

論文 スラブ筋定着にあと施工アンカーを用いた RC 床の長期積載荷重下での構造性能に関する研究

香取 慶一*1・佐藤 恵*2・向井 智久*3・南部 禎士*4

要旨：あと施工アンカーに長期応力が作用した場合の構造性能の解明を目的に、RC 床スラブのスラブ筋をあと施工アンカーで周囲に定着させた試験体を作成し、2 年以上にわたり長期積載荷重実験を行った。集合住宅の居室を想定した積載荷重に相当する荷重を載荷したところ、試験体のたわみやひび割れといった変形は、載荷開始後 1 年までの期間内にほぼ増加が終息した。それら変形はスラブ筋を通常の直線定着させた試験体のそれと比較しても、大きな差異は確認されなかった。

キーワード：あと施工アンカー、床スラブ、長期荷重、たわみ、ひび割れ、抜け出し

1. はじめに

本来は硬化したコンクリートに機器や配管などを取り付けるために使うなど小規模な施工への使用に限定されていた「あと施工アンカー」は、現在では限定的範囲とはいえ、建築物・土木構造物における耐震補強部材の取り付けにも使用されている。この際の施工の容易さから、近年はあと施工アンカーによる耐震補強部材以外の構造部材の取り付けを解禁すべきとの要請が多い。しかしながら、例えばあと施工アンカーに関する各種の長期許容応力度が本稿執筆時点（2019 年 3 月）で有効な建築基準法のもとでは制定されていないこともあり、今すぐの使用解禁は不可能である。使用解禁に当たっては、技術的資料のさらなる蓄積やそれらの評価方法の確立・拡充が必要となる。

このような背景のもと、近年の建築基準整備促進事業において、あと施工アンカーを耐震補強部材以外の構造部材にも活用するための技術的検討が展開されている。著者らも上記事業に参画し、既存の RC 建物を対象として、床スラブ（以下、スラブと称する）を増設する場合を想定してその床スラブ筋を建物本体へあと施工アンカーにより定着するような事例を想定し、試験体の作成およびスラブへの長期荷重積載荷重を行う実験を実施した。この実験を通し、軸引張力およびせん断力を長期間受けるあと施工アンカーの構造性能および床スラブの構造性能の解明を行うことが、本研究の目的である。このような「想定」にかなうものとして、例えば既存の RC 造集合住宅の建物にバリアフリー化を意図して後付けでエレベータを設置するとして、そのエレベータホール床を新たに増設する場合が考えられる。

なお、本研究ではたわみなどの変形やあと施工アン

カーの抜け出し量などが、通常の RC 建物のスラブのそれや通常のあと施工アンカーに生じるそれよりも大きくなりやすい条件をあえて設定していることを付記しておく。また、本研究はあと施工アンカーを構造部材に用いる場合の適切な適用に資する技術資料の収集を目的として行っているため、一般に使用されることがない、周囲に梁などの部材がない片持ちスラブをあえて試験体として設定していることも付記しておく。

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体名および試験体スラブ部分の配筋状況を表-1 および表-2 に、試験体形状を図-1 および図-2 に示す。試験体は、外形状の特徴から、スラブ両端に柱型に相当するスタブを有する「一方向スラブ型」と、スラブの一端に柱型に相当するスタブを有する「片持ちスラブ型」に大別される。一方向スラブ型試験体のうち、スラブ筋をスタブ内に定着するのに、いったんスラブ筋を別の鉄筋（あと施工アンカー筋 D13）に重ね継手し、そのアンカー筋をあと施工アンカーでスタブ内に定着させたものが AH 試験体で、比較のために在来工法を用いて定着筋（AH 試験体のあと施工アンカー筋に相当 D13）をスタブ内に直線定着させたものが BA 試験体である。いずれも、床部分は長さ 5760mm、幅 1000mm で厚さは 200mm である。一方、片持ちスラブ型試験体でも同様で、AH 試験体と同じ方法であと施工アンカーを用いたものが CA 試験体であり、BA 試験体と同じ方法で直線定着させたものが CB 試験体である。なお、CA 試験体と CB 試験体のスタブは、同一である。いずれも、床部分は長さ 2350mm、幅 1000mm で厚さは 200mm である。

*1 東洋大学 理工学部建築学科教授 博士（工学）（正会員）

*2 東洋大学大学院 理工学研究科建築学専攻博士前期課程（会員外）

*3 国立研究開発法人 建築研究所 主任研究員 博士（工学）（正会員）

*4 国立研究開発法人 建築研究所 主任研究員（正会員）

表-1 試験体一覧

試験体名	形状	スラブ部分寸法 (長さ×幅×厚さ)	スラブ筋のスタブへの定着方法
AH	一方向スラブ型	5760mm×1000mm×200mm	接着系あと施工アンカー
BA	一方向スラブ型		標準 (直線) 定着
CA	片持ちスラブ型	2350mm×1000mm×200mm	接着系あと施工アンカー
CB	片持ちスラブ型		標準 (直線) 定着

表-2 各試験体のスラブ部分配筋状態

試験体名	配筋位置	主筋方向		配力筋方向	
		端部	中央	端部	中央
AH BA (共通)	スラブ上端	D13 @150	D13 @300	D10 @300	D10 @300
	スラブ下端	D10 @300	D10 @150	D10 @300	D10 @300
CA CB (共通)	スラブ上端	D13 @150		D10 @300	
	スラブ下端	D10 @300		D10 @300	

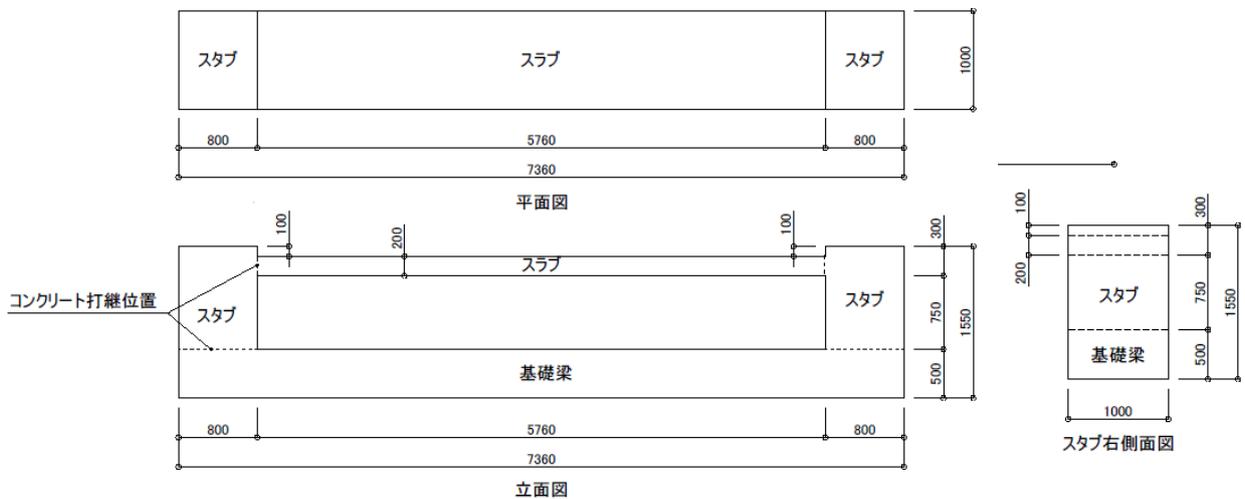


図-1 AH 試験体および BA 試験体の形状図

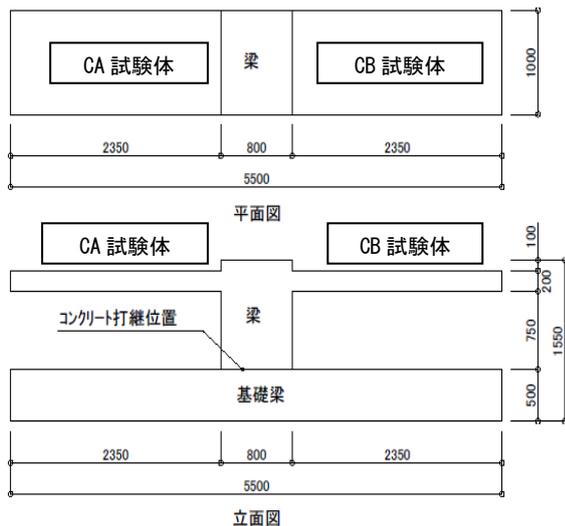


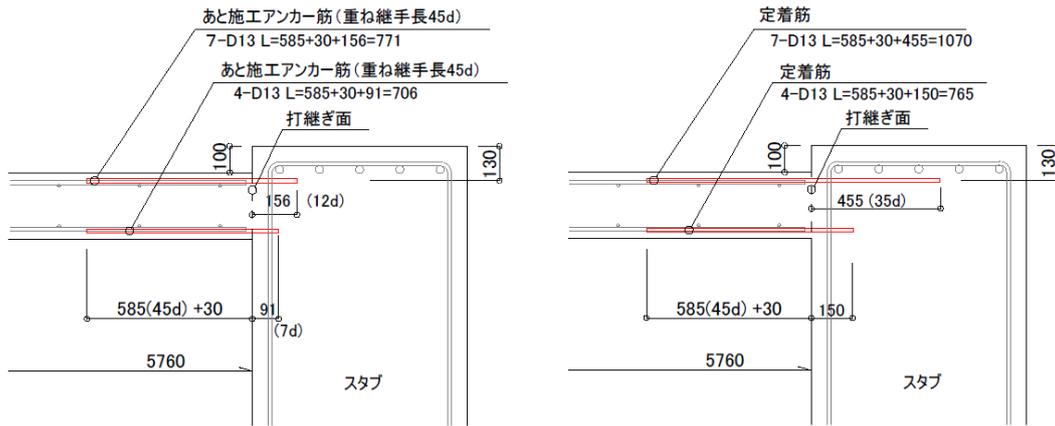
図-2 CA 試験体および CB 試験体の形状図

スラブ筋のうち、スタブとの接合部で引張力を受ける上端筋は、すべての試験体で D13 を用いている。

スラブ筋のスタブへの定着方法について、図-3 に示す。試験体の設計にあたり、「既存建物への床の増設」という趣旨から、BA 試験体および CB 試験体のスラブ上

端筋の定着の検討は、日本建築学会「鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説(1991)」(以下、1991RC 規準と略す 同様に 2010RC 規準や 2018RC 規準の表記も同じ意味)の(29)式による「許容付着応力度による所要定着長さ」の考えにしたがっている。すなわち、直線定着の定着長を定着筋の鉄筋径 $d_a=13\text{mm}$ の 35 倍とした($13 \times 35=455\text{mm}$)。一方、AH 試験体および CA 試験体のスラブ上端筋のあと施工アンカーとしての有効埋込み長さの検討は、あと施工アンカーに作用する組合せ応力の影響を無視したり、あと施工アンカーが最終的にコーン状破壊をしないと仮定したりするなどの条件を与え、「日本建築学会 各種合成構造設計指針・同解説」などを参考に、まず鉄筋径の 15 倍という数値を得た。その上で、あと施工アンカーがより厳しい応力状態となり抜け出し量が増す状況での実験を行いたいとの趣旨から、あと施工アンカー筋の鉄筋径 $d_a=13\text{mm}$ の 12 倍まで有効埋め込み長さを減らした($13 \times 12=156\text{mm}$)。

試験体に使用したコンクリートおよび鉄筋の材料試験結果を、表-3 および表-4 に示す。両材料とも、いわゆる普通強度のものを使用している。



AH 試験体 (CA 試験体も同様)

BA 試験体 (CB 試験体も同様)

図-3 スラブ筋のスタブへの定着方法

使用した接着系あと施工アンカーを構成する接着剤は、ビスフェノール A/F 型エポキシ樹脂主剤と変成脂肪族ポリアミン硬化剤からなる、いわゆる 2 成分混合型注入式エポキシ系接着剤である。

試験体は、基礎梁部分、スタブ部分および床スラブ部分から構成されており、コンクリート打設はその順番にしたがって、日を変えて行った。

なお、後述する 3.1 節での分析の基礎資料を得るために、試験体に使用したコンクリートと同じバッチのコンクリートでできた版を使って、試験体留置場所と同じ場所でコンクリートの乾燥収縮ひずみの測定も行っている。

2.2 載荷方法・測定方法・試験体留置状況

試験体の留置状況および載荷状況を写真-1 に示す。試験体の留置および実験の実施は、国立研究開発法人建築研究所の実大構造物実験棟内で行った。試験体のスラブ上に、鉄筋の束を置くことで、長期載荷を行った。



写真-1 試験体留置状況および載荷用鉄筋の積載状況

積載した荷重は、集合住宅の居室を想定して、すべての試験体で 2.5kN/m² とした。なお、諸事情からスラブ上面に載荷用鉄筋束を直置きすることはせず、複数箇所に枕

表-3 試験体に使用したコンクリートの力学的性質

基礎梁部分			スタブ部分			スラブ部分		
材齢 (週)	σ_B	E_c	材齢 (週)	σ_B	E_c	材齢 (週)	σ_B	E_c
4	46.4	---	4	24.0	---	4	21.7	---
13	48.5	2.91	13	27.7	2.31	13	25.6	3.31
26	51.0	2.52	26	31.9	2.36	26	28.8	2.96
109	59.4	3.45	108	38.6	2.84	103	33.6	2.80

σ_B : 圧縮強さ (シリンダー3本の平均値 N/mm²) このほかにスラブ部分のみ材齢 66 週で $\sigma_B=32.5$ N/mm²
 E_c : 圧縮ヤング係数 (シリンダー3本の 1/3 割線剛性の平均値 $\times 10^4$ N/mm²) このほかにスラブ部分のみ材齢 66 週で $E_c=2.74 \times 10^4$ N/mm²

表-4 試験体に使用した鉄筋の力学的性質

D10 (SD295A)				D13 (SD295A)			
σ_y	σ_t	ϵ_{max}	Es	σ_y	σ_t	ϵ_{max}	Es
369	484	17.3	1.68	360	489	22.3	1.79

σ_y : 降伏強さ (上降伏点 試験片 3 本の平均値 N/mm²) σ_t : 引張強さ (試験片 3 本の平均値 N/mm²)
 ϵ_{max} : 破断伸び (試験片 3 本の平均値 %) Es : 引張ヤング係数 (試験片 3 本の平均値 $\times 10^5$ N/mm²)

となる角材を置き、それを介してスラブに積載した。よって、厳密には等分布荷重の積載ではないが、本研究では等分布荷重の積載と等価と見なす。荷重は、2016年2月16日に行い、下記の項目の測定もその日から行っている。

実験における測定項目は、スラブ部分の鉛直変位と水平変位、スラブ部分とスタブ部分の打ち継ぎ部の水平変位、スラブ筋およびあと施工アンカー筋の軸方向ひずみ度、試験体表面に生じるひび割れの観察などである。スラブ部分の鉛直変位は、図-4の横軸に示す番号の位置のスラブ下面で測定している。AH試験体およびBA試験体では、"1"がスラブ長さ中央点であり、"5"および"6"はほぼスラブの端部（スタブとの接合部）であり、"3"および"4"は"1"と"5"の中間および"1"と"6"の中間に相当する。CA試験体およびCB試験体では、"1"がスラブ先端点であり、"4"はほぼスラブの端部（スタブとの接合部）に相当する。

試験体のひび割れ観察は、荷重用鉄筋が載っている床部分上面は荷重用鉄筋を一時的に除去して合計7回行っている。一方、それ以外の部分のひび割れの観察は1か月から2か月に1回行っている。

試験体は、実験室の屋内に留置しており、外気や雨にはさらされていない。

3. 実験結果と考察

3.1 長期たわみ

(1) 測定結果

荷重から約2年半経過した2018年8月16日までの間の試験体の長期たわみ分布図を図-4に示す。4試験体に共通して見られる特徴として、以下の項目が挙げられる。

1. 荷重を開始した2016年2月16日から2か月後の2016年4月16日までの間に、長期たわみの約50%が発生している。
2. 荷重開始から8か月後の2016年10月16日以降は、長期たわみの増加が極めて緩慢になり、たわみの増加がほぼ沈静化したとみられる。
3. AH試験体とBA試験体の長期たわみを比較すると、値に顕著な差が確認できなかった。
4. CA試験体とCB試験体の長期たわみを比較すると、スラブ先端部でCB試験体のたわみがCA試験体のそれよりも大きくなっていった。

荷重開始前の予想として、あと施工アンカーの抜け出しは直線定着されたスラブ筋のそれより大きくなり、この影響により試験体の長期たわみもBA試験体・CB試験体よりもAH試験体・CA試験体の方が大きくなるも

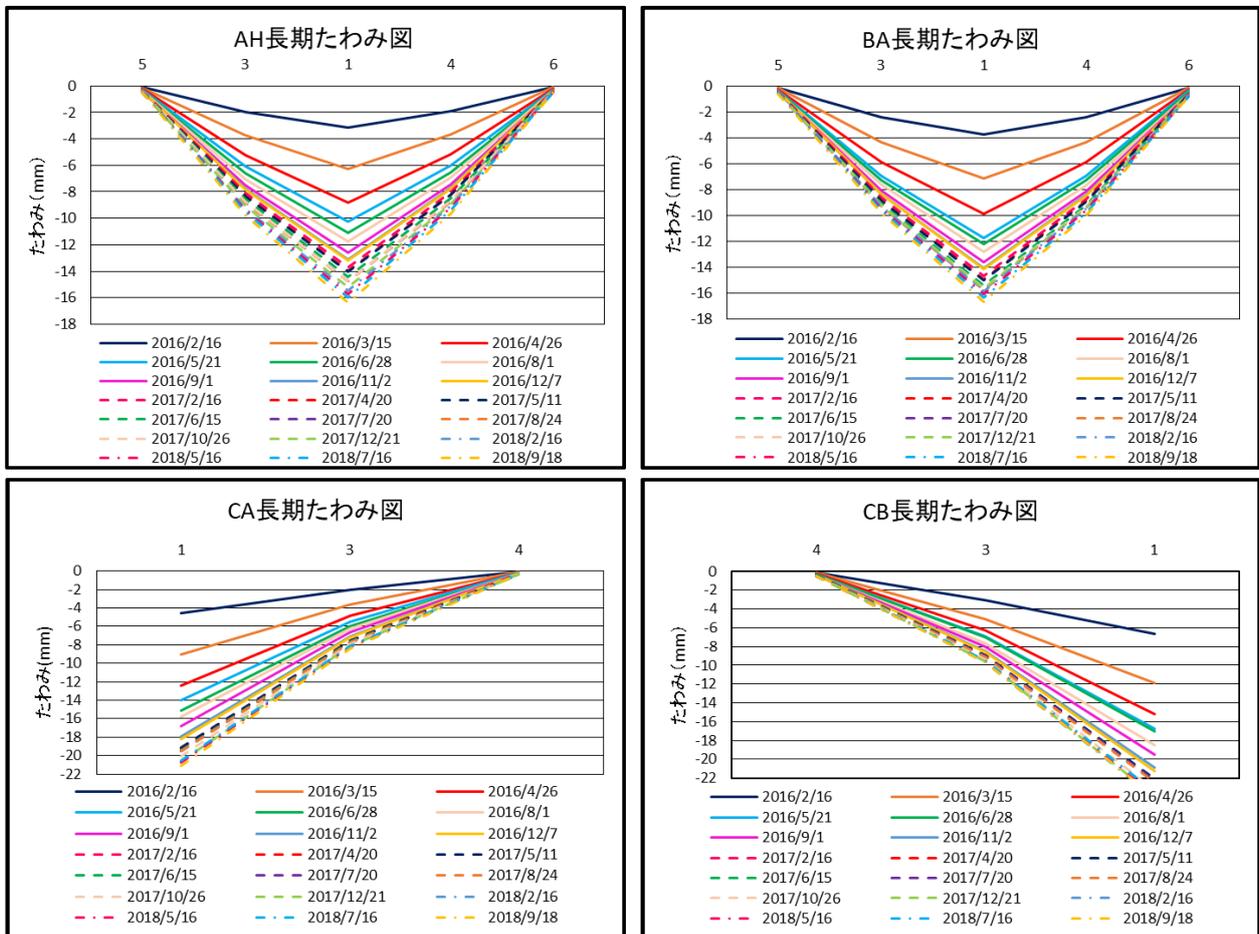


図-4 試験体長期たわみ分布図

のと考えていた。しかしながら、測定結果ではそのような傾向は確認できず、本研究の実験条件の範囲では、あと施工アンカーをスラブ筋の定着使用した場合のスラブの長期たわみは、直線定着された試験体のそれとほぼ同等となる結果を得た。

(2) 長期たわみ倍率および長期たわみの構成要因

AH 試験体および BA 試験体のスラブ長さ中央部分のたわみは、構造力学の弾性計算により $\delta_e=1.46\text{mm}$ であることが事前に分かっている。2010RC 規準によると、既往の研究結果の分析からスラブの長期たわみ倍率がおよそ 16 倍になることが示されている²⁾。これをもとに、スラブ長さ中央部のたわみ測定値を δ_e で除すことで、長期たわみ倍率 κ が求められる。表-5 に、荷重開始から 2 か月ごとのたわみ倍率を示す。本実験の測定結果を基にすると、長期たわみ倍率は 11.4 倍程度の範囲に収まっている。今後荷重を継続してもたわみが急増するとは思えないため、長期たわみ倍率は 11.4 程度と判断できる。

一方、2010RC 規準および 2018RC 規準のともに「付7.2³⁾には、長期荷重を受ける部材の長期たわみの主な構成要因として、「ひび割れの影響 Kcr」「コンクリートのクリープの影響 Kcp」「乾燥収縮の影響 Ksh」「スラブ筋などの抜け出しの影響 Ks」を挙げ、長期たわみ δ_L は上記の弾性たわみ δ_e に対して、以下の式で評価できるとしており、あわせて Kcr から Ks までの係数の求め方を示している。

$$\delta_L = (Kcr + Kcp + Ksh + Ks) \times \delta_e \quad (1)$$

本研究の試験体のうち、BA 試験体は在来一体打ち RC 床スラブに相当するが四周にスタブがあるわけではないので、2010RC 規準での長期たわみの考え方に厳密に準拠しているわけではない。さらに、AH 試験体はスラブ筋定着にあと施工アンカーを使用しているという条件だけでこの考え方からは完全に逸脱しているといえる。しかしながら、長期たわみの測定結果および後述するひび割れ観察結果で AH 試験体と BA 試験体に大きな違いが確認されなかったこと、および前述のとおり「本来想定される長期たわみ倍率 16 倍に対して実際は 11.4 倍程度である」との実験結果から四周にスタブのないことが長期たわみに与える影響は小さいと判断し、AH 試験体・BA 試験体ともに 2010RC 規準および 2018RC 規準の考え方に従うと仮定し、長期たわみの 4 つの構成要因についての分析を行う。

2018 年 8 月 16 日の測定結果およびコンクリートの圧縮強さとして表-3 の欄外に示す材齢 66 週時点での圧縮強さを用いると、2018RC 規準に示す 4 つの構成要因に対する係数は、 $Kcr+Kcp=7.16$ 、 $Ksh=0.92$ 、 $Ks=2.02$ と求まり、ゆえに $Kcr+Kcp+Ksh+Ks=10.10$ となる。前述のとおり、実験結果から得られた長期たわみ倍率は 11.4 程度となっていることから、2010RC 規準および 2018RC 規準の考え方は、AH 試験体および BA 試験体の長期たわみの

表-5 長期たわみ倍率の変化 (AH 試験体, BA 試験体)

観察年月日 (年/月/日)	AH 試験体		BA 試験体		観察年月日 (年/月/日)	AH 試験体		BA 試験体	
	たわみ測定値 $\delta_l(\text{mm})$	長期たわみ 倍率 κ	$\delta_l(\text{mm})$	κ		$\delta_l(\text{mm})$	κ	$\delta_l(\text{mm})$	κ
2016/2/16	3.13	2.14	3.735	2.56	2017/6/16	14.365	9.84	15.35	10.5
2016/4/16	8.565	5.87	9.56	6.55	2017/8/16	14.715	10.1	15.615	10.7
2016/6/16	10.8	7.40	11.965	8.20	2017/10/16	14.83	10.2	15.695	10.8
2016/8/16	12.435	8.52	13.52	9.26	2017/12/16	14.845	10.2	15.68	10.7
2016/10/16	13.105	8.98	14.08	9.64	2018/2/16	15.48	10.6	15.83	10.8
2016/12/16	13.305	9.11	14.235	9.75	2018/4/16	15.7	10.8	16.05	11.0
2017/2/16	13.685	9.37	14.645	10.0	2018/6/16	15.795	10.8	16.16	11.0
2017/4/16	13.88	9.51	14.835	10.16	2018/8/16	16.265	11.1	16.58	11.4

κ : δ_l を $\delta_e (=1.46\text{mm})$ で除した値

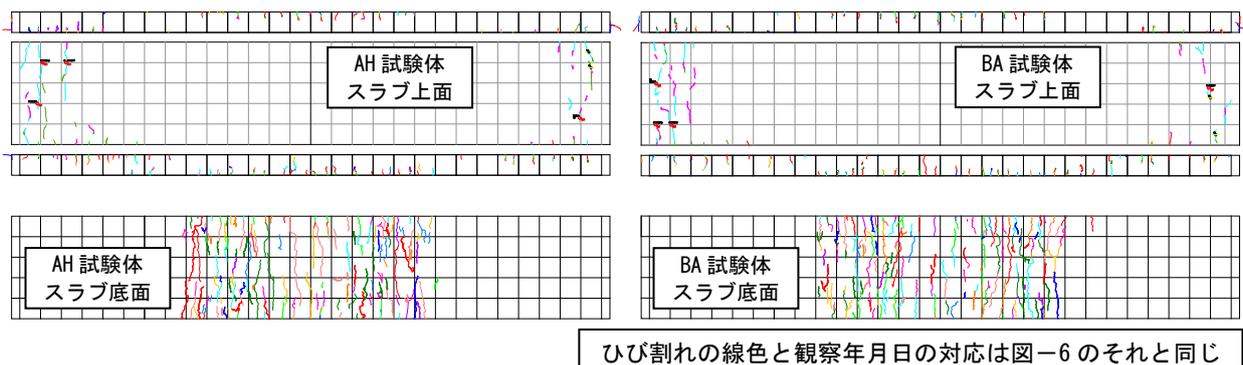


図-5 AH 試験体および BA 試験体のひび割れ分布図

長期たわみの評価に対しても適用可能と判断される。

3.2 ひび割れ分布

荷重用鉄筋束は基本的に動かさないで、試験体のひ

び割れの観察は、スラブ底面と側面、およびスタブ部分を中心に行った。試験体のひび割れ分布図を図-5 および図-6 に示す。なお、図-5 と図-6 の凡例は共通である。AH 試験体と BA 試験体のひび割れ分布について考察すると、荷重開始後のごく初期にはスラブ底面が曲げモーメントによる引張側になるスラブ長さ中央部付近にスラブ幅全域を横切るような長さの長いひび割れが生じた。その後、スラブ端部がスタブから抜け出すことに合わせて曲げモーメントによる引張側がスラブ中央部から左右両端部側へと拡大することに合わせて、ひび割れが生じる範囲もスラブ長さ中央部から左右両端部へと広がっていった。しかし、スラブ幅全域を横切るような長さの長いひび割れは、荷重開始後 14 か月経過した 2017 年 4 月の観察時に確認できたものが最後で、その後は長さの短いひび割れが分散的に生じるようになった。この傾向は CA 試験体や CB 試験体でもほぼ同じであり、この点から、荷重開始後 1 年ほどでひび割れの発生もほぼ終息したものと判断される。この点は、3.1 節で示した長期たわみの増加の終息時期よりは長くなっているものの、大略して荷重開始後 12 か月程度で試験体の変形は全体的にほぼ終息したものと判断できる。

AH 試験体と BA 試験体、および CA 試験体と CB 試験体のひび割れ分布図を比較すると、特に顕著な差は見られなかった。以上より、本研究の実験条件の範囲では、あと施工アンカーをスラブ筋の定着に使用した場合のスラブに生じるひび割れは、直線定着された試験体のそれとほぼ同等となる結果を得た。

3.3 あと施工アンカー筋の抜け出し

スタブからのあと施工アンカー筋の抜け出し量の時間的変化を図-7 に示す。抜け出し量は、変位計で測定したスラブとスタブの間の水平変位（目開き量）からひずみゲージで測定したあと施工アンカー筋の伸び量を差し引いたものとする。荷重開始後 6 か月ほどの間に抜け出し量が大きく増加するものの、その後は増加が緩慢になっていることが分かる。AH 試験体では荷重期間中の夏季（毎年 8 月ころ）に抜け出し量がやや増加する傾向にある。AH 試験体に使用したあと施工アンカーの接着剤は摂氏 40 度近辺でやや軟化することが事前に分かっ

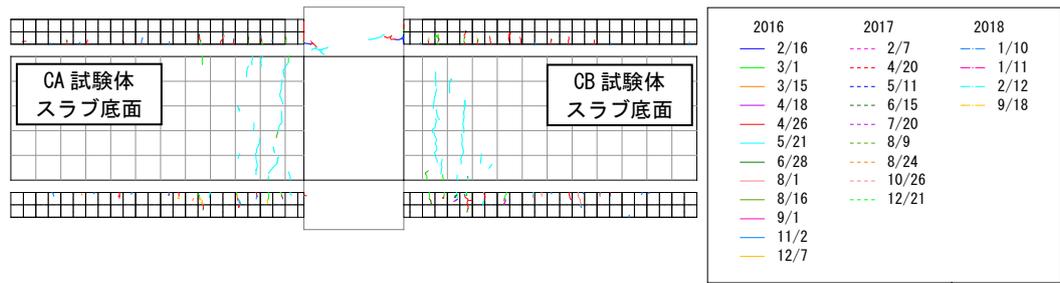


図-6 CA 試験体および CB 試験体のひび割れ分布図



図-7 あと施工アンカー筋のスタブからの抜け出し量の経時変化

ており、この傾向の原因と考えられる。AH 試験体と BA 試験体では抜け出し量に最大で 0.1mm 程度の差はあるものの、大局的な傾向としては、ほぼ同じといえる。

4. 結論

RC 造床スラブを対象に、スラブ筋の定着にあと施工アンカーを使用した試験体に長期応力を作用させる実験を行った。本研究で設定した条件や荷重期間内では、あと施工アンカーを使った場合と、スラブ筋を直線定着させた場合で、構造性能に顕著な差異は確認されなかった。特に、本研究の条件範囲内ではあるが、長期たわみの構成要因やたわみ倍率がスラブ筋定着にあと施工アンカーを使用した場合においても有効である点は、特筆すべきことと考えられる。

参考文献：

- 1)から 3)まで 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説（各年度版）
- 4) 株式会社東京ソイルリサーチ 芝浦工業大学：平成 29 年度建築基準基盤整備促進事業最終成果報告書「あと施工アンカーを用いた部材の構造性能確認方法に関する検討」, 2018.3

註：本研究は、2015 年度から実施された国土交通省建築基準整備促進事業「あと施工アンカーを用いた部材の構造性能確認方法に関する検討（委員長：塩原 等東京大学教授）」および建築研究所の研究課題「既存共同住宅におけるあと施工アンカーを用いた改修技術の実用化に向けた構造性能確認方法に関する研究」の一環として実施されたものである。本稿執筆時点（2019 年 3 月）で荷重は継続中で、今後も荷重を継続する予定である。