

論文 ひび割れたコンクリートのせん断挙動に及ぼす拘束力の影響

川道克祥*1・篠原保二*2・宮城哲矢*3・宮蔭和人*4

要旨：コンクリートの破壊進行領域（ひび割れ面）における力学的特性のうち、ひび割れ面に垂直方向の拘束力と接線方向のせん断力を同時に受ける場合の力学的特性を解明するための一助として、ひび割れ面の拘束力をパラメータとする繰返しせん断実験を行なった。鉄筋比、拔出量、降伏応力度をパラメータとして、RC 構造物のひび割れ面における鉄筋による拘束効果を対象とし、拘束力がコンクリートのひび割れ面における繰返しせん断挙動に及ぼす影響を明らかにした。

キーワード：拘束効果、繰返しせん断挙動、破壊進行領域、ひび割れコンクリート

1. はじめに

コンクリート構造物におけるひび割れの大部分は乾燥収縮、温度変化、過大応力に起因するモード I と呼ばれる引張破壊で始まるが、その後の地震荷重などによりせん断力が作用し、ひび割れ面には複合応力が作用する。また、鉄筋コンクリート構造物のひび割れの多くは、鉄筋による拘束のため、応力の伝達が可能な破壊進行領域を有していると考えられる。鉄筋コンクリート構造物の設計の強度指向型から変形指向型への移行に際し、構造物の終局強度の把握だけでなく、構造物に作用する荷重履歴に対するひび割れを含む変形挙動と破壊メカニズムを正確に知ることが必要となる。試験体を完全に分離した後のひび割れ面におけるせん断挙動に関しては、Paulay¹⁾、Walraven²⁾をはじめ多くの実験があるが、破壊進行領域におけるせん断挙動に関する実験はほとんど行われていない。

本論では、変位制御引張試験によってコンクリートに規定のひび割れ(破壊進行領域)を生成した後、アクチュエータを用いてRC構造物のひび割れ面における鉄筋の拘束効果に関するパラメータを模擬的に制御し垂直方向の拘束力を載荷する。これらの条件下でひび割れ面の繰返しせん断実験を行ない、拘束力がコンクリートのひび割れ面における繰返しせん断挙動に及ぼす影響を明らかにする。

2. 実験方法

破壊進行領域におけるせん断挙動を明らかにするため、変位制御引張試験により目標のひび割れ幅($\delta_0=0.2\text{mm}$)を生成後、垂直荷重を除荷し、除荷時の残留ひび割れ幅を初期垂直変位 δ_0 としてその後の垂直変位の増減に応じて、鉄筋の拘束効果(鉄筋比、鉄筋降伏応力度、ひずみゲージ長)を模擬的に制御した垂直方向の拘束力を随時載荷する条件下で繰返しせん断実験を行った(図-1)。なお、試験体は試験前日までにエポキシ系接着剤を用いて加力装置にボルト接合された鋼板に接着した。ひび割れ幅の制御は、試験体にノッチを設けてひび割れ生成箇所をノッチ間に特定した上で左右のノッチ近傍に設置した高感度変位計を用いて行った。また、せん断変形の測定には二軸亀裂型変位計を使用した(図-2)(詳細は参考文献3)を参照)。

試験体は、普通ポルトランドセメント、水、天然骨材からなる材齢28日のプレーンコンクリート(最大骨材径20mm)とし、スランプ18cmを目標として調合した(表-1)。また、既報の実験³⁾から粗骨材の有無がせん断挙動に与える影響は小さいので、試験体調合は一種類のみとした。試験体寸法は、高さ200mm、幅200mm、厚さ100mmとし、高さ100mm(中央)の左右両端に深さ30mmのノッチを設けた(図-2)。

*1 東京工業大学大学院 (正会員)

*2 東京工業大学助教授 建築物理研究センター 工博 (正会員)

*3 東京工業大学 COE 研究員 建築物理研究センター 工博

*4 東京工業大学大学院

実験は、初期ひび割れ幅 $\delta_0=0.2\text{mm}$ を全試験体共通とし、ひび割れ面における鉄筋の拘束効果を明らかにするため鉄筋比 $p=0\sim 1.6\%$ 、鉄筋降伏応力度 $\sigma_y=345, 1275\text{MPa}$ 、ひずみゲージ長 $G_L=37.5, 300\text{mm}$ をパラメータとした。 G_L は鉄筋の付着や拔出しを考慮するためのパラメータ(有効拘束長さ)であり、同じひび割れ幅増分に対し、 G_L が長いほうがひずみが小さくなり、拘束力も小さくなる。なお、 $G_L=37.5\text{mm}$ は高感度変位計の測定点距離、 $G_L=300\text{mm}$ は柱・梁接合部(柱せい $D=600\text{mm}$)における主筋の拔出しを想定した値⁹⁾である。加力サイクルは、引張せん断力 10kN で折返し、圧縮時はせん断力 $-50, -100, -150, -180\text{kN}$ で折返す漸増繰返しせん断載荷を基準とし、圧縮せん断力が折返し荷重に達しない場合はせん断変位 $-0.5, -1.0, -1.5, -2.0\text{mm}$ で折返した。なお、引張せん断の折返しを 10kN としたのは左右のコンクリートが接着面付近の界面で破断する恐れがあるためである(予備実験では最大引張せん断力は $10\sim 20\text{kN}$ であった)。図-3に加力方向、図-4に加力サイクルを示す。

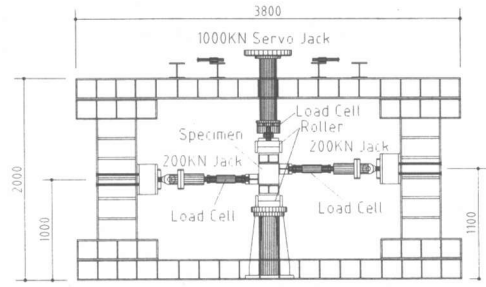
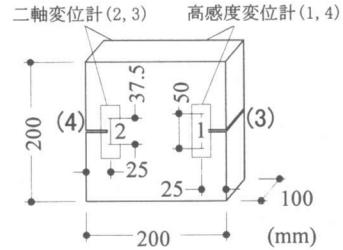


図-1 加力装置図



括弧内の数字は裏側にある変位計の意味

図-2 試験体寸法

3. 実験結果

表-2に、全試験体のパラメータ、シリンダーの圧縮試験結果および初期ひび割れ導入時の変位制御引張試験結果を示す。せん断弾性係数 G_0 はポアソン比 0.2 として割線弾性係数より算出した。図-5にひび割れ生成のための変位制御引張試験結果の一例を示す。垂直変位 $\delta v=0.01\text{mm}$ 付近で最大引張荷重に達し、その後、変位の増加とともに抵抗力が低下するひずみ軟化を起こした。

図-6は、繰返しせん断実験時の垂直変位 δv と鉄筋の拘束効果を模擬的に制御した垂直荷重 P_v の関係を示している。拘束力は、高感度変位計の平均値に、設定したパラメータ(鉄筋比、降伏応力度、ひずみゲージ長)および有効断面積 $A_s=14000\text{mm}^2$ から算出して制御した。ただし、鉄筋のひずみ硬化は考慮しないものとする。

図-7は各二軸変位計の δs およびその平均値とせん断荷重 P_s の関係を示している。図に示すように、08-300-345-2など初期の垂直方向拘束力がそれほど大きくない試験体では各二軸変位計にそれほど大きな差はみられないが、鉄筋比が大きい場合

表-1 調査表

W/C	水 (kg/m^3)	セメント (kg/m^3)	粗骨材 (kg/m^3)	細骨材 (kg/m^3)
0.55	194	353	1078	677

粗粒率 粗骨材:6.81 細骨材: 3.14

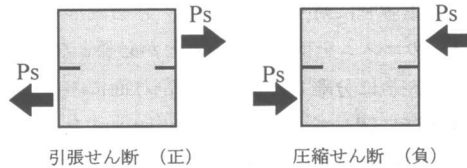
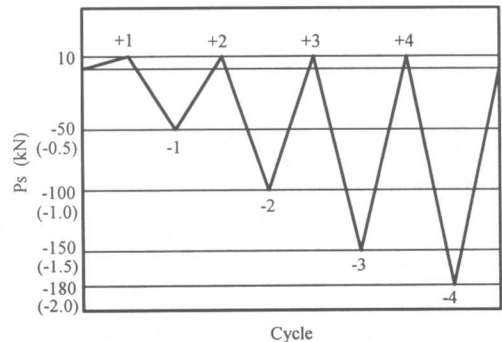


図-3 加力方向



※ただし、せん断荷重が規定のせん断力に達しない場合は括弧内に示すせん断変位(単位:mm)で折り返す

図-4 加力サイクル図

やひずみゲージ長が短い場合など、初期拘束効果が大きい試験体では、形成される圧縮束に沿って斜め下方向にひび割れが発生・進展し、斜め上方向のひび割れが発生するまで試験体両側の δs - P_s 関係に相違が生じる。しかし、斜め上方向のひび割れの発生・進展に伴い斜め下方向のひび割れ幅が小さくなると共に試験体両側の δs - P_s 関係の差も小さくなる傾向が見られた。各二軸変位計の挙動の違いがパラメータごとの比較に与える影響が少ないことや、試験体全体の挙動について考察を行うという論点から、以下の考察では二軸変位計の平均値を

せん断変位 δs として使用する。

図-8は二軸変位計の平均値 δs とせん断荷重 P_s 、垂直荷重 P_v の関係についてその一例を示している。ただし、横軸 δs は共通とし、左側縦軸 P_s と右側縦軸 P_v は互いに独立の軸とする。

δs - P_s 関係において、 $P_s=50$ knで折返す際に斜め下方向のひび割れの発生・進展は目視または50倍の顕微鏡にて確認できたが、斜め上方向のひび割れについては顕微鏡によりその発生をわずかに確認できる程度であった。その後、せん断荷重 P_s の増加に伴う斜め上方向のひび割れの進展によりせ

表-2 パラメータおよび材料特性一覧

試験体	p (%)	G_L (mm)	$s_y \sigma_y$ (MPa)	F_c (kN)	E_c (GPa)	G_0 (GPa)	F_t (kN)	F_r (kN)
00-000-000-1	—	—	—	38.8	31.4	13.1	27.0	1.89
00-000-000-2	—	—	—	37.9	29.6	12.3	23.2	0.81
04-300-345-1	0.4	300	345	32.9	33.3	13.9	23.2	2.70
04-300-345-2	0.4	300	345	36.9	36.0	15.0	20.6	2.14
08-375-345-1	0.8	375	345	36.9	36.0	15.0	20.0	2.52
08-375-345-2	0.8	375	345	35.4	37.8	15.8	16.9	3.75
08-375-1275-1	0.8	375	1275	31.1	35.0	14.6	13.5	2.73
08-375-1275-2	0.8	375	1275	37.4	33.3	13.9	23.9	2.28
08-300-345-1	0.8	300	345	28.7	34.1	14.2	17.3	1.30
08-300-345-2	0.8	300	345	32.9	33.3	13.9	20.1	2.35
08-300-1275-1	0.8	300	1275	36.9	36.0	15.0	20.4	1.58
08-300-1275-2	0.8	300	1275	37.4	33.3	13.9	20.1	1.51
16-300-345-1	1.6	300	345	28.7	34.1	14.2	17.9	1.47
16-300-345-2	1.6	300	345	36.9	36.0	15.0	21.9	1.96

試験体名
例: 08-300-345-1
p G_L $s_y \sigma_y$ No.

p: 垂直方向鉄筋比 (断面積 $A_s=14000\text{mm}^2$)
 G_L : ひずみゲージ長
 $s_y \sigma_y$: 鉄筋降伏応力度
 F_c : シリンダー圧縮試験強度 (3本の平均値)
 E_c : ヤング係数 (1/3 F_c と原点から算出した割線剛性)
 G_0 : せん断弾性係数 (ポアソン比0.2として E_c から算出)
 F_t : 引張強度 (変位制御引張試験結果)
 F_r : 残留引張力 (初期ひび割れ幅到達時)

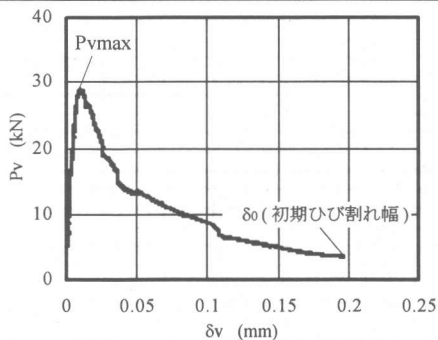
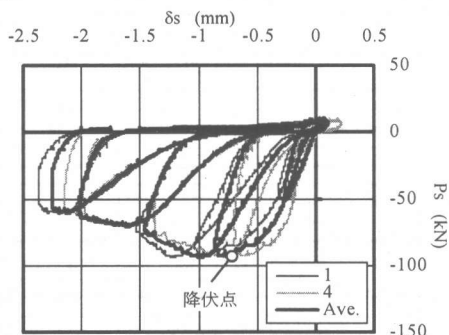


図-5 引張試験結果 (08-300-345-2)



※ 1, 4はそれぞれ二軸変位計 No.(図-2参照)

図-7 せん断変位 δs -せん断荷重 P_s 関係 (08-300-345-2)

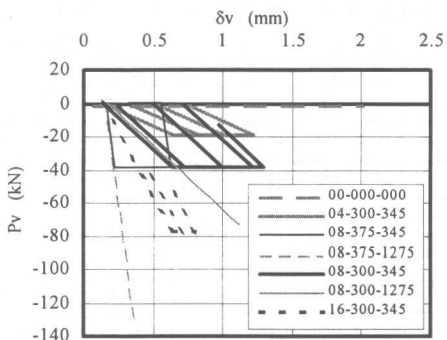


図-6 垂直変位 δv -垂直荷重 P_v 関係

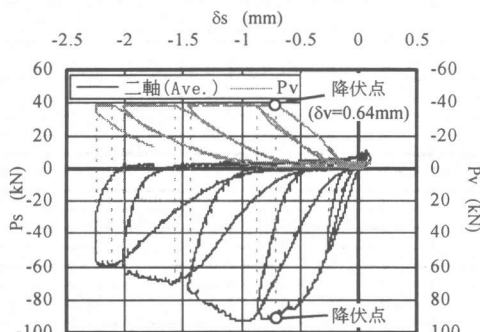


図-8 せん断変位 δs -荷重 P_s, P_v 関係 (08-300-345-2)

ん断剛性が低下し、鉄筋の降伏ではば最大荷重となり、徐々にせん断耐力が低下する。鉄筋の降伏以降のサイクルでは、Ps=-10kN程度までせん断剛性が低く拘束力Pvも小さくなる。これは鉄筋の残留ひずみの発生により初期ひび割れや斜め方向のひび割れがある程度開くまで拘束力Pvが得られず、さらにひび割れ幅の増加や繰返しの影響によりひび割れ面にお

ける骨材のかみ合い効果やひび割れ面の不整によるせん断抵抗が低減するからである。

表-3に実験結果一覧を示す。せん断剛性Ksは、引張ではPs=2kNと折返し荷重の割線剛性とし、圧縮ではPs=-10~-40kNの割線剛性である。なお、せん断変位は二軸変位計の平均値 $\delta_s Ave.$ を用いた。 $\delta_{s,PL}$ は鉄筋の降伏後の残留ひび割れ幅である。ま

表-3 せん断実験結果一覧

Cycle	Pv (kN)	δ_v (mm)	$s \delta_{PL}$ (mm)	Ps (kN)	$\delta_s(1)$ (mm)	$\delta_s(4)$ (mm)	$\delta_s Ave.$ (mm)	Ks (kN/mm)	β	Pv (kN)	δ_v (mm)	$s \delta_{PL}$ (mm)	Ps (kN)	$\delta_s(1)$ (mm)	$\delta_s(4)$ (mm)	$\delta_s Ave.$ (mm)	Ks (kN/mm)	β
00-000-000-1																		
試験体																		
0	0.0	0.17	—	0.0	0.04	-0.01	0.01	—	—	0.0	0.19	—	0.0	0.01	0.02	0.01	—	—
+1	-2.0	0.10	—	10.0	0.07	0.02	0.05	232.6	0.063	-2.0	0.09	—	10.0	0.01	0.06	0.03	164.8	0.048
-1	-2.4	0.31	—	-36.7	-0.04	-0.32	-0.18	183.5	0.050	-2.1	0.31	—	-27.0	-0.24	-0.18	-0.21	90.7	0.026
+2	-2.1	0.22	—	9.6	0.28	0.00	0.14	35.2	0.010	-1.9	0.37	—	10.0	0.03	0.14	0.09	63.5	0.018
-2	-2.1	2.24	—	-42.5	-0.39	-1.65	-1.02	38.5	0.010	-2.1	0.71	—	-6.1	-0.51	-0.43	-0.47	11.5	0.003
04-300-345-1																		
試験体																		
0	0.2	0.14	—	0.0	-0.03	-0.01	-0.02	—	—	0.1	0.14	—	0.3	0.00	0.04	0.02	—	—
+1	-0.1	0.14	0.00	9.8	0.00	0.05	0.02	187.1	0.048	0.0	0.14	0.00	8.2	0.00	0.05	0.03	461.4	0.110
-1	-11.9	0.44	0.00	-50.0	-0.38	-0.42	-0.40	139.5	0.036	-13.6	0.49	0.00	-50.0	-0.54	-0.22	-0.38	116.6	0.028
+2	-1.7	0.18	0.00	7.9	-0.01	0.00	0.00	56.6	0.015	-1.5	0.18	0.00	7.4	-0.09	0.05	-0.02	92.3	0.022
Yield	-19.3	0.64	—	-58.9	-0.60	-0.73	-0.67	—	—	-19.4	0.65	—	-62.7	-0.84	-0.23	-0.53	—	—
-2	-18.9	0.81	0.17	-35.6	-0.94	-1.04	-0.99	157.9	0.041	-19.4	0.80	0.15	-64.7	-1.00	-0.31	-0.65	138.4	0.033
+3	-2.5	0.39	0.17	5.8	-0.06	-0.10	-0.08	9.9	0.003	-0.2	0.33	0.09	5.4	-0.20	0.09	-0.06	30.3	0.007
-3	-19.4	1.00	0.36	-41.2	-1.35	-1.51	-1.43	68.3	0.018	-19.2	1.23	0.58	-52.8	-1.50	-0.95	-1.22	120.0	0.029
+4	-2.2	0.56	0.36	4.3	-0.16	-0.22	-0.19	5.1	0.001	-0.1	0.69	0.40	3.8	-0.29	0.03	-0.13	12.9	0.003
-4	-19.4	1.22	0.58	-37.1	-1.86	-2.04	-1.95	45.8	0.012	-19.4	1.96	1.31	-42.0	-1.82	-1.99	-1.90	81.9	0.020
08-375-345-1																		
試験体																		
0	0.2	0.17	—	0.0	-0.08	-0.09	-0.08	—	—	0.1	0.16	—	1.3	-0.02	-0.03	-0.02	—	—
+1	0.0	0.15	0.00	10.0	-0.05	-0.02	-0.04	173.4	0.041	-2.1	0.16	0.00	10.0	0.02	0.06	0.04	134.7	0.031
-1	-23.5	0.20	0.00	-50.0	-0.23	-0.19	-0.21	335.7	0.080	-21.7	0.19	0.00	-50.0	-0.20	-0.13	-0.17	432.4	0.098
+2	-0.1	0.14	0.00	10.2	-0.07	-0.03	-0.05	120.9	0.029	0.0	0.16	0.00	10.2	0.02	0.10	0.06	136.5	0.031
Yield	-38.7	0.23	—	-67.8	-0.30	-0.23	-0.26	—	—	-38.7	0.22	—	-74.0	-0.27	-0.14	-0.21	—	—
-2	-38.8	0.49	0.26	-81.8	-0.73	-0.26	-0.49	428.5	0.102	-38.6	0.62	0.40	-98.7	-1.00	-0.12	-0.56	505.4	0.115
08-375-1275-1																		
試験体																		
0	0.1	0.15	—	0.1	-0.02	-0.04	-0.03	—	—	0.1	0.14	—	0.1	-0.04	-0.02	-0.03	—	—
+1	-1.6	0.15	0.00	10.0	0.03	0.04	0.03	157.0	0.038	-0.1	0.14	0.00	10.1	-0.02	0.04	0.01	186.6	0.048
-1	-21.7	0.18	0.00	-50.1	-0.19	-0.18	-0.19	354.6	0.087	-14.3	0.17	0.00	-50.0	-0.18	-0.14	-0.16	317.7	0.082
+2	-0.3	0.15	0.00	10.0	0.03	0.05	0.04	156.6	0.038	-0.5	0.14	0.00	9.9	-0.03	0.04	0.00	179.9	0.046
-2	-61.9	0.26	0.00	-100.0	-0.43	-0.26	-0.34	412.6	0.101	-61.3	0.24	0.00	-100.0	-0.41	-0.25	-0.33	453.9	0.117
+3	-1.7	0.15	0.00	10.2	0.03	0.08	0.05	109.6	0.027	-0.3	0.14	0.00	8.8	-0.06	0.03	-0.02	110.7	0.028
-3	-105.1	0.31	0.00	-150.2	-0.66	-0.41	-0.54	366.9	0.090	-98.6	0.30	0.00	-150.1	-0.66	-0.33	-0.50	315.1	0.081
+4	-2.3	0.15	0.00	10.2	0.01	0.07	0.04	67.9	0.017	-0.6	0.14	0.00	10.0	-0.11	0.00	-0.05	73.2	0.019
-4	-128.9	0.35	0.00	-180.1	-0.82	-0.56	-0.69	281.4	0.069	-122.1	0.34	0.00	-180.1	-0.87	-0.42	-0.64	285.7	0.074
08-300-345-1																		
試験体																		
0	-0.4	0.17	—	0.6	0.01	0.00	0.01	—	—	0.1	0.14	—	0.0	-0.01	0.01	0.00	—	—
+1	-0.9	0.19	0.00	9.4	0.04	0.06	0.05	165.9	0.042	-0.4	0.15	0.00	10.1	0.02	0.06	0.04	211.2	0.054
-1	-16.3	0.39	0.00	-50.3	-0.40	-0.14	-0.27	218.6	0.055	-12.4	0.30	0.00	-50.1	-0.30	-0.19	-0.25	206.2	0.053
+2	-1.3	0.20	0.00	5.8	0.02	0.12	0.07	47.1	0.012	-1.1	0.15	0.00	10.1	0.02	0.12	0.07	93.2	0.024
Yield	-38.8	0.68	—	-95.3	-0.99	-0.38	-0.69	—	—	-38.8	0.64	—	-91.0	-0.82	-0.53	-0.71	—	—
-2	-38.8	0.69	0.01	-95.4	-1.01	-0.39	-0.70	244.8	0.061	-38.7	0.71	0.07	-92.0	-1.00	-0.62	-0.81	255.1	0.066
+3	-3.7	0.25	0.01	3.5	-0.21	0.01	-0.10	14.0	0.004	-3.8	0.27	0.07	9.7	-0.04	0.18	0.07	20.7	0.005
-3	-38.7	1.04	0.36	-86.1	-1.51	-0.95	-1.23	141.8	0.036	-38.7	0.98	0.34	-76.4	-1.50	-1.35	-1.43	122.0	0.031
+4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	-4.4	0.55	0.34	8.1	-0.14	0.17	0.02	7.7	0.002
-4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	-36.9	1.18	0.54	-48.8	-2.03	-1.99	-2.01	74.8	0.019
08-300-1275-1																		
試験体																		
0	0.1	0.18	—	0.0	-0.01	-0.03	-0.02	—	—	-0.1	0.17	—	0.2	-0.01	-0.04	-0.03	—	—
+1	0.1	0.18	0.00	10.1	0.03	0.03	0.03	176.0	0.042	-0.6	0.18	0.00	10.0	0.02	0.05	0.03	172.3	0.044
-1	-14.1	0.36	0.00	-50.1	-0.36	-0.23	-0.29	189.3	0.045	-13.5	0.34	0.00	-50.1	-0.30	-0.33	-0.32	161.9	0.042
+2	-1.7	0.20	0.00	10.2	0.03	0.07	0.05	75.5	0.018	-1.9	0.20	0.00	9.9	-0.01	0.05	0.02	84.6	0.022
-2	-43.0	0.73	0.00	-100.0	-1.05	-0.40	-0.73	245.5	0.059	-41.2	0.69	0.00	-97.7	-1.00	-0.46	-0.73	204.7	0.053
+3	-4.4	0.24	0.00	10.1	-0.08	0.12	0.02	44.8	0.011	-3.9	0.22	0.00	10.1	-0.11	0.05	-0.03	56.9	0.015
-3	-64.5	1.00	0.00	-117.4	-1.73	-1.00	-1.37	148.7	0.035	-58.5	0.91	0.00	-112.0	-1.50	-1.02	-1.26	142.9	0.037
+4	-16.2	0.39	0.00	9.8	-0.54	-0.20	-0.37	24.2	0.006	-19.5	0.42	0.00	7.5	-0.65	-0.58	-0.61	21.2	0.005
-4	-67.0	1.04	0.00	-109.4	-2.08	-1.50	-1.79	92.2	0.022	-79.2	1.17	0.00	-111.6	-2.00	-2.08	-2.04	150.7	0.039
16-300-345-1																		
試験体																		
0	-0.2	0.11	—	0.1	0.04	0.02	0.03	—	—	0.2	0.13	—	0.1	-0.02	-0.01	-0.02	—	—
+1	-1.7	0.12	0.00	9.0	0.07	0.06	0.07	369.7	0.093	0.0	0.11	0.00	9.2	0.00	0.02	0.01	255.3	0.061
-1	-20.1	0.24	0.00	-49.8	-0.28	-0.13	-0.20	215.6	0.054	-14.9	0.22	0.00	-50.0	-0.26	-0.16	-0.21	279.9	0.067
+2	-2.0	0.13	0.00	4.6	0.02	0.06	0.04	71.3	0.018	0.2	0.11	0.00	6.4	-0.02	0.00	-0.01	98.2	0.023
-2	-49.7	0.43	0.00	-100.0	-0.68	-0.22	-0.45	243.7	0.061	-49.4	0.44	0.00	-100.0	-0.73	-0.34	-0.53	337.3	0.080
+3	-2.7	0.13	0.00	4.4	-0.05	0.05	0.00	50.8	0.013	-3.1	0.15	0.00	4.7	-0.14	-0.08	-0.11	29.1	0.007
Yield	-77.4	0.61	—	-147.0	-1.02	-0.35	-0.69	—	—	-77.4	0.62	—	-132.7	-1.20	-0.92	-1.06	—	—
-3	-77.4	0.68	0.07	-148.4	-1.18	-0.53	-0.85	235.2	0.059	-77.5	0.69	0.07	-126.7	-1.50	-1.39	-1.44	204.6	0.049
+4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	-37.5	0.43	0.07	3.6	-0.96	-0.98	-0.97	53.6	0.013
-4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	-77.3	0.78	0.16	-118.9	-2.00	-2.16	-2.08	366.0	0.087

た、 β は表-2のせん断弾性係数 G_0 の平均値を基準($G_0=1$)として無次元化したせん断剛性低下率である。各サイクルごとの β より00-000-000試験体を除く全試験体において-1サイクル目より-2サイクル目のほうがせん断剛性が高く、その後徐々にせん断剛性が低下していくのが分かる。-1サイクル目より-2サイクル目のほうがせん断剛性が高くなるのは、-1サイクル目が微小な骨材のかみ合いや面の不整などの影響を受けひび割れ面が滑らず緩やかに荷重が上がるのに対し、-2サイクル以降では、それら微小な凹凸によるせん断伝達力が繰返しの影響で減少し、低荷重($Ps=-2kN$ 程度)のまま変形だけが進んだ後、急勾配で前サイクルの除荷開始点に向かうため、滑り量は大きくなるが見かけの剛性は増加するからである。

図-9に全パラメータのせん断変位 δs -せん断荷重 Ps 関係包絡線を示す。鉄筋比が高くひずみゲージ長が短いほど初期せん断剛性が高くなり、鉄筋比、降伏応力度が高いほど最大耐力後のせん断耐力低下が緩やかになるのが分かる。なお、鉄筋比 $\sigma_y=1275MPa$ の試験体は鉄筋が降伏しなかった。

4. 鉄筋比 p の比較

図-10に鉄筋比 p が異なる試験体(ひずみゲージ長 $G_L=300mm$, 降伏応力度 $\sigma_y=345MPa$)の δs - Ps 関係包絡線を示す。各試験体を比較すると、鉄筋比が高いほどせん断剛性およびせん断耐力が高くなり、鉄筋の降伏後に最大耐力に達し、その後徐々に耐力が低下することが分かる。これは、鉄筋比が高いほどひび割れ幅の単位増分に対する拘束力が大きくなり、せん断摩擦抵抗の増加やひび割れ

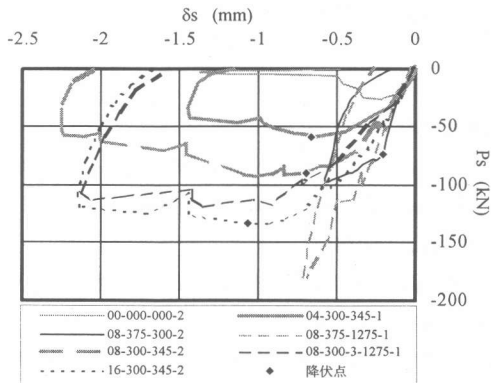


図-9 δs Ave.- Ps 関係包絡線

幅の抑制による骨材のかみ合い効果が増加するからである。また、16-300-345-2は最大耐力後の耐力低下が少なく韌性に富んでいる。これは16-300-345-2の鉄筋の塑性ひずみが小さくひび割れの増加を抑制するからである。

5. ひずみゲージ長 G_L の比較

図-11, 図-12にひずみゲージ長が異なる試験体(鉄筋比 $p=0.8\%$)および拘束が無い試験体00-000-000-2の δs - Ps 関係包絡線を示す。図-11は降伏応力度 $\sigma_y=345MPa$, 図-12は $\sigma_y=1275MPa$ の試験体について比較している。

図より、ひずみゲージ長 G_L が短くなるほど初期せん断剛性が高くなるのが分かる。これは、鉄筋比が高い場合と同様に、ひび割れ幅の単位増分に対する拘束力が大きくなるからである。また、図-11, 図-12とも $G_L=300mm$ の試験体が $Ps=-30kN$ 程度で斜め下方向のひび割れが開き、急激にせん断剛性が低下しているが、 $G_L=37.5mm$ の試験体では拘束効果が高いため急激なせん断剛性低下は見られない。降伏応力度ごとに比較すると、 $\sigma_y=345MPa$ の試験体は $G_L=37.5mm$ の試験体08-375-345-2が鉄筋降伏後、急激にせん断剛性が低下し、 δs - Ps 関係、ひび割れ幅ともに08-300-345-2に近づいていくのに対し、 $\sigma_y=1275MPa$ の試験体では鉄筋が降伏しないため、せん断剛性、せん断耐力は高くなる。 $G_L=300mm$ の試験体08-300-1275-1が $Ps=-122kN$ に達した後、徐々にせん断耐力が低下していくのは、08-375-1275-1が $Ps=-180kN$ 時にひび割れ幅 $\delta s=0.35mm$ であるのに対し、08-300-1275-1では、 $Ps=-122kN$ 時に $\delta s=0.90mm$ に達しており、骨材のかみ合

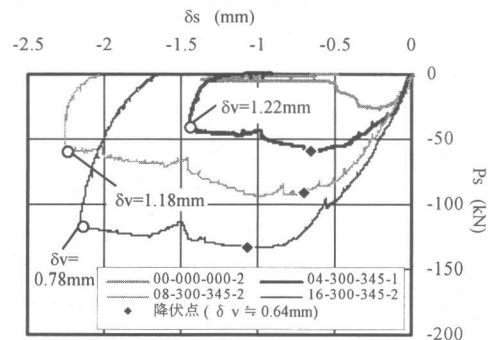


図-10 鉄筋比 p の比較

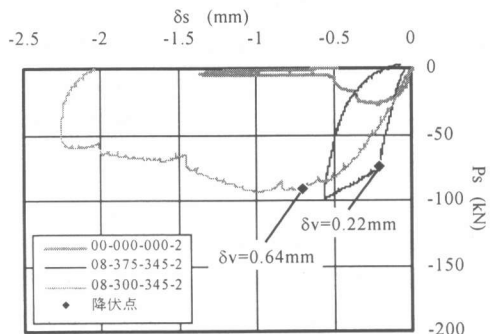


図-11 ひずみゲージ長 G_L の比較 ($\sigma_y = 345\text{MPa}$)

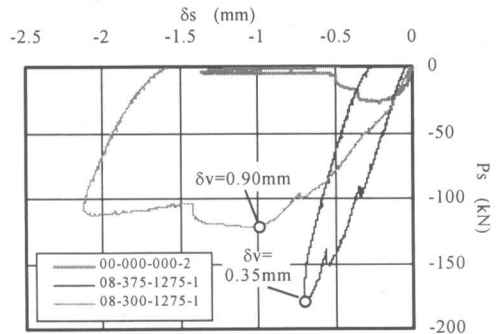


図-12 ひずみゲージ長 G_L の比較 ($\sigma_y = 1275\text{MPa}$)

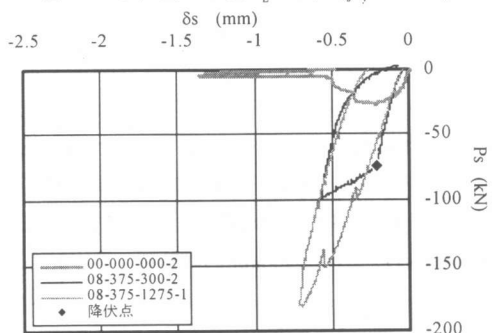


図-13 降伏応力度 σ_y の比較 ($G_L = 37.5\text{mm}$)

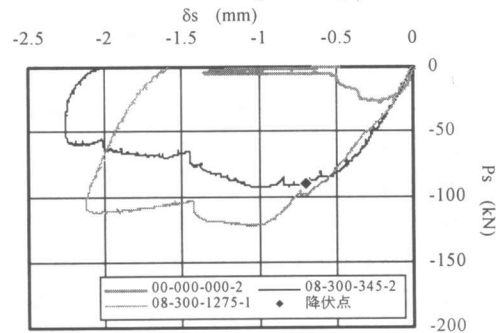


図-14 降伏応力度 σ_y の比較 ($G_L = 300\text{mm}$)

い効果の減少により鉄筋の降伏前にせん断伝達力が最大となるからである。

6. 降伏応力度 σ_y の比較

図-13、図-14に降伏応力度が異なる試験体(鉄筋比 $p = 0.8\%$)の δ_s - P_s 関係包絡線を示す。図-13はひずみゲージ長 $G_L = 37.5\text{mm}$ 、図-14は $G_L = 300\text{mm}$ の試験体について比較している。

図より、降伏応力度 σ_y が高くなるほどせん断耐力は高くなるが、初期せん断剛性は同様の傾向となるのが分かる。ひずみゲージ長ごとに比較すると、 $G_L = 37.5\text{mm}$ の試験体は、08-375-345-2が鉄筋降伏後に急激にせん断剛性が低下するのに対し、08-375-1275-1は $P_s = -180\text{kN}$ 時に最大耐力に達した様子は無く降伏応力度による差が顕著に見られるが、 $G_L = 300\text{mm}$ の試験体では、08-300-1275-1のほうがせん断耐力が若干大きく、最大耐力後の耐力低下が小さくなるものの、 $G_L = 37.5\text{mm}$ の試験体ほど顕著な差は見られない。これは、ひずみゲージ長 G_L の比較の際と同様、ひび割れ幅の増大により骨材のかみ合い効果の減少し、鉄筋の降伏前にせん断伝達力が最大となるからである。

7. まとめ

- 鉄筋比 p が2倍になるとせん断耐力は約1.5倍になる。
- 鉄筋比 $p = 0.4\%$ と 0.8% の試験体は、最大耐力到達後、せん断耐力が大きく低下し ($\delta_s = 2.0\text{mm}$ 時に最大耐力の約70%) 靱性能に大きな差は見られないが、 $p = 1.6\%$ の試験体ではせん断耐力低下が小さく ($\delta_s = 2.0\text{mm}$ 時に最大耐力の約90%) 靱性能が高い。
- ひび割れ幅 δ_v が 1mm に近くなると、骨材のかみ合い効果が減少するため、鉄筋の降伏前にせん断伝達力が最大となる。

参考文献

- T. Paulay and P.J. Loeber: ACI, 1974, pp.1-15
- Walraven, J and Keuser, W.: Darmstadt Concrete 2, 1987, pp.221-234
- 篠原 保二他: 日本建築学会構造系論文集, 第525号, 1999.11, pp.1-6
- 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説, 1999