

[96] 水平集中荷重を受ける鉄筋コンクリート耐震壁のせん断強度

正会員 ○村上 利憲 (長谷川工務店 技術開発部)
 正会員 福嶋 孝之 (長谷川工務店 常務取締役)
 正会員 南 宏一 (大阪工業大学 工学部)

1. はじめに

耐震壁は建物の耐震性能を左右する重要な耐震要素であるにもかかわらず、その終局強度に関する理論的な評価法はいまだに確立されていない。特に、せん断強度に関する既存の方程式のほとんどは実験式であり、理論的なアプローチを試みたものは極めて少ない。(文献1,2) 本研究は圧縮・曲げおよびせん断の組み合わせ応力を受ける鉄筋コンクリート柱のせん断強度に関する解析手法(文献3)を応用して、鉄筋コンクリート耐震壁の終局せん断強度の理論解を①はり機構、②引張側柱主筋係数 ϕ と水平方向壁筋係数 Ψ_h およびせん断スパン比 η の関係から任意の傾き θ をもつコンクリート支柱で形成されるアーチ機構および③弦機構の強度の累加によって誘導し、コンクリート工学の検証用試験体(文献4)30体を用いて、実験結果と解析結果の比較および理論の妥当性を検討するものである。

2. 解析モデル

解析対象のモデルを図-1に示す。耐震壁の頭部には軸力 N_e と水平せん断力 Q を受ける1層1スパンの耐震壁とする。耐震壁のせん断伝達機構としては図-2(a),(b),(c)に示すように①はり機構、②アーチ機構、③弦機構の3要素を仮定し、耐震壁の終局せん断強度($n-q$ 方程式)はそれぞれの機構の強度を累加して求める。なお耐震壁頭部の軸力および水平せん断力を受ける梁はそれぞれの機構が形成されるに十分な剛性と強度を有するものとする。コンクリートは圧縮力のみを抵抗し、その強度は単純化のためにシリンダー圧縮強度 F_c とする。

3.1 はり機構に関する強度 (b_n-b_q 方程式)

はり機構は引張あるいは圧縮に抵抗する柱主筋と引張に抵抗する水平方向壁筋および材軸に対し $\theta=45^\circ$ の角度をなし、 bt の幅を有するコンクリート束材で構成される。なお、はり機構に用いる主筋量 $bP_t(=\beta \cdot P_t, \beta$ は引張側柱主筋量 P_t に対するはり機構に用いる柱主筋量の割合を示す。)を用いると、はり機構の柱主筋係数は $\beta\phi(=\beta \cdot P_t \cdot \sigma_y / F_c, \phi = P_t \cdot \sigma_y / F_c)$ と求められ、はり機構の b_n-b_q 相関方程式は下式の様になる。

(a) $-2\beta\phi \leq b_n < -2\beta\phi + (1+\eta)\Psi_h$ $b_q = (b_n + 2\beta\phi) / (1+\eta)$ — (1.a)
 (b) $-2\beta\phi + (1+\eta)\Psi_h \leq b_n < 2\beta\phi + (1-\eta)\Psi_h$ $b_q = \Psi_h$ — (1.b)
 (c) $2\beta\phi + (1-\eta)\Psi_h \leq b_n \leq 2\beta\phi$ $b_q = (b_n - 2\beta\phi) / (1-\eta)$ — (1.c)

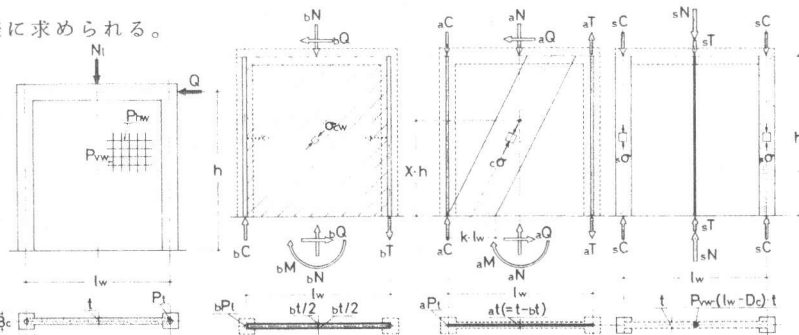
柱鉄筋が圧縮および引張降伏し、同時に、水平方向壁筋に引張降伏してはり機構の強度が決まる場合のはり機構に必要な主筋係数比 $b\beta$ は下式の様に求められる。

$b\beta = \Psi_h \eta / (2\phi)$ — (2)

3.2 アーチ機構に関する強度

(a_n-a_q 方程式)

アーチ機構ははり機構に用いられた残りのコンクリート幅 $a_t(=t-bt)$ を有し、任意の傾き θ [$\tan \theta = (1-k)/X \cdot \eta$, X :反曲点高さ比, k :中立軸比]をもつ無筋コンクリート支柱と引張および圧縮に抵抗する柱主筋で構成さ



れる。アーチ機構の a_n - a_q 相関方程式は下式の様に求められる。

$$a_q = \{ \sqrt{4 \cdot c_n \cdot (1 - c_n / a_{t1}) / a_{t1} + (X\eta)^2 - X\eta} \cdot a_{t1} / 2 \quad \text{--- (3)}$$

アーチ機構を形成するコンクリート支柱の傾き θ (反曲点高さ比 X) とアーチ機構に用いられる柱主筋係数 $(1-\beta)\phi$ の関係は壁頭部の曲げモーメントの釣り合いから、(3)式を用いて下式の様に求められる。

$$(1-\beta)\phi = a_q \cdot \eta \cdot (1-X) / 2 = (1-X) \cdot a_{t1} \cdot \eta \cdot \{ \sqrt{1 + (X\eta)^2} - X\eta \} / 4 \quad \text{--- (4)}$$

(4)式はコンクリート支柱の傾き θ (反曲点高さ比 X) とはり機構に用いられる主筋係数比 β の関係式となる。従って、反曲点高さ比 X は $1 \leq X \leq 1/2$ の範囲の値をとることから、 $X=1/2$ の時のアーチ機構から決まるはり機構に用いられる主筋係数比 $a\beta$ は(4)式から、下式の様に求められる。

$$a\beta = 1 - a_{t1} \cdot \eta \cdot \{ \sqrt{1 + (\eta/2)^2} - (\eta/2) \} / (8\phi) \quad \text{--- (5)}$$

はり機構に用いられる主筋係数比 β と反曲点高さ比 X は3区分できる。

① $\Psi_h \geq 2\phi/\eta$ の場合 $\beta = 1.0$ $X = 1.0$ --- (6.a)

② $\Psi_h < 2\phi/\eta$ の場合 $\beta = \max(b\beta, a\beta) = b\beta$ $1.0 < X < 1/2$ --- (6.b)

③ $\Psi_h < 2\phi/\eta$ の場合 $\beta = \max(b\beta, a\beta) = a\beta$ $X = 1/2$ --- (6.c)

反曲点高さ比 X は β の値を与えることによって、(4)式から求めることができる。

3.3 弦機構に関する強度 (s_n - s_q 方程式)

弦機構ははり機構およびアーチ機構に用いられたコンクリート部分を除く圧縮に抵抗する柱コンクリート弦材と引張あるいは圧縮に抵抗する鉛直方向壁筋弦材により構成される。弦機構の s_n - s_q 相関方程式は下式となる。

(a) $-\Psi_h \leq s_n \leq \Psi_h + n^*$ $s_q = 0$ --- (7)

4. 耐震壁の終局せん断強度 (n - q 方程式)

耐震壁の終局せん断強度は、はり機構、アーチ機構および弦機構の強度をそれぞれ累加して求めることができる。はり機構とアーチ機構の強度の累加則は図-3(a)に示すように柱主筋が降伏して耐力が決まる場合 ($\Psi_h \geq 2 \cdot \phi/\eta$) 文献3の修正拡張累加強度理論が適用でき、その相関曲線は一次的に求められる。しかしながら、水平方向壁筋の引張降伏により耐力が決まる場合 ($\Psi_h < 2 \cdot \phi/\eta$) は柱主筋がはり機構とアーチ機構にそれぞれ用いられ、アーチ機構を形成するコンクリート支柱の傾き θ (反曲点高さ比 X , $1 \leq X \leq 1/2$) が変動する。図-3(b)は $\beta=1$ 、反曲点高さ比 $X=1$ の場合の累加則で、(c)は $\beta=b\beta$ 、反曲点高さ比 x が $1 < X < 1/2$ で、(d)は $\beta=a\beta$ 、反曲点高さ比 $X=1/2$ であり、それぞれ修正拡張累加強度理論が適用できる。はり機構に用いられる柱主筋係数 $\beta \cdot \phi$ の値が変化するとともに、はり機構の強度が低下し、アーチ機構の強度が増加し、これらの強度を累加した相関曲線は任意の軸力領域においてせん断力が増加する。従って、耐震壁のはり機構とアーチ機構の累加した相関曲線は β の取り得る値のそれぞれの相関曲線の軌跡を結ぶ包絡線となる。この相関曲線を求めるためにはかなり複雑なくり返し

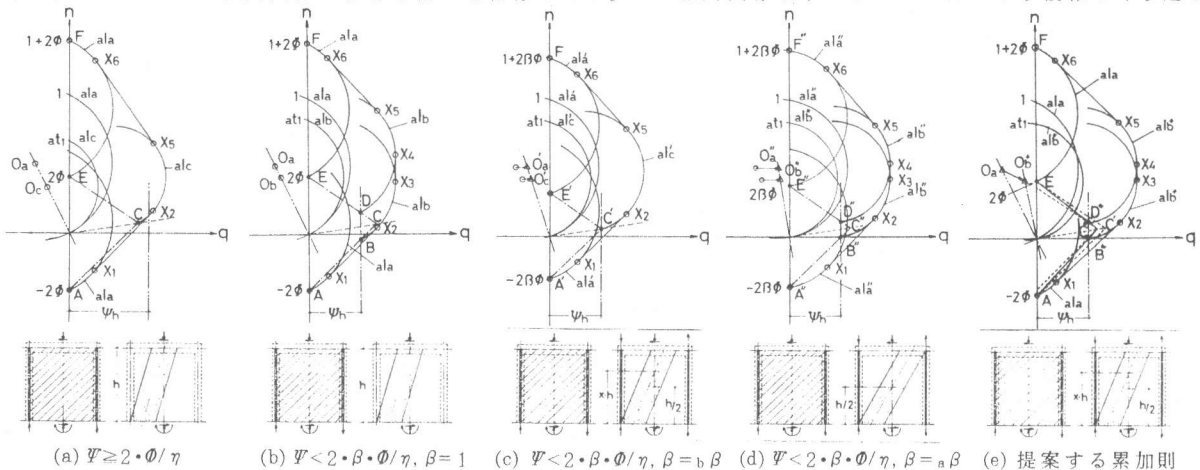


図-3 はり機構とアーチ機構の累加則

計算を要し、かつ、この曲線は複雑な曲線を描くので数式化するのに困難である。そこで、本理論は、はり機構とアーチ機構の累加強度を簡単な数式化にし、耐震壁の断面諸量が決めれば一次的にアーチ機構を形成するコンクリート支柱の反曲点高さ比 X とはり機構に用いられる柱主筋係数 β が決まりかつ、柱主筋係数 β の取り得る相関曲線の軌跡を結ぶ包絡線を満足する概算手法である。図-3(e)のはり機構とアーチ機構の累加則に示すように、はり機構の強度は点Aと点C'および点Eと点C''を結ぶ直線とし壁筋の引張降伏で決まる場合の強度は上記の直線と水平方向壁筋係数 \mathcal{V}_h の交わる点B''と点D''とする。はり機構の強度点Aと点Eに累加するアーチ機構の強度は図-3(b)の $\beta=1.0$ の aI_a とし、はり機構の強度点B''と点D''に累加するアーチ機構の強度は図-3(d)の $\beta=a\beta$ の aI_b' とする。従って、はり機構とアーチ機構の累加強度に関する相関曲線はそれぞれの曲線(aI_a, aI_b')に接する直線 $\overline{X_1 X_2}, \overline{X_3 X_4}$ および $\overline{X_5 X_6}$ と曲線 $\widehat{AX_1}, \widehat{X_2 X_3}, \widehat{X_4 X_5}$ および $\widehat{X_6 F}$ で表わされる。図-4は β の値($\beta=1.0, \beta=b\beta, \beta=a\beta$)によるはり機構とアーチ機構の累加した相関曲線と上記略算解を求める相関曲線を示している。軸力が引張側の領域においては多少の差が認められ、略算解の方が多少安全側の値を示しているが、実質的に使用する軸力の領域($0 \leq n < 0.3$)の範囲内においては厳正解とほぼ等しい。

5. 耐震壁の終局曲げ強度

図-5に示すようにI型の壁断面はフランジ部に相当する断面とウェブ断面から構成されるものとし、それぞれの部分に配置される鉄筋はそれぞれの重心位置にあるものと仮定する。フランジ部分の強度(M_f, N_f)およびウェブ部分の強度(M_w, N_w)について

$$M = M_f + M_w \quad N = N_f + N_w \quad \text{--- (8)}$$

の拡張累加強度理論を適用すると曲げ強度が算出できる。終局曲げ強度 M はその強度に対応するせん断力 Q で表わすと下式のようになる。

$$M = Q \cdot h \quad \text{--- (9)}$$

図-6に終局曲げ強度と終局せん断強度の n - q 相関曲線を示している。

6. 実験値と解析値の比較検討

前述の解析手法を用いて文献4の解析モデル検証用試験体30体を解析し、この結果を表-1に示す。一般的に、耐震壁の終局せん断強度として用いられ

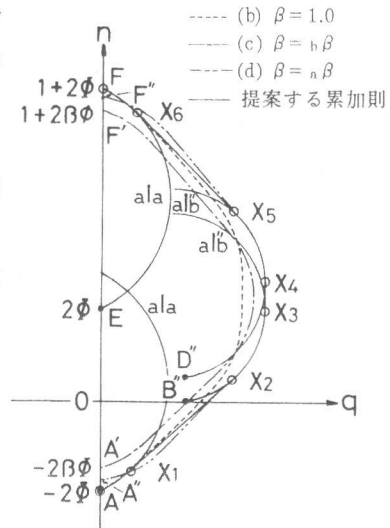


図-4 提案する相関曲線

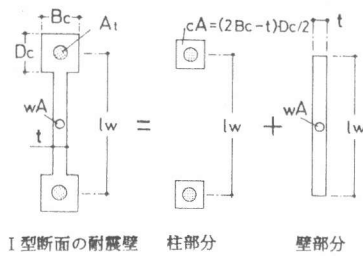


図-5 I型断面のモデル化

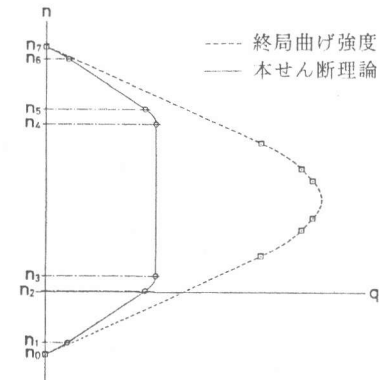


図-6 耐震壁の n - q 相関曲線

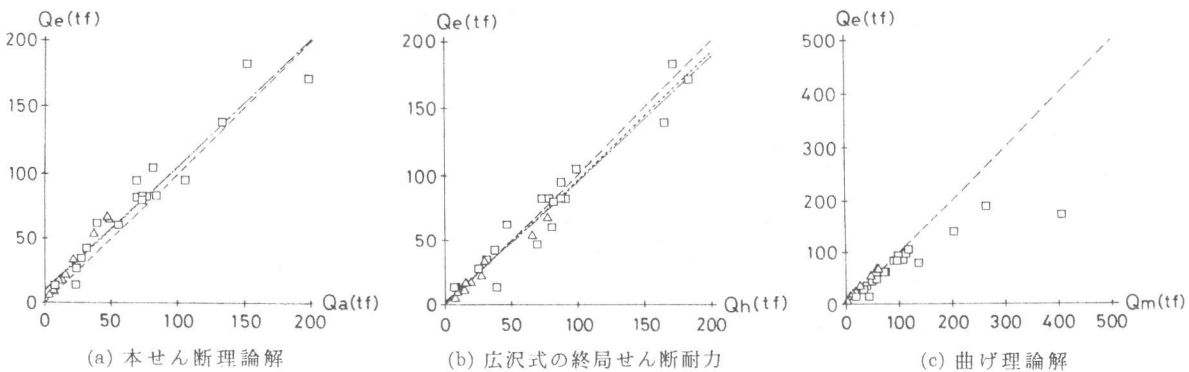


図-7 実験値と解析値の比較

ている広沢式も合せて解析した。図-7(a),(b),(c) は本せん断理論、広沢式の解および曲げ理論解と実験値の比較をそれぞれ示す。図中の点線は試験体30体の一回帰式を、一点鎖線は曲げ理論解よりも実験値の方が高い値を示す試験体10体(図中の△印)を除いた20体の一回帰式をそれぞれ示す。本せん断理論解は実験結果をよく評価しており、多少安全側の値を示しているのに対して、広沢式の解は実験結果をよく評価しているが、解析結果の方が実験結果よりも高い値を示す場合がある。また、危険側の値を示している。表-1の*印の試験体10体に関しては、曲げ理論よりも実験結果の方が高い値を示し、かつ、曲げ理論解よりも広沢式の解の方が高い値を示している。20体の試験体に関するそれぞれの解析結果の一回帰式を求めると下式の様に求められる。

$$\text{本せん断理論解 } Q_e = 0.947 \cdot Q_a + 10.317 \quad \text{---(10)} \quad \text{広沢式の解 } Q_e = 0.935 \cdot Q_h + 2.666 \quad \text{---(11)}$$

7. 結 語

本解析手法はアーチ機構を形成するコンクリート支柱の傾き θ (反曲点高さ比 $X, 1 \leq X \leq 1/2$)が引張側柱主筋係数 Φ 、水平方向壁筋係数 Ψ_h およびせん断スパン比 η の関係から自動的に決まり、はり機構、アーチ機構および弦機構の強度をそれぞれ累加して、耐震壁の終局せん断強度を評価する所に特徴がある。また、壁頭部の載荷梁が十分な剛性と強度を有した場合に適応できるものである。本せん断理論解は実験結果をよく評価できることが明らかであり、この解析による評価方法は代表的な広沢式による評価方法よりも合理性に富み、良好な結果を与えている。

表-1 実験値と解析値の比較一覧表

試験体名	Φ	Ψ_h	Ψ_v	$l_v(\text{cm})$	$t(\text{cm})$	$F_c(\text{tf}/\text{mf})$	$h(\text{cm})$	n_e	q_e	q_h	q_e/q_h	q_a	q_e/q_a	q_m	q_e/q_m	実験の破壊形式	解析の破壊形式
NO. 1	0.073	0.200	0.189	200	5.0	0.265	87.5	0.146	0.302	0.309	0.98	0.274	1.10	0.520	0.58	不明	曲げ
* NO. 2	0.044	0.120	0.105	200	8.0	0.258	187.5	0.088	0.163	0.189	0.86	0.110	1.48	0.150	1.09	曲げ・せん断	曲げ
* NO. 3	0.044	0.040	0.035	200	8.0	0.285	187.5	0.088	0.126	0.156	0.81	0.086	1.47	0.112	1.13	曲げ・せん断	曲げ・せん断
NO. 4	0.413	0.035	0.027	130	8.0	0.177	145.0	0.0	0.337	0.253	1.33	0.212	1.59	0.382	0.88	せん断	せん断
NO. 5	0.156	0.050	0.043	200	10.0	0.204	187.5	0.092	0.202	0.193	1.05	0.181	1.12	0.238	0.85	せん断	せん断
NO. 6	0.131	0.130	0.114	200	10.0	0.243	187.5	0.077	0.215	0.204	1.05	0.167	1.29	0.241	0.89	曲げ・せん断	曲げ・せん断
* NO. 7	0.115	0.035	0.031	200	10.0	0.276	287.5	0.068	0.118	0.140	0.84	0.086	1.37	0.114	1.04	曲げ・せん断	曲げ・せん断
NO. 8	0.120	0.036	0.032	200	10.0	0.266	187.5	0.071	0.177	0.165	1.07	0.129	1.37	0.182	0.97	曲げ・せん断	曲げ・せん断
* NO. 9	0.085	0.058	0.050	120	4.5	0.201	172.5	0.124	0.149	0.181	0.82	0.093	1.60	0.119	1.25	曲げ・せん断	曲げ・せん断
* NO. 10	0.106	0.036	0.032	120	4.5	0.319	172.5	0.078	0.127	0.154	0.82	0.084	1.51	0.112	1.13	曲げ・せん断	曲げ・せん断
NO. 11	0.299	0.052	0.045	120	4.5	0.226	172.5	0.111	0.217	0.207	1.05	0.192	1.13	0.262	0.83	せん断	せん断
NO. 12	0.147	0.019	0.017	205	7.5	0.338	145	0.0	0.184	0.176	1.05	0.209	0.88	0.220	0.84	せん断	せん断
NO. 13	0.575	0.028	0.025	50	3.0	0.20	55.8	0.16	0.440	0.241	1.83	0.208	2.12	0.597	0.74	せん断	せん断
NO. 14	0.502	0.024	0.022	50	3.0	0.229	55.8	0.140	0.378	0.223	1.70	0.206	1.83	0.521	0.73	せん断	せん断
* NO. 15	0.228	0.183	0.127	38.7	6.7	0.308	100	0.0	0.129	0.178	0.72	0.095	1.36	0.112	1.15	曲げ	曲げ
* NO. 16	0.394	0.176	0.122	38.7	6.7	0.320	100	0.0	0.199	0.193	1.03	0.149	1.34	0.177	1.12	せん断	曲げ
NO. 17	0.279	0.155	0.132	100	4.96	0.206	90	0.0	0.335	0.307	1.09	0.272	1.23	0.383	0.87	せん断	せん断
NO. 18	0.247	0.282	0.246	100	4.86	0.237	90	0.0	0.385	0.328	1.11	0.270	1.35	0.408	0.89	曲げ・せん断	曲げ
* NO. 19	0.242	0.135	0.114	100	4.97	0.237	180	0.340	0.281	0.256	1.10	0.183	1.54	0.260	1.08	曲げ・せん断	曲げ
* NO. 20	0.149	0.026	0.021	50	3.0	0.240	70	0.0	0.139	0.209	0.67	0.090	1.54	0.113	1.23	曲げ	せん断
* NO. 21	0.137	0.024	0.019	50	3.0	0.262	70	0.326	0.224	0.226	0.99	0.157	1.43	0.220	1.02	せん断	曲げ・せん断
NO. 22	0.012	0.035	0.418	138.5	8.0	0.177	145	0.0	0.089	0.202	0.34	0.118	0.58	0.210	0.33	曲げ・せん断	曲げ
NO. 23	0.135	0.073	0.144	156.4	16.0	0.176	170	0.124	0.187	0.166	1.13	0.173	1.08	0.223	0.84	曲げ・せん断	曲げ・せん断
NO. 24	0.135	0.117	0.107	156.4	16.0	0.212	170	0.103	0.156	0.163	0.96	0.157	0.99	0.207	0.75	曲げ・せん断	曲げ・せん断
NO. 25	0.135	0.342	0.152	156.4	16.0	0.150	170	0.145	0.218	0.244	0.89	0.183	1.19	0.230	0.95	曲げ・せん断	曲げ
NO. 26	0.018	0.160	0.272	160	10.0	0.246	170	0.111	0.118	0.177	0.67	0.118	1.00	0.143	0.83	曲げ・せん断	曲げ
NO. 27	0.074	0.175	0.208	160	10.0	0.225	170	0.121	0.167	0.223	0.75	0.151	1.11	0.215	0.78	曲げ・せん断	曲げ
NO. 28	0.098	0.373	0.353	150	16.0	0.247	60	0.0	0.290	0.310	0.94	0.333	0.87	0.687	0.43	せん断	曲げ
NO. 29	0.080	0.302	0.286	150	16.0	0.305	120	0.0	0.190	0.226	0.84	0.183	1.04	0.278	0.68	曲げ・せん断	曲げ
NO. 30	0.082	0.310	0.294	150	16.0	0.297	120	0.135	0.257	0.241	1.07	0.212	1.21	0.369	0.70	曲げ	曲げ

*印の試験体は、実験値の耐力の方が拡張累加強度理論に基づく曲げ耐力よりも上回ったものである。 q_e : 実験値, q_a : 広沢式の解析値, q_h : 解析値, q_m : 曲げ解析値

参考文献

1. 称原,加藤, "鉄筋コンクリート耐震壁の終局耐力", RC構造のせん断問題に対する解析的研究に関する工研研 論文集, 1982.6, pp.41~48.
2. 村上,南, "鉄筋コンクリート耐震壁のせん断強度(その2)", 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), 昭和59年10月, pp.1809~1810.
3. 若林,南, "鉄筋コンクリート部材のせん断強度について", 第2回コンクリート工学年次講演会講演論文集(1980), 1980年6月, pp.449~452.
4. 菅野, "耐震壁選定試験体選定理由および実験データの概要", RC構造のせん断問題に対する解析的研究に関する工研研, JCI, 昭和58年10月, pp.43~54.

記 号

Q: 終局せん断強度(kgf), N: 圧縮力(kgf), M: 曲げモーメント(kgf・cm), q: 無次元化せん断力 $q=Q/(t \cdot l_v \cdot F_c)$, n : 無次元化軸力 $n=N/(t \cdot l_v \cdot F_c)$
 m : 無次元化曲げモーメント $m=M/(t \cdot l_v^2 \cdot F_c)$, b_t : はり機構に用いられる壁厚(cm), a_t : アーチ機構に用いられる壁厚(cm), l_v : 壁有効せい(cm)
 a_{t1} : アーチ機構のコンクリート支柱の巾厚比 $a_{t1} = a_t/t$, $a_t = t - b_t$, Φ : 柱主筋係数 RC造の場合 $\Phi = P_t \cdot \sigma_y / F_c$, P_t : 引張側柱主筋比 $P_t = A_t / (t \cdot l_v)$
 Ψ_h : 水平方向壁筋係数(水平方向壁筋) $\Psi_h = (P_{hv} \cdot \sigma_{vy}) / F_c$, Ψ_v : 弦材係数 (鉛直方向壁筋) $\Psi_v = (l_v \cdot D_c) \cdot P_{vv} \cdot \sigma_{vy} / (l_v \cdot F_c)$, D_c : 柱せい(cm)
 t : 壁厚(cm), η : せん断スパン比 $\eta = 2 \cdot h / l_v$, χ : アーチ機構のコンクリート反曲点高さ比, h : 階高(cm), χ : アーチ機構のコンクリート反曲点高さ比
 D_c : 柱せい(cm), χ : アーチ機構のコンクリート反曲点高さ比, h : 階高(cm), β : はり機構に用いる鉄筋係数比, A_t : 引張側柱主筋断面積 (cm^2)
 B_c : 柱巾(cm), N_1 : 載荷軸力(kgf), F_c : コンクリートシリンドラ圧縮強度(kgf/cm 2), n^* : コンクリートの弦材係数 $n^* = (2 \cdot B_c \cdot D_c - t \cdot D_c) / (t \cdot l_v)$
 n^* : コンクリートの弦材係数 $n^* = (2 \cdot B_c \cdot D_c - t \cdot D_c) / (t \cdot l_v)$, n_e : 無次元化載荷軸力 $n_e = N_1 / (t \cdot l_v \cdot F_c)$, σ_y : 鉄筋の降伏応力度(kgf/cm 2)
 P_{hv} : 水平方向壁筋比(%), σ_{vy} : 壁筋の降伏応力度(kgf/cm 2), P_{vv} : 鉛直方向壁筋比(%)