

報告 あと施工アンカーにより増設した片持ちスラブの長期载荷実験

高津 比呂人^{*1}・宮内 靖昌^{*2}・藤村 勝^{*3}・伊藤 武司^{*3}

要旨：あと施工アンカーにより施工した片持ちスラブの引張鉄筋に、曲げ引張応力を長期間作用させる実験を実施し、スラブ先端のたわみ量は約1年9ヶ月を経てもわずかに増加し続けることを確認した。また、片持ちスラブ端部の固定状態は、鉄筋の抜け出し等が生じることにより完全固定状態とはならず、引張鉄筋を折り曲げ定着したもの、樹脂系定着材により定着したもの、無機系定着材により定着したものの順に完全固定状態から離れる（半剛接状態となる）ことが確認された。ただしその鉄筋の長期载荷による抜け出し変形の増加量は最大でも0.3mm程度と非常に小さな値となった。

キーワード：あと施工アンカー、長期载荷、片持ちスラブ

1. はじめに

改修工事で多用される接着系あと施工アンカーについては、建築基準法において長期許容応力度が定められていないため主要構造材の接合には使用できない^{例え¹}のが現状である。しかしながら近年、既存ストックの住戸全体を大規模に改修して価値を高めるといった再生手法に関する研究が進められており²、このような大規模改修を行う際には、あと施工アンカーを用いることで平面計画の自由度が高まり、かつ施工の合理化を図ることができると考えられる。

そこで、本研究ではあと施工アンカーを用いて施工した片持ちスラブの引張鉄筋に、曲げ引張応力を長期に作用させた実験を実施し、アンカー筋の抜け出しなどの長期性状を検討したのでここに報告する。

の呼び名)でスタブにスラブの引張鉄筋(SD295A)を定着したのに対して、No2, No3, No4試験体ではあと施工アンカー筋(SD295A)をスラブの引張鉄筋としてスタブに定着した。No2, No4試験体はともにエポキシ樹脂を主剤としたカプセル方式の定着材を用いた(以下、樹脂アンカー試験体と呼ぶ)が、鉄筋径および本数が3-D13と2-D16で異なる。なお、3-D13の断面積が381mm²なのに対して、2-D16の断面積は398mm²でありほぼ等しい。No3試験体では膨張性急硬モルタルをカプセル化した定着材を用いた(以下、無機アンカー試験体と呼ぶ)。あと施工アンカー筋の有効埋め込み長さは12d_bで共通とし、鉄筋の先端は片側45度カットとした。

2.2 試験体の製作

試験体は最初にスタブの部分を作成し、スタブコンク

2. 長期载荷実験の概要

2.1 試験体

試験体は4体とし、それぞれ試験体固定用スタブから片持ちスラブ(厚さ150mm)を跳ね出す形状とした。試験体一覧を表-1に、試験体配筋図を図-1に示す。

No1試験体では折り曲げ定着(定着長40d_b, d_bは鉄筋

表-1 試験体一覧

試験体	No1	No2	No3	No4
鉄筋径 本数	3-D13	3-D13	3-D13	2-D16
定着方法	折り曲げ 定着	樹脂 アンカー	無機 アンカー	樹脂 アンカー
定着長	40d _b	12d _b	12d _b	12d _b

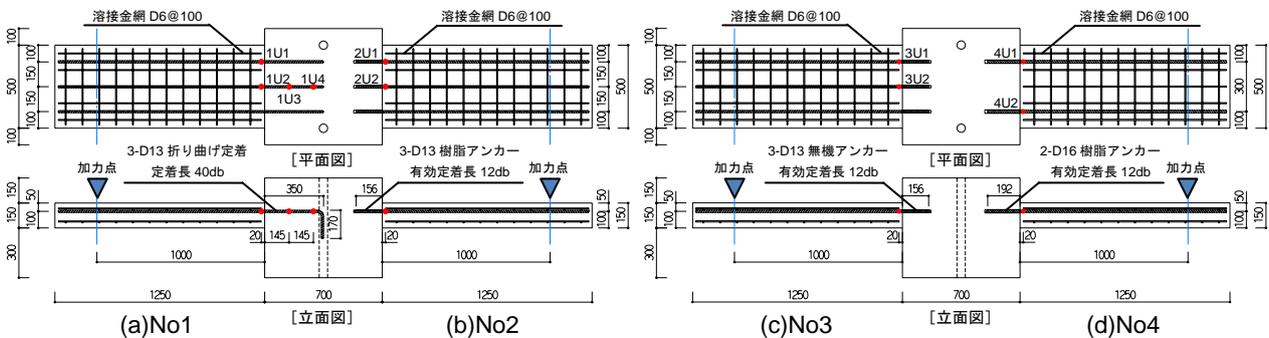


図-1 試験体配筋図(単位: mm, 図中の●は鉄筋ひずみ計測位置, 記号はひずみゲージの記号)

*1 (株)竹中工務店 技術研究所 先端技術研究部 研究員 工修 (正会員)

*2 (株)竹中工務店 技術研究所 建設技術研究部 主席研究員 博(工) (正会員)

*3 (株)竹中工務店 東京本店 設計部 構造グループ

リート（目標圧縮強度（4週）：21N/mm²）が所定の強度を発現したことを確認後、スタブの所定の位置を穿孔し、樹脂カプセルおよび無機カプセルをコンクリート孔に装填してアンカー筋を回転と打撃によって埋め込んだ。折り曲げ定着のNo1については、スタブコンクリート打設前に、あらかじめ鉄筋をスタブ内に埋め込んでおいた。

あと施工アンカー筋施工後、スラブ部分の型枠および溶接金網の配筋を行ってスラブコンクリート（目標圧縮強度（4週）：21N/mm²）を打設した。したがっていずれの試験体にもスラブとスタブの界面には打継ぎ面が存在することとなる。なお、スラブとスタブの界面に特別な打継ぎ面の処理は行わなかった。アンカー施工時のスタブコンクリートの材料特性、長期載荷開始時のスラブコンクリートの材料特性、鉄筋の材料特性を表-2に示す。

表-2 コンクリート・鉄筋の材料特性

	圧縮強度 [N/mm ²]	静弾性係数 [N/mm ²]	引張強度 [N/mm ²]
スタブコンクリート	22.7	2.24 × 10 ⁴	1.99
スラブコンクリート	31.5	3.34 × 10 ⁴	2.63
	降伏強度 [N/mm ²]	弾性係数 [N/mm ²]	引張強度 [N/mm ²]
鉄筋D13	361.3	1.78 × 10 ⁵	500.1
鉄筋D16	338.6	1.81 × 10 ⁵	479.5

2.3 加力・計測

スタブを反力床に固定後、スタブとスラブの界面から距離1000mmの位置に設定した加力点におもり（2.61kN × 2 = 5.22kN）を載せることにより載荷を行った。載荷完了後の状況を写真-1に示す。計測項目は、おもり直下の鉛直変位、スラブとスタブ界面の目開き、主筋の抜け出し変位、鉄筋のひずみ（鉄筋ひずみ計測位置は図-1を参照）とした。

スラブとスタブの界面が完全固定とした場合に、スラブ自重とおもりによる載荷でスラブ端部に発生する曲げモーメント M_c は以下の式(1)によって求められる。

$$M_c = wL^2/2 + Pl = 6.63 \text{ [kN} \cdot \text{m]} \quad (1)$$



写真-1 おもり載荷完了後の状況

ここで、 w ：コンクリートの単位長さあたりの重量（ $=24\text{kN/m}^3 \times 0.5\text{m} \times 0.15\text{m} = 1.8\text{kN/m}$ ）、 L ：片持ちスラブの全長（ $=1250\text{mm}$ ）、 P ：おもりの重量（ $=5.22\text{kN}$ ）、 l ：スラブとスタブ界面から加力点までの距離（ $=1000\text{mm}$ ）

この時、鉄筋に生ずる引張力 T は式(2)より、

$$T = M_c/j = 75.7 \text{ [kN]} \quad (2)$$

(j ：スラブ断面の応力中心間距離（ $=7d/8$ ）、 d ：スラブの有効せい（ $=100\text{mm}$ ））であり、3-D13および2-D16の断面積で割るとそれぞれ 199N/mm^2 、 190N/mm^2 となる。

3. 実験結果

3.1 変形の推移

おもりによる載荷を開始してから635日（約1年9ヶ月）後までの、おもり直下の鉛直変位（*WV）とスタブとスラブ上面の目開き変形（*SH、ここでは図-2に示すスラブ上面に埋め込んだインサートとスタブ間の変位を目開き変形と定義）の推移を図-3に示す。

おもり直下の鉛直変位*WV（図中、実線）については、時間の経過に従って増加量は徐々に小さくなってはいるものの、全期間で変形が増加し続けていることがわかる。試験体間で載荷直後のおもり直下の鉛直変位が1.26～2.58mmとばらつきが大きかったため、最終変形についても約7mm～10mmと大きくばらついた。目開き変形*SH（図中、一点鎖線）はあと施工アンカーのNo2、No3、No4試験体が2mmを超えたのに対して折り曲げ定着のNo1試験体では1mm強に留まった。

おもり直下の鉛直変位の計測値からおもり載荷直後の変位を差し引いて算定した鉛直変位増分の比較を図-4に示す。図より、本実験における長期載荷によるおもり直下の鉛直変位増分は、6～7mmであったことがわかる。また、長期載荷による鉛直変位増分が最も小さいのは、3-D13樹脂アンカーのNo2試験体で、次に小さいのが3-D13無機アンカーのNo3試験体で、3-D13折り曲げ定着のNo1試験体と2-D16樹脂アンカーのNo4試験体はほぼ同じ値であったことが確認された。

3.2 主筋の抜け出し

載荷を開始してからの主筋抜け出し変位の推移を図-5に示す。ここでは、スラブ側面の主筋と同じ高さに埋め込んだインサートとスタブ間の変位を主筋抜け出し変位と定義し、図にはスラブの両側面の2点の計測値の平均値を示した。この抜け出し変位についても載荷直

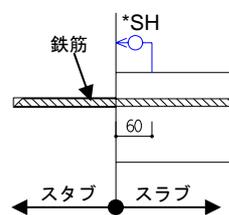
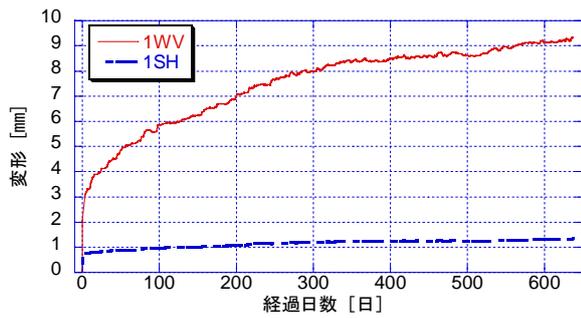
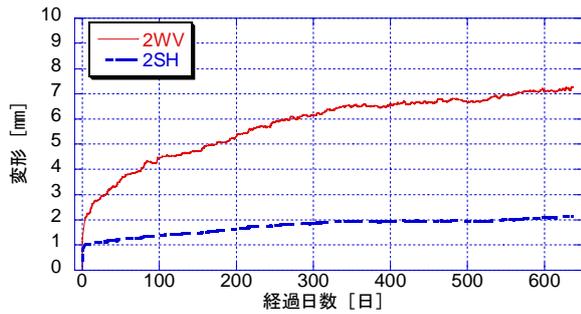


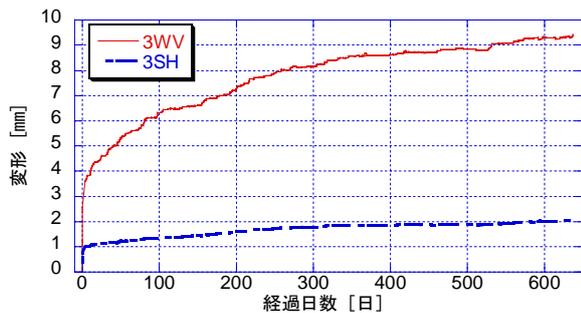
図-2 スタブとスラブ上面の目開き変形（*SH）



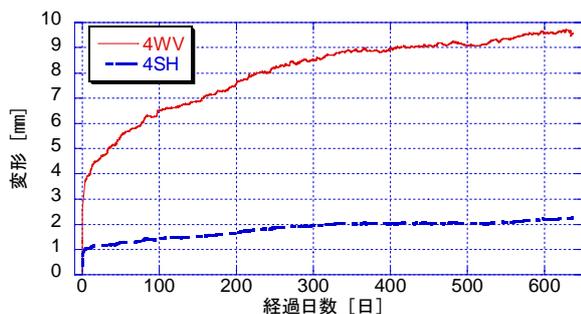
(a) No1 (3-D13 折り曲げ定着)



(b) No2 (3-D13 樹脂アンカー)



(c) No3 (3-D13 無機アンカー)



(d) No4 (2-D16 樹脂アンカー)

図-3 変形の推移

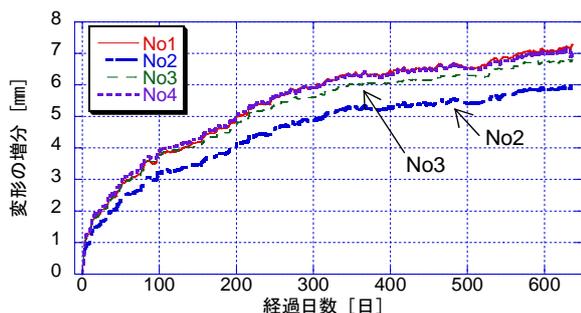


図-4 おもり直下の鉛直変位増分の比較

後の値が 0.15~0.29mm となり試験体間のばらつきがやや大きかった。

図-3 に示すおもり直下の鉛直変位は载荷直後から全期間概ね増加し続けていたのに対し、鉄筋抜け出し変位は全試験体で経過日数 50~150 日においてほとんど変位が進行しない状況が確認された。この時期は、図-6 の熱電対により計測した試験体周辺の気温の推移に示す通り気温が上昇していた時期に相当する。気温がピークとなった 150 日過ぎから、鉄筋の抜け出し変位が増加し、気温が最も低くなった 350 日でその増加が止まるという傾向が見られた。これは温度の上昇によって、鉄筋やコンクリートが伸びたことに起因するものと推察される。

その後、再び気温の上昇がピークを迎えた 500 日過ぎから鉄筋の抜け出し変位が増加する傾向が見られた。特に 3-D13 折り曲げ定着の No1 では他の試験体よりも増加量が大きいことが確認された。

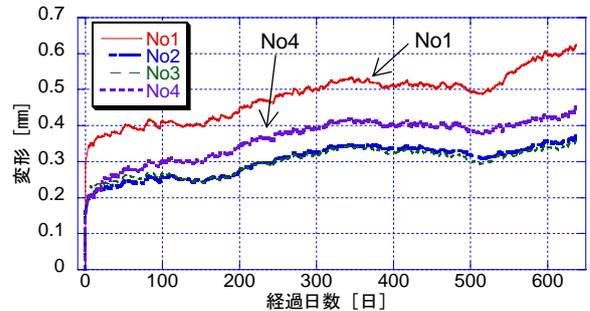


図-5 主筋抜け出し変位の比較

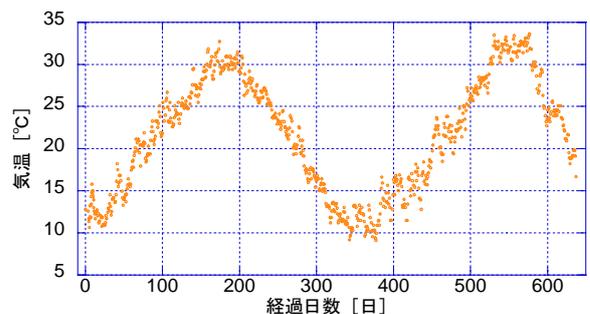


図-6 試験体周辺気温の推移

3.3 主筋ひずみ

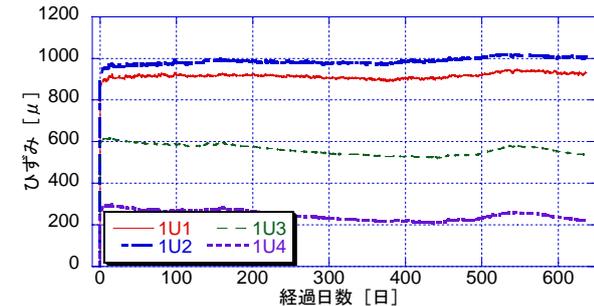
载荷を開始してからの主筋ひずみの推移を図-7 に示す。主筋ひずみについては、時間の経過に伴う変動はほとんど見られなかった。3-D13 折り曲げ定着の No1 試験体のスラブとスタブ界面の鉄筋ひずみ (1U1, 1U2) と 3-D13 樹脂アンカーの No2 試験体のスラブとスタブ界面の鉄筋ひずみ (2U1, 2U2) がほぼ等しいのに対して、3-D13 無機アンカーの No3 試験体の鉄筋ひずみ (3U1, 3U2) はそれらに比べて 100 μ 程度小さい値となった。2-D16 樹脂アンカーの No4 試験体の鉄筋ひずみ (4U1,

4U2) も No3 とほぼ同等であった。

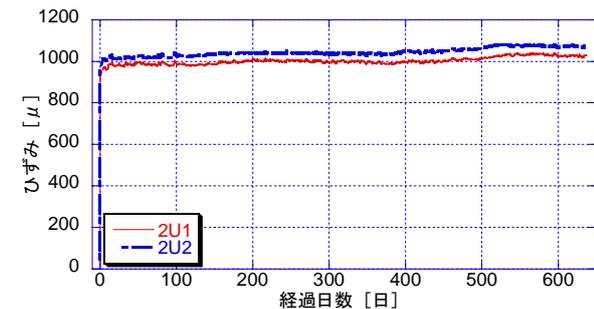
3-D13 折り曲げ定着の No1 試験体において、図-5 に示した主筋抜け出し変位が大きく増加する点で、折り曲げ起点近い 1U3, 1U4 のひずみが若干変動する状況が確認された。鉄筋の抜け出しによってひずみが折り曲げ起点側にシフトしたことが原因と考えられる。

3.4 ひび割れ状況

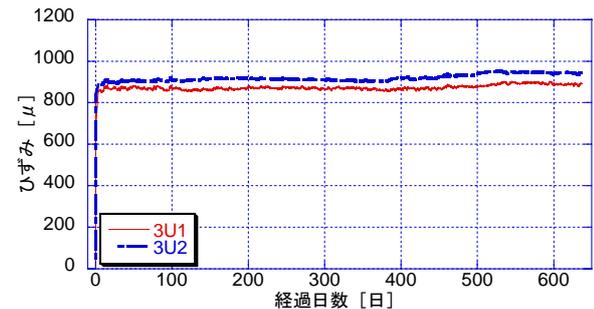
載荷後 635 日のひび割れ状況を図-8 に示す。載荷直後にはスラブとスタブの界面にのみひび割れの発生が



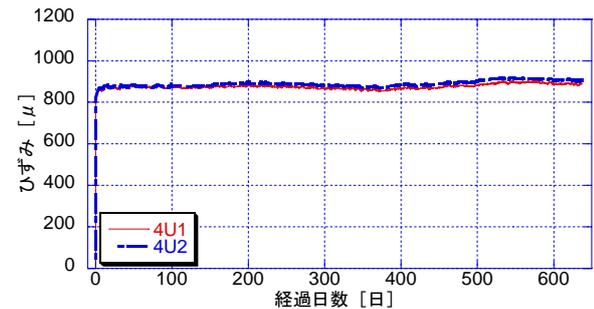
(a) No1 (3-D13 折り曲げ定着)



(b) No2 (3-D13 樹脂アンカー)



(c) No3 (3-D13 無機アンカー)



(d) No4 (2-D16 樹脂アンカー)

図-7 主筋ひずみの推移

見られたが、載荷から 3 日後にスラブ部分にひび割れが発生したことを目視で確認した。その後ひび割れ本数は徐々に増え、時間の経過に従ってひび割れ同士の間隔が狭くなる傾向が見られた。

最終的に、3-D13 樹脂アンカーの試験体 (No2) のひび割れ本数が最も少なく、3-D13 無機アンカーの試験体 (No3) のひび割れ本数が最も多くなったと見受けられる。しかしながら、各試験体のスラブとスタブの界面を除く最大ひび割れ幅は、クラックスケールで計測したところせいぜい 0.1mm 程度であり、耐久性に与える影響はほとんどないといえる。

3.5 おもり撤去後の性状

本実験では、おもりによる載荷を開始してから 636 日でおもりを撤去することにより除荷を行った。おもり撤去から約 4 週間のおもり直下位置での鉛直変位の推移を図-9 に、計測された主筋抜け出し変位からおもり載荷直後の変位を差し引いて算定した主筋抜け出し変位増分の推移を図-10 に示す。

図-9 より、除荷から時間の経過に従って変形が若干ではあるが回復の様子が確認された。また、図より本実験におけるおもり直下の非回復鉛直変形は 5~7mm であったといえる。非回復鉛直変形が最も小さかったのは、3-D13 樹脂アンカーの No2 試験体であり、その他の試験体についてはほとんど差が無い。一方、図-10 に示す主筋の抜け出し変位増分については、いずれも 0.2mm 以下の小さな変形に回復した。主筋の抜け出し変位については、除荷後の時間の経過に従って抜け出し変形が回復する様子は確認されなかった。

図より、本実験における長期載荷による鉄筋の抜け出し量は、3-D13 折り曲げ定着の No1 試験体と 2-D16 樹脂

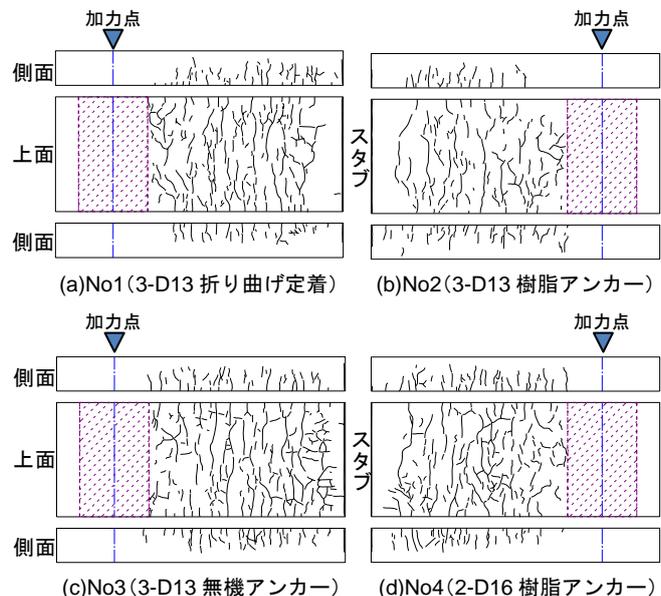


図-8 ひび割れ発生状況

(斜線部：おもりが乗っている範囲)

アンカーのNo4試験体が約0.2mmとほぼ等しく、3-D13樹脂アンカーのNo2試験体が約0.1mm、3-D13無機アンカーのNo3試験体が約0.05mmで最も小さいという結果であった。

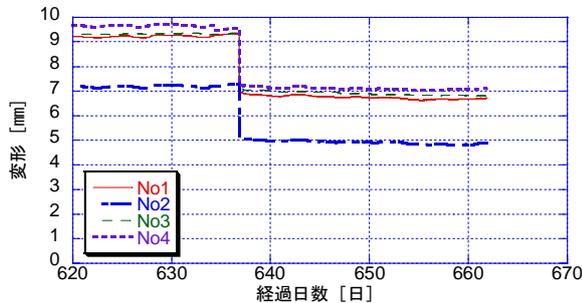


図-9 おもり直下の鉛直変位の比較 (除荷後)

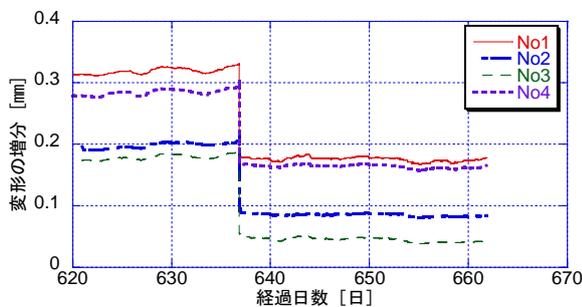


図-10 主筋抜け出し変位増分の比較 (除荷後)

4. 実験結果の考察

ここでは、変位計および鉄筋ひずみの計測結果から算出したスラブとスタブの界面に発生している曲げモーメント (M_m) と、スラブとスタブが完全固定であると仮定した場合の曲げモーメント (M_c) の比を算出して比較を行う。

算出に際しては以下の仮定を行った (図-11)。

- おもりを乗せるとスラブとスタブの界面にひび割れが生じてスラブとスタブが離間する。
- スラブとスタブの接している部分の長さを中立軸深さ X_n と定義し、その X_n をスラブとスタブ上面の目開き変位と主筋の抜け出し変位の計測値から幾何学的に算出する。
- 鉄筋ひずみの計測値に弾性係数と鉄筋断面積を掛けて、鉄筋引張力 T_m を求める。コンクリートによる圧縮力 C_m は T_m と等しいとし、コンクリートの応力度分布は三角形分布とする。なお、スタブとスラブが離間していると仮定したため、コンクリートは引張力を負担しない。
- 先ほど求めた X_n より応力中心間距離 j_m が計算できるので、界面で発生しているモーメント M_m を式(3)により求める。

$$M_m = T_m \times j_m \quad (3)$$

以上の仮定に基づいて算出した中立軸深さ X_n と曲げモーメント M_m の推移を図-12, 13に示す。

中立軸深さ X_n は3-D13折り曲げ定着のNo1が60mm程度なのに対して、残りのあと施工アンカーの3体の試験体では約90mmとなった。一方、計測値から算出した曲げモーメント M_m は3-D13折り曲げ定着のNo1が最も大きく、以下大きい順に3-D13樹脂アンカー (No2)、2-D16樹脂アンカー (No4)、3-D13無機アンカー (No3) となった。

ここで得られた計算値 M_m と完全固定 (剛接) であると仮定した時の曲げモーメント M_c の比の推移を図-14に示す。図より最も完全固定に近いのは3-D13折り曲げ定着のNo1ではあるが、その値は1以下であり、完全固定とピンの間である (半剛接の状態である) ことがわかる。以下、3-D13樹脂アンカー (No2)、2-D16樹脂アンカー (No4)、3-D13無機アンカー (No3) の順に完全固定状態から離れることが確認された。また、時間経過による変動はほとんどないことも確認できる。

ここで、No1試験体では主筋の抜け出し変位が他の試験体に比べて大きいこと、中立軸深さ X_n の計算値が小さくなる。そのため、応力中心間距離 j_m が大きくなり、これが原因で M_m の計算値が大きくなったものと考えられる。鉄筋引張力 T_m がほぼ同じ場合、中立軸深さ X_n が小さくなれば、その分コンクリートの圧縮縁ひずみ ϵ_c が大きくなること推察される。 T_m 、 X_n 、スラブコンクリートの静弾性係数を用いて算出した ϵ_c の推移を図-15に示す。図より、3-D13折り曲げ定着のNo1試験体ではコンクリートの圧縮縁ひずみが他の試験体に比べ3割程度

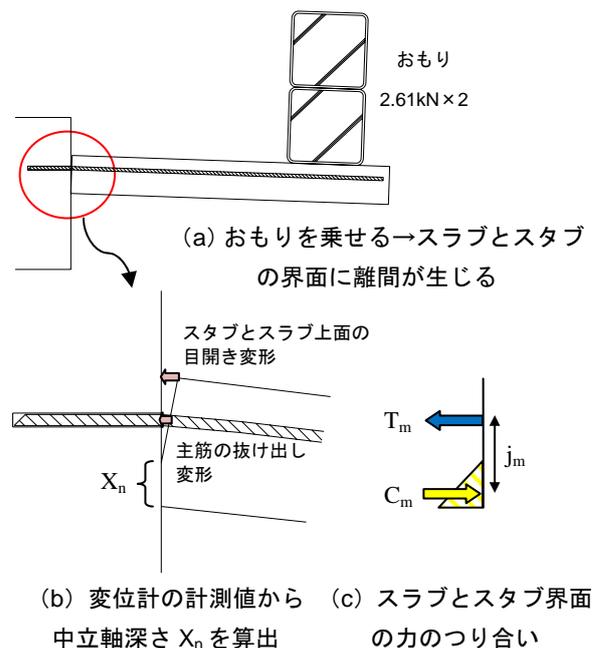


図-11 曲げモーメント M_m 算出の仮定

大きかったことがわかる。一方で、 ϵ_c の値は相対的に小さく、大きく増加はしていないことから、コンクリートのクリープ変形が進行していたとは考えにくい。したがって、長期荷重によりおもり直下の鉛直変位が進行した主要因は、スラブに順次ひび割れが発生したことによる変形の蓄積と剛性の低下にあったと推察される。このことは、長期荷重によるおもり直下の鉛直変位が最も小さかった3-D13樹脂アンカーのNo2試験体でひび割れ本数が少なかったこととも因果関係にあるといえる。

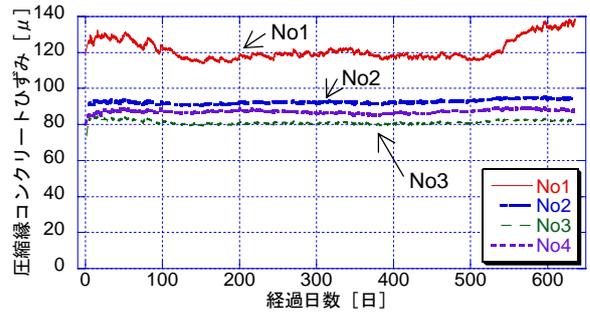


図-15 ϵ_c の推移

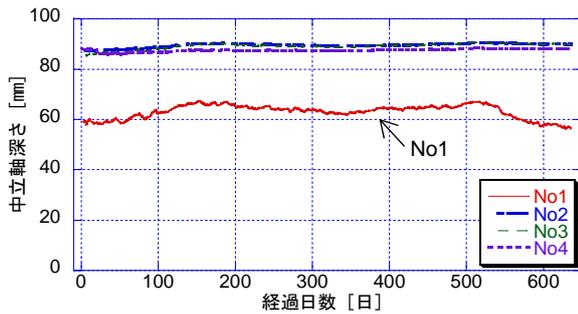


図-12 中立軸深さ X_n の推移

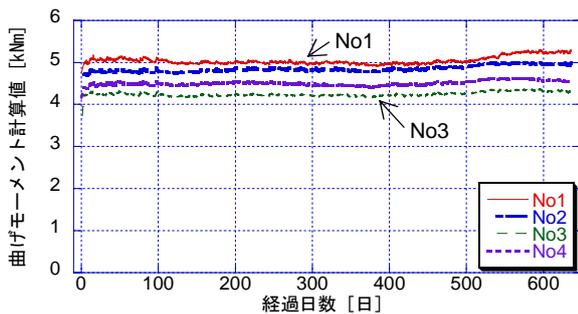


図-13 曲げモーメント M_m の推移

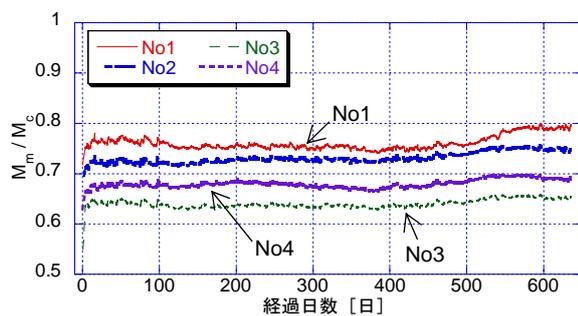


図-14 M_m/M_c の推移

5. まとめ

あと施工アンカーを用いた片持ちスラブの長期荷重実験を行い以下の知見を得た。

- (1) おもり直下の鉛直変位は約1年9ヶ月を経てもわずかではあるが増加を続けた。
- (2) 荷重直後にはスラブとスタブの界面にのみひび割れが発生したが、その後スラブ部分にひび割れが発生し、時間の経過に従ってひび割れ本数は徐々に増え、ひび割れとひび割れの間隔が狭くなっていく傾向が見られた。
- (3) すべての試験体で完全固定の状態ではなく、スタブからの主筋の抜け出しが生じることによって完全固定の状態から離れた(半剛接合状態になった)と考えられる。3-D13 折り曲げ定着が完全固定状態に最も近く、以下3-D13樹脂アンカー、2-D16樹脂アンカー、3-D13無機アンカーの順に完全固定の状態から離れていった。
- (4) 本実験における鉄筋の抜け出し変形の増加量は最大でも0.3mm程度と非常に小さい値であった。

参考文献

- 1) 国土交通省：あと施工アンカー・連続繊維補強設計・施工指針，国住指第501号別添，2006.5
- 2) 川西泰一郎：ひばりが丘団地既存住棟におけるルネッサンス計画1-住棟単位での改修技術の開発-，コンクリート工学，Vol.48，No.10，pp.34-40，2010.10