

論文 接着式あと施工アンカーの耐久性に関する実験的検証（疲労載荷試験）

菅原 寛文*1・井口 重信*2・水野 光一郎*3・松田 芳範*4

要旨：接着式あと施工アンカーの耐久性の評価方法については、ETAG^{1,2)}やACI³⁾といった欧米の基準では基準化されているものの、試験方法や試験結果の詳細が公開されていないのが現状である。本稿では、耐久性の評価の項目のひとつとして、耐疲労性について繰返し載荷試験を行い、繰返し載荷後の最大荷重、最大荷重時の拔出し量、破壊形態の変化を確認した。その結果、一部の試験条件、材料では繰返し載荷試験中に拔出すものがあった。また、繰返し載荷前後で最大荷重時の拔出し量の低下や、破壊形態が変化する材料がみられた。

キーワード：あと施工アンカー、接着系アンカー、疲労、繰返し載荷

表-1 試験体諸元及び載荷条件

試験体 (直径 ×高さ)	名称	接着 材料	アン カー筋	載荷 回数	載荷振幅 (※)	拘束 非拘束
試験体① (300×200)	1S-1	A・B ・C・D	SNB7 M12	—	静的	拘束
	1R-1			10 ⁵	0.25-0.60	
	1R-2			10 ⁶	0.25-0.50	
	1R-4			10 ⁵	0.25-0.50	
	1R-5			10 ⁴	0.25-0.80	
試験体② (400×250)	2S-2-1	A・B ・C・D・E	PC鋼棒 M20	—	静的	拘束
	2R-4-1			10 ⁵	0.25-0.60	
	2R-4-2					
	2R-4-3			—	静的	非拘束
	2S-2-2			—	静的	
	2S-2-3			—	静的	
	2R-5-1			10 ⁵	0.25-0.60	非拘束
	2R-5-2					
	2R-5-3					

1. はじめに

接着式あと施工アンカーは、長期間にわたってコンクリート中に埋設されるものが多いことから、その性能の評価が重要である。あと施工アンカーの性能のうち、耐久性の評価方法については、ETAG^{1,2)}やACI³⁾といった欧米の基準では基準化されているものの、試験方法や試験結果の詳細が公開されていないのが現状である。日本においては、あと施工アンカー工法的设计・施工指針(案)4)、各種合成構造設計指針・同解説5)においても、その試験方法が明確にされていないのが現状である。

鉄道高架橋の張出しスラブをあと施工する場合などには、列車荷重による繰返し載荷の影響を受けるので十分な耐疲労性が必要である。本稿では、耐久性の評価の項目のひとつとして、必要な性能である耐疲労性に着目して繰返し載荷試験を行い、材料、充填方法、載荷回数、載荷振幅、拘束条件等をパラメーターに検討を行ったので、その結果を以下に記述する。

2. 試験概要

2.1 試験フロー

疲労載荷試験を行うにあたっては、初めに静的載荷試験を行い最大荷重から基準荷重を設定するとともに、最大荷重、最大荷重時拔出し量、破壊形態を記録した。

次に基準荷重をもとに繰返し載荷試験を実施した。載荷中の機械変位と荷重を記録した。所定回数を載荷後にアンカー筋が拔出さず残ったものについて静的載荷試験を行い、最大荷重、最大荷重時拔出し量、破壊形態を記録した。

静的載荷試験結果と繰返し載荷試験後の静的載荷試験結果の比較を行い耐疲労性を評価した。

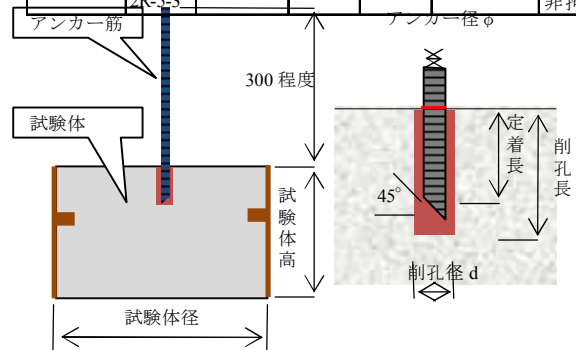


図-1 試験体概要図

2.2 試験体の概要

(1) 試験体とコンクリートの諸元

試験体諸元及び載荷条件を表-1に示す。なお、載荷振幅は基準荷重との比率を示している。試験体の製作にあたっては、紙製の円形ボイド管に設計基準強度 24N/mm²のコンクリートを打込み、あと施工アンカーを固着させる試験体を製作した。試験時のコンクリート強度は 30.0

*1 東日本旅客鉄道(株) 構造技術センター (正会員)

*2 東日本旅客鉄道(株) 構造技術センター 工修 (正会員)

*3 東日本旅客鉄道(株) 東京支社 工博 (正会員)

*4 東日本旅客鉄道(株) 構造技術センター 工博 (正会員)

～31.5 N/mm²であった。試験体の寸法は、図-1のとおりとし、試験体径 300mm、試験体高さ 200mm の試験体①と試験体径 400mm、試験体高さ 250mm の試験体②の 2 ケースとした。

(2) アンカー筋の仕様

試験体①で使用したアンカー筋の仕様は、高温用合金鋼ボルト SNB7 (JIS G4107) 引張降伏強度 725 N/mm² の M12 とした。試験体②で使用したアンカー筋の仕様は、PC 鋼棒 SBPD930/1080 (JIS G3137) 引張降伏強度 1,080 N/mm² の M20 とした。アンカー筋の先端は図-1 のとおりいずれも 45 度カットしたものを用了。

(3) アンカー筋の施工方法

削孔径、定着長、削孔長については、最大荷重がアンカー筋で破断荷重とならないように配慮して設定した。

試験体①については全ての試験体をハンマードリルで削孔径 $d=15\text{mm}$ 、定着長 60mm、削孔長 72mm となるように下向きで穿孔し、アンカー筋の設置及び接着剤の注入については上向きで行った。

試験体②については全ての試験体をハンマードリルで削孔径 $d=25\text{mm}$ 、定着長 100mm、削孔長 120mm となるように下向き穿孔した。アンカー筋の設置及び接着剤の注入についても下向き施工で行った。

(4) 接着剤の種類と充填方法

接着剤には、材料をパラメーターとして 4 種類の有機系材料 (A: エポキシアクリレート, B: ビニルエステル, C: エポキシ, D: アクリル) と 1 種類の無機系材料 (E: セメント) 等を選定した。充填方法をパラメーターに、カプセル方式 (A・B・E)、注入方式 (C・D) の 2 種類を選定した。

2.3 試験方法

(1) 静的荷重試験方法 (疲労前)

疲労前の静的荷重試験の概要を図-2 に示す。試験体のアンカー筋端部には機械式継手を介してテンションロッドを取り付けた。

荷重装置には鋼材引張試験用の万能試験機を用い、下部の荷重梁の下端に試験体を固定し、テンションロッドの上端付近を上部の荷重梁に固定させ上方へ荷重することで、アンカー筋を引き抜いた。下部の荷重梁と試験体の間には、支圧板 ($t=30\text{mm}$) を密着させて設置し、完全剛の状態で行った。

支圧板には、図-3 に示すようにアンカー径に応じて孔径を変えたものを使用した。試験体① (試験体番号 1S-1, 1R-1, 1R-2, 1R-4, 1R-5) については、拘束条件 (1.5d: 孔径 24mm の支圧板) で行った。試験体② (2S-2-1～3, 2R-4-1～3, 2R-5-1～3) については、各材料において荷重方法の違いによる変化を確認するためのパラメーターとして拘束条件 (1.5d: 孔径 40mm の支圧板)、非拘束条

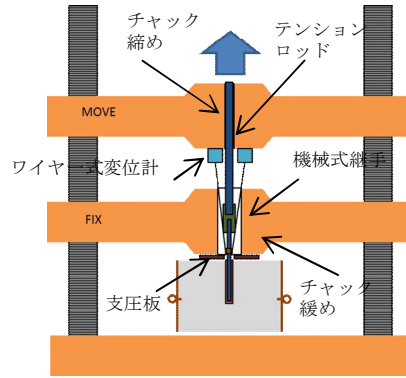


図-2 静的荷重試験方法

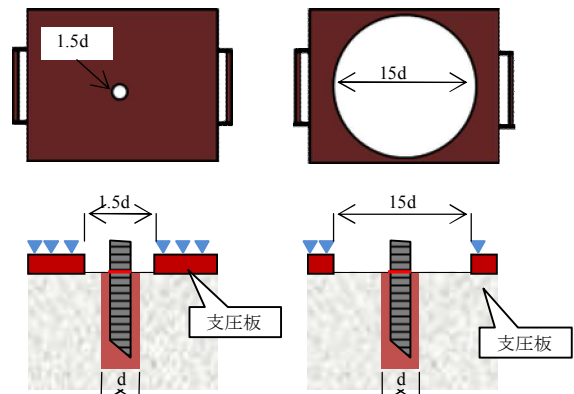


図-3 荷重方法 (左) 拘束, (右) 非拘束

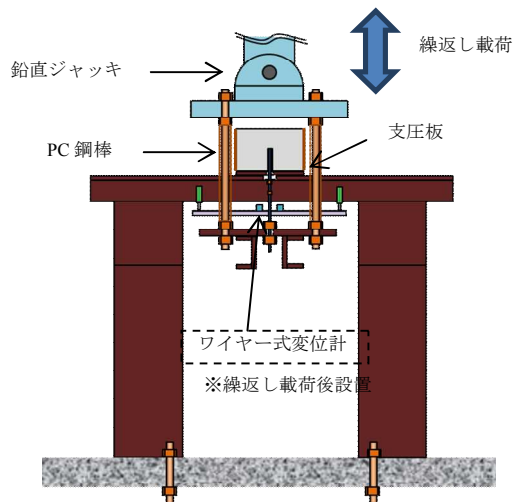


図-4 繰返し荷重試験方法

件 (15d: 孔径 375mm の支圧板) の 2 条件で行った。

試験時の計測項目は、試験機の荷重値と機械変位のほか、試験体上面付近のアンカー筋に取り付けたワイヤースタビライザー 2 個の平均値をアンカー筋の拔出量とした。荷重は、荷重が最大値を超えるまでの間は 0.0～0.5kN/m/sec 程度で行い、その後は適宜、荷重速度を速め、アンカー筋が引き抜けるまで荷重を続けた。

(2) 繰返し荷重試験方法

繰返し荷重試験の概要を図-4 に示す。荷重は、アンカー筋の端部に設置した荷重梁を 4 本の PC 鋼棒を介して

鉛直ジャッキにより載荷することでアンカー筋に引抜き力を発生させて行った。載荷振幅は、ETAG の基準と同様に基準荷重の 0.25~0.60 を基本とし、パラメーターとして最大荷重を 0.50, 0.80 と変化させて行った。載荷回数についても ETAG の基準と同様に 10^5 回を基本とし、パラメーターとして、 10^4 回、 10^6 回と変化させて行った。計測項目は、載荷中の機械変位、荷重である。

(3) 静的載荷試験方法 (疲労後)

変動荷重を所定回数載荷終了した後、アンカー筋が引き抜けていないものについては、アンカー筋の根元付近に計測用の鋼材を固定し、その鋼材の両側 2 か所に抜出し量計測用のワイヤー式変位計を取り付けて、アンカー筋が引き抜けるまで載荷を行った。

3. 試験結果

3.1 静的載荷試験結果 (疲労前)

静的試験の荷重-抜出し量の関係は、全体的に同様の傾向を示している。その一例のグラフを図-5 に示す。また、静的試験時の後のアンカー筋の破壊形態の例を図-6 に示す。破壊形態を分類すると、アンカー筋および接着剤のみが引抜ける付着破壊(a)、アンカー筋近傍のコンクリートがコーン状に引抜けるコーン破壊タイプ(b)、試験体上面にアンカー筋から放射状にひび割れが伸びる割裂破壊タイプ(c)に大別された。コーン破壊タイプ(b)には、アンカー筋端部の方が付着破壊となるものが多かったがこれらもコーン破壊タイプに区分した。

付着破壊タイプは(a)はさらに、接着剤とコンクリート

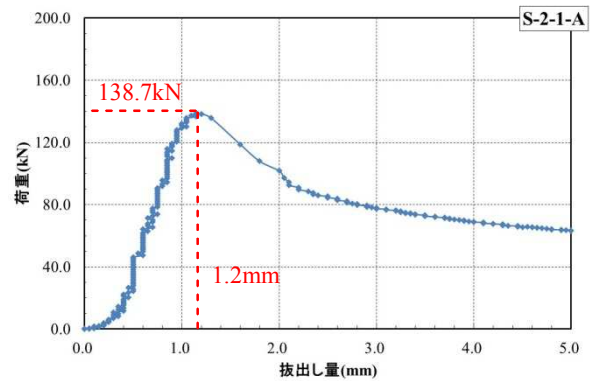


図-5 静的試験の荷重-抜出し量グラフ



(a) 付着破壊 (b) コーン破壊 (c) 割裂破壊



(a-1) 接着破壊 (a-2) 凝集破壊 (a-3) 接着・凝集破壊 (b-1) コーン破壊

図-6 破壊形態の例

表-2 静的載荷試験結果 (疲労前)

試験体名称			載荷条件	最大荷重(kN)		抜出し量(mm)		破壊形態
				実測値	平均	実測値	平均	
1S-1		A	拘束	62.0	62.0	1.40	1.40	凝集
1S-1		B	拘束	77.3	77.3	1.95	1.95	凝集
1S-1		C	拘束	71.2	71.2	1.85	1.85	接着・凝集
1S-1		D	拘束	60.3	60.3	1.30	1.30	凝集
2S-2	1	A	拘束	139.0	139.0	1.20	1.20	接着
2S-2	2	A	非拘束	79.5	84.2	1.90	1.45	割裂
2S-2	3	A	非拘束	88.9		1.00		割裂
2S-2	1	B	拘束	156.0	156.0	1.70	1.70	接着
2S-2	2	B	非拘束	92.3	93.8	1.60	1.30	接着
2S-2	3	B	非拘束	95.3		1.00		割裂
2S-2	1	C	拘束	150.2	150.2	1.20	1.20	接着
2S-2	2	C	非拘束	97.5	101.6	1.00	1.30	割裂
2S-2	3	C	非拘束	105.7		1.60		割裂
2S-2	1	D	拘束	82.50	82.5	9.10	9.10	接着
2S-2	2	D	非拘束	46.2	53.7	1.80	1.75	コーン
2S-2	3	D	非拘束	61.1		1.70		コーン
2S-2	1	E	拘束	93.4	93.4	1.80	1.80	凝集
2S-2	2	E	非拘束	79.1	87.1	0.90	0.95	コーン
2S-2	3	E	非拘束	95.1		1.00		コーン

の界面で引抜ける接着破壊(a-1)、アンカー筋のねじ山付近で引抜ける凝集破壊(a-2)、およびそれらの両者が見られる接着・凝集破壊(a-3)に分けられた。

疲労前の静的荷重試験の結果を表-2に示す。最大荷重は拘束条件の方が非拘束条件よりも大きくなる傾向がみられた。また、破壊形態は拘束条件では付着破壊となり、非拘束条件では割裂またはコーン破壊する傾向にあった。なお、繰返し荷重試験の基準荷重は、最大荷重を用い、同一パラメーターで2体あるものは2体の平均値を用いた。

3.2 繰返し荷重中の機械変位

繰返し荷重試験中の鉛直ジャッキにおける機械変位と荷重の推移を図-7~9に示す。繰返し荷重試験中の機械変位は、大別すると、図-7のようにアンカー筋が抜出さなかったが機械変位が一定あるいは減少したもの、図-8のようにアンカー筋が抜出さなかったが機械変位が増大し続けたもの、図-9のようにアンカー筋が抜出したものの3種類がみられた。

3.3 静的荷重試験結果（疲労後）

疲労後の静的荷重試験の結果を表-3、表-4に示す。ここで、残存強度比および抜出し量比とは、疲労前と疲労後の静的荷重試験の最大荷重の比および抜出し量の比を表す。

1R-1-D、1R-2-Aについては、繰返し荷重中にアンカー筋が破断したため、結果が得られていない。また、拘束条件で基準荷重の0.25~0.60の荷重振幅で試験した1R-5-B、2R-4-1-Eについては、繰返し荷重中にアンカー筋が抜出したため、破壊形態は繰返し荷重試験後のものを表している。

残存強度比が0.90を下回るものは1体、抜出し量比が

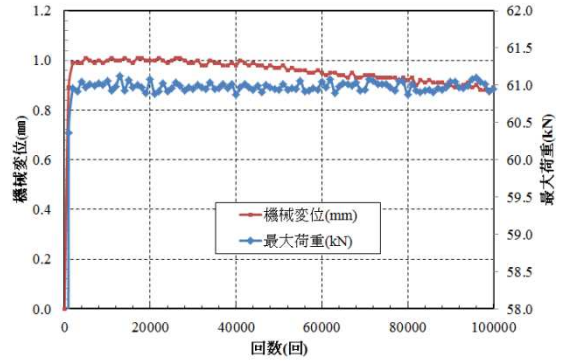


図-7 繰返し荷重中の機械変位（2R-5-1-C）

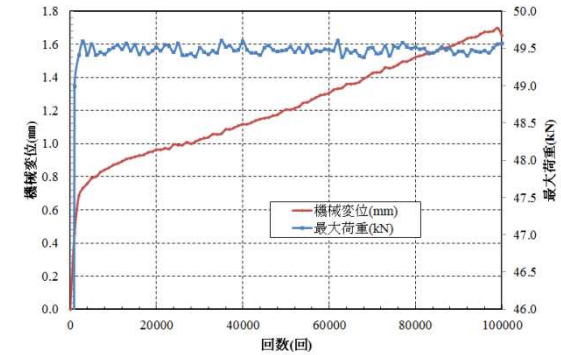


図-8 繰返し荷重中の機械変位（2R-4-1-D）

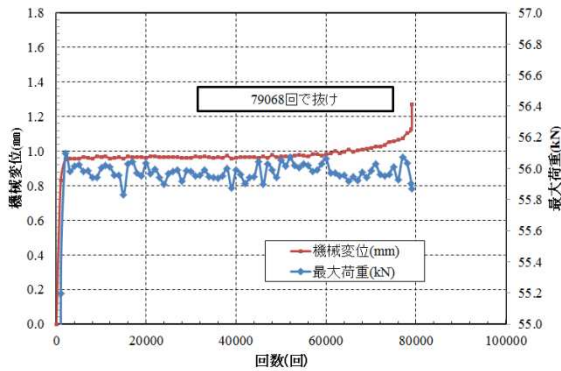


図-9 繰返し荷重中の機械変位（2R-4-1-E）

表-3 試験体①静的荷重試験結果（疲労後）

試験体名称	載荷条件	最大荷重(kN)			抜出し量(mm)			破壊形態	
		実測値	平均	残存強度比	実測値	平均	抜出し量比		
1R-1	A	拘束	64.7	64.7	1.04	1.37	1.37	0.98	接着→接着
1R-1	B	拘束	71.7	71.7	0.93	1.95	1.95	1.00	接着→接着
1R-1	C	拘束	80.3	80.3	1.13	5.12	5.12	2.77	接着→凝集
1R-1	D	拘束	99,000回でアンカー破断						
1R-2	A	拘束	61.4	61.4	0.99	1.67	1.67	1.19	接着→凝集
1R-2	B	拘束	262,756回でアンカー破断						
1R-2	C	拘束	80.3	80.3	1.13	3.21	3.21	1.74	接着→接着
1R-2	D	拘束	66.8	66.8	1.11	1.48	1.48	1.14	接着→凝集
1R-4	A	拘束	60.8	60.8	0.98	1.42	1.42	1.01	接着→凝集
1R-4	B	拘束	74.7	74.7	0.97	2.37	2.37	1.22	接着→凝集
1R-4	C	拘束	79.3	79.3	1.11	2.96	2.96	1.60	接着→凝集
1R-4	D	拘束	63.8	63.8	1.06	1.37	1.37	1.05	接着→凝集
1R-5	A	拘束	61.2	61.2	0.99	1.38	1.38	0.99	接着→凝集
1R-5	B	拘束	412回でアンカー抜出し						
1R-5	C	拘束	66.6	66.6	0.94	1.50	1.50	0.81	接着→凝集
1R-5	D	拘束	71.3	71.3	1.18	1.88	1.88	1.45	接着→凝集

表-4 試験体②静的載荷試験結果 (疲労後)

試験体名称			載荷条件	最大荷重(kN)			拔出し量(mm)			破壊形態
				実測値	平均	残存強度比	実測値	平均	拔出し量比	
2R-4	1	A	拘束	153.9	153.9	1.10	0.65	0.65	0.54	接着→接着・凝集
2R-4	1	B	拘束	154.6	169.1	1.08	1.10	0.80	0.65	接着→接着
2R-4	2	B	拘束	183.6			0.50		0.29	接着→接着・凝集
2R-4	3	B	拘束	141.1 [※]	-	0.90	0.55	-	0.32	接着→(割裂)
2R-4	1	C	拘束	185.8 [※]	-	1.24	1.60	-	1.33	接着→(割裂)
2R-4	1	D	拘束	70.1	70.1	0.85	5.35	5.35	0.59	接着→接着
2R-4	1	E	拘束	79,068回でアンカー拔出し						凝集→(接着・凝集)
2R-5	1	A	非拘束	95.4	95.4	1.13	0.50	0.50	0.34	割裂→割裂
2R-5	1	B	非拘束	83.5	88.0	0.94	0.30	0.15	0.23	割裂→割裂
2R-5	2	B	非拘束	84.8			0.05		0.04	割裂→割裂
2R-5	3	B	非拘束	95.6			0.10		0.08	割裂→割裂
2R-5	1	C	非拘束	94.2	94.2	0.93	0.30	0.30	0.23	割裂→割裂
2R-5	1	D	非拘束	68.9	68.9	1.28	0.55	0.55	0.31	コーン→コーン
2R-5	1	E	非拘束	96.1	96.1	1.10	0.05	0.05	0.05	コーン→コーン

1.1 を上回るものおよび破壊形態が変化するものは複数みられた。

4. 考察

4.1 接着剤の材料・充填方法の影響

疲労前および疲労後の残存強度比, 拔出し量比, 破壊形態の変化を, 表-5, 表-6 に示す。各試験体の耐疲労性の評価として, 下記 3 項目で評価を行うと表-5, 表-6 のようになる。

- ① 破壊形態が疲労前と疲労後で変わらないもの
- ② 残存強度比が 0.9 を上回るもの
- ③ 拔出し量比が 1.1 を下回るもの

評価点が高いものは, 繰返し載荷の影響を受けておらず, 一定の耐疲労性を有しているものと思われる。

残存強度比で 0.90 を下回るものは 2R-4-1D のみであった。また, 2R-4-1E でアンカーが拔出したため, 残存強度比は残っていないと判断した。その他の材料・充填方法においては 0.93 以上となった。拔出し量比では, 1.0 以上となった 2R-4-1C とアンカーが拔出した 2R-4-1E で繰返し載荷の影響を受けているとした。その他の材料・充填方法においては, 1.0 以下となった。破壊形態では, 2R-4-1 の B, C および E において破壊形態の変化が見られた。

4.2 拘束・非拘束の影響

表-5, 表-6 より, 残存強度比については拘束では D を除き, 非拘束ではすべての試験体で 0.93 以上の残存強度比を有していることから, あまり差異はないと考えられる。拔出し量比については, C のみ 1.0 を上回った。その他の試験体では, 拘束よりも非拘束のほうが下回る傾向が見られた。また破壊形態でも, 拘束では B, C, E で破壊形態が変わったのに対し, 非拘束では全て破壊形

表-5 疲労前・疲労後比較 (拘束)

名称	項目	A	B	C	D	E	備考
2R-4-1	破壊形態	○	×	×	○	×	変化なし○
	残存強度比	○	○	○	×	×	0.9以上○
	拔出し量比	○	○	×	○	×	1.1以下○
	評価点	3	2	1	2	0	○:1点, ×:0点

表-6 疲労前・疲労後比較 (非拘束)

名称	項目	A	B	C	D	E	備考
2R-5-1	破壊形態	○	○	○	○	○	変化なし○
	残存強度比	○	○	○	○	○	0.9以上○
	拔出し量比	○	○	○	○	○	1.1以下○
	評価点	3	3	3	3	3	○:1点, ×:0点

態の変化がなかったことから, 影響があったものと考えられる。

接着剤の耐力を確認するうえでは, 繰返し載荷の影響を受けやすい, 拘束条件で試験を行うのがよいと考えられる。

4.3 載荷回数・載荷振幅の影響

1R-2, 1R-4 の残存強度比, 拔出し量比の比較を図-10, 図-11 に示す。1R-2 は載荷回数を 10^6 回, 1R-4 は載荷回数を 10^5 回としたもので, 載荷回数のみがパラメーターとなっている。残存強度比では, ほとんど低下傾向は見られないが, 拔出し量比については, アンカー筋破断とならなかった A, C, D 全ての試験体で, 載荷回数が 10^5 回よりも 10^6 回のほうが, 拔出し量比が 11%ほど大きい結果となった。

1R-1, 1R-4 の残存強度比, 拔出し量比の比較を図-12, 図-13 に示す。1R-1 は載荷振幅が基準荷重の 0.25~0.60, 1R-4 は基準荷重の 0.25~0.50 としたもので, 載荷振幅のみがパラメーターとなっている。残存強度比では, ほとんど差異は見られないが, 拔出し量比では C のみ 1.0 を

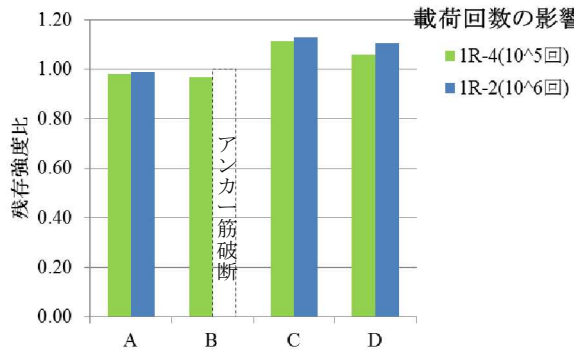


図-10 疲労前後の残存強度比(1R-2, 1R-4)

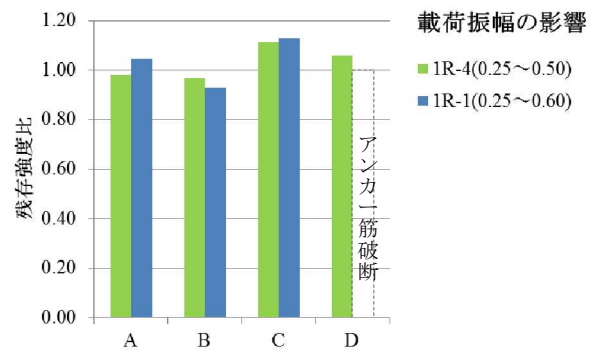


図-12 疲労前後の残存強度比(1R-1, 1R-4)

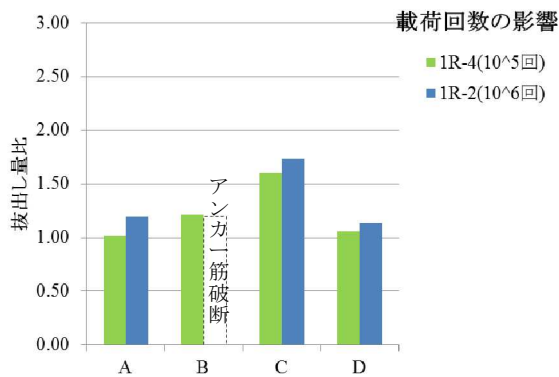


図-11 疲労前後の抜出し量比(1R-2, 1R-4)

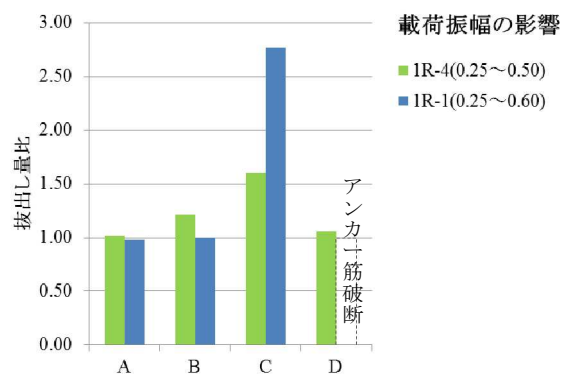


図-13 疲労前後の抜出し量比(1R-1, 1R-4)

上回り、疲労の影響があったと推定される。また、荷重振幅を基準荷重の0.25~0.80とした1R-5Bでは、繰返し荷重中に抜出していることから、この程度の荷重振幅では疲労の影響があるものと思われる。

5. まとめ

本試験によって得られた知見は以下のとおりである。

- (1) 繰返し荷重中に拘束条件で基準荷重の0.25~0.60の荷重振幅で試験したものでアンカー筋が抜出するのが見られた。
- (2) 疲労前、疲労後の残存強度比が0.90を下回るものは1体、抜出し量比が1.1を上回るものおよび破壊形態が変化するものは複数見られた。これらのものは、疲労の影響を受けたものと思われる。
- (3) 荷重回数が多くなると残存強度比では差異がみられないが、抜出し量比では、平均で11%程度大きくなった。
- (4) 荷重振幅が大きくなると残存強度比では差異がみられないが、抜出し量比では大きくなるものが1体見られた。また、荷重振幅を0.25~0.80としたものでは、アンカー筋の抜出するものが1体見られた。
- (5) 拘束条件を変えた場合は、残存強度比の影響は見られないが、抜出し量比では拘束条件より非拘束条件の方が下回るものが多く見られた。また、破壊形態でも、非拘束条件では破壊形態の変化が見られなか

ったが、拘束では5体中3体に変化が見られた。以上より、接着剤の性能を確認するには拘束条件で試験するのがよいと考えられる。

今後は、繰返し荷重の影響を受ける荷重振幅を確認するために、拘束条件で荷重振幅をパラメーターに試験を行っていく予定である。

謝辞: 本試験は日本建築あと施工アンカー協会(JCAA)との共同試験により実施したものであり、あと施工アンカーの施工にあたっては多大なるご協力を頂いた。記して謝辞としたい。

参考文献

- 1) EOTA : ETAG001 Part five : BONDED ANCHORS, Apr. 2013
- 2) EOTA : ETAG001 Annex A: DETAILS OF TESTS, Apr. 2013
- 3) ACI:355.2, Qualification of Post-Installed Mechanical Anchors in Concrete & Commentary, 2001
- 4) 土木学会, コンクリートライブラリー141, コンクリートのあと施工アンカー工法の設計・施工指針(案), 2014.3
- 5) 日本建築学会, 各種合成構造設計指針・同解説, 2010
- 6) 水野光一郎, 井口重信, 門真太郎: 接着系あと施工アンカーの疲労耐性評価試験, 土木学会第69回年次学術講演会, 2014.9