

論文 コンクリート打設直後に地震動を受けた後の鉄筋とコンクリートの付着特性に関する基礎的研究

兵間 将吾^{*1}・貞末 和史^{*2}

要旨：コンクリート打設直後に RC 構造物が地震や強風による振動を受けた場合、地震によって建物が倒壊しなかった場合でも、鉄筋とコンクリートの一体性が失われ、建物の耐震性能が乏しくなることが推測される。本研究では、コンクリート打設直後の RC 要素試験体に振動を与える実験を行い、その RC 要素試験体のコンクリートが硬化後に鉄筋とコンクリートの付着特性を調べる静的載荷実験を行なって、振動の変位振幅が大きくなるような振動条件下では鉄筋とコンクリートの相対的なズレが大きくなることを明らかにし、さらに、相対的なズレが大きい場合ほど、鉄筋とコンクリートの付着劣化の程度が大きくなることを示した。

キーワード：付着強度、凝結硬化、地震動

1. はじめに

RC 構造物の構造設計は、コンクリート打設後所要の養生期間を得て、コンクリートが設計基準強度に達しているものとして構造安全性が検討される。しかしながら、RC 構造物は時として建設工事中に地震や強風による振動を受けることがあり、コンクリート打設直後、あるいはコンクリートが設計基準強度に達する前に地震等の外乱を受けた場合、容易にひび割れを生じたり、鉄筋とコンクリートの一体性が失われることが懸念され、その後の建設工事を進めてよいものか判断に悩むことがある。

建設工事中に振動を受ける RC 構造物に関して、土木構造物では、既存のコンクリート道路橋の拡幅工事における自動車等の走行振動を想定して、コンクリート硬化中に継続的な微小振動を受ける RC 部材の力学挙動について検討した実験が行われており、鉄筋を固定し、コンクリート部分のみ振動させることで鉄筋とコンクリートに相対変位を生じさせた場合は付着強度が大きく低下することが報告されている¹⁾。

また、内燃力発電所の増設工事を対象として、発電所運転中に機器により生じる継続振動下でコンクリートが打設される場合の鉄筋とコンクリートとの付着性状に関する実験が行われ、どの程度の振動レベルで付着強度が低下するのか検討されている²⁾。

建築構造物では、コンクリート打設工事中に火山活動に伴う継続的な地震動を受けた RC 建物の実例があり、建設現場での計測振動を基に鉄筋とコンクリートとの付着強度について検討する実験が行われている。この研究では、地震動を受けることによって生じる鉄筋とコンクリートの相対的なズレを静的に与えるという条件下で実験を行い、地震動を受けない場合と比べて付着強度が低下したことが報告されている³⁾。

さらに、コンクリート打設直後に地震動を受けることによって、コンクリートの材料特性がどのように変化するのか確かめた実験も行われており、凝結を開始する前の流動性が高い状態でコンクリートが地震動を受けると骨材が移動し、局所的な材料分離や空隙を生じて、コンクリートの圧縮強度および弾性係数が低下する場合があると報告されている⁴⁾。

また、コンクリート工事の締固め作業中に起こり得る棒形振動機と鉄筋の接触がコンクリートと鉄筋の付着強度に及ぼす影響について研究されており、棒形振動機と鉄筋の接触を過度に行うと付着強度が低下すると報告がある⁵⁾。

上記に挙げた研究では、いずれも振動を受けることによって鉄筋とコンクリートの付着劣化やコンクリートの材料特性が劣化することが報告されている。

一方で、著者らが行った実験では、コンクリートが凝結を開始する前の流動性の高い状態で振動を受ける場合には、コンクリート硬化後の主筋の付着劣化は極めて小さいことが明らかにされている⁶⁾。しかしながら、地震や強風による振動を対象として、コンクリート打設後、どの程度の経過時間で、どの程度の振動を受けると、鉄筋とコンクリートの付着特性はどのような影響を受けるかについては明確にされていない。

本研究では、コンクリート打設直後に鉄筋とコンクリートが相対的にズレ（以下、相対ズレと称す）を生じるような振動を受ける RC 要素試験体を製作し、振動を受けるまでの経過時間、振動条件の違いによって、どの程度の相対ズレを生じるか明らかにし、さらに、振動に伴って生じた鉄筋とコンクリートの相対ズレがコンクリートの硬化が進んだ後の鉄筋の付着特性にどのような影響を与えるかについて検討する。

*1 鹿児島大学大学院 理工学研究科 博士前期課程建築学専攻（正会員）

*2 広島工業大学 工学部建築工学科准教授 博士(工学)（正会員）

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体形状を図-1に示す。試験体は断面 150mm×150mm、長さ 208mm のコンクリートブロックに D19 の異形鉄筋を埋め込んだ形状とし、鉄筋の引き抜き試験を行うものとした。ただし、荷重端および自由端の 29mm (1.5 d_b , d_b は鉄筋径) の区間は付着を絶縁しており、付着長さは 150mm (8 d_b) となっている。コンクリートの打設を 3 回に分けて行っているため、それぞれの打設時において、コンクリート打設直後に振動を受ける試験体と受けない試験体を製作した。

試験体計画を表-1に示す。実験変数は、コンクリート打設直後の振動の有無、コンクリート打設直後に振動を受けるまでの経過時間および振動条件(振動数, 最大加速度)とし、同一条件下の試験体は各々2体とした。コンクリート打設直後に振動を受けるまでの経過時間は、コンクリート凝結始発前、コンクリート凝結中、コンクリート凝結終結後の3種類とした。振動は全て正弦波とし、振動数 f を 2.5Hz, 5Hz の2種類, 最大加速度 A_{cc} は 2.0~9.8m/s² とした。質量の大きさは、同一振動数の条件下では、最大加速度に質量を乗じた値(鉄筋の引き抜き力)が一定となるように計画した(表-1における打設1, 2回目)。ただし、打設3回目に関しては2.3項において述べる理由で、最大加速度の設定値を変えている。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-2, 表-3にそれぞれ示す。

表-1 試験体計画

試験体	加振 時期	振動数 f (Hz)	最大加速度 Acc (m/s ²)	質量 m (kg)	打設
1N0000	なし	—	—	—	1回目
1P0205	凝結始発前	5.0	2.0	310	
1P0505			4.9	124	
1P1005			9.8	62	
1M0205	2.0		310		
1M0505	4.9		124		
1M1005	9.8		62		
1A0205	2.0		310		
1A0505	4.9		124		
1A1005	9.8		62		
2N0000	なし	—	—	—	2回目
2P0202	凝結始発前	2.5	2.0	310	
2P0502			4.9	124	
1P1002			9.8	62	
2M0202	2.0		310		
2M0502	4.9		124		
2M1002	9.8		62		
2A0202	2.0		310		
2A0502	4.9		124		
2A1002	9.8		62		
3N0000	なし	—	—	—	3回目
3P0405	凝結始発前	5.0	3.3	310	
3P0605			5.9	124	
3P1005			9.8	62	
3M0405	3.3		310		
3M0605	5.9		124		
3M1005	9.8		62		
3A0405	3.3		310		
3A0605	5.9		124		
3A1005	9.8		62		

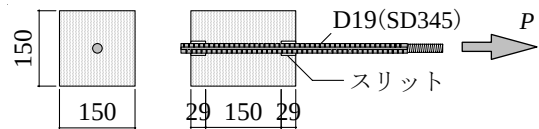


図-1 試験体形状 (単位:mm)

表-2 コンクリートの材料強度(鉄筋引き抜き試験時)

打設	圧縮 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)	割裂 (N/mm ²)
1回目	13.9	23522	1.39
2回目	23.3	25643	2.09
3回目	24.2	23370	2.51

表-3 鋼材の材料強度

降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	伸び (%)
375	563	16.3

2.2 コンクリートの凝結・硬化の進行状況

凝結・硬化の進行状況は、コンクリート打設後、写真-1に示されるプロクター貫入試験を行って確認した。

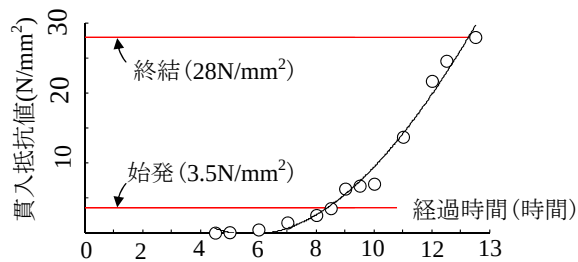
プロクター貫入試験による貫入抵抗値と経過時間の関係を図-2に示す。凝結の進行状況はコンクリート打設時の気温等による影響を受けるが、貫入抵抗値が3.5N/mm²に達する時を凝結始発、28 N/mm²に達する時を凝結終結とし、本実験ではコンクリート打設後、振動を受けるまでの経過時間を表-4に示す時間とした。



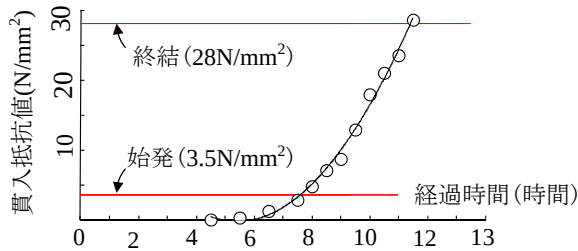
写真-1 プロクター貫入試験

表-4 凝結始発・終結および振動時経過時間

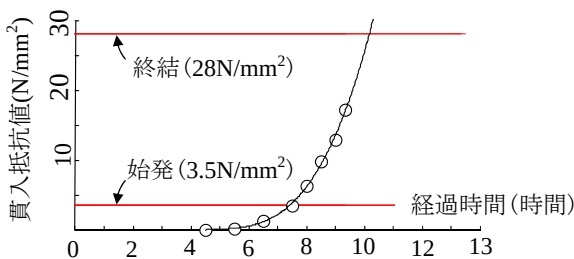
打設		1回目	2回目	3回目
プロクター 貫入試験	始発	8時間30分	7時間40分	7時間30分
	終結	13時間00分	11時間20分	10時間20分
振動時 経過時間	始発前	5時間40分	6時間11分	5時間29分
	凝結中	9時間25分	9時間11分	8時間29分
	終結後	13時間20分	11時間31分	10時間29分



(a) 打設 1 回目



(b) 打設 2 回目



(c) 打設 3 回目

図-2 プロクター貫入試験結果

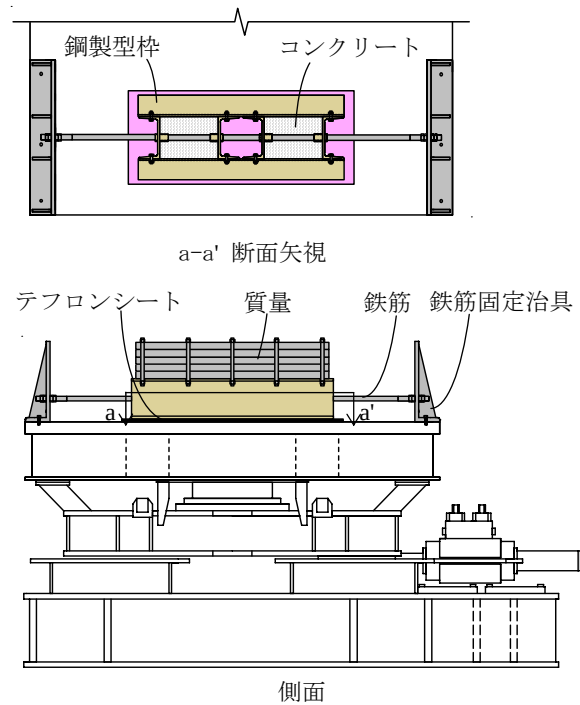


図-3 振動台

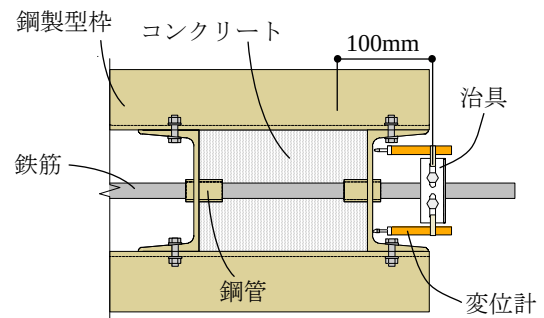


図-4 鉄筋とコンクリートの相対ズレ変位の計測

2.3 加振方法

試験体に与える振動は、図-3 に示す振動台を用い、表-1 に示した振動条件下の正弦波を 60 秒間与えるものとした。試験体は一本の鉄筋に対してコンクリートブロックを 2 つ直列に並べた状態に設置して、ネジ加工した鉄筋の両端を鉄筋固定治具を介して振動台に固定した。型枠は厚さ 6mm の底板と $[-150 \times 75 \times 6.5 \times 10]$ の溝形鋼を組み立てた鋼製型枠を用いており、型枠底板と振動台の間に厚さ 3mm のテフロンシートを 2 枚重ねて挟み、型枠は振動台に固定されていない状態となっている。各試験体両端にはスリットを設けるため、型枠に内径 24.2φ の鋼管を溶接して取り付けている。また、型枠の上部には質量を乗せている。ただし、コンクリート打設 1、2 回目の加振終了後、テフロンシートの動摩擦係数 μ を計測したところ $\mu=0.194$ であることが確認されたため、コンクリート打設 3 回目の加振では、鋼製型枠下面の摩擦抵抗力を考慮した上で、同一振動数の条件下の鉄筋の引き抜き力が一定となるように最大加速度を再設定した。

計測項目は、振動台の加速度 a_{Acc} 、試験体の加速度 s_{Acc} 、鉄筋とコンクリートの相対ズレ変位 δ_p とした。 δ_p の計測は、図-4 に示すように変位計を取り付け、変位計の先端を型枠にあてて計測した。

2.4 鉄筋の引き抜き試験方法

コンクリート硬化後の引き抜き試験の方法を写真-2 に示す。コンクリートに埋め込まれた鉄筋をセンターホール型油圧ジャッキを用いて単調に引き抜いた。荷重はセンターホール型ロードセルを用いて計測し、鉄筋の自由端側の抜け出し量を変位計を用いて計測した。



写真-2 引き抜き試験

3. 実験結果

3.1 計測振動

加振結果の一例を図-5、加振結果一覧を表-5に示す。
表-5の tA_{cc} は振動台最大加速度の計測値、 sA_{cc} は試験体

表-5 加振結果一覧

試験体	振動台 最大加速度 $tA_{cc}(m/s^2)$	試験体 最大加速度 $sA_{cc}(m/s^2)$	振動台 最大変位 $t\delta u(mm)$	相対ズレ 変位 $\delta p(mm)$
1P0205	2.09	2.29	1.99	0.03
1P0505	4.98	4.84	4.97	4.19
1P1005	10.1	8.04	9.94	8.24
1M0205	2.18	2.29	1.99	0.03
1M0505	6.07	5.21	4.97	0.02
1M1005	12.6	27.1	9.94	23.9
1A0205	2.18	2.29	1.99	0.03
1A0505	5.02	5.53	4.97	0.05
1A1005	12.4	34.8	9.94	14.9
2P0202	2.09	2.06	7.35	0.03
2P0502	5.31	7.36	19.9	32.2
2P1002	10.1	12.4	39.8	23.6
2M0202	2.13	2.19	7.35	0.03
2M0502	4.83	12.6	19.9	33.2
2M1002	10.6	30.8	39.8	26.2
2A0202	2.09	2.19	7.35	0.03
2A0502	4.93	5.3	19.9	0.08
2A1002	11.3	37.4	39.8	13.0
3P0405	4.08	2.92	3.53	5.97
3P0605	6.59	6.26	5.93	5.26
3P1005	10.2	8.50	9.94	32.2
3M0405	3.74	6.17	3.53	1.61
3M0605	6.21	15.3	5.93	4.31
3M1005	11.1	28.3	9.94	19.6
3A0405	4.17	9.73	3.53	1.05
3A0605	6.45	13.6	5.93	0.41
3A1005	11.6	40.6	9.94	15.4

最大加速度の計測値、 $t\delta u$ は計測値 tA_{cc} を用いて計算した振動台の最大変位である。

1P0205 と 1P0505 の δp の時刻歴を比較すると、1P0205 の δp は $\pm 0.03mm$ で大きな相対ズレ変位を生じていないのに対して、1P0505 の δp は最大で $-4.19mm$ と大きな相対ズレ変位を生じている。試験体加速度に質量を乗じた力が働くことで生じる付着力が付着耐力を越えると鉄筋とコンクリートが相対ズレを生じるものと思われる。また、1P0205 のように大きな相対ズレ変位を生じない場合の加速度は振動台と試験体でほぼ同じ値を示していることが確認された。一方、1P0505 のように大きな相対ズレ変位を生じている場合の加速度は振動台と試験体で異なる値を示していることが確認された。

図-6、図-7に $tA_{cc}-\delta p$ 関係および $t\delta u-\delta p$ 関係を示す。

各振動条件下について、 $tA_{cc}-\delta p$ 関係を見ると、最大加速度が大きい振動を受けると δp が大きくなっていることがわかる。また、振動数の違いによる影響を確認すると、凝結始発前では低振動数の場合の方が δp が大きくなる傾向があるが、これは、低振動数では大きな変位振幅を受けることが影響しており、 $t\delta u-\delta p$ 関係を見ると $t\delta u$ が大きい場合に δp も大きくなっていることがわかる。大加速度・低振動数の振動を受けて変位振幅が大きくなる振動条件下である場合に δp が大きくなることが確認された。

また、凝結始発前と凝結終結後の $tA_{cc}-\delta p$ 関係、 $sA_{cc}-\delta p$ 関係を比較すると、コンクリート硬化の影響により、同一の振動条件下でも凝結終結後の δp は小さくなる傾向が確認された。

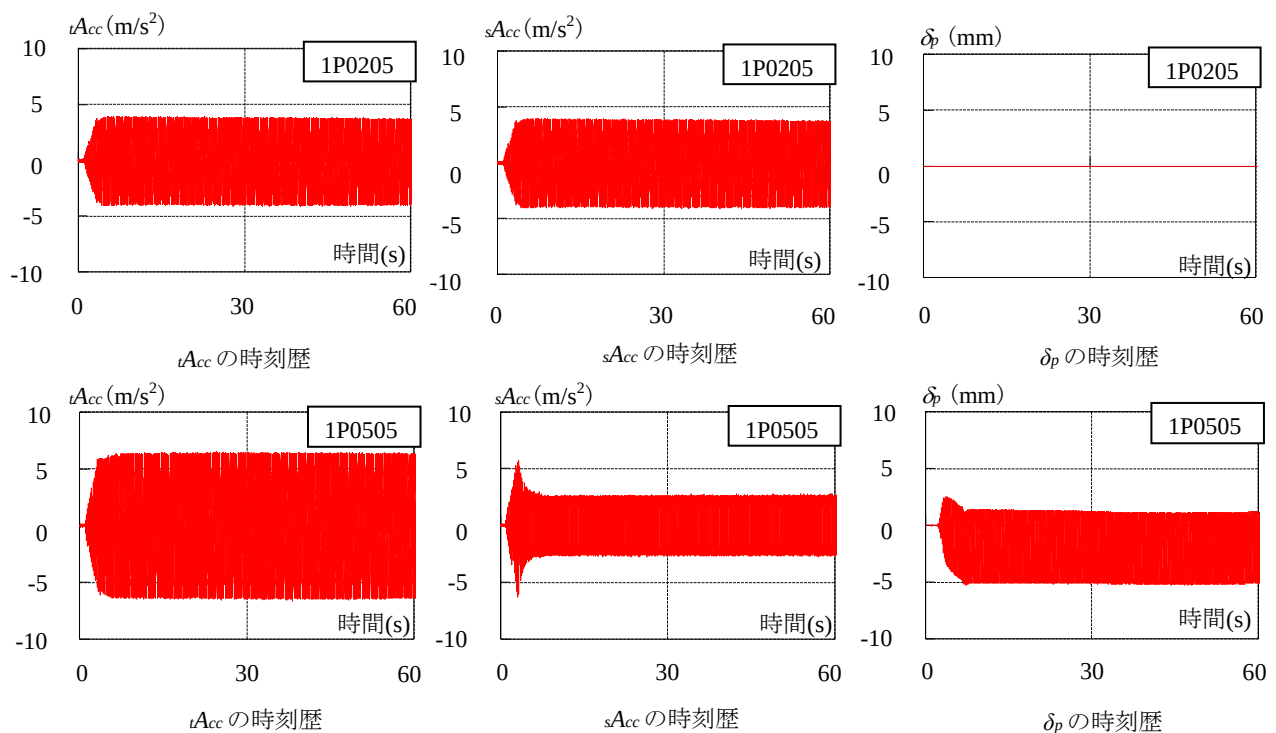


図-5 加振結果

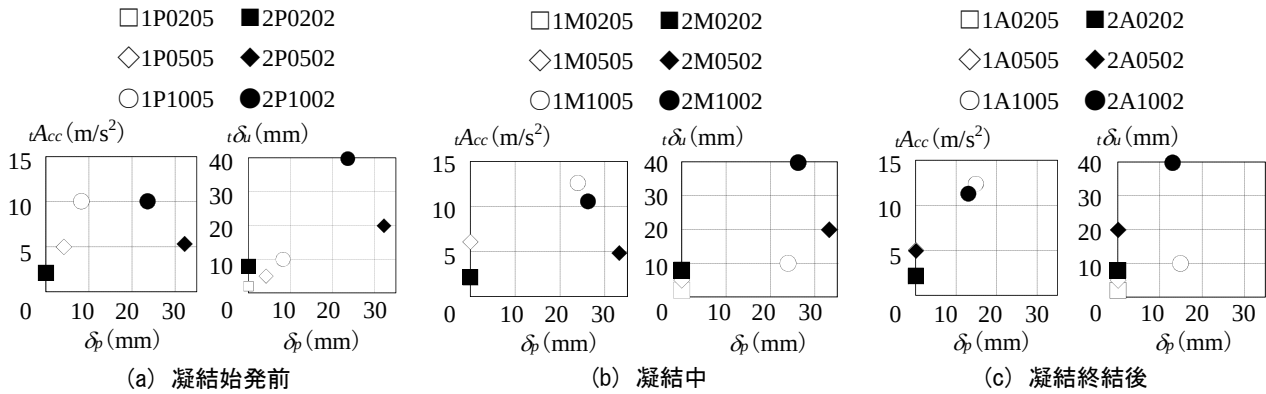


図-6 $tAcc$ — δ_p 関係および $t\delta_u$ — δ_p 関係

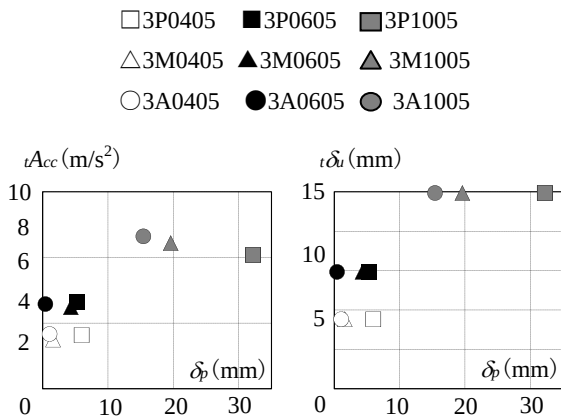


図-7 $tAcc$ — δ_p 関係および $t\delta_u$ — δ_p 関係

3.2 付着信頼強度

本実験で用いた試験体について、鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針⁷⁾に示される付着信頼強度 τ_b の算定を行う。なお、圧縮強度 σ_b は表-2 に示したコンクリートの材料試験結果を用いる。

$$\tau_b = \alpha_t (0.086b_i + 0.11 \sqrt{\sigma_b}) + k_{st} \quad (1)$$

$$\alpha_t = \begin{cases} 0.75 + \sigma_b / 400 & (\text{梁の上端主筋}) \\ 1 & (\text{上記以外の主筋}) \end{cases} \quad (2)$$

$$b_i = \min(b_{si}, b_{ci}) \quad (3)$$

$$b_{si} = (b - N_1 d_b) / (N_1 d_b) \quad (4)$$

$$b_{ci} = \{ \sqrt{2} (d_{cs} + d_{ci}) - d_b / d_b \} \quad (5)$$

$$k_{st} = \begin{cases} (56 + 47N_w / N_1) (B_{si} + 1) p_w & (b_{ci} \geq b_{si} \text{ のとき}) \\ 146A_w / (d_b S) & (b_{ci} < b_{si} \text{ のとき}) \end{cases} \quad (6)$$

ここに、 b は部材の幅 (mm)、 N_1 は主筋の本数 (本)、 d_{cs} は側面かぶり厚さ (mm)、 d_{ci} は底面かぶり厚さ (mm)、 N_w は 1 組の横補強筋の足の数 (本)、 p_w は横補強筋比、 A_w は横補強筋 1 本の断面積 (mm²)、 d_b は主筋径 (mm)、 S は横補強筋間隔 (mm) である。なお、本実験で用いた試験体について、 τ_b を算定すると、圧縮強度 $\sigma_b = 13.9, 23.3, 24.2 \text{ N/mm}^2$ のそれぞれの場合について、 $\tau_b = 2.62, 3.39, 3.45 \text{ N/mm}^2$ という計算結果が得られた。

3.3 破壊状況

鉄筋の引き抜き試験による最終破壊状況の一例を写真-3 に示す。本実験では、鉄筋が抜け出すことによって最大耐力に達する破壊モードとコンクリートが割裂破壊する破壊モードの 2 種類の破壊状態が確認された。



写真-3 最終破壊状況

3.4 最大耐力

図-8 に最大付着応力度の実験値 τ_{max} と加振時の相対ズレ変位 δ_p の関係を示す。図-8 に示した τ_b は 3.2 項で求めた付着信頼強度である。

いずれの振動条件下においても δ_p が大きくなる場合ほど τ_{max} が小さくなる傾向が確認できるが、 δ_p が 5.0mm 程度であっても、 τ_{max} は τ_b を上回っていることが確認された。

表-6 に実験結果一覧を示す。 ${}_0\tau_{max}$ は振動を与えていない試験体の最大付着応力度の実験値である。破壊状態について、○印は 2 体ともコンクリート割裂破壊、●印は 2 体とも鉄筋抜け出し破壊、△は 1 体がコンクリート割裂破壊を生じ 1 体が鉄筋抜け出し破壊を生じた場合である。

$A_{cc} = 9.8 \text{ m/s}^2$ で加振を行った試験体に関しては、2A1002 以外すべての試験体において τ_{max} は τ_b を下回っており、2.5Hz で加振を行った 2P0502 と 2M0502 に関しても τ_{max} は τ_b を下回っていることが確認された。なお、鉄筋抜

け出し破壊は比較的最大付着応力度が小さい場合に生じており、コンクリート割裂破壊は比較的最大付着応力度が大きい場合に生じていることがわかる。

付着応力度と鉄筋の抜け出し量関係の一例を図-9に示す。

1P0505, 1P1005, 2P0502, 2P1002 は鉄筋抜け出し破壊で耐力は小さいが、2P1002 以外の初期抜け出し剛性はほぼ同じになった。また、鉄筋の抜け出し破壊は最大耐力に達した後、緩やかに耐力低下したが、1P0205, 2P0202のようにコンクリートの割裂破壊を生じた試験体は最大耐力に達した後、急に耐力低下することが確認された。

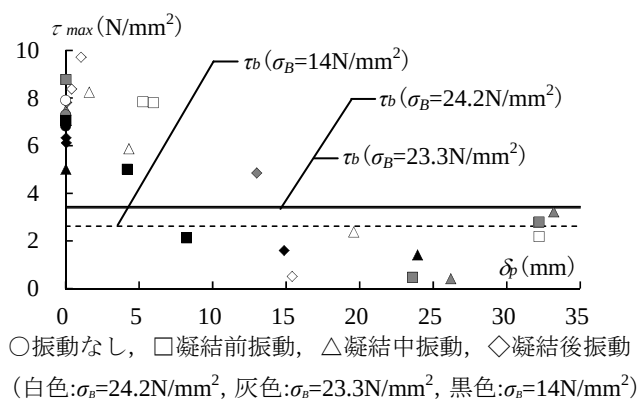


図-8 最大付着応力度－相対ズレ変位関係

表-6 実験結果一覧

試験体	τ_{max} (N/mm ²)	τ_{max} / τ_{max0}	τ_{max} / τ_b	破壊状態
1N0000	6.83	1.00	2.60	○
1P0205	7.06	1.20	2.68	○
1P0505	5.01	0.38	1.90	△
1P1005	2.12	0.06	0.81	●
1M0205	7.06	1.03	2.68	○
1M0505	5.01	0.44	1.90	○
1M1005	1.41	0.06	0.54	●
1A0205	6.33	0.94	2.41	△
1A0505	6.11	1.07	2.32	○
1A1005	1.60	0.66	0.61	●
2N0000	7.30	1.00	2.13	○
2P0202	8.78	1.03	2.56	○
2P0502	2.79	0.73	0.81	●
2P1002	0.47	0.31	0.14	●
2M0202	7.50	1.03	2.19	○
2M0502	3.22	0.73	0.94	●
2M1002	0.41	0.21	0.12	●
2A0202	6.86	0.93	2.00	○
2A0502	7.81	0.90	2.28	○
2A1002	4.85	0.23	1.41	●
3N0000	7.90	1.00	2.30	○
3P0405	7.80	0.99	2.27	○
3P0605	7.84	0.99	2.29	○
3P1005	2.18	0.28	0.64	●
3M0405	8.25	1.04	2.40	○
3M0605	5.87	0.74	1.71	●
3M1005	2.38	0.30	0.69	●
3A0405	9.71	1.23	2.83	○
3A0605	8.38	1.06	2.44	○
3A1005	0.51	0.06	0.15	●

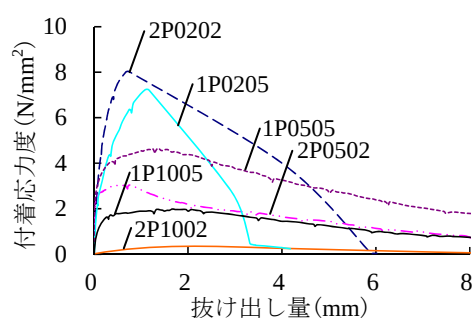


図-9 付着応力度－抜け出し量関係

4. まとめ

コンクリート打設直後の加振実験およびコンクリート硬化後の鉄筋引き抜き試験を行い、以下の結論を得た。

- 1) 最大加速度が大きく低振動数で、変位振幅の大きい振動条件下では、振動を受けることによる鉄筋とコンクリートの相対的なズレが大きくなる。
- 2) 同一振動条件下でも凝結終結後に振動を受ける場合は鉄筋とコンクリートの相対的なズレは小さくなる。
- 3) 振動を受けることによる鉄筋とコンクリートの相対的なズレが大きい場合ほど、コンクリート硬化後の最大付着応力度は小さくなる。

参考文献

- 1) 山下宣博, 平野実, 塚山隆一, 神垣則明: 養生中に継続振動をうけるコンクリートの諸性質について, セメント・コンクリート, No.287, pp.30-38, 1971.1
- 2) 江藤芳武, 平野利光, 深池正樹, 出光隆: 凝結硬化時に継続振動を受ける鉄筋コンクリートの付着強度に関する研究, 土木学会論文集, No.544, pp.223-234, 1996.8
- 3) 川瀬克己, 今村栄一, 勝木政善, 本康久, 室山秀夫: 打込後に断続的地震動を受けたコンクリートの付着強度 その2 室内実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.459-460, 1978.9
- 4) 梶山毅, 住学, 平弘毅: 打込み直後に地震動を受けたコンクリートの強度性状に関する実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.571-572, 2005.9
- 5) 坂本英之, 中田善久, 大塚秀三, 毛見虎雄: 締固めにおける棒形振動機と鉄筋の接触がコンクリートと鉄筋の付着強度に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.33, No.1, pp.383-388, 2011.7
- 6) 貞末和史, 佐藤立美: コンクリート凝結・硬化中に振動を受けた後の鉄筋とコンクリートの付着特性に関する一実験, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.33, No.2, pp.667-672, 2011.7
- 7) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説, 1999.8