鋳鋼製ベースプレートを用いた柱脚部の基礎コンクリートの 支圧強度とアンカーボルトの弾塑性挙動*

松 尾 英 成*¹, 浦 晟*²

Bearing Strength of Reinforced Foundation Concrete and Elasto-Plastic Behavior of Anchor Bolt in Exposed Fixed Column Base Made of Cast Steel Base Plate

Hideshige MATSUO and Akira URA

A few tests were carried out to determine the strength and rigidity of reinforced concrete for foundations, the performance element of the exposed fixed column base made of a cast steel base plate, and the strength and rigidity of anchor bolts initially prestressed without constraining the shank. Stress was introduced to the reinforced concrete using a distribution plate, and its bearing strength was evaluated using the bearing surface area and the distance between the bearing-surface and reinforced concrete ends as parameters. Initial prestress was introduced into anchor bolts embedded in the reinforced foundation concrete, then a pull-out load was applied, and the elasto-plastic behavior of the bolts was clarified.

Key Words: Fixing Element, Coupling, Rigidity, Column Base, Bearing Strength, Reinforced Foundation Concrete, Elasto-Plastic Behavior, Anchor Bolt

1. 結 言

耐震性に関する設計規準が厳しくなってきたのに伴い、柱脚も回転剛性の高いモーメントコネクション(固定柱脚)として設計しようという構造設計上のニーズが高まってきている。

これらのニーズを踏まえ、著者らはこれまでに回転剛性が高く施工性の良好な露出型の固定柱脚を開発してきた^{(1)~(2)}。この種の柱脚では、地震時に発生する曲げモーメント・せん断力および軸力(柱の軸方向に作用する鉛直力)に対し、高い回転剛性と十分な強度が要求される。本研究では、柱脚全体の性能試験に先立ち、本柱脚の重要な性能要素となる基礎の鉄筋コンクリートの支圧強度と初期張力を導入したアンカーボルトの弾塑性挙動を把握するための実験を行った。その結果、支圧面端部から基礎の鉄筋コンクリート端部までの距離および支圧面積が基礎の鉄筋コンクリートの支圧強度に大きく影響することと、初期張力を導入したアンカーボルトの基礎の鉄筋コンクリート中での弾塑性挙動を把握した。

2. 基礎鉄筋コンクリートの支圧強度実験

2.1 実験の目的 鉄骨柱脚における基礎コンクリートの許容支圧応力に関しては、AISCのLRFD指針案やMSC^{(3)~(5)}等にその考え方が示されている。しかし、これらはいずれもベースプレート底面の全面に支圧応力が発生する場合の評価であり、柱脚に作用する曲げモーメントに対し、柱軸力が大きい応力領域でのものである。

ところで地震国である我が国では、柱脚の設計をする場合、柱軸力に比べ曲げモーメントが大きい応力領域での検討が必要となることが多い。この場合ベースプレートから基礎のコンクリートが受ける支圧応力は、ベースプレート端部の領域に作用する偏心局部支圧応力となり、支圧部分から基礎コンクリート端部までの距離(へりあき)は小さいことが多い。このときの基礎コンクリートの破壊形式は、端部の割裂破壊であることが知られているが⁽⁶⁾、強度に関する定量的な評価はなされていない。本実験は、柱軸力に比べ曲げモーメントが大きい応力領域での基礎コンクリートの支圧強度(最大強度)と許容支圧応力の評価方法を明確にすることを目的としたものである。

2.2 試験体および実験方法 試験体形状を図1

* 原稿受付 平成4年3月3日。

*¹ 正員, 日立金属(株)若松工場 (〒808 北九州市若松区北浜1-9-1)。

*² 正員, 長崎大学工学部 (〒852 長崎市文教町1-14)。

に、試験体仕様を表1に示す。試験体のパラメータは、表1に示すようにへりあき (ex および ey) と支圧幅 B とし、試験体数を12種類とした。なお、試験体上部には、実際の柱脚の基礎鉄筋コンクリートに近づけるため、コンクリートと同強度の厚さ50mmの無収縮モルタルを設けた。

実験方法は、万能2000トン大型構造物試験機を用いて、試験体へ20トン刻みの片振りの載荷をし、試験体が破壊するまで行った。

2.3 実験結果および考察 実験結果の一覧を表2に示す。また実験結果に基づいた、コンクリートの四週圧縮強度 F_c (kgf/cm²) に対する最大支圧応力 σ_{max} の比 (σ_{max}/F_c) と加圧幅 B およびへりあき ex の関係を、図2に示す。

σ_{max}/F_c は図2に示すように、本柱脚での一般的なへりあき量の範囲 ($2.5 \leq ex \leq 10$ cm) において、同じへりあき量では加圧幅が小さくなるほど、また同じ加圧幅ではへりあき量が大きくなるほど上昇する傾向となった。また表2および図2より、コンクリートの最大支圧応力 σ_{max} はそのコンクリートの四週圧縮強度 F_c の1~3倍になることが、確認できた。

ところで、基礎コンクリートの許容支圧応力 fn の評価式は、前述のAISCのLRFD指針案やMSC等

より、式(1)の形で示されている。

$$fn = 0.35 \cdot F_c \sqrt{A1/A0} \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 $A1$ は基礎コンクリートの断面積、 $A0$ は基礎コンクリートに作用する支圧面積である。

基礎コンクリートの最大支圧応力 σ_{max} と F_c との関係は種々の形で表現できると思われるが、ここでは式(1)の形に従ってこの関係の考察をすることにした。すなわち、 $\sigma_{max}/(F_c \sqrt{A1/A0})$ と $\sqrt{A1/A0}$ との関係のみたものが、図3である。ここで、 $A1$ を本柱脚の基礎コンクリートの断面積 (支圧面の長辺方向の長さ380mmに短辺方向のへりあき $2ex$ を加算した長さを一辺とした正方形)、 $A0$ を支圧面積 ($380 \times B$

表2 実験結果の一覧

Test specimen	Maximum load	Maximum bearing stress	σ_{max}/F_c
	P_{max} kN (tf)	σ_{max} MPa (kgf/cm ²)	
A-2-3	549 (56.0)	48.2 (491)	1.96
A-2-6	839 (85.6)	36.8 (375)	1.50
A-2-11	998 (101.8)	23.9 (244)	0.976
A-5-3	588 (60.0)	51.6 (526)	2.10
A-5-6	804 (82.0)	35.3 (360)	1.44
A-5-11	1221 (124.5)	29.2 (298)	1.19
A-7-3	687 (70.0)	60.2 (614)	2.46
A-7-6	981 (100.0)	43.1 (439)	1.76
A-7-11	1302 (132.8)	31.2 (318)	1.27
A-10-3	785 (80.0)	68.8 (702)	2.81
A-10-6	1079 (110.0)	47.3 (482)	1.93
A-10-11	1420 (144.8)	33.9 (346)	1.38

図2 σ_{max}/F_c とへりあき ex および加圧幅 B の関係

表1 試験体仕様

Test specimen	Edge clearance		Width of pressed face B (mm)
	ex (mm)	ey (mm)	
A-2-3	25	50	30
A-2-6		75	60
A-2-11		100	110
A-5-3	50	50	30
A-5-6			60
A-5-11			110
A-7-3	75	75	30
A-7-6			60
A-7-11			110
A-10-3	100	100	30
A-10-6			60
A-10-11			110

図1 試験体形状

図3 $\sigma_{max}/(F_c \sqrt{A1/A0})$ と $\sqrt{A1/A0}$ との関係

mm)とした。

本実験の範囲では、 $\sigma_{\max}/(F_c \sqrt{A_1/A_0})$ は最小値が0.45、最大値が0.55となり、平均値は0.49となった。この結果から、へりあき量が2.5~10 cmの範囲では、基礎コンクリートの最大支圧応力 $\sigma_{\max}$ は式(2)で評価できると考えられる。

$$\sigma_{\max} = 0.49 \cdot F_c \sqrt{A_1/A_0} \quad \cdots \cdots (2)$$

また、我が国および各国の建築基準に定められた式(3)で示す最大支圧応力 $\sigma_{\max}$ と許容支圧応力 f_n の考え方⁷⁾を採用すると、式(2)の $\sigma_{\max}$ に式(3)を代入することにより、基礎コンクリートの許容支圧応力 f_n は、式(4)で評価できると考えられる。

$$f_n = 1/3 \cdot \sigma_{\max} \quad \cdots \cdots (3)$$

$$f_n = 0.16 \cdot F_c \sqrt{A_1/A_0} \quad \cdots \cdots (4)$$

式(4)の係数(0.16)は、 A_1 の面積のとらえ方によって多少変動するが、AISCのLRFD指針案やMSCの評価式である式(1)の係数(0.35)に比べ、約45%に低下する結果となった。本実験での試験体の破壊形式は、いずれもコンクリート端部の割裂破壊であったが、式(4)の係数が式(1)の係数に比べ低下した原因は、このコンクリート端部の割裂破壊が支圧破壊に先行したためと考えられる。

したがって、柱軸力に比べ曲げモーメントが大きい応力領域での基礎コンクリートの最大支圧応力 $\sigma_{\max}$ は式(2)、許容支圧応力 f_n は式(4)で評価することが必要と考えられる。

3. 初期張力を導入したアンカーボルトの基礎鉄筋コンクリート中からの引抜き実験

3.1 実験の目的 著者らによって開発された柱脚に使用されるアンカーボルトは、下部に設けられた定着板によって、基礎コンクリート中に定着され、軸部は紙管等によってコンクリートとの付着が絶たれたものである。初期張力は、ナットの回転によってアンカーボルトのナット下面から定着板上面までの軸部全域に導入される。この種のアンカーボルトの基礎コンクリート中よりの抜け出し剛性については、これまで初期張力によって圧縮されたコンクリートのばね定数が把握できないために、結果的に柱脚の回転剛性を定量的に把握できず、実務設計上支障をきたしていた。

本実験は、コンクリートのばね定数の把握と、アンカーボルトの弾性域での基礎コンクリートからの抜け出し剛性の評価式を得ることを主目的としたものである。

3.2 試験体および実験方法

試験体形状を図4と5(CB-3-5, CBa-3-5の配筋図の例)に、試験体仕様を表3に示す。表3に示すようにアンカーボルトの軸径は、 $\phi 30$ と $\phi 42$ の2種類とし、それぞれの試験体名称をCB-3-5, CBa-3-5, CB-3-7およびCB-4-5とした。なお図4中の()内数値は、CB-4-5の場合を示す。アンカーボルトのコンクリート中への定着長さ(コンクリート上面から定着板上面までの長さ)は、アンカーボルト軸径の20倍とし、アンカーボルトの軸部は、ビニールテープを巻いてコンクリートとの付着を絶った。定着板は、アンカーボルトに最大強度の引抜き力が作用したときに、定着板上面のコンクリートの支圧応力が、プレストレストコンクリート設計施工標準の許容支圧応力⁷⁾を超えない面積とし、材質はSS400とした。鉄筋コンクリートの幅は、本柱脚のアンカー

表3 試験体仕様

Specimen	Condition	Anchor bolt		Edge distance	Anchor plate
		Size	Material		
CB-3-5	Dead anchor bolt	M30	SS490	0.5 ϕ Y	Large
CBa-3-5				0.5 ϕ Y	Small
CB-3-7				0.75 ϕ Y	Large
CB-4-5				0.5 ϕ Y	Large
AB-3-0	Aerial anchor bolt	M30	SS400	-	#90x16t
AB-4-0		M42		-	#120x22t
AB-3-0S	Aerial anchor bolt	M30		-	#90x16t
AB-4-0S		M42		-	#120x22t

Key: Yield stress for screw section of anchor bolt

図4 試験体形状 (アンカーボルト配置図)

図5 試験体形状 (配筋図 CB-3-5, CBa-3-5)

ボルト間距離とし、長さは定着板先端より 45° 方向にせん断破壊面が発生するように、コンクリートを固定する支点が、せん断破壊面に影響を与えない長さとした。

試験体のパラメータは、アンカーボルトの軸径・材質・初期張力・コンクリートのへりあきの 4 種類である。また比較のため、コンクリートに埋込まないアンカーボルト単体の引っ張り試験も行った。これらの試験体を表 3 に、AB-3-0, AB-4-0, AB-3-0S, AB-4-0S として示す。

鉄筋コンクリートに埋込まれたアンカーボルトへの载荷は、100 トン油圧ジャッキにより、片振りで行った。アンカーボルトのひずみおよびコンクリートからの抜き出し量の測定は、図 6 に示す方法で行った。

またアンカーボルト単体の载荷は、アムスラー試験

表 4 実験結果

Specimen	Maximum Load T_{max} KN (tf)	#1 A_e cm ²	#2 T_{pred} KN (tf)	#3 T_{max} KN (tf)	#4 B_o KN (tf)	#5 B_s KN (tf)	Note
CBa-3-5	333 (34.0)			1.03 152 (15.5)	157-177 (16-18)		#5, #6
CB-3-5	338 (34.5)	5.606 (33.1)	325 (33.1)	1.04 156 (15.9)	147-167 (15-17)		
CB-3-7	334 (34.1)			1.03 222 (22.6)	216-245 (22-25)		#5
CB-4-5	709 (72.3)	11.21 (68.4)	671 (68.4)	1.06 292 (29.8)	245-275 (25-28)		
AB-3-0	324 (33.0)	5.606 (33.1)	325 (33.1)	1.00	-	-	-
AB-4-0	686 (69.9)	11.21 (68.4)	671 (68.4)	1.02	-	-	-
AB-3-0S	237 (24.2)	5.606 (26.7)	262 (26.7)	0.91	-	-	-
AB-4-0S	557 (56.8)	11.21 (52.5)	515 (52.5)	1.08	-	-	-

#1: Effective area of anchor bolt's screw section

#2: Theoretical maximum load with fact number

#3: Initial preloading

#4: Load separated from concrete

#5: All specimen ruptured with screw section of anchor bolt

#6: When load became 294 KN (30tf), corn-shape crack appeared in specimen CBa-3-5

D1: Monitor meter for loosened length of anchor bolt

D2: Monitor meter for loosened length of anchor plate

S1, S2, S3: Strain gauge for anchor bolt

図 6 測定方法

機により、片振りで行った。

3.3 実験結果および考察 実験結果を表 4 に示す。本表に示すように、どの試験体もアンカーボルトのねじ部の破断で、最大荷重が決まった。

3.3.1 アンカーボルトの定着部の変位 アンカーボルトに作用する引抜き力 T と、コンクリート中の定着板の変位量 δp の関係を、図 7 に示す。図 7 に示したコンクリートのコーン破壊強度 Cu は、各種アンカーボルト設計指針案の考え方⁽⁸⁾を採用し、式(5)で算定した。

$$Cu = \alpha \cdot \sqrt{Fc} \cdot Ap \dots \dots \dots (5)$$

ここで、 Ap は図 8 に示すコンクリートのコーン破壊面の水平投影面積である。 α は、コーン破壊亀裂が発生した CBa-3-5 の試験体において、 Cu がコーン破壊亀裂の発生時期の荷重とほぼ一致する 0.8 とした。

アンカーボルトの初期張力によって発生するコンクリートへの圧縮力が、アンカーボルトに作用する引抜き力によって解除される点を離間と定義すると、本実験でのアンカーボルトの定着板の変位量は、どの試験体も離間までは微小であった。アンカーボルトのねじ

(a) CB-3-5

(b) CBa-3-5

(c) CB-4-5

図 7 アンカーボルトに作用する引抜き力 T と定着板の変位量 δp の関係

部が降伏する荷重 eTy での定着板の変位量 δp は、CB-3 シリーズの試験体で約 0.2 mm、CB-4-5 の試験体で約 0.4 mm となった。また、アンカーボルトへの引抜き力 T とコンクリートからの拔出し量 δ の関係を示す図 9 より、この荷重でのアンカーボルトのコンクリートからの全拔出し量 δ が、CB-3 シリーズの試験体で約 1.3 mm、CB-4-5 の試験体で約 1.9 mm であった。したがって、この荷重でのアンカーボルトの全拔出し量 δ に対する定着板の変位量 δp の比率は、15～21% となった。このことから、初期張力が導入されたアンカーボルトにおいては、離間後の定着板の変位量は大きく、離間後のアンカーボルトの全体の拔出し剛性については、定着板の変位を考慮する必要があると考えられる。なお、アンカーボルトのねじ部が降伏する荷重 eTy までは、CBa-3-5 の試験体を除いては、コンクリートにコーン破壊亀裂が発生していないことから、この荷重域での定着板の変位は、主にコンクリートの圧縮変形およびクリープによるものと思われる。

また、アンカーボルトのねじ部が破断した荷重での定着板の変位量 δp は、どの試験体も約 0.4～1.0 mm であり、この時点でのアンカーボルトの全拔出し量 δ の約 10～15% であった。

一方、へりあきが小さくコンクリートのコーン破壊強度 Cu が低かった CBa-3-5 の試験体での定着板の変位量 δp は、図 7 (b) からわかるように、コンクリートのコーン破壊が起こった後多少大きくなったが、アンカーボルトのねじ部が破断する時点では約 0.7～0.8 mm で、それほど大きくならなかった。これは、コンクリート端部に配筋された鉄筋が、コンクリートのコーン破壊発生後、アンカーボルトに対し定着力を発揮したためと考えられる。近接した鉄筋が、アンカーボルトの定着に寄与する影響度については、今後実験的検討が必要と思われる。

3.3.2 離間までのアンカーボルトの挙動 ここでは、離間までのアンカーボルトの挙動を考察する。

初期張力を与えられたアンカーボルトへの引抜き力

A_p : Effective horizontal shadow area

図 8 コンクリートのコーン破壊面の水平投影面積

T と付加張力 ΔT の関係は、高力ボルト接合設計施工指針⁽⁹⁾ によれば式 (6) のように考えられる。

$$\Delta T = 1/(1+\kappa) \cdot T \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$\kappa = Kc/Kb = Ac/(n \cdot Ab) \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 κ はコンクリートとアンカーボルトのばね定数の比、 Kc はコンクリートのばね定数、 Kb はアンカーボルトのばね定数、 Ac はコンクリートのばね定数に影響を及ぼす有効断面積、 Ab はアンカーボルトの軸断面積、 n はアンカーボルトとコンクリートのヤング係数比である。

したがって、離間までのアンカーボルトに作用する引抜き力 T と拔出し量 δ の関係は、式 (8) によって表せる。すなわち離間までの範囲において、初期張力を導入したアンカーボルトのコンクリートからの拔出し剛性は、単体の伸び剛性 $Ee \cdot Ab/L$ の $(1+\kappa)$ 倍となる。

$$T = (1+\kappa) \cdot Ee \cdot Ab/L \cdot \delta \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 Ee はアンカーボルトの等価ヤング係数、 L はアンカーボルトの定着長さである。

コンクリートの有効断面積 Ac については、種々の考え方があると思われるが、 Ac を求めるための有効径 dc を、式 (9) のように仮定した。

$$dc = \beta \cdot dp \quad \dots\dots\dots (9)$$

(a) CBa-3-5

(b) CB-4-5

図 9 アンカーボルトへの引抜き力 T とコンクリートからの拔出し量 δ の関係

ここで、 dp は定着板の直径、 β は係数である。アンカーボルトの初期張力導入時にコンクリートに発生する応力は、コンクリートとの付着を絶ったこの種のアンカーボルトにおいては、定着板の端部から 45° 上方に伝わると考えられ、この応力がコンクリート断面のかなり広い範囲に及ぶものと思われる。本実験結果では、 β の値を 2.5 と仮定し、アンカーボルトとコンクリートのヤング係数比を $10^{(10)}$ として $(1+\kappa)$ を求めると、CB-3 シリーズの試験体で約 6.6、CB-4-5 の試験体で約 6.1 となり、これにアンカーボルト単体の伸び剛性 $Ee \cdot Ab/L$ を乗じたアンカーボルトの拔出し剛性は、実験値とほぼよい対応を示す。この理論剛性値を、図 9 に一点鎖線で示す。このことから、コンクリートのばね定数 Kc を算出するために必要な、コンクリートの有効断面積 Ac を定めるための有効径 dc は、定着板の直径 dp の約 2.5 倍として評価できると考えられる。また、離間までのアンカーボルトに作用する引抜き力 T と拔出し量 δ の関係は、式 (8) で評価でき、アンカーボルトの拔出し剛性は、径が $\phi 30 \sim 42$ クラスのものでは、アンカーボルト単体の伸び剛性 Kb の約 6 ～ 7 倍程度となることが確認できた。

理論的な離間荷重 tBs は、式 (10) で求められるが、表 4 および図 9 に示すように、実験結果による離間荷重 Bs は初期張力 Bo とほぼ同等の値となった。ひずみゲージの結果からも、載荷後約 Bo/κ 程度のアンカーボルトの初期張力の低下が起こっていることが確認された。したがって、離間荷重 Bs は初期張力 Bo で評価することが望ましいと考えられる。

$$tBs = (1 + 1/\kappa) \cdot Bo \quad \cdots \cdots (10)$$

3.3.3 離間後のアンカーボルトの挙動 図 10 に定着板の変位がなく、初期張力の低下がない場合の、アンカーボルトに作用する引抜き力 T と拔出し量 δ の関係の理論的なモデルを示す。

被締付け材が、比較的薄く剛性の高い鉄材等であれ

図 10 定着板の変位がなく、初期張力の低下がない場合の、アンカーボルトへの引抜き力 T と拔出し量 δ の関係を表す理論的なモデル

ば、 T と δ の関係はほぼ図 10 のような挙動を示すと思われるが、本実験では図 9 に示すように、離間後のアンカーボルトの引抜き剛性は、単体の伸び剛性 Kb を下まわった。この原因は、離間後のアンカーボルトのコンクリートからの全拔出し量 δ は、アンカーボルトの伸び量 δp だけでなく、これに定着板の変形量 δp が加算されたためと考えられる。また定着板の変位量 δp は、コンクリートにコーン破壊等種々の破壊が起こらない場合、定着板より上部のコンクリートの圧縮変形とクリープが支配的であると推察される。

ここで、離間後のアンカーボルトの全拔出しの増加量 $\Delta \delta$ を、アンカーボルトの伸びの増加量 $\Delta \delta b$ とコンクリートの圧縮変形の増加量 $\Delta \delta p$ を加算したもの、すなわち $\Delta \delta = \Delta \delta b + \Delta \delta p$ と考えると、アンカーボルトに作用する付加張力 ΔT とアンカーボルトのコンクリートからの全拔出し増加量 $\Delta \delta$ の関係は、式 (11) で表される。

$$\Delta T = \kappa / (1 + \kappa) \cdot Kb \cdot \Delta \delta \quad \cdots \cdots (11)$$

$$Kb = Ee \cdot Ab / L \quad \cdots \cdots (12)$$

式 (11) の考え方によれば、離間後のアンカーボルトの拔出し剛性は、アンカーボルト単体の伸び剛性 Kb の $\kappa / (1 + \kappa)$ 倍となる。ここで、コンクリートの有効径を定着板の直径の 2.5 倍とし、アンカーボルトとコンクリートのヤング係数比を 10 として $\kappa / (1 + \kappa)$ を試算すると、CB-3 シリーズおよび CB-4-5 の試験体ともに約 0.85 になる。また、繰返し荷重後の定着板の変位量 δp を、コンクリートの圧縮変形およびクリープと考え、コンクリートのヤング係数を、コンクリートのクリープ効果をも含めた見かけのヤング係数に置き換え、弾性計算する方法⁽¹⁰⁾を採用し、 $\kappa / (1 + \kappa)$ を試算すると以下となる。すなわち、コンクリートのクリープを考慮したアンカーボルトとコンクリートの見かけのヤング係数比を約 24 とし、コンクリートの有効径を定着板の直径の 2.5 として $\kappa / (1 + \kappa)$ を試算すると、CB-3 シリーズおよび CB-4-5 の試験体ともに約 0.7 になる。この理論による離間後のアンカーボルトの拔出し剛性を、コンクリートのクリープを考慮しないものを 2 点鎖線、コンクリートのクリープを考慮したものを破線として、図 9 に示す。図 9 に示すように、離間後のアンカーボルトの理論的な拔出し剛性値は、コンクリートのクリープを考慮したもののほうが、実験値とよい対応を示した。したがって、コンクリートにコーン破壊等種々の破壊が起こらない場合、離間後のアンカーボルトの拔出し剛性は、コンクリートのクリープも考慮し、ほぼ式 (11) の右辺第 1 項 $\kappa / (1 + \kappa) \cdot Kb$ で評価できると考えられ、径が $\phi 30 \sim 42$ クラスのもの

図 11 アンカーボルトへの引抜き力 T と拔出し量 δ の関係を表すモデル

では、アンカーボルト単体の伸び剛性 Kb の約 70% 程度となることが確認できた。

これらの結果から、離間までと離間後を合わせたアンカーボルトに作用する引抜き力 T と拔出し量 δ の関係は、図 11 に示すモデルで評価できると考えられる。図 11(a) および (b) に示す破線は、それぞれ CBA-3-5 および CB-4-5 の実験結果の T と δ の関係の包絡線である。

アンカーボルトのねじ部が降伏する A 点以降のアンカーボルトの塑性域での挙動は、図 11 に示すとおりであるが、表 4 に示す最大荷重 T_{max} と、アンカーボルトの材料実体値を用いて算出した理論的なねじ部の最大強度 T_{pred} との比 T_{max}/T_{pred} が約 1 となることから、初期張力の有無はアンカーボルトの最大強度に影響を及ぼさないことも確認した。

4. 結 言

本実験より、以下のことが確認できた。

(1) ヘリあき量が 2.5~10 cm の範囲では、コンクリートの最大支圧応力 σ_{max} は、四週圧縮強度 F_c の 1~3 倍になる。また、この範囲でのコンクリートの最大支圧応力 σ_{max} と許容支圧応力 f_n は、それぞれ式 (2) および式 (4) で評価できる。

(2) コンクリートのばね定数 Kc あるいはアンカーボルトの拔出し剛性を算出するのに必要な、コンクリートの有効断面積 A_c を定める有効径 d_c は、定着板の直径 d_p の約 2.5 倍として評価できる。

(3) 離間荷重 B_s は、初期張力 B_o で評価するのが望ましい。

(4) 離間までのアンカーボルトに作用する引抜き力 T と拔出し量 δ の関係は、式 (8) で評価でき、アンカーボルトの拔出し剛性は、径が $\phi 30 \sim 42$ クラスのものでは、アンカーボルト単体の伸び剛性 Kb の約 6~7 倍程度となる。

(5) 離間後のアンカーボルトの拔出し剛性は、式 (11) の右辺第 1 項の $\kappa/(1+\kappa) \cdot Kb$ で評価でき、径が $\phi 30 \sim 42$ クラスのものでは、アンカーボルト単体の伸び剛性 Kb の約 70% 程度となる。

(6) 初期張力を導入したアンカーボルトに作用する引抜き力 T と拔出し量 δ の関係は、図 11 に示すモデルで評価できる。

最後に、本研究の遂行に際し適切なご指導とご協力を賜った東京大学名誉教授加藤勉博士・鹿島建設技術研究所長佐藤邦昭博士・日立機材鈴木周衛博士ならびに鹿島建設技術研究所・構造設計部の諸氏に、感謝の意を表する。

文 献

- (1) 佐藤・ほか 2 名, AIJ 大会学術講演梗概集・構造系, (1978), 1287-1288.
- (2) 佐藤・ほか 2 名, AIJ 大会学術講演梗概集・構造系, (1981), 2031-2032.
- (3) AISC, *Proposed Load and Resistance Factor Design Specification for Steel Building*, April 15, (1983), 93-94.
- (4) AISC, *Manual of Steel Construction Allowable Stress Design*, ninth edition, (1989), 3-106, 3-108.
- (5) ACI, *Commentary on Building Code Requirements for Reinforced Concrete* (ACI318-83), (1983), 318R-60, 318R-62.
- (6) 秋山, 鉄骨柱脚の耐震設計, (1985-3), 20-22.
- (7) プレストレストコンクリート設計施工基準, (1987), 95~96, 92~93, 日本建築学会.
- (8) AIJ, 各種アンカーボルト設計指針案, 建築雑誌, 99-1216, (1984), 76-77.
- (9) 高力ボルト接合設計施工指針, (1972), 14-19, 日本建築学会.
- (10) 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, (1988), 43-47, 110-115, 日本建築学会.