度の長期たわみ倍率となり、ハーフ PCa 部材適用による長期たわみの抑制効果が確認できた。

5. まとめ

実大の片持ちスラブ試験体の長期荷重実験を実施した。得られた結果は以下のようにまとめられる。

- (1) 在来試験体は、先端たわみが一様に増加し続けた。対して PCa 試験体は、温湿度が上昇する期間に先端たわみが減少する傾向が見られた。
- (2) 初期ひび割れを想定した試験体のひび割れ幅は、温湿度の変化に伴う増減を繰り返しながら徐々に拡幅した。
- (3) 下面コンクリートのひずみは、いずれの試験体も圧縮ひずみが徐々に進行する傾向を示したが、温湿度が上昇する期間においては圧縮ひずみの進行度合いが緩やかになる傾向を示した。
- (4) ハーフ PCa および在来の標準試験体の上端筋ひずみ

は、いずれの計測箇所も温湿度の変化に伴い増減する傾向が見られた。初期ひび割れを想定した試験体は、ひび割れ付近の上端筋ひずみはほぼ横ばいであり、その他の計測点は、標準試験体と同様に温湿度の変化に伴い増減した。

- (5) 長期たわみ倍率は、1-P が 1-R の 70% 程度、2-P が 2-R の 85% 程度となり、ハーフ PCa 部材適用による長期たわみの抑制効果を確認できた。

ハーフ PCa 部材による長期たわみ抑制効果を考慮した合理的な評価方法を探るため、今後は、ハーフ PCa 部材による長期たわみの抑制メカニズムを検討するほか、PCa 試験体の長期たわみと既往の長期たわみ予測式^{例えば}との整合性を確認していく。

参考文献

- 1) 岩田樹美, 大野義照: 鉄筋コンクリートスラブの簡易法による長期たわみ算定とその予測精度, 日本建築学会構造系論文集, 第 683 号, pp.130-137, 2013.1
- 2) 渡部雄二, 佐藤眞一郎, 塩原等, 楠原文雄, Trinh Viet A, 佐藤法喬: 多様化した鉄筋コンクリート床スラブの長期たわみに関する研究(その 1. 研究目的および既往の研究の調査), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造IV, pp.189-190, 2007.8
- 3) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 2018
- 4) 菅野俊介: 鉄筋コンクリート構造物の塑性剛性に関する研究(その 4), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造系, pp.791-792, 1968.10
- 5) 岩田樹美, 大野義照: 鉄筋コンクリート片持ちスラブの長期たわみ計算法, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造IV, pp.677-678, 2010.9