

[122] 被覆形鋼管コンクリートはりのせん断挙動に関する研究

正会員 藤井 学 (神戸大学工学部)

正会員 ○宮本文穂 (神戸大学工学部)

平田 綱 勇 (日本鋼管重工設計部)

竹内 克 宣 (香川県庁土木部)

1. ま え が き

被覆形鋼管コンクリート構造 (従来の鉄骨鉄筋コンクリートにおいて鉄骨を鋼管で置換え、鋼管内部を中空に保った構造) は、(1) 死荷重の軽減が図れること、(2) 鉄筋コンクリート構造 (RC 構造) と比較して、はり高等の断面寸法を小さく抑えると共に、じん性に富む構造とすることが可能であること、(3) 鋼管構造と比較して、鋼管の局部変形に対する抵抗が著しく改善されること等、多くの有利性が考えられる反面、(1) 鋼管とコンクリートとの一体性の不足、(2) 力学的挙動、特にせん断破壊性状の解明およびたわみ挙動の算定法が未確立である等の問題がある。本研究は、既報の研究^{1) 2)}をもとにして、(1) 供試体の寸法効果、(2) 鋼管外径・はり高比: d_s / D 、(3) 腹鉄筋比: p_w 、(4) せん断スパン・はり高比: a / D 、(5) スパイラル筋の溶接による付着性能の改善、(6) 荷重の繰返し、被覆形鋼管コンクリートはりの力学的挙動に与える影響を実験的・理論的に明らかにしようとしたものである。

2. 実験の計画および方法

2.1 供試体 供試体の形状・寸法を図-1に示す。また、表-1に供試体の種類および条件を示す。本研究では、せん断破壊挙動に主眼をおいたため、せん断スパン・はり高比

a / D を 1.0, 1.2, 1.5 とし、腹鉄筋比を種々変化させた。また、スパイラル筋の鋼管への溶接による鋼管とコンクリートの付着向上がせん断破壊挙動および変形挙動に与える影響を調べるため、スパイラル筋径およびその巻きピッチを変化させた。本実験で鋼管に溶接したスパイラル筋の径および巻きピッチの特性を D 51 と比較したものを表-2に示す。コンクリートの設計基準強度は $\sigma_{ck} = 300 \text{ kg/cm}^2$ とし、その配合を表-3に、また、使用した鋼材の物理的性質を表-4に示す。

2.2 荷重方法 図-2に示すように、せん断スパン・はり高比 (a / D) に応じた曲げスパンを有する2点対称荷重とし、1 t on ピッチで荷重を増加させ、5 t on 毎に下限荷重 1 t on の繰返し荷重を行った。なお、繰返し数は3回とした。

表-1 供試体の種類および条件

供試体記号	はり高 = はり幅 D = b (cm)	鋼管外径 ・ はり高比 d_s / D	せん断スパン ・ はり高比 a / D	スターラップ 間隔 s (cm)	腹鉄筋比 p_w (%)	スパイラル筋 直径 d (mm)	スパイラル筋 巻ピッチ h (cm)	備考
A-10	27	0.8	1.5	10	1.05	—	—	鋼管外径 $d_s = 21.63 \text{ cm}$ 鋼管肉厚 $t = 0.45 \text{ cm}$
A-7	27	0.8	1.5	7	1.50	—	—	
A-5	27	0.8	1.5	5	2.11	—	—	
A*-5	29	0.75	1.5	5	1.48	—	—	
AS-5-15	33	0.65	1.5	5	0.96	6	15	
AL-5-15	33	0.65	1.5	5	0.96	10	15	
AS-5-11	33	0.65	1.5	5	0.96	6	11	
AS-5-7	33	0.65	1.5	5	0.96	6	7	
AL-5-7	33	0.65	1.5	5	0.96	10	7	
AS-5-5	33	0.65	1.5	5	0.96	6	5	
AS-5-3	33	0.65	1.5	5	0.96	6	3	
A-4	31	0.70	1.5	4	1.44	—	—	
A-3	27	0.80	1.5	3	3.51	—	—	
A*-3	33	0.65	1.5	3	1.60	—	—	
B-3.5	33	0.65	1.2	3.5	1.37	—	—	
BL-3.5-15	33	0.65	1.2	3.5	1.37	10	15	
BL-3.5-7	33	0.65	1.2	3.5	1.37	10	7	
C-7	27	0.80	1.0	7	1.50	—	—	
C-5	29	0.75	1.0	5	1.48	—	—	
C-4	31	0.70	1.0	4	1.44	—	—	
CL-3.5-15	33	0.65	1.0	3.5	1.37	10	15	
CL-3.5-7	33	0.65	1.0	3.5	1.65	10	7	
C-3	33	0.65	1.0	3	1.60	—	—	

表-2 溶接鋼管と鉄筋の表面形状の比較

スパイラル筋 巻きピッチ h (cm)	h/鋼管外径 h/d _s	スパイラル 筋径 d (mm)	d/鋼管外径 d/d _s
3	0.139	6	0.228
5	0.324	10	0.466
7	0.694	—	—

呼び名	ふしの平均間隔 の最大値 公称直径	ふしの高さの 最小値 公称直径
D 51	0.701	0.049

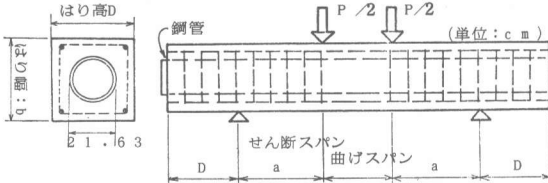


図-1 供試体の形状および寸法

表-3 コンクリートの示方配合

粗骨材の 最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	水セメント比 W/C (%)	粗骨材率 S/a (%)	単位量 (kg/m ³)		
					水 w	セメント c	粗骨材 s
20	12~14	2	51.8	44.2	192	371	783

2.3 測定項目 各荷重段階での測定項目は次の通りである。④図-2に示す各位置でのたわみ量および鋼管の変形量 ⑤ひびわれ発生荷

重, 進行状況およびひびわれ幅, ⑥破壊荷重および破壊形式。

3. 実験結果とその考察

3.1 ひびわれおよび破壊性状

ここでは腹鉄筋量, d_s / D すなわち, かぶり厚さとともにスパイラル筋の有無が種々の a / D に対して示すひびわれおよび破壊挙動を考察する。 $a / D = 1.5$ の場合, 各要因に関係なく, 曲げひびわれが, $5 \sim 10 \text{ ton}$ の荷重段階で発生する。その後の荷重増加により, かぶりが大きく腹鉄筋量の異なるものは曲げひびわれの発達に著しく, 破壊近傍で斜めひびわれ, 鋼管の偏平化による水平ひびわれが現われる。破壊形式は, 曲げ破壊を示す。これに対し, かぶりが小さく, 腹鉄筋量が少なくなるにつれて, 鋼管の偏平化による水平ひびわれの拡大が著しくなる。しかし, 破壊荷重に大きな差異はみられない。スパイラル筋を有する場合は, 曲げひびわれの発達を著しく鈍化させると共に鋼管の偏平化も防ぎ, 破壊荷重は無しの場合の約2倍となっている。 $a / D = 1.0$ の場合, スパイラル筋を有しない供試体においては, かぶりの大小が破壊を支配するひびわれを大きく左右する。すなわち, かぶり小の供試体においては, 鋼管の偏平化による水平ひびわれが破壊を支配し, かぶりが大きくなると, 曲げ, 斜めおよび水平ひびわれの, 3ひびわれが発達する。一方, スパイラル筋を有する場合は, 最終的には, 鋼管の偏平化による水平ひびわれが破壊を支配するものの, ひびわれ抑制効果は著しく増大する。破壊荷重も他と比べて約2倍となる。一例として, $a / D = 1.0$ の場合の荷重とひびわれ幅の関係を図-3に示す。

3.2 ひびわれ発生荷重算定法の検討

(a) 曲げひびわれ発生荷重: $b P_{CR}$ 引張線コンクリートが曲げ引張強度に達した時点で発生すると考えて

求めた値を表-5に併記する。表-5より, スパイラル筋を有しない場合の算定値は, 比較の実験値と一致しているが, スパイラル筋を有する場合は, 危険側の値を与えており, この算定法が適さないことがわかる。

表-4 鋼材の物理的性質

使用目的	呼び名	公称断面積 (cm ²)	降伏点強度 (kg/cm ²)	破断強度 (kg/cm ²)	弾性係数 (kg/cm ²)		
主鉄筋	D 10	0.7133	3760	6850	2.1×10^6		
スターラップ	φ 6	0.2827	6270	7010	2.1×10^6		
使用目的	タイプ	外径 (cm)	肉厚 (cm)	断面積 (cm ²)	降伏点強度 (kg/cm ²)	引張強度 (kg/cm ²)	弾性係数 (kg/cm ²)
鋼管	STK-41	21.63	0.45	29.93	3400	4700	2.1×10^6
スパイラル筋	d=6mm φ 6						
	d=10mm D 10						

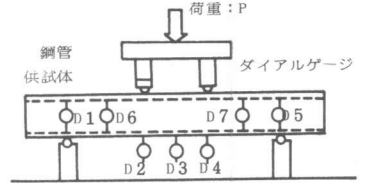


図-2 載荷装置および変形量測定位置

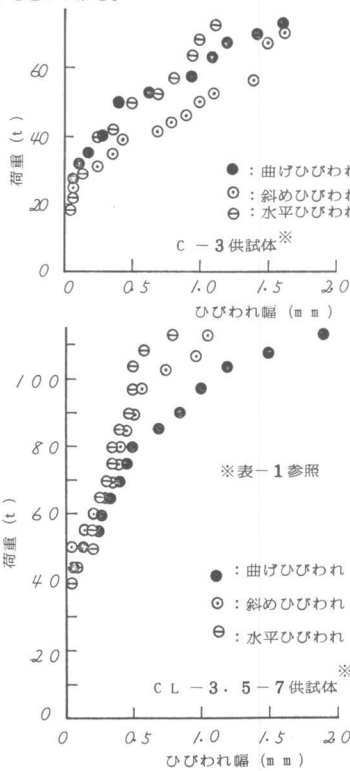


図-3 荷重とひびわれ幅の関係

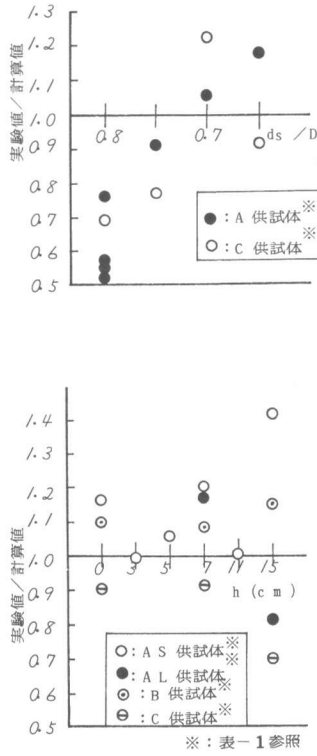


図-4 斜めひびわれ発生荷重の算定値と実験値の比較

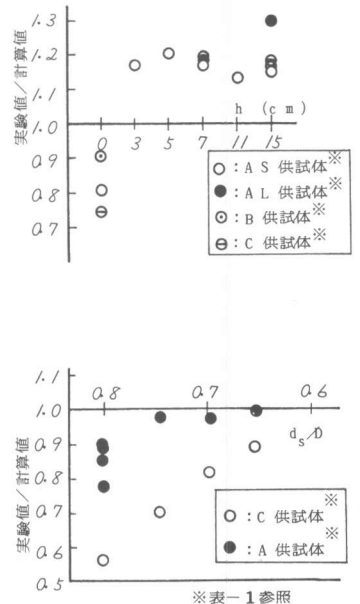


図-5 せん断破壊荷重の算定値と実験値との比較

(b) 斜めひびわれ発生荷重： $s P_{cr}$ 従来より提案されている、鋼管を軸方向筋として取扱う算定は、鋼管のせん断力負担を考慮していないなどの問題があるため、ここでは新たに累加強度式の適用を試みた。すなわち、 $Q_{cr} (=s P_{cr} / 2) = R_c Q_{cr} + s Q_{cr}$ ----- (1) ここで、 Q_{cr} ：斜めひびわれ発生時のせん断力、 $R_c Q_{cr}$ ：斜めひびわれ発生時に鉄筋コンクリート部分で分担するせん断力、 $s Q_{cr}$ ：斜めひびわれ発生時に鋼管が負担するせん断力である。 $R_c Q_{cr}$ の算定は、次式のACI設計基準式⁴⁾により行なう。 $\tau_{cr} = R_c Q_{cr} / \phi \cdot b_w \cdot d = 0.504 \sqrt{\sigma_c'} + 176 \cdot P_t \cdot Q \cdot d / M$ ----- (2) また、 $s Q_{cr}$ の算定には次式を適用する。 $s Q_{cr} = s A \cdot \epsilon_{cr} \cdot E_s / 2$ ----- (3) ここで、 ϵ_{cr} ：ひびわれ発生時の鋼管の主引張ひずみ(200×10⁻⁶)、 $s A$ ：鋼管の断面積、 E_s ：鋼管の弾性係数、である。式(1)により算定した値と実験値の比較を表-5に併記する。また、図-4には d_s / D およびスパイラル筋ピッチ、 h による計算値と実験値の比較を示している。これによると、スパイラル筋を有する場合は、計算値は比較的实验値と一致するが、スパイラル筋がなく、かぶりの小さいものは鋼管の偏平化のために大きな差異が生じている。

3.3 破壊荷重算定法の検討

(a) 曲げ破壊荷重： $b P_u$ 曲げ破壊時に鋼管とコンクリート部分の中立軸は一致しており、鋼管、鉄筋は引張、圧縮でそれぞれ降伏していると仮定した場合の終局強度式³⁾を適用した。その算定結果および実測値との比較を表-5に併記する。これより、スパイラル筋を有しない場合、明らかに曲げ破壊に至った供試体については、よく一致している。スパイラル筋を有する場合は、ほぼ4割程度安全側の値を与えている。

(b) せん断破壊荷重： $s P_u$ せん断耐力の算定値として、次式の累加強度式²⁾の適用を試みた。 $Q_u (=s P_u / 2) = R_c Q_u + s Q_u$ ---- (4) ここで、 $R_c Q_u$ ：鉄筋コンクリート部分のせん断耐力で、ACI設計基準式⁴⁾より算定する。 $s Q_u$ ：鉄筋コンクリートの破壊時に鋼管の負担するせん断力(=k A_s σ_y)¹⁾²⁾、式(4)により得られた値および実測値との比較を表-5に併記する。図-5は、せん断破壊荷重の計算値と実測値の比をかぶり厚およびスパイラル筋巻きピッチについて示したものである。これより、かぶり厚を大きくするか、スパイラル筋を溶接して鋼管の偏平化を抑制することにより精度よく算定することができる。

3.4 変形特性の検討

(a) 鋼管の変形 せん断スパン中央部の鋼管内(図-6参照)での変形量を測定し、せん断スパン長、かぶり厚、スパイラル筋の有無およびピッチが鋼管の偏平化に与える影響を検討した。図-6は一例として、 $a / D = 1.2$ および 1.0 の場合について荷重の増加および繰返しに伴う鋼管の変形量をプロットしたものである。また、表-5には、偏平化が急に進行するときの荷重を併記している。これによると、スパイラル筋のない

表-5 実験結果および計算結果の一覧

供試体記号	コンクリートの 圧縮強度 ²⁾ σ_c (Kg/cm ²)	曲げひびわれ発生荷重 ¹⁾ P_{cr} (t)			斜めひびわれ発生荷重 ¹⁾ $s P_{cr}$ (t)			破壊荷重 ¹⁾ P_u (t)	曲げ破壊荷重 ¹⁾ $b P_u$ (t)			せん断破壊荷重 ¹⁾ $s P_u$ (t)			** 破壊形式	鋼管変形 急増荷重 (t)
		実測値	計算値	実/計	実測値	計算値	実/計		計算値	実/計	計算値	実/計	計算値	実/計		
A-10	276	7.5	7.3	1.03	7.5	14.5	0.52	38.7	52.2	0.74	49.2	0.79	H	12.0		
A-7	305	5.0	8.1	0.62	8.0	14.6	0.55	45.0	53.1	0.84	50.2	0.90	H	10.0		
A-5	243	5.0	6.8	0.74	8.0	14.4	0.56	41.8	51.2	0.82	49.1	0.85	H	10.0		
A*-5	267	10.0	8.4	1.19	14.0	15.4	0.91	52.8	51.9	1.02	54.2	0.97	B,H	10.0		
AS-5-15	260	8.8	9.0	0.98	25.0	17.6	1.42	77.3	55.6	1.39	67.4	1.15	B***,S	—		
AL-5-15	331	8.0	10.2	0.78	15.0	18.2	0.82	88.4	58.1	1.52	68.1	1.30	B***,S	—		
AS-5-11	297	7.0	8.6	0.81	18.0	17.9	1.01	76.7	57.0	1.35	67.8	1.13	B	—		
AS-5-7	322	9.0	9.4	0.96	22.0	18.2	1.21	79.6	57.8	1.38	68.0	1.17	B***,S	—		
AL-5-7	304	7.2	9.9	0.73	21.0	18.0	1.17	80.0	57.2	1.40	67.9	1.18	B***,S	—		
AS-5-5	291	7.0	10.0	0.70	19.0	17.9	1.06	82.2	56.8	1.45	67.7	1.21	B***,S	—		
AS-5-3	328	6.0	10.6	0.57	18.0	18.2	0.99	80.0	58.0	1.38	68.1	1.17	B***,S	—		
A-4	232	7.0	8.4	0.83	17.0	16.2	1.05	56.7	50.6	1.12	58.3	0.97	B	12.0		
A-3	236	5.0	6.3	0.79	11.0	14.4	0.76	42.9	50.9	0.85	48.9	0.88	H	18.0		
A*-3	298	8.0	11.4	0.70	21.0	17.9	1.17	66.4	57.0	1.16	82.4	0.81	B	21.0		
B-3.5	311	8.0	12.6	0.63	20.0	18.1	1.10	77.5	72.0	1.08	84.9	0.91	H	—		
BL-3.5-15	322	8.0	12.4	0.65	21.0	18.2	1.15	98.8	72.5	1.36	85.0	1.16	B,H	—		
BL-3.5-7	362	7.0	16.4	0.43	20.0	18.5	1.08	101.8	74.0	1.38	85.4	1.19	B,H	—		
C-7	276	10.0	11.7	0.86	10.0	14.6	0.69	39.8	78.4	0.51	69.9	0.57	H	10.0		
C-5	239	11.8	11.3	1.04	11.8	15.3	0.77	52.0	74.6	0.70	73.7	0.71	H	11.0		
C-4	265	12.0	14.3	0.84	20.0	16.4	1.22	65.6	77.8	0.84	79.7	0.82	H	18.0		
CL-3.5-15	358	9.0	15.9	0.57	13.0	18.5	0.70	114.1	88.4	1.29	98.5	1.16	S,H	—		
CL-3.5-7	341	9.0	19.5	0.46	17.0	18.4	0.92	116.2	87.6	1.33	98.3	1.18	S,H***	—		
C-3	248	12.0	17.2	0.70	16.0	17.5	0.91	76.0	82.7	0.92	102.6	0.74	S	34.0		

*** B：曲げ破壊， S：せん断破壊， H：水平ひびわれによる破壊，

*** 支配的破壊形式

い場合、腹鉄筋比に関係なく測定断面にひびわれが発生すると同時に変形量が急激に増大 (A 点) し、その後の一定荷重下での繰返しにおいても変形が増大する。この傾向は、特に $a/D = 1.0$ の場合が著しい。これに対し、スパイラル筋を溶接した場合は、変形量の急増点は認められず、一定荷重下における繰返し载荷による変形量の増加も認められない。スパイラル筋の有無による差異は、 $a/D = 1.0$ の場合において特に顕著である。これより、被覆形鋼管コンクリートはりにおいて、断面寸法が大きくなるにつれて問題となってくる鋼管の偏平化は、腹鉄筋量を増大させるより、スパイラル筋を適当な方法で設置する方が有利であると考えられる。

(b) 支間中央におけるたわみ 鋼管の偏平化および鋼管鋼管とコンクリートの付着不足がはりのたわみに及ぼす影響は大きいと考えられる。

ここでは、主にスパイラル筋の有無によるたわみ挙動に及ぼす影響に着目し、その算定法について検討する。図-7は、一例として、 $a/D = 1.0$ の場合の荷重～たわみ関係を示したものであり、図中には、有効断面2次モーメントの算定にACI式を用いたもの：A、鋼管のみの曲げ剛性を用いたもの： Δ_s 、RC部分の曲げ剛性を用いたもの： Δ_{RC} 、および鋼管の曲げ剛性とRC部分の曲げ剛性の和を用いたもの： Δ 、を併記した。

これによると、スパイラル筋無しの場合、ひびわれ発生までは Δ 線がよく一致し、ひびわれ発生後は Δ_s 線に近づく。これに対し、スパイラル筋有りの場合、ひびわれ発生前後を通じてAと Δ 線の間位置しており、鋼管とコンクリートの付着は破壊近傍まで良好であることがわかる。

4. あとがき
本研究は、被覆形鋼管コンクリートのせん断挙動に及ぼす、かぶり厚さ、腹鉄筋量およびスパイラル筋の影響を実験的に調べた結果を述べ、ひびわれ発生荷重、破壊耐力およびたわみの算定法を検討したもので、鋼管の偏平化の抑制、コンクリートの付着の改良によって安全側の値を与えることがわかった。なお、本研究の一部は、昭和52年度および53年度、文部省科学研究費補助金(試験研究-2)によるものである。

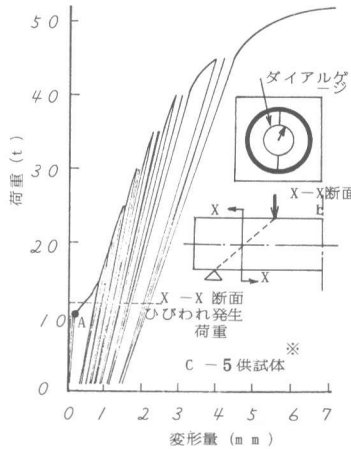


図-6 (a) 鋼管の変形曲線

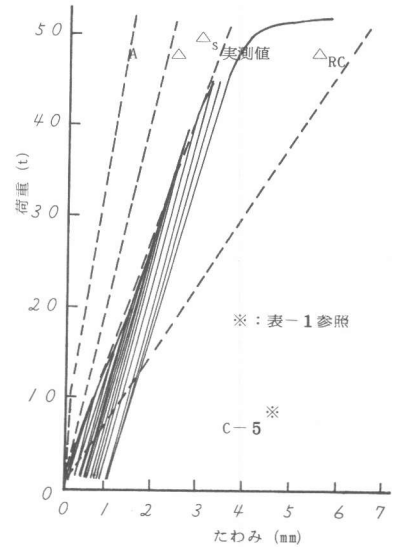


図-7 (a) 荷重～たわみ曲線

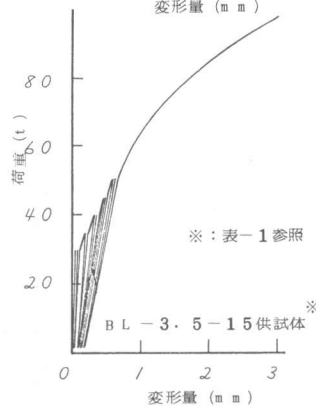
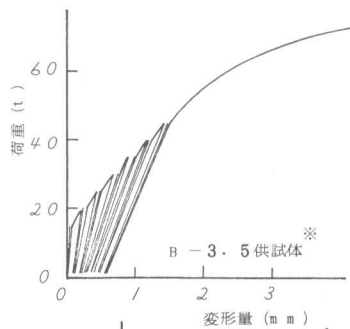


図-6 (b) 鋼管の変形曲線

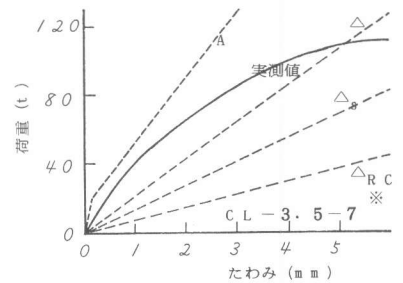


図-7 (b) 荷重～たわみ曲線

参考文献

- 1) 竹内他: 「被覆形鋼管コンクリートはりのせん断挙動」 土木学会第32回年次講演, 昭和52・10
- 2) 藤井他: 「被覆形鋼管コンクリートはりのせん断挙動について」 土木学会関西支部講演, 昭和53・5
- 3) 若林他: 「鉄骨鉄筋コンクリート構造」 建築構造学大系19, 昭和42・10
- 4) ACI Standard: 「Building Code Requirements for Reinforced Concrete」 ACI 318-71, 1971