

[87] はりのせん断終局強度付近における斜めひび割れを横切る 高強度せん断補強筋のせん断伝達力

正会員○福原正志(東京工業大学工学部)
正会員 黒正清治(東京工業大学工業材料研究所)

1 序

本研究は、0.2% Offset 耐力(以下単に降伏強度という)が約1.3 tonf/cm²と、高い強度を有する鉄筋をせん断補強筋として用いたとき、その降伏強度の有効な活用範囲を究明することを目的とした一連の実験研究である。

本報では既に行った実験結果¹⁾を参考にせん断終局強度付近を想定した、あらかじめ斜めひび割れを入れた解析モデルを作成し、この静定構造物に近づけたモデルのFEM弾性解析結果より力の釣り合い条件から斜めひび割れ部分の力の流れを把握し、主にこの斜めひび割れ部分のせん断補強筋のせん断分担力について考察した。

2 解析の対象とした試験体と解析モデル

2・1 試験体・実験結果と解析モデル: 表1に本研究の解析の対象とした試験体(a/D=1.5)の諸元と実験結果を、また図1に詳細図の1例を示す。図2はこれ等試験体のせん断終局強度、Q_u時の平均せん断応力度、s^T_u(=Q_u/b_j)と、せん断補強筋比ρ_wとの関係を示したものであるが、この図に示すように高強度せん断補強筋は普通強度と較べ優れた補強効果を発揮していた。図3は、実験中に撮影した写真を参考に作成した解析モデルを、また図4は、Q_uと各要素のせん断伝達力との関係を示したものである。この解析モデルは全試験体共通であり、斜めひび割れ部分のせん断補強筋、斜めひび割れを水平に横切る主筋ならびに圧縮側コンクリートの3種類のせん断抵抗要素を有するせん断力伝達面A、B、Cが逆対称に入っている。なおせん断破壊時の状況を示す実験結果の1例を写真1に示す。

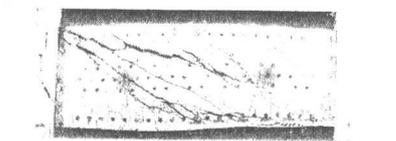


写真1. 終局強度付近のひび割れ (No.6)

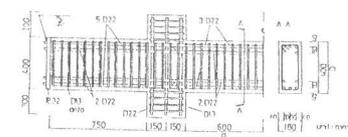


図1. 試験体詳細図(例)

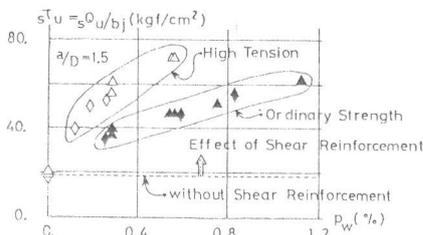


図2. s^T_u と ρ_w との関係

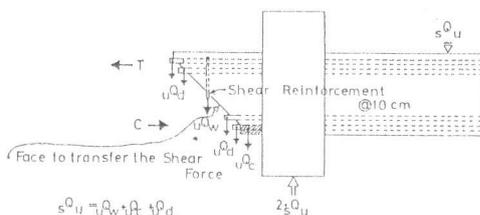


図4. Q_u とせん断抵抗要素

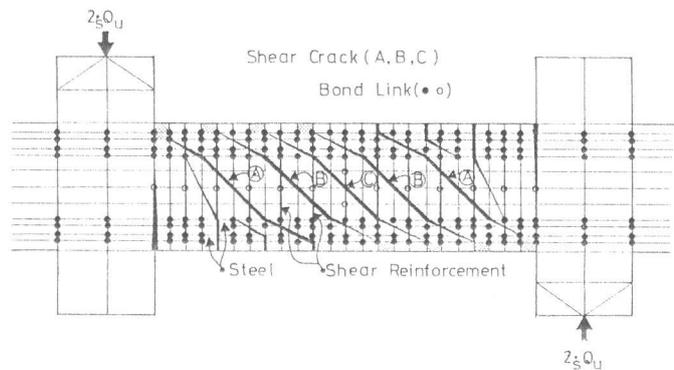


図3. 解析モデルとせん断力伝達面

表1. 試験体・実験結果・材料の定数・解析結果

No.	Symbol	Specimens		Test, R _u Q _u	Constant			Analytical Results													
		(1) P _u	(2) P _y		R _u /R _y	R _u Q _u	R _y Q _y	R _u /R _y	A Face (A)		B Face (B)		C Face (C)								
		c ⁰ = 199 kgf/cm ²		E(1/4) = 2.24 × 10 ⁶ kgf/cm ²		s ⁰ _y = 8308 kgf/cm ²															
Series No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
Symbol	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	
P _u	0.28	0.28	0.28	0.28	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.75	0.75	0.12	0.19	0.26	0.37	0.26	0.59	0.83	0.26	0.59	
P _y	2550	2550	13490	13490	2550	2550	13490	13490	2600	2600	2600	13800	12630	12870	13800	2930	2790	2630	2930	2790	
R _u /R _y	7.1	7.1	37.8	37.8	14.3	14.3	75.5	75.5	19.5	19.5	19.5	15.6	20.8	33.5	51.1	7.6	16.7	21.8	7.6	16.7	
Q _u	21.4	19.3	30.0	33.4	25.0	25.0	38.0	37.8	27.5	27.5	27.5	32.0	20.8	28.0	21.8	18.5	25.0	29.5	18.5	25.0	
R _u /Q _u	3.0	3.0	2.2	2.2	2.6	2.6	1.9	1.9	2.4	2.4	2.4	2.1	2.9	2.4	2.1	3.2	2.6	2.3	2.4	2.6	2.6
R _y /Q _y	1.2	1.2	1.0	1.0	1.1	1.1	0.9	0.9	1.3	1.3	1.3	1.1	1.2	1.2	1.1	1.5	1.3	1.2	1.2	1.3	1.3
R _u /R _y	37.5	37.5	39.8	39.8	49.3	49.3	50.4	50.4	53.8	53.8	53.8	24.1	24.1	37.0	42.9	35.2	48.4	53.4	35.2	48.4	48.4
R _y /Q _y	19.5	19.5	17.8	17.8	18.5	18.5	17.1	17.1	17.7	17.7	17.7	21.5	20.0	19.8	19.2	21.3	19.8	19.2	21.3	19.8	19.8
R _u /Q _u	43.0	43.0	42.3	42.3	32.1	32.1	32.6	32.6	32.6	32.6	32.6	54.4	47.3	43.3	43.3	43.6	43.6	43.6	43.6	43.6	43.6
R _y /Q _y	64.1	64.1	67.9	67.9	80.1	80.1	78.7	78.7	87.6	87.6	87.6	21.7	23.7	23.7	23.7	15.8	15.8	15.8	15.8	15.8	15.8
R _u /R _y	69.2	69.2	73.3	73.3	85.1	85.1	89.6	89.6	90.5	90.5	90.5	36.7	36.7	36.7	36.7	23.7	23.7	23.7	23.7	23.7	23.7
R _y /Q _y	20.5	20.5	18.2	18.2	12.3	12.3	11.1	11.1	9.1	9.1	9.1	18.1	11.3	8.1	8.1	9.5	9.5	9.5	9.5	9.5	9.5
R _u /Q _u	10.4	10.4	8.5	8.5	2.6	2.6	1.3	1.3	0.6	0.6	0.6	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1
R _y /Q _y	23.2	23.2	21.8	21.8	12.3	12.3	11.1	11.1	9.1	9.1	9.1	36.7	36.7	36.7	36.7	23.7	23.7	23.7	23.7	23.7	23.7
R _u /R _y	69.2	69.2	73.3	73.3	85.1	85.1	89.6	89.6	90.5	90.5	90.5	36.7	36.7	36.7	36.7	23.7	23.7	23.7	23.7	23.7	23.7
R _y /Q _y	20.5	20.5	18.2	18.2	12.3	12.3	11.1	11.1	9.1	9.1	9.1	18.1	11.3	8.1	8.1	9.5	9.5	9.5	9.5	9.5	9.5

(1): Shear Reinforcement Ratio (%) (2): Yield Stress or 0.2% Offset Stress (kgf/cm²)
 (3): Ultimate Shear Strength (tonf) (4): Stiffness of Bond Link's Spring (tonf/cm)
 (5): Elastic Stiffness of Concrete Element (× 10³ kgf/cm²)
 (6) See Fig.3 where, R_u = Q_u/(-1.tonf) × 100 (%), Q_u = Q_u/Q(-1.tonf) × 100 (%), Q_y = Q_y/Q(-1.tonf) × 100 (%), Q_y = Q_y/Q(-1.tonf) × 100 (%). See Fig.4
 R_u = Q_u/Q(-1.tonf) × 100 (%), Q_y = Q_y/Q(-1.tonf) × 100 (%). See Fig.4 * : Average Value of two Specimens

2・2 材料の定数：せん断破壊時の斜めひび割れ部分の補強筋の挙動をできるだけ正確に把握するためには、解析結果の部材剛性 ${}_aK_m$ ができるだけ実験結果の終局強度付近の部材剛性 cKm^1 に近づくことが望ましいと考えた。そこでこのような状況を再現する手段として部材の変形やせん断力伝達機構に影響を及ぼすと考えられるボンドリンクのバネ剛性 K_b (font/cm) ならびにコンクリートの剛性 K_c (Kg/cm^2) を以下で示す方法で適宜仮定した。まず藤井³⁾、野口⁴⁾、黒正⁵⁾等の研究を参考に K_b を表1に示すように仮定し、次にこの K_b を用いてコンクリートの剛性のみをパラメーターにした予備解析を行い、この結果を参考に解析結果の部材剛性 ${}_aK_m$ が実験結果の部材剛性 ${}_aK_m$ に近くなるよう K_c を表1のように仮定した。これ等の仮定を用いて解析した解析値の部材剛性 ${}_aK_m$ 実験結果 $Q \sim \delta$ との関係の1例を図5に示す。なお鉛直方向のボンドリンクの剛性が圧縮力を受ける場合には、主筋がコンクリートにめり込まないよう $K_b = 100 \text{ font/cm}$ と大きな値を用いた。

3. 解析結果の検討

3・1 せん断伝達力の算出方法：せん断伝達面における ${}_aQ_u$ 時のせん断伝達力 ${}_aQ_w, {}_aQ_c, {}_aQ_d$ (図4参照)の算出方法を以下に示す。まず解析モデル(図3参照)の試験部に単位のせん断力 $Q (= 1 \text{ tonf})$ を作用させFEM弾性解析を行う。次にこの解析結果よりせん断力伝達面の力の釣り合いから、せん断補強筋に作用する応力の和 Q_w 、せん断力伝達面に接するコンクリート要素の節点に作用する等価節点力の和 Q_c 、ならびにせん断力伝達面に接する主筋要素の節点に作用する等価節点力の和 Q_d をそれぞれ求める。なお Q と Q_w, Q_c, Q_d との関係は、 $Q = Q_w + Q_c + Q_d$ である。次にこれ等 Q_w, Q_c, Q_d と Q との比 $R_w = Q_w/Q \times 100, R_c = Q_c/Q \times 100, R_d = Q_d/Q \times 100$ をそれぞれ求め、最後にこのせん断力伝達率 $R_{w,c,d}$ (%) と ${}_aQ_u$ の積として、 ${}_aQ_u$ 時の各要素のせん断伝達力 ${}_aQ_w (= R_w \cdot {}_aQ_u), {}_aQ_c (= R_c \cdot {}_aQ_u), {}_aQ_d (= R_d \cdot {}_aQ_u)$ を算出した。なお普通強度せん断補強筋を用いた試験体のせん断力伝達面 B・C で、 $R_w \cdot {}_aQ_u$ の値がひび割れ部分の伝達し得るせん断伝達力のほぼ上限値 $\Sigma a_w \cdot \sigma_y$ (以下限界せん断伝達力という)を超たが、その場合は、 ${}_aQ$ ($= R_w \cdot {}_aQ_u - \Sigma a_w \cdot \sigma_y$) は、コンクリートと主筋要素の伝達力にそれぞれ伝達率 R_c, R_d に応じ比例配分した。

3・2 解析方法の検討：図6は高強度せん断補強筋を用いた試験体 No. 8 の ${}_aQ_u$ 時の材軸位置におけるせん断補強筋の歪に関する解析結果と、W・S・Gを用いて測定した実験結果とを示したものである。この図に示すように、 ${}_aQ_u$ 時のせん断補強筋の解析結果は実現象を良く追跡し、本報で試みた研究手法がはりの ${}_aQ_u$ 付近のせん断補強筋の挙動を解明する上で有効な手段の一つであることが確認できた。

3・3 斜めひび割れ位置とせん断力伝達機構：解析モデルにおけるせん断力伝達面 A, B, C のせん断抵抗要素のせん断伝達率 R_w, R_c, R_d を表1に、また図7にこの R_w とせん断補強筋比 ρ_w との関係を示す。図8は、せん断力伝達面 A, B, C の各せん断抵抗要素のせん断伝達力 ${}_aQ_w, {}_aQ_c, {}_aQ_d$ の負担の状況を試験体 No. 6, No. 8 について図示したものである。これ等の図が示すようにせん断伝達力は斜めひび割れの位置に大きく左右される。すなわちモーメントの大きな試験部端部に近いA面よりモーメントの小さい支曲点近くの試験部中央部よりのB, C面の方が補強筋の負担するせん断の割合い

* 1 : ${}_aK_m$ とは、実験結果の $Q \sim \delta$ 曲線上で原点と ${}_aQ_u$ とを結ぶ割線剛性をいう。

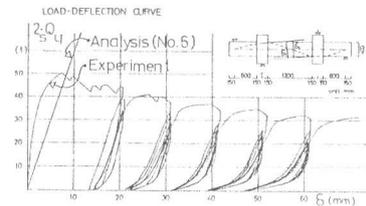


図.5 部材の剛性

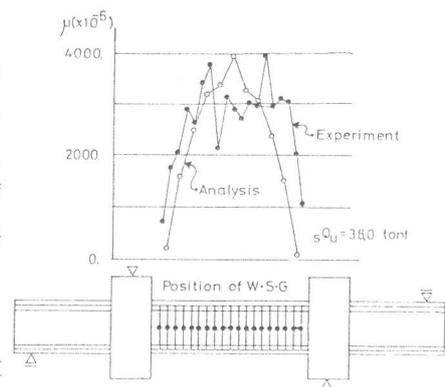


図.6 せん断補強筋の歪分布 (No.8)

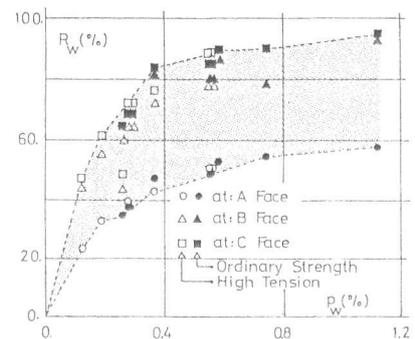


図.7 R_w と ρ_w との関係

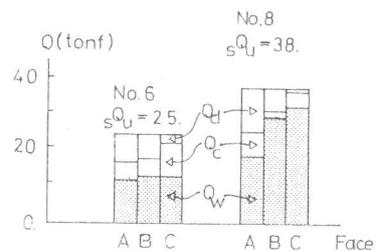


図.8 せん断力伝達面のせん断伝達力

が多くなり、せん断補強筋がほとんどのせん断力を負担するいわゆる全補強に近い状態になる。このような挙動は実験結果からも観察される。図9(1)、(2)は試験体No.6～No.9の4つの試験体の実験結果で、せん断力と補強筋の歪との関係を示したものであるが、いずれの試験体も解析結果と同様、 Q_u 時における補強筋の歪性は、反曲点に近い方の補強筋の方が、大きな値を示していた。

3・4 補強筋のせん断伝達力 $u\tau_w$ に及ぼす $p_w \cdot \sigma_y$ の影響： 図10は $u\tau_w$ と p_w との関係を示したものである。この図で同じ p_w で高強度せん断補強筋の $u\tau_w$ (H) と普通強度の $u\tau_w$ (N) とを比較すると、 $u\tau_w$ (H) の方が大きく、補強筋の降伏強度がせん断伝達力に大きな影響を及ぼすことがわかる。そこでこの影響量をせん断伝達力面Cにおける $u\tau_w$ (H) と $u\tau_w$ (N) との比で比較してみると、 $p_w = 0.26$ 多では、 $u\tau_w$ (H) / $u\tau_w$ (N) は3.6であり $p_w = 0.56$ 多では2.6となり降伏強度が $u\tau_w$ に大きな影響を及ぼすことがわかるが、しかしその影響量は必ずしも $w\sigma_y$ の比 $w\sigma_y$ (H) / $w\sigma_y$ (N) (=5.1) 程は、大きくない。このような傾向は実験結果からも定性的に説明できる。すなわち図9(2)にみられるように p_w が等しい試験体で、 Q_u 付近では、高強度せん断補強筋を用いた試験体の補強筋の歪は普通強度を用いた試験体の歪よりはるかに大きく、これがせん断破壊をおくらせ、 Q_u を大きくした原因であることがこの図より理解できるが、しかし補強筋の降伏歪 ϵ_y に着目した場合、普通強度の補強筋は、 Q_u に達する以前に既に降伏歪に達し、補強筋の持つ補強能力を最大限に発揮した後せん断破壊しているのに対し、高強度の場合、歪そのものは普通強度のものより大きい、それでも高強度鉄筋の持つ降伏歪 ϵ_y に達するはるか以前で部材が破壊している。このような挙動をしたため補強筋の補強効果が必ずしも $w\sigma_y$ の比 $w\sigma_y$ (H) / $w\sigma_y$ (N) に達しなかったものと考えられる。

3・5 $u\tau_w$ と $p_w \cdot w\sigma_y$ との関係： 図11は $u\tau_w$ と $p_w \cdot w\sigma_y$ との関係を示したものであるが、この図で $u\tau_w$ は、 $p_w \cdot w\sigma_y$ が大きくなるに従って大きくなり、同じ $p_w \cdot w\sigma_y$ で普通強度の $u\tau_w$ (N) と高強度の $u\tau_w$ (H) とを比較した場合、 $u\tau_w$ (N) が $u\tau_w$ (H) より大きい。図12(a), (b), (c)は $p_w \cdot w\sigma_y$ がほぼ等しく $w\sigma_y$ の異なる試験体No.13とNo.18のそれぞれ Q_w, Q_c, Q_d と Q との関係を示したものである。図12(a)で、 Q_u 時の Q_u に着目した場合、普通強度を用いたNo.18は既に限界せん断伝達力 $\Sigma a_w \cdot w\sigma_y$ に達し高強度を用いたNo.13より大きい値を示していた。これは、 $p_w \cdot w\sigma_y$ がほぼ同じでも、普通強度を用いたNo.18は、高強度のNo.13に較べ補強筋の断面積 a_w が5倍近くあるので補強筋の軸方向剛性が大きく、その分補強筋のせん断伝達率 R_w が大きくなり、その結果として Q_w (N) の方が Q_w (H) より大きくなったものである。しかし終局強度付近では前述したように普通強度の Q_w (N) は、既に $\Sigma a_w \cdot w\sigma_y$ に達してしまうので図11における $u\tau_w$ (N) / $u\tau_w$ (H) は R_w (N) / R_w (H) の比程大きくなり、また図12(b), (c)にみられるように R_c (H) / R_c (N), R_d (H) / R_d (N) の比程大きくなり、 Q_c (H) / Q_c (N), Q_d (H) / Q_d (N) が大きくなり、 Q_w (N) が頭打ちになり、 Q_c (N), Q_d (N) の負担が増大するからである。

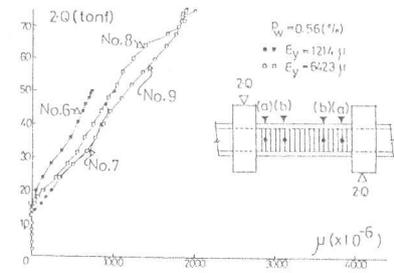


図. 9 (1) 位置(a)の補強筋の歪

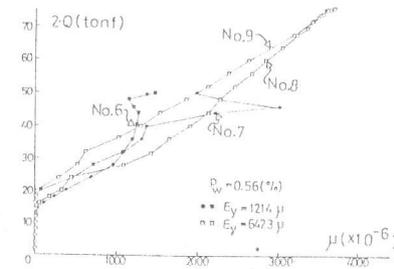


図. 9 (2) 位置(b)の補強筋の歪

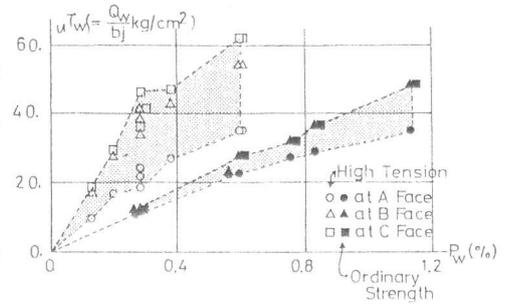


図. 10 $u\tau_w$ と p_w との関係

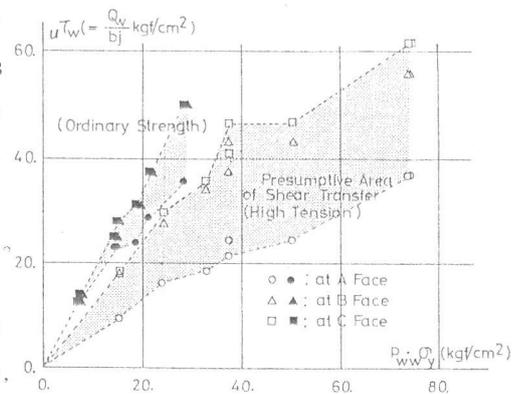


図. 11 $u\tau_w$ と $p_w \cdot \sigma_y$ との関係

3・6 高強度せん断補強筋の効果率 ϕ ： 図13は高強度せん断補強筋を用いた試験体のせん断力伝達面B,C面におけるせん断伝達力の解析値 uQ_w と限界せん断伝達力 $\Sigma a_w \cdot w \cdot \sigma_y$ との比 $uQ_w / \Sigma a_w \cdot w \cdot \sigma_y$ (有効補強効果率 ϕ)と $p_w \cdot w \cdot \sigma_y / F_c$ との関係を示したものである。この図に示すように ϕ は、 $p_w \cdot w \cdot \sigma_y / F_c$ が増すに従って減少する傾向を示し、 ϕ と $p_w \cdot w \cdot \sigma_y / F_c$ との回帰式として次式を得た。 $0 < p_w \cdot w \cdot \sigma_y < 0.27$ $\phi = -p_w \cdot w \cdot \sigma_y / F_c + 0.76$

3・7 せん断終局強度に及ぼすせん断補強筋の補強効果に関する実験結果の評価： $\sigma_{\tau w}$ に及ぼすせん断補強筋の補強効果に関する実験値 $\sigma_{\tau w}$ を、ここでは大野・荒川原式等で評価されていると同様の方法($\sigma_{\tau w} = \sigma_{\tau u} + \sigma_{\tau u}(p_w - 0)$)で評価し、実験結果の整理を行い図11にさらにプロットしたのが図14である。この図にみられるように実験値 $\sigma_{\tau w}$ は、 $p_w \cdot w \cdot \sigma_y$ の小さいところでは一部解析結果の範囲(破線部分)をはみ出しているものがあるものの、おおむねその範囲内にあり、しかもその上限付近、すなわち補強筋のせん断力伝達率 R_w が大きかったB,C面における解析値に近い値を示した。また今回の実験範囲で実験値 $\sigma_{\tau w}$ と $p_w \cdot w \cdot \sigma_y$ との関係を示す回帰式として次式を得た。

高強度せん断補強筋の場合、 $a/D = 1.5$ $0 < p_w \cdot w \cdot \sigma_y \leq 75.5$ Kgf/cm^2

$$\sigma_{\tau w}(H) = 6.1 (p_w \cdot w \cdot \sigma_y)^{0.5} \quad Kgf/cm^2$$

普通強度せん断補強筋の場合、 $a/D = 1.5$ $0 < p_w \cdot w \cdot \sigma_y < 29.4$ Kgf/cm^2

$$\sigma_{\tau w}(N) = 7.2 (p_w \cdot w \cdot \sigma_y)^{0.5} \quad Kgf/cm^2$$

4 結論

せん断終局強度付近を想定した、あらかじめ多数のひび割れを有する解析モデルを実験結果を参考に作成し、この解析モデルを用いてFEM弾性解析を行いその結果を検討した結果、本研究の主な目的である斜めひび割れ部分のせん断補強筋のせん断終局強度に及ぼす補強効果に関する定量な評価をするための基礎資料を得ることができた。

参考文献

- Scordelis: Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Beams (A. C. I. Journal, 1967)
- 福原・黒正: 鉄筋コンクリート部材における高強度せん断補強筋の補強効果に関する実験研究(はりの曲げせん断実験)(建築学会論文報告集320号)
- 藤井・森田: 割裂付着破壊時の局所付着応力—すべり曲線(建築学会大会・昭和55年)
- 野口・丸田: 鉄筋コンクリートばりのせん断抵抗機構の非線形有限要素方法解析(コンクリート学・コロキウム・昭和57年)
- 黒正・瀧口・長嶋: 異形鉄筋コンクリートの付着に関する基礎的研究(建築学会大会・昭和48年)
- 荒川卓: 鉄筋コンクリートばりのせん断抵抗に関する基礎的研究(北大研究報告25号)

謝辞: 本研究の解析の対象とした試験体の製作にあたっては、高周波熱練株式会社、水馬克久氏に多大な協力をいただき厚く御礼申し上げます。また本研究を行うにあたって、東京工業大学・助教授・和田章博士に的確な助言と協力をいただき深く感謝の意を表します。

(付記): 本研究における数値計算は、東京工業大学総合情報処理センターのHITAC-M-200H型電子計算機を利用しました。

+2: $\sigma_{\tau u}(p_w=0)$ とは、無補強試験体のせん断終局時の平均せん断応力度である。

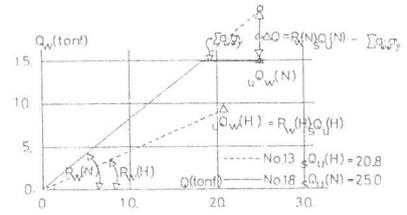


図. 12 (a) Q_w と Q との関係

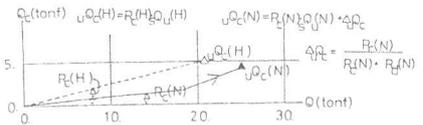


図. 12 (b) Q_c と Q との関係

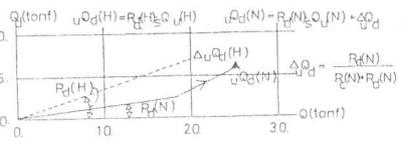


図. 12 (c) Q_d と Q との関係

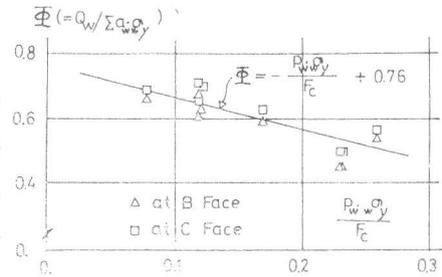


図. 13 有効補強効果率(ϕ)と補強筋パラメーターとの関係

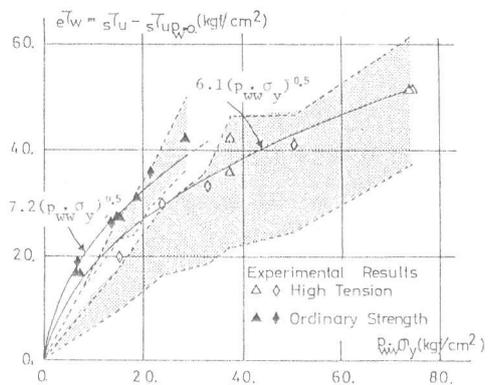


図. 14 実験値 $\sigma_{\tau w}$ と $p_w \cdot w \cdot \sigma_y$ との関係