シアキー位置と充填材強度が引抜耐力に及ぼす影響 およびボルト頭付近の支圧破壊領域の等価付着強度

シアキー付き穿孔セメントモルタル充填式あと施工アンカーボルト耐力の基礎的研究
EFFECT OF THE POSITION OF A SHEAR KEY AND STRENGTH OF FILLING
CEMENT MORTAR AND EQUIVALENT BOND STRENGTH OF COMPRESSIVE
FAILURE ZONE NEAR THE ANCHOR BOLT HEAD

Bearing capacity of anchor bolts in a dented bore of concrete with filling cement mortar

浜田 公也*, 河村 博之**, 小森 清司***

Kimiya HAMADA, Hiroyuki KAWAMURA and Kiyoshi KOMORI

In the present report, we have clarified the desirable position of a shear key, the shearing strength of shear-key and the bond resistance of side surface of a bore hole and the effect of strength of filling cement mortar on tensile strength from the pull-out test under the conditions varying the embedding length of anchor bolts, the positions of a shear-key, the amount of filling cement mortar, the strength of filling cement mortar and the size of diameter of a bore hole.

Also we have obtained the equivalent bond strength of compressive failure zone near the anchor bolt head, and have shown the formula of estimating the pull-out strength of concrete anchors in each failure types.

Keywords : *post installed anchorage, anchor bolt, shear key, bond strength*

あと施工アンカー, アンカーボルト, シアキー, 付着強度

1. まえがき

筆者らは、安定した耐力を有し、設計荷重までの変形量が小さく、粘り強い力学特性を有し、その上耐久性、耐火性がある、しかも経済的なあと施工アンカーを作ること为目标に、シアキー付き穿孔セメントモルタル充填式あと施工アンカーボルトの研究を行っている^{1)~3)}。

その成果として前報¹⁾では、あと施工アンカーにシアキーを設けることによって、耐力の安定と変形の抑制を図ることができることを明らかにした。

本報告は、①引抜力を受けた場合、その応力状態が埋込み深さが同じであってもシアキーの位置が異なれば、耐力にも差が生じることを考慮に入れて、どの位置にシアキーを設けるのが最も好ましいかを明らかにすること②最も好ましい位置にシアキーを設けた場合、シアキーのせん断強度とストレート部分の穿孔側面の付着強度お

よびその相対関係がどのようになっているのかを明らかにすること ③セメントモルタル充填後、比較的早期に荷重が加わる場合や、調合の異なる充填セメントモルタルを使用した場合に、充填材の強度がボルトの引抜耐力にどのような影響を及ぼすかを明らかにすることなどを目的に、拘束支承—引張実験を行い、耐力性状および変形性状について考察し、前報¹⁾の実験結果も含めて、ボルト頭付近の充填セメントモルタルが支圧破壊を生じた場合の支圧破壊領域の等価付着強度を求め、コンクリート破壊時の耐力推定式をまとめて示した。

2. 実験

2.1 供試体の形状と作成

供試体の形状は前報¹⁾と同様に、図—1に示すような直方母材とし、穿孔面が側面になるようにレディミクス

本論文は、文献2)~3)を基に、加筆、再編したものである。

* 九州産業大学工学部建築学科 副手 (長崎大学大学院)

** 九州産業大学工学部建築学科 教授・工博

*** 長崎大学工学部構造工学科 教授・工博

Junior Assistant., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Kyushu Sangyo Univ.

Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Kyushu Sangyo Univ., Dr. Eng.

Prof., Dept. of Structural Engineering, Faculty of Engineering, Nagasaki Univ., Dr. Eng.

図—1 供試体形状

トコンクリートを打設、3日後に脱型し、実験日まで空中養生した。穿孔およびシアキーの施工方法についても前報¹⁾と同様であるが、シアキー形状と実測寸法を図—2に示す。埋込みボルトは、六角ボルト M12, M16, M20を用いた。充填材については、セメントモルタルを用いた。

なお、母材コンクリート、充填セメントモルタルの調合については前報¹⁾と同じ表—1のようであり、また、多少施工が不良となった場合でも安全性が損なわれない

表—1 供試体の種類と個数

シリーズ	ボルト径	穿孔径 ϕ (mm)	埋込み深さ h (mm)	表面から凸部先端までの距離（シアキーの位置） h_o (mm)	充填高さ （充填材の量） H (mm)	供試体の個数
D	M16	28	30	25	30	1×3個
	〃	〃	50	25,45	50	2×3個
	〃	〃	70	25,45,65	70	3×3個
	〃	〃	90	25,45,65,85	90	4×3個
	〃	〃	110	25,45,65,85,105	110	5×3個
	〃	〃	130	25,45,65,85,105,125	130	6×3個
E	M16	28	50	25	35	1×3個
	〃	〃	70	45	35,55	2×3個
	〃	〃	90	65	35,55,75	3×3個
	〃	〃	110	85	35,55,75,95	4×3個
	〃	〃	130	105	35,55,75,95,115	5×3個
F	M12	21	埋込み深さ h (mm) () 内は h_o (mm)		充填材圧縮強度 σ_a (kg/cm ²)	4x3x3個
			50, 70, 90, 110 (30, 50, 70, 90)		各々 150, 250, 350	
	M16	28	50, 70, 90, 110, 130 (25, 45, 65, 85, 105)			
	M20	35	50, 70, 90, 110, 130, 150, 170 (20, 40, 60, 80, 100, 120, 140)			

・母材コンクリートの調合 細骨材の粗粒率は2.70，粗骨材粗粒率は6.56
セメント：細骨材：粗骨材＝1：2.42：3.70，水セメント比は0.57

・充填セメントモルタルの調合 砂は海砂で0.6mm以下とし，粗粒率は1.73
セメント：砂：フライアッシュ＝1：1：0.25，水セメント比は0.46
AE減水剤（ポゾリス）はセメント重量の1％，フロー値28秒（Jロート方法）

図—2 シアキー形状

ようなアンカーの設計を目標にしているので、穿孔側面の清掃処理の不良、充填セメントモルタルの収縮肌別れ等を想定して、穿孔側面にマシン油を塗布した。

2.2 供試体の種類

今回の報告で使用した実験供試体は表—1に示すように、前報¹⁾の A, B, C シリーズに続き、D, E, F シリーズの3種類とした。

D シリーズは、好ましいシアキーの位置を調べるための供試体であり、埋込み深さを変化させ、さらに各々の埋込み深さごとに表面から凸部先端までの距離を変化させたものである(表—2)。

E シリーズは、D シリーズで求めた好ましい位置にシアキーを設けた場合での、シアキーのせん断強度とストレート部分の穿孔側面の付着強度を調べるための供試体であり、埋込み深さを変化させ、各々の埋込み深さごとに充填高さを変化させたものである(表—3)。

F シリーズは、充填材強度が引抜耐力に及ぼす影響を調べるための供試体であり、シアキーを好ましい位置に設けた状態で、ボルト径および穿孔径、埋込み深さを変化させ、各々の組み合わせごとに充填セメントモルタルの圧縮強度を変化させたものである(表—4)。

2.3 加力および測定方法

加力は15t用センターホールジャッキを用い、載荷方法は500kgごとの漸増繰返し片振り載荷とした。荷重の測定は20t用ロードセル、ボルトの拔出し量はクリップゲージ(測定範囲: ± 5 mm, 感度: 1100×10^{-6} /mm)を用い、動歪計を介してXYレコーダーにて荷重変形曲線を記録した(図—1)。

3. 実験結果

3.1 破壊形状

今回の実験で生じた破壊形状はD, E, F シリーズとも、図—3に示す4つのタイプに大別することができる。

① 充填部拔出し破壊は、シアキーがせん断破壊し、かつ、充填部と母材の付着が無くなって、充填部が拔出し

表—2 供試体形状および実験結果一覧表 (D シリーズ) (シアキー位置, 埋込み深さの変化)

供試体記号の凡例 D - 30- 25 ← 表面から凸部先端までの距離
埋込み深さ h → (凸部先端位置 h₀)

供試体記号 (各3個)	埋込み深さ h (mm)			表面から凸部先端ま での距離 h ₀ (mm)			最大荷重 P _{max} (kg)			最大荷重時変形 δ P _{max} (mm)			破壊形式		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
D - 30- 25	30	(30 31 30)		25	(24 25 23)		1100	1350	1125	0.42	0.22	0.24	錐	//	//
50- 25	50	(52 51 51)		25	(26 26 25)		1675	1325	1400	0.28	0.42	0.42	複	//	//
45	//	(50 51 51)		45	(44 46 44)		3225	1975	2475	0.52	0.42	0.52	複	抜	抜
70- 25	70	(72 71 71)		25	(26 25 25)		2175	1875	1450	0.80	0.72	0.46	複	//	//
45	//	(72 71 70)		45	(46 45 45)		5625	5025	4375	1.16	0.96	0.60	複	//	//
65	//	(71 72 72)		65	(65 66 66)		3300	3700	3450	0.54	0.62	0.40	抜	//	//
90- 25	90	(90 90 90)		25	(24 24 24)		5300	3500	5050	4.36↑	4.28↑	4.02↑	複	//	//
45	//	(91 91 90)		45	(46 46 45)		7350	7825	6375	1.58	2.74	1.06	複	//	//
65	//	(91 91 88)		65	(66 65 63)		7300	7225	7925	3.10	3.68	3.00	抜	//	//
85	//	(92 91 90)		85	(86 84 85)		5750	2425	2375	4.17↑	0.36	0.56	複	抜	抜
110- 25	110	(111 111 110)		25	(25 25 25)		8300	7525	2575	4.34↑	4.36↑	3.46	複	//	//
45	//	(108 110 106)		45	(43 44 40)		8350	8050	9050	1.78	2.02	2.67	複	ボ	複
65	//	(108 110 111)		65	(63 64 65)		9350	8300	9200	2.70	2.12	2.26	ボ	//	//
85	//	(110 110 110)		85	(85 83 85)		9050	8950	8600	2.60	2.24	2.94	ボ	//	//
105	//	(110 111 111)		105	(104 105 106)		4250	7900	7725	3.98	4.00↑	4.10↑	抜	//	//
130- 25	130	(130 130 129)		25	(25 24 24)		8525	6000	3175	4.16↑	4.10↑	4.26↑	複	//	//
45	//	(131 129 127)		45	(45 44 46)		9250	9250	9350	2.22	2.58	2.42	ボ	//	//
65	//	(131 131 130)		65	(66 66 65)		8950	9350	9100	2.56	2.32	2.16	ボ	//	//
85	//	(128 128 128)		85	(85 85 84)		9350	9150	9450	3.46	2.08	2.68	ボ	//	//
105	//	(130 131 130)		105	(105 106 105)		8200	9050	8950	3.70	2.42	2.34	ボ	//	//
125	//	(130 130 130)		125	(125 125 124)		7150	9450	9400	4.18↑	3.70	4.04↑	抜	ボ	ボ
・材料強度 母材コンクリート : $\sigma_B = 287 \text{ kg/cm}^2$ 充填セメントモルタル : $\sigma_B = 436 \text{ kg/cm}^2$ ボルト破断耐力(M16) : 8.1t or 9.4t ・()内は実測寸法を示す															
・破壊形式 抜: 充填部抜け出し破壊 複: 複合破壊 (抜+錐状破壊) ボ: ボルト破断 ・↑はこの値以上であることを示す															

表—3 供試体形状および実験結果一覧表 (E シリーズ) (充填高さ, 埋込み深さの変化)

供試体記号の凡例 E - 50- 35 ← 充填高さ H
埋込み深さ h →

供試体記号 (各3個)	埋込み深さ h (mm)			充填高さ H (mm)			最大荷重 P _{max} (kg)			最大荷重時変形 δ P _{max} (mm)			破壊形式		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
E - 50- 35	50	(48 50 49)		35	(35 35 35)		1550	2450	1550	0.32	0.40	0.36	複	//	//
70- 35	70	(70 68 70)		35	(34 30 32)		4000	5950	5050	0.55	0.80	0.63	抜	複	複
55	//	(69 69 68)		55	(55 53 54)		5750	4950	3800	0.90	0.52	0.40	複	//	//
90- 35	90	(93 93 92)		35	(33 36 33)		4450	5000	5350	0.69	0.60	0.65	抜	//	//
55	//	(93 92 90)		55	(53 55 54)		8400	8350	7500	1.96	1.31	1.04	抜	//	//
75	//	(93 93 93)		75	(70 71 73)		8400	8450	8550	1.79	2.52	2.10	ボ	//	//
110- 35	110	(114 116 115)		35	(39 35 37)		7450	5900	5900	1.16	1.40	1.09	抜	//	//
55	//	(110 110 112)		55	(51 69 54)		5400	8350	6950	1.06	3.32	4.30↑	抜	ボ	抜
75	//	(111 111 109)		75	(72 75 74)		8450	6000	8650	3.90↑	0.86	2.00	ボ	抜	ボ
95	//	(110 110 111)		95	(92 92 89)		8250	8400	8300	1.38	1.50	1.52	ボ	//	//
130- 35	130	(130 133 129)		35	(48 47 49)		5050	6450	6500	0.90	0.96	1.06	抜	//	//
55	//	(131 130 131)		55	(54 54 54)		8400	7450	8400	1.54	1.25	1.62	ボ	抜	ボ
75	//	(132 130 132)		75	(74 74 75)		8350	8500	8350	2.98	3.92↑	1.52	ボ	//	//
95	//	(130 130 131)		95	(97 94 93)		8200	8900	8800	1.76	4.12	2.24	ボ	//	//
115	//	(130 129 130)		115	(107 110 110)		8500	8300	8650	1.40	1.72	2.12	ボ	//	//
・材料強度 母材コンクリート : $\sigma_B = 280 \text{ kg/cm}^2$ 充填セメントモルタル : $\sigma_B = 515 \text{ kg/cm}^2$ ボルト破断耐力(M16) : 8.1t or 9.4t ・()内は実測寸法を示す															
・破壊形式 抜: 充填部抜け出し破壊 複: 複合破壊 (抜+錐状破壊) ボ: ボルト破断 ・↑はこの値以上であることを示す															

た破壊である。

② 錐状破壊は, 充填凸部先端から表面に向かって円錐状に破壊したものである。シアキーを孔底部 ($h-h_0=0.5 \text{ cm}$) に設け, かつ埋込み深さが小さい ($h \leq 5 \text{ cm}$) D シリーズの供試体にも多く生じた。

③ 複合破壊は, 充填凸部から上が錐状破壊, 下はそのまま拔出した破壊である。また, 同じ複合破壊でも, 先

に錐状破壊を生じ, その後ずるずると拔出すもの [埋込み深さが比較的大きく ($h \geq 9 \text{ cm}$) シアキーの位置が浅い ($h_0=2.5 \text{ cm}$) の] と, 錐状破壊と拔出し破壊がほぼ同時に生じるもの ($h_0=4.5 \text{ cm}$) があった。

④ ボルト破断は, 埋込みボルトが破断したものである。なお, 各供試体の破壊形式については表—2, 3, 4 中に記した。

表—4 供試体形状および実験結果一覧表 (F シリーズ) (充填材圧縮強度, ボルト径, 埋込み深さの変化)

供試体記号の凡例 F-M12-A- 5 ← 埋込み深さ h
 ボルト径 → 充填材圧縮強度 σ_B

供試体記号 (各3個)	充填材圧縮 強度 σ_B (kg/cm ²)	埋込み深さ h (mm) 1 2 3	支圧破壊荷重 P_B (kg) 1 2 3	最大荷重 P_{max} (kg) 1 2 3	支圧破壊荷重時 変形 δP_B (mm) 1 2 3	最大荷重時変形 δP_{max} (mm) 1 2 3	破壊形式 1 2 3
F-M12-A- 5	150	50(52 49 51)	— — —	550 600 850	— — —	0.12 0.20 0.35	抜 //
7	//	70(71 69 70)	750 800 —	2500 1600 1050	0.18 0.25 —	0.80 0.54 0.50	抜 //
9	//	90(89 90 90)	— 700 750	900 2475 1550	— 0.21 0.15	0.30 0.79 0.51	抜 //
11	//	110(112 109 109)	750 650 550	3450 4000 4150	0.24 0.16 0.21	1.25 2.14† 1.58	抜ボ*ボ*
B- 5	244	50(50 50 51)	700 — 1050	1575 1100 1225	0.13 — 0.22	0.77 0.37 0.32	抜 //
7	//	70(72 73 74)	1150 1050 1100	2600 1450 2000	0.18 0.24 0.21	1.08 0.62 0.42	抜 //
9	//	90(91 92 91)	— 1100 1025	1475 1850 1700	— 0.30 0.24	0.76 0.53 0.52	抜 //
11	//	110(114 113 114)	900 — 950	1150 2100 5050	0.24 — 0.20	0.47 2.15† 2.16†	抜 抜 ボ
C- 5	357	50(50 51 50)	— — —	1350 1900 850	— — —	0.43 0.50 0.25	抜 //
7	//	70(70 71 71)	1300 — 1200	2150 2350 2300	0.20 — 0.21	0.44 0.45 0.71	抜 //
9	//	90(91 90 90)	1000 1200 1400	3750 4625 3500	0.21 0.19 0.36	2.09† 1.92† 2.17†	抜 //
11	//	110(112 112 113)	1425 1050 —	5050 5050 5050	0.31 0.18 —	1.73† 2.12† 1.96†	ボ //
F-M16-A- 5	175	50(53 52 50)	— — 1150	1350 1650 2050	— — 0.23	0.54 0.60 0.70	抜 //
7	//	70(70 70 71)	— 1000 1350	1250 2750 2400	— 0.15 0.25	0.26 0.96 0.62	抜 //
9	//	90(90 92 93)	1050 1325 1400	3000 2700 2925	0.15 0.18 0.18	0.90 0.62 0.93	抜 //
11	//	110(111 110 108)	1325 1450 1325	4350 3250 3225	0.12 0.19 0.13	1.37 0.88 0.76	抜 //
13	//	130(130 130 130)	1300 1300 1175	3575 4200 7700	0.18 0.16 0.07	1.07 1.26 2.19†	抜 //
B- 5	251	50(51 50 51)	1450 1500 —	2950 2950 2325	0.16 0.22 —	0.59 0.56 0.51	抜 抜 複
7	//	70(71 72 72)	1650 1300 1550	3925 4600 2950	0.37 0.15 0.20	1.12 0.91 0.64	抜 //
9	//	90(93 92 91)	— 1350 1450	5600 3050 6450	— 0.15 0.16	1.28 0.68 2.00	抜 //
11	//	110(111 111 111)	1325 1650 1550	7650 5750 5650	0.15 0.22 0.16	2.20† 1.40 1.13	抜 //
13	//	130(132 133 131)	1625 1600 1550	5550 5100 5100	0.21 0.17 0.26	1.42 1.03 1.25	抜 //
C- 5	349	50(52 52 52)	— — —	1425 1300 1325	— — —	0.19 0.22 0.37	複 //
7	//	70(70 70 70)	1725 2150 1825	5400 5100 4750	0.19 0.20 0.20	1.03 0.74 0.81	抜 //
9	//	90(92 90 89)	1900 1825 1875	7050 6900 5100	0.17 0.20 0.20	2.15† 2.14† 1.02	抜 //
11	//	110(112 110 108)	1800 1750 1800	6275 6300 5450	0.20 0.23 0.22	1.86† 1.86† 2.09†	抜 //
13	//	130(130 130 130)	1600 1250 1700	8000 7800 7400	0.13 0.12 0.20	1.40† 1.56† 2.17	ボ 抜 抜
F-M20-A- 5	194	50(51 51 50)	— — —	1525 1500 1200	— — —	0.36 0.26 0.16	複 //
7	//	70(72 72 71)	1850 — 2000	3800 2900 2800	0.21 — 0.17	0.78 0.58 0.72	抜 //
9	//	90(94 92 91)	— 2050 2050	2500 3850 4750	— 0.20 0.19	0.83 0.83 1.27	抜 //
11	//	110(111 111 113)	1925 1800 1950	6350 4750 6950	0.19 0.17 0.11	2.22† 1.25 1.82	抜 //
13	//	130(129 132 131)	1850 1800 1725	6750 6250 7450	0.12 0.11 0.11	1.42 1.21 1.82	抜 //
15	//	150(152 153 151)	1500 1600 2000	12000 10900 9450	0.11 0.11 0.17	1.93† 2.18† 2.12†	ボ 抜 抜
17	//	170(170 172 172)	2000 1750 1800	8825 12500 11200	0.20 0.09 0.12	2.17† 2.15† 2.19†	抜 ボ 抜
B- 5	264	50(52 51 53)	— — —	1600 1700 1500	— — —	0.26 0.26 0.17	複 //
7	//	70(72 72 72)	2600 2700 2500	4450 4850 5450	0.17 0.23 0.23	0.53 0.76 0.88	抜 //
9	//	90(90 93 93)	2600 3300 3000	6700 6800 7400	0.16 0.25 0.20	1.15 0.95 1.31	抜 //
11	//	110(112 111 111)	3000 3000 2750	8900 8450 8100	0.17 0.20 0.26	1.78 1.59 2.20†	抜 //
13	//	130(131 132 131)	2500 2600 3400	12450 10200 9500	0.11 0.20 0.23	2.17† 2.20† 2.20†	ボ 抜 抜
15	//	150(150 153 153)	2900 2200 2500	11900 12200 12100	0.12 0.12 0.11	1.73† 2.19 2.28†	ボ //
17	//	170(175 171 170)	2300 2000 2000	12100 12400 12500	0.27 0.12 0.11	2.16† 2.16† 2.18†	ボ //
C- 5	349	50(54 52 52)	— — —	1600 1500 1450	— — —	0.26 0.22 0.19	複 //
7	//	70(72 73 72)	— — —	2950 3700 3350	— — —	0.59 0.45 0.46	抜 複 抜
9	//	90(90 93 91)	— — —	6000 7000 7000	— — —	1.42 0.99 1.24	抜 //
11	//	110(113 113 115)	— 3300 —	9500 8450 9400	— 0.26 —	1.57 1.70 1.18	抜 //
13	//	130(130 132 132)	— 3100 —	11050 11650 10300	— 0.10 —	2.16 1.31† 2.19	抜 //
15	//	150(152 153 154)	4000 3400 —	11700 11950 11600	0.19 0.16 —	1.59† 1.93† 1.45	ボ //
17	//	170(171 170 171)	3500 3100 3550	12000 12400 11900	0.12 0.11 0.13	2.15 2.01 2.23†	ボ //
・材料強度 A B C 母材コンクリート: $\sigma_B = 322, 347, 340$ kg/cm ² (M12) $\sigma_B = 340, 354, 316$ kg/cm ² (M16) $\sigma_B = 339, 354, 284$ kg/cm ² (M20) ボルト破断耐力: $P_u = 5.1$ t (M12), 8.1 t (M16), 12.5 t (M20)							
・破壊形式 抜: 充填部拔出破壊 複: 複合破壊 (抜+錐状破壊) ボ: ボルト破断 ボ*: ボルトネジヤマの破断 ・()内は埋込み深さの実測寸法を示す ・†はこの値以上であることを示す							

3.2 変形性状

荷重-変形曲線の模式図を, D, E, F シリーズまとめて破壊形式ごとに図—4 に示す。

穿孔側面にマシン油を塗布したためにマシン油の隙間分の変形 δ_0 が生じることや, 埋込み深さが小さく, 複合破壊や拔出し破壊を生じたものは, P_{max} に達した後荷重が低下し変形が進むものがあるが, その他は, 抜け始めてからもボルト頭付近が支圧破壊し, かなりの塑性

変形がみられた。このことは前報¹⁾とほぼ同様である。また, F シリーズにおいて, 充填後実験日までの期間が短く充填セメントモルタル強度が低いものに, ボルト頭付近の充填セメントモルタルが支圧破壊を生じたとき, 荷重 P_B 部分で変形が急に大きくなる現象がみられた。

3.3 最大荷重 P_{max} と最大荷重時変形 δP_{max}

今回の実験で得られた最大荷重 P_{max} と最大荷重時変

図-3 破壊形状

図-4 荷重変形曲線の模式図

形 $\delta_{P_{max}}$ を表-2~4 に示し、表-4 には支圧破壊荷重 P_B と支圧破壊荷重時変形 δ_{PB} も示す。

また、穿孔には先端および先端付近の側面にも超硬チップが取り付けられているコンクリートドリルを使用したため、穿孔側面に凸凹が生じやすい。したがって、拔出し破壊、複合破壊のように付着強度が影響する破壊については、 P_{max} は全体的にかなりばらついている。

4. 結果についての考察

4.1 シアキー位置の変化について (D シリーズ)

ここでは、シアキーをどの位置に設けるのが最も好ましいかを、D シリーズの実験結果により検討する。

図-5 に本実験供試体の引抜時の破壊モデルと弾性応力分布モデルを示す。また、最大荷重 P_{max} /ボルト破壊耐力 $_B P_U$ と h_o/ϕ との関係を図-6 に示す。

a) シアキーがボルト頭付近にある場合 ($h-h_o \leq 0.5$ cm : 図-6 の横軸で各 h 右端のプロット)

当初、シアキーはできるだけ深い位置に設けた方が有利であると考えた¹⁾が、シアキーに作用する荷重によって生じる充填セメントモルタルの引張せん断破壊と、ボルト頭付近に生じる圧縮滑り破壊が組み合わさった形で破壊するので、拔出しやすくなり P_{max} は小さくなり、しかもばらつきやすくなる。すなわち、シアキーをボルト頭付近にあまり近づけると不利である。また、埋込み深さ h が大きくなると、当然付着抵抗も大きくなり P_{max} は大きくなるが、逆に埋込み深さ h が小さくなると、シアキーのせん断耐力よりも充填凸部先端からの錐状破壊耐力の方が小さくなるので、錐状破壊が生じる。

b) シアキーがボルト頭から離れている場合 ($h-h_o \geq 2.5$ cm : a) のプロット以外)

図-5 破壊モデルと弾性応力分布モデル

図-6 $P_{max}/_B P_U$ と h_o/ϕ の関係 (D シリーズ)

今回の供試体の中でシアキーを比較的表面近くに設けた $h_0 \leq 4.5$ cm の場合は、充填凸部先端から上は錐状破壊、下は拔出し破壊をする複合破壊を多く生じた。充填凸部から上の錐状破壊時の耐力 P_{cone} とシアキーから下のストレート穿孔部分の付着抵抗力 P_{bond} との大小関係で、 $P_{cone} \geq P_{bond}$ のときは、 P_{max} は P_{cone} と P_{bond} を加えたものとなる。また、 $P_{cone} < P_{bond}$ のときは、凸部先端からの錐状破壊が先に生じ、その後荷重は増大するが、 P_{cone} と P_{bond} は累加されず P_{bond} のみの耐力となり、シアキーを設けない場合と同様耐力はばらつきやすくなる。

$h_0 \geq 6.5$ cm の場合は、 h_0 が大きいと P_{cone} が大きくなり、 P_{cone} に P_{bond} を加えた P_{max} は、ボルトの破断耐力よりも大きくなり、ボルトが破断した。

以上の結果から、シアキーの位置は、シアキーの引張せん断破壊領域と充填セメントモルタルの圧縮滑り破壊領域が重複しないように、かつできるだけ深い位置に設けることが好ましい。すなわち、圧縮滑り破壊の角度と引張せん断破壊の角度は約 $60^\circ \sim 70^\circ$ のため、 70° と仮定すると、今回の実験供試体で用いたボルト径、穿孔径、シアキー形状の場合（図-2）は、ボルト頭からシアキー先端までの距離は M 12 で 1.8 cm、M 16 で 2.1 cm、M 20 で 2.9 cm となり、 $h-h_0$ は $1.5d$ (d : ボルト直径) 程度とするのが好ましい（図-7）。

最大荷重時変形 δ_{Pmax} については、 P_{max} と δ_{Pmax} の関係を図-8 に示す。充填凸部先端からの錐状破壊が先に生じて複合破壊したものの変形が数 mm にも及んでいるが、これを除けば、錐状破壊、複合破壊、拔出し破壊、ボルト破断の順に δ_{Pmax} は P_{max} とともに大きくなっており、前報¹⁾の結果とほぼ同様の結果が得られている。

また、載荷は静的漸増繰返し片振りとしたために、残留ひずみが若干確認されたが、引張力を受ける場合は、通常使用されるボルトの材質が SD 295 A クラスでは、M 16 のボルトが降伏するときの短期許容耐力は 6 t 程度であり、6 t でコンクリート側が破壊（錐状、複合、拔出し）するときの P_{max} 時の変形は約 1 mm、残留ひ

図-7 好ましいシアキーの位置

図-8 P_{max} と δ_{Pmax} の関係 (D, E シリーズ)

ずみは約 0.7 mm 程度である。さらに、現場ではプレタイトが行われるであろうから、静的荷重時では残留ひずみとゆるみは問題にはならないと思われる。変速繰返し荷重が作用する場合で、しかもボルト自体に圧縮力が作用する場合は、ボルトのゆるみ等今後の課題としたい。

4.2 充填高さの変化について (E シリーズ)

ここでは、シアキーを好ましい位置に設けた場合のシアキーのせん断強度とストレート部分の穿孔側面の付着強度を調べるために E シリーズの実験結果により検討する。

最大荷重 P_{max} /ボルト破断耐力 $B P_u$ と H/ϕ との関係を図-9 に示す。多少のばらつきはあるが、複合破壊を生じたものは、充填凸部から上は錐状破壊、凸部から下は拔出し破壊であるため、充填高さ H には関係なく耐力はほぼ一定である。拔出し破壊を生じたものは、これもまたばらつきはあるが、充填高さ H が大きくなると付着面積が増すため、当然付着抵抗力も増し耐力は大きくなっている。

拔出して破壊したものについて、 P_{max} をシアキーせん断面積 ($c A_s$) と充填セメントモルタルの圧縮強度 $f_{\sigma B}$ で除した値 $P_{max}/(c A_s \cdot f_{\sigma B})$ と埋込み深さ h 、充填高さ H との関係を図-10 に示す。D シリーズのうちボルト頭付近にシアキーを設けたもので拔出したものと、前報¹⁾のボルト頭付近にシアキー 1 個設けた実験結果（穿孔側面にマシン油を塗布した拔出して破壊したもの）も併せてプロットした。

ボルト頭付近にシアキーを設けたもので拔出したものは、前報¹⁾と同様にみかけのシアキーのせん断強度は約 $0.2 f_{\sigma B}$ であることがわかる。

また、埋込み深さ h が 9 cm を超えるもの、およびシアキーを好ましい位置に設けた E シリーズのうち拔出したものは、見かけのシアキーのせん断強度 $0.2 f_{\sigma B}$ よりも大きくなっている。これは、前報¹⁾でも述べたが、

図-9 $P_{\max}/P_u$ と H/ϕ の関係 (E シリーズ) 図-10 $P_{\max}/(cAs \cdot f_s \sigma_B)$ と h, H の関係

ボルト頭付近のセメントモルタルが支圧破壊を起こすと、引抜き力 T により圧縮滑り面に σ_n, τ が生じ、 T とともに大きくなる σ_n の水平成分 σ_R が摩擦力となって、引抜き抵抗力に加算されるためと考えられる (図-11)。

そのようなわけで、このシリーズで求めようとした好ましい位置でのシアキーのせん断強度および穿孔側面の付着強度は、支圧破壊が生じると加算される耐力に影響され明確にはならなかった。このボルト頭付近が支圧破壊するような場合の破壊領域の付着強度については 5.3

図-11 支圧破壊による摩擦力 σ_R

で述べる。

なお、 $\delta_{P_{\max}}$ については図-8 の中で D シリーズの結果とともに示しているが、D シリーズと同様の結果が得られている。

4.3 充填材強度の変化について (F シリーズ)

ここでは充填材圧縮強度 $f_s \sigma_B$ が引抜き耐力に及ぼす影響を調べるために F シリーズの実験結果により検討する。

図-12 に、抜出し破壊したものについて、 $P_{\max}$ /ボルト破断耐力 P_u と埋込み深さ h /穿孔径 ϕ との関係を示す。母材コンクリートの圧縮強度 σ_B が若干異なるため、 σ_B の影響が引抜き耐力に及ばないように $P_{\max}$ の値を補正してプロットとした。補正の方法は、穿孔側面の平均付着強度 τ_0 が $0.1 \text{ min}(\sigma_B, f_s \sigma_B)$ とおけることを考慮すれば¹⁾、 $\sigma_B > f_s \sigma_B$ の場合は、 σ_B に無関係となるから $P_{\max}$ はそのままの値を採用できる。しかし、 $\sigma_B < f_s \sigma_B$ の場合 (ABC のうち C のみ) には、後述する図-14 中に示す耐力測定推定式を用いて、 $\alpha \times \text{⑤式}(\sigma_B) = \text{⑤式}(f_s \sigma_B)$ および $\alpha \times \text{⑥式}(\sigma_B) = \text{⑥式}(f_s \sigma_B)$ なる等式をたて、それを解いて α を求め、その α を $P_{\max}$ に乗じて $P_{\max}$ の

 図-12 $P_{max}/\sigma_B P_u$ と h/ϕ の関係 (F シリーズ)

補正値を求めなければならない。

支圧破壊を生じるものは、穿孔側面に作用する引抜きに比例して増大する摩擦力が耐力に加算されるため、 P_{max} が小さくて支圧破壊を生じないものに比べると、 P_{max} は h の増大とともに急激に大きくなっている。

図-4 で示した荷重変形曲線により、ボルト頭付近の充填セメントモルタルの支圧破壊が認められたものについて、支圧破壊荷重 P_B をボルト頭支圧面積 ${}_B A_0$ と充填セメントモルタルの圧縮強度 σ_B で除した値 $P_B / ({}_B A_0 \cdot \sigma_B)$

σ_B) と埋込み深さ h との関係を図-13 に示す。ばらつきが大きく、1.5~2.5 の範囲に広がっているが、平均値はどの場合でも約 2 となっている。しかし、この値は充填材強度および埋込み深さが大きくなると若干小さくなる傾向を示している。

5. 耐力推定

前報¹⁾において、ボルト破断、錐状破壊、充填部拔出し破壊について耐力推定式を示しているが、ボルト頭付近の充填セメントモルタルが支圧破壊を起こした場合の耐力増加については触れていない。

ここでは、まず、シアキーのせん断強度、ストレート穿孔部分の支圧破壊領域外の平均付着強度と支圧破壊領域の等価付着強度を示し、さらに、耐力推定のために仮定した応力分布をまとめて図-14 に示す。

破壊形式では拔出し破壊と複合破壊、形状ではシアキーがある場合と無い場合およびシアキーの位置、また、支圧破壊を起こす場合と起こさない場合の各ケースについて、穿孔側面の平均付着強度、シアキーのせん断強度、錐状破壊耐力、支圧破壊を起こす範囲の摩擦力を考慮した等価付着強度を仮定すれば、耐力の推定が可能であることを示した。

5.1 シアキーのせん断強度 τ_s

拔出して破壊したものに対しては、D シリーズと前報¹⁾の実験結果より、みかけのシアキーのせん断強度 $\tau_s = 0.2 \sigma_B$ (図-10) と表せる。

5.2 ボルト頭付近の充填セメントモルタルが支圧破壊していない場合のストレート穿孔部分の平均付着強度 τ_0

前報¹⁾のシアキーを設けていない場合の実験結果のうち、拔出して破壊したものに対しては、

$$\tau_0 = 0.1 \times \min(\sigma_B, \sigma_B)$$

5.3 支圧破壊領域の等価付着強度 τ_B

ここで、ボルト頭付近の充填セメントモルタルが支圧破壊している場合の支圧破壊領域の平均付着強度を実験値より求めてみる。

例えば、図-14 ①② のシアキーを設けていない場合

 図-13 $P_B / ({}_B A_0 \cdot \sigma_B)$ と h の関係

図-14 耐力推定に使用した応力分布の仮定

について、ストレート穿孔部分を支圧破壊領域外 (h_b 部分) と支圧破壊領域 (h_a 部分) に分けて、それぞれの平均付着応力分布を仮定し、支圧破壊領域外では $\tau_b = 0.1 \times \min(\sigma_B, \sigma_{Bs})$ の一定値、支圧破壊領域ではボルト頭支圧面積当たりの平均支圧応力 σ_0 の一次式

$\tau = a \cdot \sigma_0 + b$ で表されるものとする、引抜き力 P は、

$$P = \pi \cdot \phi \cdot h_b \cdot \tau_b + \pi \cdot \phi \cdot h_a \cdot \tau_a \quad (1)$$

ここに ϕ : 穿孔径

h_b : 支圧破壊領域外長さ

τ_b : 支圧破壊領域外の平均付着強度

h_a : 支圧破壊領域長さ

τ_a : 支圧破壊領域の等価付着強度

$$\tau_a = a \cdot \sigma_0 + b \quad \sigma_0 = P/A_0$$

a, b : 一次式 τ_a の係数

σ_0 : ボルト頭支圧面積当たりの支圧応力

A_0 : ボルト頭支圧面積

で表される。

(1) 式で右辺にも P が含まれるので、 P でまとめると、

$$P = \frac{\pi \cdot \phi (h_b \cdot \tau_b + h_a \cdot b)}{1 - \frac{\pi \cdot \phi \cdot h_a \cdot a}{A_0}} \quad (2)$$

となるから、使用ボルト径 d 、穿孔径 ϕ 、埋込み深さ h 、母材コンクリート強度 σ_B 、充填セメントモルタル強度 σ_{Bs} を決定し、一次式 $\tau_a = a \cdot \sigma_0 + b$ の係数 a, b が求められ、引抜き力 P を推定することができる。

支圧破壊を起こしていると考えられる ($\sigma_0/\sigma_B \geq 2$) 今回の実験結果に前報¹⁾の実験結果を加えて、実験値から τ_a を逆算し σ_0 との関係の求めると、図-15 に示したような実験式 $\tau_a = a \cdot \sigma_0 + b$ が得られ $a = 0.16, b = -63$ と求められる。この関係式が支圧破壊領域の等価付着強度 τ_a をよく表していることが図-15 からよくわかる。この場合、ばらつきを相関係数で表すと 0.95、回帰直

図-15 τ_a と σ_0 の関係

線の τ_a の標準偏差は 33 kg/cm^2 であった。

5.4 耐力推定式

図-14 に示してある応力分布を基に抜出し破壊、複合破壊の耐力推定式をまとめて示すと、推定耐力 P は

1) シアキーを設けない場合

① 支圧破壊を起こさない場合は、

$$P = \pi \cdot \phi \cdot h_b \cdot \tau_b$$

② 支圧破壊を起こす場合は、

$$P = \frac{\pi \cdot \phi (h_b \cdot \tau_b + h_a \cdot b)}{1 - \frac{\pi \cdot \phi \cdot h_a \cdot a}{A_0}}$$

2) シアキーをボルト頭付近に設けた場合

③ 支圧破壊を起こさない場合は、

$$P = \pi \cdot \phi \cdot h_b \cdot \tau_b + \pi \cdot \phi \cdot h_a \cdot \tau_s$$

④ 支圧破壊を起こす場合は、②と同じ

ただし、記号は図-14 中の④による

3) シアキーをボルト頭付近以外に設けた場合

⑤ 支圧破壊を起こさない場合は、③と同じ

ただし、記号は図-14 中の⑤による

⑥ 支圧破壊を起こす場合は、

$$P = \frac{\pi \cdot \phi (h_b \cdot \tau_b + h_B \cdot b) + \pi \cdot \phi \cdot h_d \cdot \tau_s}{1 - \frac{\pi \cdot \phi \cdot h_B \cdot a}{B A_0}}$$

◇複合破壊

1) $P_{\text{cone}} \geq P_{\text{bond}}$ の場合

P_{cone} は凸部より上の錐状破壊耐力で下記に示す。

学会式⁴⁾ $P_{\text{cone}} = P_{a1} = \phi_1 \sqrt{F_c} \cdot A_c$,

$$A_c = \pi \cdot l_e (l_e + D)$$

$$\phi_1 = 1, \quad F_c = \sigma_B, \quad l_e = h_0, \quad D = \phi_d$$

河村式⁵⁾ $P_{\text{cone}} = \pi \cdot \sigma_t (0.720 a \cdot h + 0.897 h^2)$

σ_t : 母材コンクリートの引張強度

a : 定着金物径 ($a = \phi_d$ とする)

h : 埋込み深さ ($h = h_0$ とする)

P_{bond} は凸部より下の付着強度で、支圧破壊を起こしていない⑦⑨の場合は、

$$P_{\text{bond}} = \pi \cdot \phi \cdot h_b \cdot \tau_b$$

支圧破壊を起こしている⑧⑩の場合は、

$$P_{\text{bond}} = \frac{\pi \cdot \phi (h_b \cdot \tau_b + h_B \cdot b)}{1 - \frac{\pi \cdot \phi \cdot h_B \cdot a}{B A_0}}$$

⑦ 支圧破壊を起こさない場合は、

$$P = \pi \cdot \phi \cdot h_b \cdot \tau_b + P_{\text{cone}}$$

⑧ 支圧破壊を起こす場合は、

$$P = \frac{\pi \cdot \phi (h_b \cdot \tau_b + h_B \cdot b) + P_{\text{cone}}}{1 - \frac{\pi \cdot \phi \cdot h_B \cdot a}{B A_0}}$$

2) $P_{\text{cone}} < P_{\text{bond}}$ の場合

⑨ 支圧破壊を起こさない場合は、①と同じ

ただし、記号は図-14 中の⑨による

⑩ 支圧破壊を起こす場合は、②と同じ

ただし、記号は図-14 中の⑩による

なお、これらの耐力推定式の適用範囲は、文献1)も含めた実験範囲とすべきであるが、既往の研究を参考にし、拡張しても差し支えない部分を考慮すれば、およそ、アンカーされる側のコンクリート強度は $F_c = 150 \sim 300 \text{ kg/cm}^2$ 、充填セメントモルタル強度は $F_c = 150 \sim 500 \text{ kg/cm}^2$ 、ボルトは M 10～M 22、埋込み深さは 5～17 cm、はしあきは埋込み深さ程度、隣接アンカーまでの距離が埋込み深さ以上離れている場合で引張力を受ける場合を適用範囲とする。

6. まとめ

シアキーを設けると、ストレート穿孔に比べ、耐力の安定、変形の抑制に対して有効であるが、その位置はシアキーの引張せん断破壊領域とボルト頭付近の充填セ

ントモルタル圧縮滑り破壊領域が重複しないように、かつ、できるだけ深い位置に設けることが好ましい。すなわち、今回の実験供試体では、充填凸部位置を埋込み深さの底から $1.5 d$ 程度以上の方 ($h - h_0 = 1.5 d$) に設けるのが好ましい。

好ましい位置に設けられたシアキーを持つアンカーの耐力は、シアキーのせん断強度および穿孔側面の付着強度を累加することにより求めることができるが、シアキーのせん断強度 τ_s を $0.2 f_{\sigma B}$ 、支圧破壊領域外の平均付着強度 τ_b を $0.1 \times \min(\sigma_B, f_{\sigma B})$ 、支圧破壊領域の等価付着強度 τ_B を $\tau_B = a \cdot \sigma_0 + b$, $a = 0.16$, $b = -63$ と仮定すれば、破壊耐力とよく符号する。

以上は、充填材強度が変化しても適用することができ、すべての場合の耐力推定が可能である。また、ボルト頭付近の充填セメントモルタルが支圧破壊を起こす支圧破壊荷重は約 $2 \cdot B A_0 \cdot f_{\sigma B}$ である。

この結果を用いて、シアキーを設けた場合と設けない場合、および、支圧破壊を起こした場合と起こさない場合について、拔出し破壊と複合破壊の耐力推定式を示した。シアキー位置、穿孔径、埋込み深さ、母材コンクリートと充填セメントモルタルの強度が決まれば、①～⑩の起こり得る破壊形すべてについて引張耐力 P を求め、この中で最も小さな P とその破壊形で耐力が決まる。

今後、実用化のために、群効果、はしあき、弛み、安全率および繰返し載荷、せん断力が作用する場合等の研究を行う予定である。

引用文献

- 1) 浜田公也、河村博之：シアキー付き穿孔セメントモルタル充填式あと施工アンカーボルト耐力の基礎的研究，日本建築学会構造系論文報告集、第 421 号，pp. 77～87，1991 年 3 月
- 2) 浜田公也、立石妙子、河村博之：穿孔セメントモルタル充填式あと施工アンカーボルトの応力と耐力について（その 9～11），日本建築学会大会学術講演梗概集（中国），構造Ⅱ，pp. 695～700，1990 年 10 月
- 3) 浜田公也、河村博之：シアキー付き穿孔セメントモルタル充填式あと施工アンカーボルトの引抜耐力，日本建築学会九州支部研究報告，第 32 号，pp. 353～356，平成 3 年 3 月
- 4) 日本建築学会：各種合成構造設計指針同解説，昭和 60 年 2 月
- 5) 河村博之：プレキャスト鉄筋コンクリート構造接合部耐力についての基礎的研究，日本建築学会構造系論文報告集，第 353 号，pp. 1～12，昭和 60 年 7 月

(1991 年 6 月 10 日原稿受理，1991 年 11 月 29 日採用決定)