

[2060] 鋼材のダボ効果に関する研究

正会員 ○篠田佳男（前田建設工業技術研究所）

正会員 山田一字（前田建設工業技術研究所）

1. まえがき

RC部材においてひびわれ面に作用するせん断力は、骨材のインターロックと鉄筋の拘束に基づいた摩擦理論で精度良く評価されると既往に報告^{1,2)}されている。しかし、地下連続壁鉛直継手に代表されるように、せん断面が凹凸のない構造形式では、骨材のインターロックの寄与が期待できず、鋼材のダボ効果のみで、せん断力が伝達されなければならない。鋼材のダボ効果は、既往に研究^{3,4)}されているものの、耐力が精度良く評価されるまでには至っていない。そのため、地下連続壁を土木構造物本体に使用する場合、せん断力の取り扱いが設計法を確立する上で重要な課題となっている。

本研究は、この鉛直継手に関する合理的な設計法の確立、および実用化を目的として実施したものである。なお、本報告は、せん断面を貫通する鉄筋に加え、平滑な鋼板のせん断伝達機構および耐力評価を実験結果に基づいて検討したものである。

2. 実験概要

実験に用いた試験体は、図-1に示すように、せん断面が $80 \times 74\text{cm}$ 、せん断面と垂直方向に2.7mの長さを有するPush-off試験体である。実験は、表-1および図-2に示すように、以下に示す継手の構造形式に分けて行った。

①主筋構造

主筋構造は、せん断面を貫通する主筋のみでせん断力を伝達するものである。実験は、鉄筋径（D32, 25）および鉄筋比（0.51~1.88%）をパラメータとして、7体実施した。

②シア筋構造

シア筋構造は、せん断補強筋としてせん断面を貫通するシア筋を有するものである。実験は、シア筋の長さ

（15, 25, 40cm）、シア筋量（2-D32, 4-D32, 6-D32）、主筋径（D16, D25, D32）、および主筋比（0.20, 0.51, 0.80%）として、7体実施した。

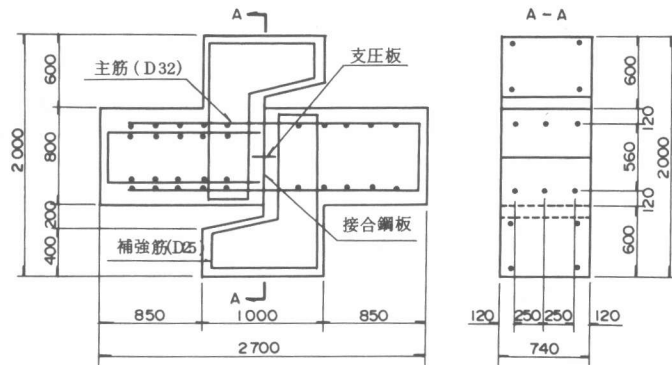


図-1 セン断実験用試験体



図-2 継手の構造

③ 支圧板構造

支圧板構造は、せん断補強としてせん断面を貫通する平滑な鋼板（支圧板）を設けたもので、主筋と支圧板が複合してせん断力を伝達するものである。実験は、支圧板の厚さ（3.2, 4.5, 9 mm）をパラメータとして、4体実施した。

実験に使用した鋼材は、表-2, 3に示す機械的性質を有するものである。また、コンクリートは、呼び強度 225kg/cm²のレデーミクストコンクリートを使用した。

主筋のびずみは、図-3に示す位置で測定した。なお、ひずみ分布を詳細に調査することを目的としたNo.17とNo.21試験体は、鉄筋を溝切加工し、軸ひずみと曲げひずみを測定した。また、支圧板を有するNo.21試験体は、図-4に示すように、支圧板と支圧板近傍のコンクリートのびずみを合わせて測定した。

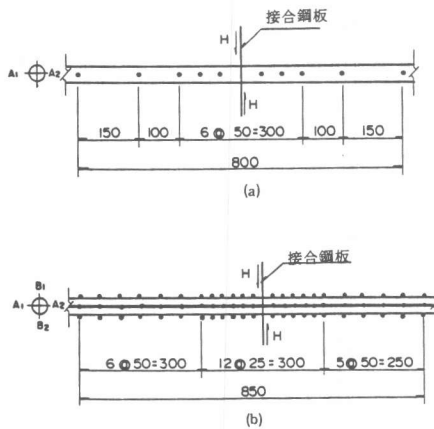


図 図-3 主筋のひずみ測定位置

表-1 試験体一覧表

試 験 体 配 筋					コンクリート 圧 縮 強 度 σ_{cu} (kg/cm ²)	実 験 結 果	
No.	実験シリーズ	試験体名称	As=As'	鉄筋補強		鉄筋降伏荷 重 Py(ton)	最大荷重 Pu(ton)
1	主 筋 構 造	SN80	3-D32	—	265	—	340.5
2		SRJ51	3-D25	—	229	50.1	187.2
3		SRJ80	3-D32	—	203	75.3	152.2
4		SRJ86	5-D25	—	229	70.0	235.3
5		SRJ107	4-D32	—	203	99.8	201.4
6		SRJ120	7-D25	—	229	120.1	288.6
7		SRJ134	5-D32	—	267	120.2	284.8
8		SRJ188	7-D32	—	203	170.9	277.2
9	シ ア 筋 構 造	SRJ80S4-15	3-D32	4-D32	200	116.6	200.3
10		SRJ80S4-25	3-D32	4-D32	200	118.7	220.1
11		SRJ80S4-40	3-D32	4-D32	200	120.1	219.6
12		SRJ80S2	3-D32	2-D32	228	100.6	200.2
13		SRJ80S6	3-D32	6-D32	228	150.0	243.3
14		SRJ20S4	3-D16	4-D32	203	70.0	103.2
15		SRJ51S4	3-D25	4-D32	203	95.1	206.4
16		SRJ80S4-CY	3-D32	4-D32	210	123.0	254.2
17	支 圧 板 構 造	SRJ80S4	3-D32	4-D32	234	130.0	280.1
18		SRJ80P3.2P	3-D32	PL-3.2	282	110.1	281.7
19		SRJ80P4.5P	3-D32	PL-4.5	313	121.5	289.3
20		SRJ80P6P	3-D32	PL-6	282	139.8	278.5
21		SRJ80P9P	3-D32	PL-9	234	155.5	259.4

表-2 鉄筋の機械的性質

使用鉄筋	降伏強度 σ_{sy} (kg/cm ²)	引張強度 σ_{su} (kg/cm ²)	弾性係数 E_s ($\times 10^4$ kg/cm ²)
D16	3491	5040	1.81
D25	3762	5779	1.88
D32	3710	5632	1.83

表-3 鋼板の機械的性質

種別	降伏強度 σ_{sy} (kg/cm ²)	引張強度 σ_{su} (kg/cm ²)	弾性係数 E_s ($\times 10^4$ kg/cm ²)
FL-3.2	2540	4112	2.10
FL-4.5	3230	4176	2.12
FL-6	3317	4633	2.13
FL-9	3093	4723	2.17

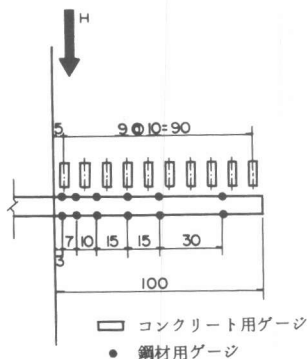


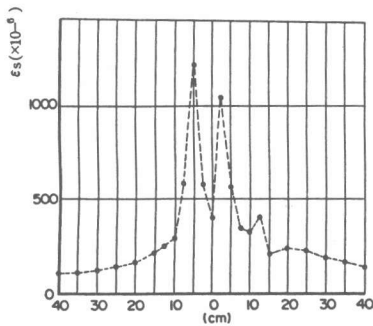
図-4 支圧板および周辺の測定位置

3. 実験結果及び検討

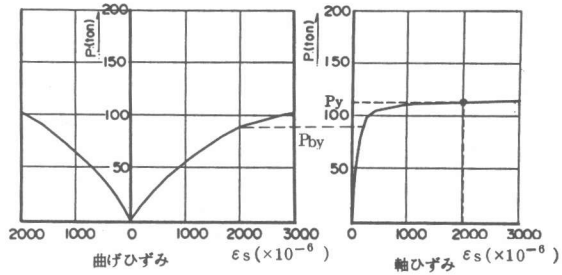
(1) 鉄筋のひずみ

図-5は、シア筋構造SRJ80S4と支圧板構造SRJ80P9Pの軸ひずみ分布を示したものである。ひずみ分布は、せん断面から2.5cmあるいは5cmの位置で最大値を示し、その位置前後で急激な減少を生じる逆W型となっている。これは、作用せん断力に対する主筋の寄与がせん断面よりむしろ若干離れた位置で最大値となることを示唆している。図-6は、最大を示した位置での曲げひずみと軸ひずみを示したものである。曲げひずみは、引張測が圧縮側を若干上回りながら、せん断力の増加とともにその値を増し、降伏ひずみ（せん断曲げ降伏耐力 P_{by} ）に達することを示している。これに対して、軸ひずみは、せん断曲げ降伏耐力に達するまで、作用せん断力とほぼ線形な関係を示しているが、これ以後値を大きくし、降伏ひずみ（せん断降伏耐力 P_y ）に至っている。

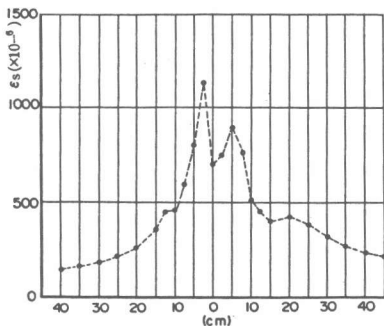
これらは、鉄筋断面内の応力状態が図-7に示すように推移するものと考えられる。ここで、(a)は鉄筋が弾性状態、(b)は塑性領域が進行している状態、そして、(c)はせん断降伏耐力状態を示している。このため、鉄筋は、せん断降伏耐力時には(d)に示す全塑性に近似され、曲げに抵抗しているものと考えられる。



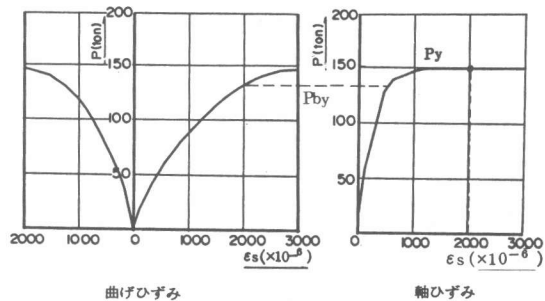
(a) SRJ80S4



(a) SRJ80S4



(b) SRJ80P9P



(b) SRJ80P9P

図-5 主筋のひずみ分布（溝切加工鉄筋）

図-6 $p \sim \epsilon_s$ 曲線（溝切加工鉄筋）

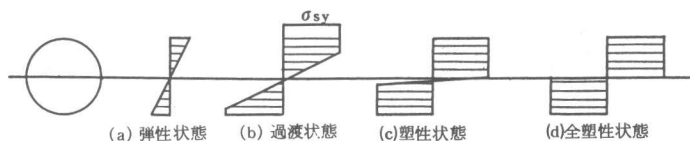


図-7 鉄筋断面内の応力状態

(2) 支圧板のひずみ

図-8は、支圧板のひずみ分布を示したものである。支圧板のひずみ分布は、主筋と同様に、せん断面から若干離れた位置で最大となることを示している。また、作用せん断力と支圧板のひずみの関係は、図-9に示すように、引張と圧縮のひずみがほぼ同様に値を大きくし、せん断降伏耐力時には降伏値を上回っていることを示している。

これらは、支圧板断面内での応力状態も鉄筋と同様に、作用せん断力の増大とともに塑性領域が内部に進行し、せん断降伏耐力時には全塑性状態に近似されることを示している。

(3) コンクリートのひずみ

図-10は、支圧板近傍におけるコンクリートのひずみを示したものである。せん断降伏耐力時でのコンクリートのひずみは、支圧板が最大ひずみを示した位置を越える2.5cmでも、 4000×10^{-6} を上回る大ひずみを示している。これは、図-11に示すように、せん断面での相対すべりが生じる際に、支圧板のせん断面近くでコンクリートが圧砕されていることを示している。コンクリートのこの圧砕は、支圧板近傍の局部的な箇所だけで起っており、この位置を離れた箇所でのコンクリートは健全な状態であると考えられる。そのため、この部分のコンクリートは、局部的な荷重を受ける支圧状態となり、図-12に示すような支圧強度 $m\sigma_{cu}$ を考慮した応力状態として、鋼材に作用していると考えられる。

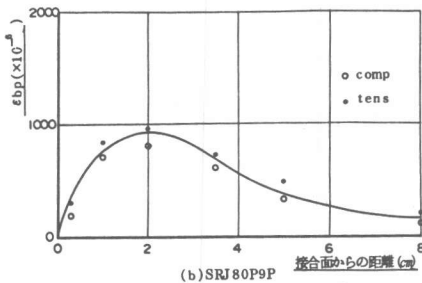


図-8 点溶接支圧板のひずみ分布

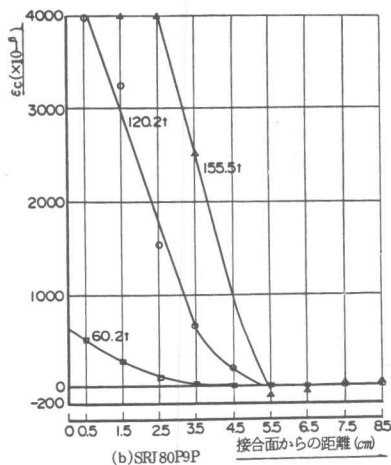


図-10 支圧板の変形および周囲の圧砕状況

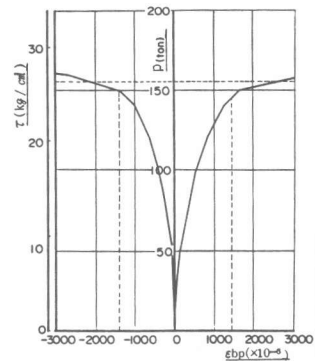


図-9 $p \sim \varepsilon_{bp}$ 曲線 (SRJS0P9P, 支圧板のひずみ)

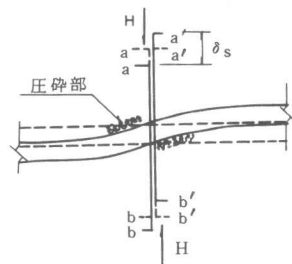


図-11 支圧板近傍のコンクリートのひずみ分布

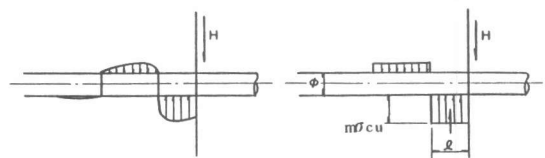


図-12 鋼材への作用荷重状態

4. 耐力評価

(1) 鋼材の抵抗機構

せん断面を貫通する鋼材は、曲げに対して支配的に抵抗することが認められた。そこで、鉄筋と支圧板の抵抗モーメントを求めると、(1)、(2)式となる。

(鉄筋)

$$M_{rs} = 2 \int_0^{\phi/2} \sigma_{sy} \cdot y dA = \phi^3 \cdot \sigma_{sy} / 6 \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 M_{rs} ：鉄筋の抵抗モーメント (kg・cm)

ϕ ：鉄筋径 (cm)

σ_{sy} ：鉄筋の降伏強度 (kg/cm²)

(支圧板)

$$M_{rb} = 2 \int_0^{t/2} \sigma_{by} \cdot y dA = A_b \cdot t \cdot \sigma_{by} / 4 \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 M_{rb} ：支圧板の抵抗モーメント (kg・cm)

t ：支圧板の厚さ (cm)

σ_{by} ：支圧板の降伏強度 (kg/cm²)

A_b ：支圧板の断面積 (cm²)

(2) 鋼材に作用する断面力

鋼材は、断面力として曲げモーメントの作用を受ける。そこで、鉄筋と支圧板の作用モーメントを求めると(3)、(6)式となり、その最大値は(4)、(7)式で、また作用位置は(5)、(6)式で表される。

(鉄筋)

$$M_{ss} = -A_o (x - 2H/A_o)^2 / 4 + H^2 / A_o \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 M_{ss} ：鉄筋の作用モーメント (kg・cm)

$A_o := m \cdot \sigma_{cu} \cdot \pi \cdot \phi$

x ：せん断面からの距離 (cm, $x \leq \ell$)

H ：作用せん断力 (kg)

$$M_{ssmax} = H^2 / (m \cdot \sigma_{cu} \cdot \pi \cdot \phi) \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$x_s = 2 \cdot H / (m \cdot \sigma_{cu} \cdot \pi \cdot \phi) \quad \dots\dots\dots (5)$$

(支圧板)

$$M_{sb} = -B_o (x - H/B_o)^2 / 2 + H^2 / 2 B_o \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 M_{sb} ：支圧板の作用モーメント (kg・cm)

$B_o := m \cdot \sigma_{cu} \cdot b_b$

b_b ：支圧板の長さ (cm)

$$M_{sbmax} = H^2 / (2 m \cdot \sigma_{cu} \cdot b) \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$x_b = H / (m \cdot \sigma_{cu} \cdot b) \quad \dots\dots\dots (8)$$

(3) 耐力算定

せん断降伏耐力時に鉄筋一本で伝達されるせん断力は H_{sy} は、(1)式と(4)式から(9)式で与えられる。

$$H^2_{sy} / (m \cdot \sigma_{cu} \cdot \pi \cdot \phi) = \phi^3 \sigma_{sy} / 6 \quad \dots\dots\dots (9)$$

平均せん断応力 τ_{sy} ($= H_{sy} / b H$) は、(9)式の関係から(10)式で与えられる。

$$\tau_{sy} / \sqrt{\sigma_{cu}} = \alpha \cdot p_s \sqrt{\sigma_{sy}} \quad \dots\dots\dots (10)$$

ここで、 α ：定数

p_s ：鉄筋比 ($= A_s / b H$)

図-13は、(10)式の関係をもとに、せん断降伏耐力時における実験値 $\tau_{sy} / \sqrt{\sigma_{cu}}$ を縦軸に、 $p_s \sqrt{\sigma_{sy}}$ を横軸にプロットしたものである。実験結果は、図に示すとおり、かなり良い線形関係を示す。そこで、せん断降伏耐力時のせん断応力 τ_{sy} は、この実験値の関係から、 $\alpha=1.74$ として、(11) 式で表される。

$$\tau_{sy} / \sqrt{\sigma_{cu}} = 1.74 p_s \cdot \sqrt{\sigma_{sy}} \quad \cdots (11)$$

(11) 式は、実験値との変動係数が 5.5% を示すように、きわめて信頼性の高い耐力算定式といえる。

せん断降伏耐力時に支圧板で伝達されるせん断力 H_{by} は、(2) 式と (7) 式から (12) 式で与えられる。

$$H_{sy}^2 / (2 m \cdot \sigma_{cu} \cdot b_b) = A_b \cdot t \cdot \sigma_{by} / 4 \quad \cdots (12)$$

平均せん断応力 $\tau_{by} (= H_{by} / b H)$ は、(12) 式の関係から (13) 式で与えられる。

$$\tau_{by} / \sqrt{\sigma_{cu}} = \beta p_b \cdot \sqrt{\sigma_{by}} \quad \cdots (13)$$

ここで、 β : 定数

p_b : 鋼材比 ($= b_b H / b H = b_b / b$)

定数 β を鉄筋と同様に求めると、算定式は (14) 式で表される。

$$\tau_{by} / \sqrt{\sigma_{cu}} = 1.34 p_b \cdot \sqrt{\sigma_{by}} \quad \cdots (14)$$

(14) 式は、図-14に示すように実験値と良い一致がみられる。このように、平滑な鋼板で伝達されるせん断力も、鉄筋と同様に評価されることが認められた。

5. まとめ

せん断面と直角に配置された鋼材のダボ効果により伝達されるせん断力に着目して検討を行った。鋼材のせん断伝達機構は、鋼材の曲げに大きく依存することが実験結果より認められた。また、鋼材の軸ひずみが降伏するせん断降伏耐力は、以下に示す式で精度良く評価されることが確認された。

$$(\text{鉄筋}) \quad \tau_{sy} / \sqrt{\sigma_{cu}} = 1.74 \cdot p_s \cdot \sqrt{\sigma_{sy}}$$

$$(\text{鋼板}) \quad \tau_{by} / \sqrt{\sigma_{cu}} = 1.34 \cdot p_b \cdot \sqrt{\sigma_{by}}$$

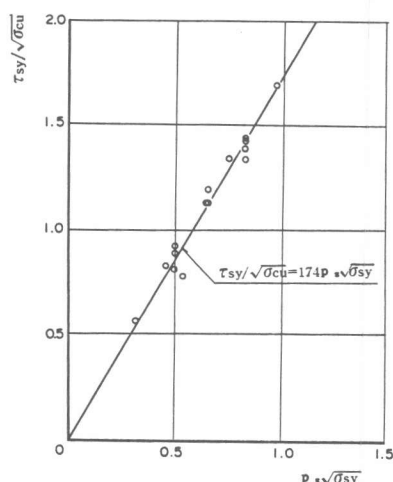


図-13 $\tau_{sy} / \sqrt{\sigma_{cu}} \sim p_s \sqrt{\sigma_{sy}}$ 関係図 (鉄筋)

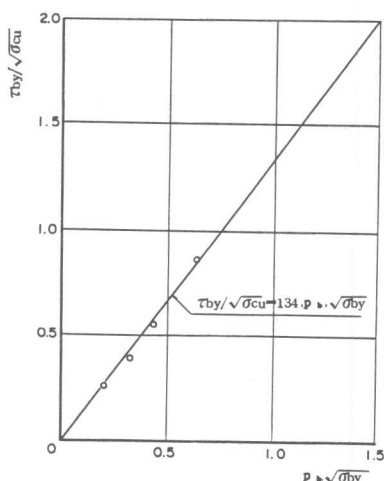


図-14 $\tau_{by} / \sqrt{\sigma_{cu}} \sim p_b \sqrt{\sigma_{by}}$ 関係図 (支圧板)

参考文献 1) Mattock, A.H.: Shear Transfer in Reinforced Concrete-Recent Research, ACI Journal, Vol. 17, PP.55-75, 1972 2) 山田一字: 鉄筋コンクリート製原子炉格納容器の設計における問題点, 特に RC シェル要素のせん断設計法の合理化に関する研究, 前田建設技術研究所報, No.22-13 3) Dulacska, H.: Dowel Action of Reinforcement Crossing Cracks in Concrete, ACI Journal, Vol. 69, PP.754-757, 1972 4) Paulay, T., Park, R., and Phillips, M.H.: Horizontal Construction Joints in Cast-in-Place Reinforced Concrete, ACI, SP42-27, PP.599-616, 1974