

論文 480キロ級の高強度コンクリートを用いたRC柱のせん断耐力に及ぼす作用軸力比の影響

桑田裕次*1・南 宏一*2

要旨：480キロ級の高強度コンクリートを用いたRC柱のせん断耐力に及ぼす軸力の影響を検討するため4体の実験を行った結果、軸力比 $n=-1/6$ (引張)から $n=1/3$ (圧縮)の範囲でせん断耐力に及ぼす軸力の影響が少ないが、圧縮軸力の増加に伴いせん断耐力が上昇する傾向がある。既往耐力式のうちAIJのA法とB法・南式およびACI式等で比較検討した結果、南式で実験結果の傾向は説明できるが、圧縮軸力時に危険側の誤差、引張軸力時に安全側の誤差が確認された。

キーワード：引張軸力、高強度鉄筋コンクリート柱、せん断耐力、斜張力ひび割れ耐力

1. はじめに

超高層鉄筋コンクリート（以下RCと略記）造建物の下層階側柱は地震力によって変動軸力が作用する。この変動軸力はRC柱の剛性やひび割れ耐力、降伏耐力等に影響を与える。このような問題に対して、変動軸力を考慮したRC造骨組の弾塑性解析[1]や下層階側柱部部分架構の静的加力実験[2]や高強度材料を利用した柱の変動軸力下での曲げせん断実験[3]～[4]や2方向曲げせん断と変動軸力下での高強度材料を用いたRC柱の静的加力実験[5]および引張軸力下でのコンクリートクラック面に沿ったコンクリートのせん断力伝達を考慮した理論[6]～[7]等の研究が既に行われている。文献[1]～[5]はコンクリート圧縮強度350kgf/cm²級から700kgf/cm²級の範囲の実験であるが、いずれの実験においても主筋引張降伏を伴う曲げ崩壊機構で耐力が決定されており、引張作用軸力下でのRC柱のせん断耐力には不明な点が残されている。そこで本研究は480kgf/cm²級高強度コンクリートと引張降伏強度10000kgf/cm²級高強度主筋を用いた場合のRC柱に対し、引張力を含めた作用軸力がRC柱せん断耐力に与える影響を実験で検討する。

2. 実験

2.1 実験計画

文献[8]～[9]に示される1200キロ級と600キロ級高強度コンクリートを用いた場合と比較検討できるように柱の形状寸法や配筋形式を定めた。ただし、コンクリート強度は $\sigma_B=480\text{kgf/cm}^2$ 級、主筋引張降伏強度 $\sigma_y=10000\text{kgf/cm}^2$ 級、せん断補強筋引張降伏強度 $\sigma_{wy}=13000\text{kgf/cm}^2$ 級のマルチフープ（外周筋と副帯筋を一体化し、一筆書き状に曲げ加工した帯筋、以下マルチフープと称する。）を用いた。実験変数は作用軸力比として4種類($n=-1/6, 0, 1/6$ および $1/3$ 、ただし圧縮時が正で $n=N/bD\sigma_B$ 、引張時が

表-1 実験計画

試験体名	N	n
CA048-T6	-41.6	-0.167
CA048-N0	0	0
CA048-C6	73.6	0.169
CA048-C3	146.9	0.337

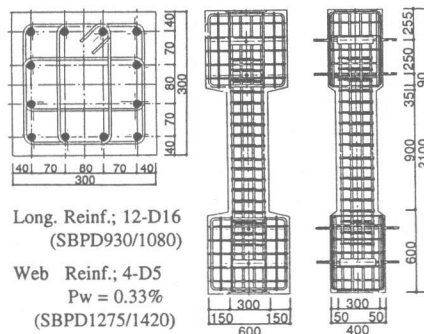


図-1 断面構成および形状寸法

*1 福山大学助手 工学部建築学科、(正会員)

*2 福山大学教授 工学部建築学科、工博(正会員)

負で $n=N/A_g\sigma_y$) を選択した。試験体は合計4体であり、実験変数と試験体の組み合わせ表-1に示す。

2.2 試験体の形状寸法および使用材料

試験体の断面構成および形状寸法を図-1に示す。柱断面は $b \times D = 300\text{mm} \times 300\text{mm}$ であり柱長さ L は900mmである。主筋には12-D16(SBPD930/1080)を用い、せん断補強筋には、D5(SBPD1275/1420)をそれぞれ用いた。せん断補強筋は、図-1に示すように外周筋と副帯筋が一体化した一筆書き状の曲げ加工筋による中子筋方式とした。コンクリートの調合設計は4週圧縮強度が 480kgf/cm^2 となるよう表-2のとおり定めた。砕石は広島県福山市郷分町産のものを使用し、比重2.70、粗粒率6.00である。海砂は広島県豊田郡瀬戸田町高根島産を使用し、比重2.53、粗粒率2.75である。混和剤には高性能減水剤を用いてコンクリートの流動化を図った。コンクリート圧縮強度は、載荷実験開始時(材令58日)と終了時(材令63日)の平均値として $\sigma_B = 485\text{kgf/cm}^2$ であり、その際の歪み度はほぼ0.2%であった。使用材料の機械的性質を表-3に示す。

2.3 実験方法

実験は建研式加力装置を改良した装置を用いて一定軸力を負担させた後、正負漸増繰り返し逆対称曲げせん断力を載荷した。載荷則は、文献[8]~[9]に示された実験の場合と同一とした。

3. 実験結果

3.1 破壊状況

写真-1に最終破壊状況の代表例を示す。初期ひび割れ発生荷重および変位部材角 $R = \pm 0.01\text{rad}$.における耐力および最大耐力を表-4に示す。初期ひび割れおよび最大耐力についてはその時点の変位部材角を()内に併せて示す。軸力が存在しないときおよび圧縮軸力が存在する場合は、各試験体とも曲げひび割れが生じた後、斜張力ひび割れが生じた。引張軸力が存在する試験体の場合は、引張軸力を負荷させた段階で柱脚部から柱頭部にわたる柱全断面に材軸直交方向のひび割れが発生した後、斜張力ひび割れが生じた。最大耐力時の破壊は実験変数に関係なく全ての試験体で斜張力ひび割れが卓越しており、せん断破壊の様相を呈している。しかしながら、試験体の中央付近に生じた斜めひび割れと材軸が

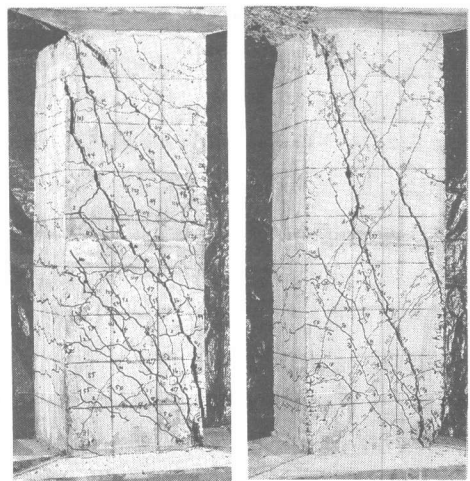
表-2 コンクリートの配合表

Gmax (mm)	W/C (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	S/A (%)	単位量 (kg/m ³)				
					W	C	S	G	AD
10	35	20.8	2.5	41.0	194	554	633	972	11.08
Gmax; 粗骨材の最大寸法					W; 水		G; 粗骨材		
W/C; 水セメント比					C; セメント		AD; 混和剤		
S/A; 細骨材率					S; 細骨材				

表-3 使用材料の機械的性質 (単位: kgf/cm²)

(a) コンクリート			(b) 鉄筋		
材令	Fc	Ft	種類	σ_y	σ_u
8日	293		主筋 D16-10000	10457	11587
15日	390		帯筋 D5-13000	14092	14792
21日	423				
28日	453	30			
58日	495	30			
63日	475				

Fc: 圧縮強度 σ_y : 降伏点
Ft: 割裂強度 σ_u : 最大耐力



(a) $n=1/6$ (引張) (b) $n=1/6$ (圧縮)

写真-1 最終破壊状況

なす角度の傾き θ は作用軸力比の大きさにより異なり、作用軸力が引張力の場合は θ が大きく、作用軸力の圧縮力が大きくなると θ が小さくなる傾向が認められた。このことは主応力度理論によるコンクリート引張応力の分布傾向と一致する実験結果である。また、曲げ圧縮域における材端部では、実験変数に関係なく主筋のかぶりコンクリート部分にひび割れが集中し、いずれの試験体でも最大耐力付近において材端部のコンクリートに局所的な圧縮が認められたが、主筋の座屈は認められなかった。

3. 2 主筋および帯筋の歪み分布

図-2 に主筋および帯筋の応力度推移状況を代表例として $n=-1/6$ (引張軸力) の場合を示す。図中の○・●および◇印は、

斜張力ひび割れ発生時と変位部材角 $R=1\%$ rad. および最大耐力時を各々示し、破線は降伏応力度を示す。外周帯筋部分のうち加力方向と平行な部分をA筋、直交する部分をB筋、中子筋部分のうち加力方向と平行部分をC筋、直交方向部分をD筋として最大耐力時の帯筋の応力度の特徴をまとめて、以下に示す。

- 1) 作用軸力が $n=1/6$ と $1/3$ の場合いずれの帯筋も降伏しない。そのときの応力度は $0.5 \sim 0.7 \sigma_{wy}$ の値を示す。作用軸力が $n=-1/6$ と 0 の場合は一部の帯筋が降伏する。
- 2) 作用軸力 $n=1/6$ と $1/3$ の場合のA筋は $0.5 \sigma_{wy}$ 程度の応力度を示し、C筋は $0.7 \sigma_{wy}$ 程度の値を示す。B筋およびD筋は $0.2 \sigma_{wy}$ 程度の値を示す。
- 3) 作用軸力 $n=-1/6$ と 0 の場合、A筋は $0.7 \sigma_{wy}$ 程度の応力度を示し、C筋は降伏する。B筋およびD筋は $0.5 \sigma_{wy}$ 程度の値を示す。
- 4) 主筋の応力度分布は、作用軸力 $n=-1/6$ の場合、隅角部主筋の一部で降伏が認められるが、主筋の付着劣化はあまり認められない。

3. 3 履歴曲線および包絡線

図-3 (a) ~ (d) に各試験体の履歴曲線を示す。図-4 に正載荷時の包絡線を示す。縦軸はせん断力 Q (tf) を、横軸は部材角 R (%rad.) を各々示す。図中の▽印は曲げひび割れ発生時を、▼印はせん断ひび割れ発生時を、▽M印は最大耐力時を各々示す。図中の点線は $P-\delta$ 効果を示す。また、後述の理論式で求めたせん断耐力も図中に示し、AIJ A法によるものを Q_A (2点鎖線)、B法を Q_B (1点鎖線)、ACI式を Q_{ACI} (破線)、南式を Q_M (実線) で各々示す。履歴曲線および包絡線の比較から次のことが認められた。

- 1) 軸力比の大きいものほど初期剛性が高く、初期斜張力ひび割れ耐力も大きい。斜張力ひび割れ後の剛性低下は、軸力比の大きいものほど剛性低下が大きい。しかしながら、斜張力ひび割れによる剛性低下後の剛性は、軸力比の大きさに関係なくほぼ一定である。
- 2) 最大耐力はほぼ一定であり、 $n=-1/6$ から $n=1/3$ の軸力比の範囲では、軸力比が最大耐力に与える影響は小さい。
- 3) 最大耐力に至るまでの変形量は軸力比によって影響を受ける。軸力比が小さいほど、その変形量は大きくなる。
- 4) 最大耐力以降の性状は軸力比によって影響を受ける。軸力比が小さくなるほど、耐力の低下率は小さく、かつ変形能力は大きくなる。

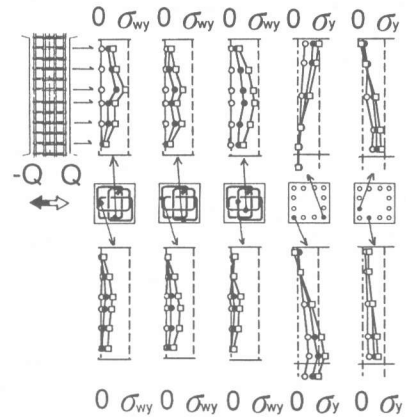


図-2 歪み分布 (CA048-T6)

表-4 実験値(単位：N；tf、Q；tf、R；×10⁻²rad.)

試験体名	作用軸力 N (1)	曲げひび割れ		斜張力ひび割れ		R=±1.0%		最大耐力 Q _{max} (R _{max})	補正したせん断力(2)						
		正 QF (RF)	負 -QF (-RF)	正 QD (RD)	負 -QD (-RD)	正 QR1	負 -QR1		正 Q _F (RF)	負 -Q _F (-RF)	正 Q _D (RD)	負 -Q _D (-RD)	正 Q _{R1}	負 -Q _{R1}	Q _{max} (R _{max})
CA048-T6	-41.6	-	-	8.1 (0.18)	-13.9 (-0.49)	27.0	-24.2	42.0 (1.83)	-	-	8.0 (0.18)	-13.6 (-0.49)	26.9	-24.1	41.9 (1.83)
CA048-N0	0	7.9 (0.09)	-2.0 (0.03)	15.6 (0.28)	-12.2 (-0.17)	32.0	-32.8	44.1 (2.34)	7.9 (0.09)	-2.0 (0.03)	15.6 (0.28)	-12.2 (-0.17)	32.0	-32.8	44.1 (2.34)
CA048-C6	73.6	21.9 (0.20)	-18.0 (-0.11)	26.0 (0.28)	-27.5 (-0.25)	40.6	-41.9	44.4 (1.73)	22.1 (0.20)	-18.1 (-0.11)	26.3 (0.28)	-27.8 (-0.25)	40.7	-42.0	44.6 (1.73)
CA048-C3	146.9	23.9 (0.18)	-25.9 (-0.15)	40.0 (0.41)	-33.9 (-0.25)	48.9	-46.2	48.9 (1.00)	24.3 (0.18)	-26.2 (-0.15)	40.8 (0.41)	-34.4 (-0.25)	51.0	-48.5	51.0 (1.00)

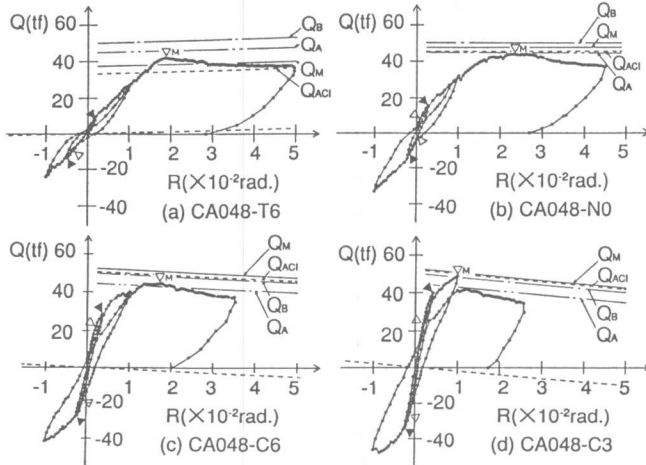


図-3 履歴曲線

註(1)圧縮力を正、引張力を負とする。
 (2)転倒モーメントの影響を考慮したせん断力で
 $\bar{Q} = Q + N \cdot R [1 + (h/L)]$ から求める。
 ここでR；部材角
 h；柱長さ
 L；軸力用ジャッキ支承間距離

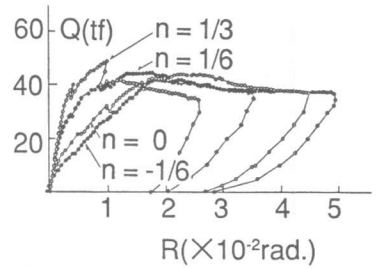


図-4 包絡線

4. 理論解析の検討

4. 1 斜張力ひび割れ耐力の検討

図-5に斜張力ひび割れ耐力と軸力比の関係を示す。縦軸は $Q_D / (bd\sqrt{\sigma_B})$ を横軸は $\sigma_N / \sqrt{\sigma_B}$ を表す。図中の●印は実験値を示す。実線は文献[10]から求めた理論値の式(1)を示し、破線は文献[11]から求めた理論値を示す。

$$Q_D / (bd\sqrt{\sigma_B}) = 1.0 + 0.1(\sigma_N / \sqrt{\sigma_B}) \quad (1)$$

ここに、 $\sigma_N = N/bd$

N：軸力(圧縮力が正の値、引張力が負の値)

圧縮力によって斜張力ひび割れ耐力が増加する実験の傾向は、式(1)および文献[11]から求めた理論式とも一致している。しかしながら、引張力が作用したとき、文献[11]で求めた理論式では評価できない場合がある。これに対して式(1)は実験結果の傾向が説明できる。

4. 2 終局せん断耐力の検討

表-5に終局せん断耐力の実験値と理論値の比較を示す。図-6に終局せん断耐力と作用軸力の関係を示す。縦軸の左側は軸力N(tf)を示し、右側は軸力比 $n (=N/bd\sigma_B)$ (圧縮時)と $(=-N/Ag\sigma_y)$ (引張時)を、横軸はせん断力Q(tf)を各々示す。図中の●印は実験値を示す。1点鎖線は文献[12]で示されるA法による理論値 Q_A を、2点鎖線はB法による理論値 Q_B を示す。細い実線は文献[13]~[14]によるACI式による

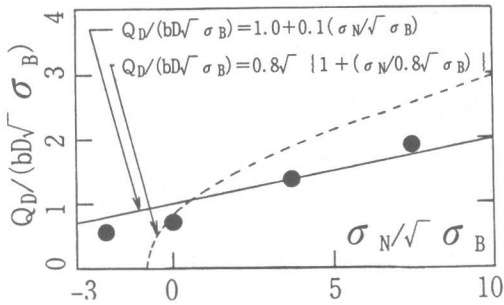


図-5 斜張力ひび割れ耐力と軸力の関係

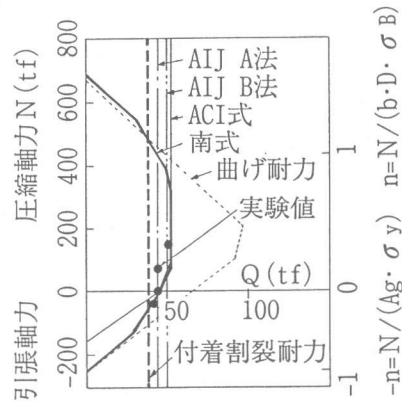


図-6 終局せん断耐力と軸力比の関係

表-5 実験値と理論値の比較 (単位: Q; tf, N; tf)

試験体名	作用軸力 N	軸力比 n	実験値 Qmax	曲げ耐力 QF	南式 QM	AIJ A法 QA	AIJ B法 QB	益尾式 QMS	ACI式 QACI	附着割裂耐力 Qs
CA048-T6	-41.6	-0.167	41.9	51.2	37.1	44.9	50.3	38.3	33.4	38.3
CA048-N0	0	0	44.1	66.6	47.6	44.9	50.3	38.3	45.4	38.3
CA048-C6	73.6	0.169	44.6	86.3	52.7	44.9	50.3	38.3	50.7	38.3
CA048-C3	146.9	0.337	51.0	96.1	52.8	44.9	50.3	50.8	52.2	38.3

理論値 Q_{ACI} を示す。太い実線は南理論による理論値 Q_M を示す。また、終局時のコンクリートの応力度分布を三角形と仮定して、一般化累加強度理論を適用して求めた曲げ耐力 Q_F を破線で示す。作用軸力比 $n=-1/6$ (引張)から $n=1/3$ (圧縮)の軸力比範囲では、せん断耐力に与える軸力比の影響が小さいことが実験結果から確認されたが、圧縮軸力の増加に伴いせん断耐力が上昇する傾向が見受けられた。AIJ A法およびB法は、軸力比がせん断耐力に与える影響が小さいことが示された既往の研究成果にもとづき、理論式のなかに軸力の効果は見込まれていない。しかしながら、圧縮軸力が作用した場合A法は実験値に対して耐力を低めに、引張軸力が作用した場合は実験値に対して耐力を高めに評価している。B法は圧縮と引張軸力の両方の実験の場合に対して、実験値より理論値が高めの耐力となった。これらに対してACI式および南式は、引張軸力によりせん断耐力が低下する実験結果の傾向と理論値の傾向が一致する。しかしながら、軸力が圧縮の場合はACI式および南式は実験値に対して危険側の誤差を、引張軸力の場合はACI式および南式の理論値は安全側の誤差を与えることが示された。引張軸力($n=-1/6$)が作用したとき理論値が安全側となる傾向はACI式が大きく、南式が小さい。引張軸力($n=-1/6$)のときACI式が実験値に対して低めの値を与えている理由は、せん断耐力に与える主筋強度の評価が関係していると考えられる。また、図-6に太い破線で附着割裂耐力が示されているが、これは異形主筋の附着強度として藤井・森田式に基づいて制限されるトラス機構を考えたせん断耐力 [11] から求めた値である。ACI式の一部でせん断耐力を附着割裂耐力が上回る範囲があるが、A法・B法および南式でせん断耐力に対して附着割裂耐力が下回っており附着割裂破壊が生じる結果になっている。なお、主筋重心間距離としては、2段主筋を等価な1段主筋として求めた値を用いている。

5. 結論

1) 作用軸力比 $n=-1/6$ (引張)から $n=1/3$ (圧縮)の範囲で、 $\sigma_B=480\text{kgf/cm}^2$ 級高強度コンクリートを用いたRC柱のせん断耐力に与える軸力比の影響は小さい。

2) 480kgf/cm^2 級高強度コンクリートを用いたRC柱部材の斜張力ひび割れ耐力は引張軸力が作用している場合を含めて、コンクリート引張強度を $\sqrt{\sigma_B}$ で表す(1)式で概ね評価できる。

3) 実用的なせん断耐力式であるA法やB法では軸力の影響が考慮できない。南式では軸力がせん断耐力に与える影響の傾向は評価できるが、圧縮力軸力時に危険側の誤差、引張軸力時安全側の誤差が確認された。

(謝辞)

本実験の実施にあたり、高強度せん断補強筋の材料提供ならびに曲げ加工は川鉄テクノワイヤ(株)に、コンクリート調査では(株)中国宇部生コンにご尽力を頂きました。本研究は広瀬友昭君(現在(株)松村組)の1993年度福山大学工学部建築学科の卒業研究として行われた。各位に感謝いたします。

参考文献

- 1) 福沢栄治他：柱の変動軸力を考慮したRC造骨組の弾塑性解析，その1解析法と芯筋柱の構造実験解析，日本建築学会構造系論文報告集，第372号，pp.31-44，1987.2
- 2) 寺岡 勝他：RC造高層骨組下層階側柱部部分架構の耐震性に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.15，No.2，pp.1137-1142，1993.6
- 3) 金田和浩他：高強度材料を利用した柱および柱梁接合部の地震荷重下における性状，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.14，No.2，pp.407-412，1992.6
- 4) 阿満重幸他：高軸力および変動軸力を受ける鉄筋コンクリート柱の変形状，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.13，No.2，pp.339-344，1991.6
- 5) 申 範昊他：3軸応力を受ける高強度鉄筋コンクリート柱の挙動に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.13，No.2，pp.463-468，1991.6
- 6) Shrinivas B.Bhide and Michael P.Collins : Influence of Axial Tension on the Shear Capacity of Reinforced Concrete Members ACI Structural Journal V.86 No.5 pp.570-581 September-October 1989
- 7) Michel P.Collins and Denis Mitchell: Prestressed Concrete Structures Prentice-Hall Inc. pp.309-379,1991
- 8) 中江晃彦・倉本洋・南宏一：1200キロ級の高強度コンクリートを用いたRC柱部材のせん断破壊性状，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.12，No.2，pp.357-362，1990.6
- 9) 桑田裕次・中山昭夫・南宏一：600キロ級の高強度コンクリートを用いたRC柱のせん断耐力，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.15，No.2，pp.473-478，1993.6
- 10) 桑田裕次・南宏一：耐震設計における60MPa級高強度コンクリートを用いたRC柱のせん断強度，第9回日本地震工学シンポジウム(1994)論文集，第2分冊，pp.1417-1422，1994.12
- 11) 益尾 潔：鉄筋コンクリート柱・梁部材の終局せん断耐力ならびに降伏変形の評価，日本建築学会構造系論文報告集，第452号，pp.87-97，1993.10
- 12) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針・同解説，pp.104-150，1990.11
- 13) American Concrete Institute : Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-83),Nov.1983
- 14) 日本コンクリート工学協会文献抄録委員会：ACI 318-83鉄筋コンクリート構造設計規準、コンクリート工学、Vol.22, No.22, pp.43-53, 1984