

(114) コンクリート打継目のせん断挙動に関する実研的研究

東京理科大学 正会員 田村浩一

正会員 森地重暉

正会員 白木恒雄

## 1 はじめに

無筋コンクリート、煉瓦等から構成される旧式構造物は強震によって打継目、目地等に沿うせん断ずれ被害を生じることがある。

1978年宮城県沖地震の東北本線江合川橋梁の被害も同様であり、この種の被害の起こるメカニズムを解明するために、コンクリート打継目の静的および動的なせん断挙動の研究<sup>1)</sup>を行ない、その後の整理、研究等の一部について以下に述べる。

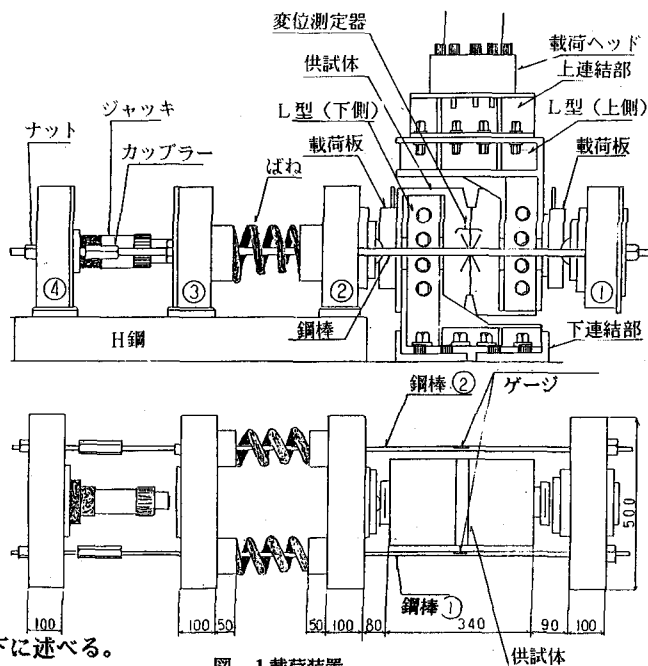


图 1 载荷装置

## 2 静的せん断試験

供試体は図-1、2に示す18\*28\*34 cmの大きさで、高さの中間部に17\*16.4 cmのせん断面をもち、その中心と面に対する圧縮力の偏心距離を0、27および58 mm、偏心率で0、約1/6、約3/8の3種類とした。コンクリートは目標圧縮強度210 kg/cm<sup>2</sup>、粗骨材最大寸法25および15 mmとし、打継目は下部コンクリート打ち24時間後にワイヤーブラシによりレータンスを除いた後、上部コンクリートを打継いだ。せん断面は予め5 mmノッチに当てた丸鋼に圧力を加えて割裂ひびわれをおこさせた後、HTボルトを用いて供試体をL型金具に固定した。島津サーボバルサUHF30のヘッドと台に金具を固定して正負せん断強制変位を、また供試体中央両側面に配置した丸鋼とスプリングにより、せん断面に0.28、1.4、3.4 tの3種類の圧縮力を作用させた。載荷は正負せん断ずれ振幅を5、10、20 mmと増加させながら繰返すI型と、ずれ振幅を2 cmから漸次減少させるD型の2種類とし、せん断面をまたぐ30°方向の相対変位、鋼棒ひずみ、ヘッドの荷重、せん断面の凹凸等を測定した。

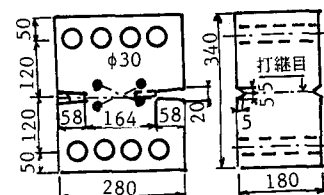


図 2 供試体形状

### 3 静的せん断試験結果

せん断力をせん断面積で除した平均せん断応力度 $\tau$  (kg/cm<sup>2</sup>)、圧縮力をせん断面積で除した平均圧縮応力度 $\sigma$  (kg/cm<sup>2</sup>)、せん断力を圧縮力で除した摩擦係数 $\mu$ の一例を図\_3、4に示す。粗骨材最大寸法25と15mmのせん断挙動に及ぼす差違はせん断面の凹凸が2~6mmで類似したこともあって特に認められず、15mmのデータのプロットも図\_3、4と同様である。I型とD型では新たに接触するせん断面の状況が異なるため、 $\sigma$ と $\tau$ 、 $\delta$ では差があるが傾向は類似しており、偏心率1/6はこれらの中間に存

在する。

せん断抵抗を求める場合は、一般に $\mu$ が用いられるが、 $\sigma$ の広い範囲で打継目の $\mu$ が一定と考えるのは適当でない。これに対し、 $\tau$ と $\sigma$ の関係は線形であると仮定できるので、今回の試験の範囲で $\tau$ と $\sigma$ の直線回帰式を求めると表 1 のとおりである。I-0 と I-3/8 の回帰式には見掛け上の差があるが、t 分布検定による有意水準 0.05 又は 0.1 による軸力ごとの検定では、0.28 t の場合には差があるとみることができるが、3.4 t では差が認められず、圧縮力が大きくなると偏心の影響は小さい傾向を示している。

#### 4 動的せん断試験

地震により振動状態にあるコンクリート打継目のせん断抵抗を調べるため、中間に打継目をもつコンクリートブロックを振動台に固定して、下部ブロックに振動を与えつつ上部ブロックにせん断面に沿う強制変位を与えたときの抵抗力、ずれ量、ひびわれ幅、加速度等の予備試験を行った。

供試体は図 5 に示す高さの中間部に 19\*10 cm、(又は 11\*10, 11\*5 cm) の打継面をもつ 11\*13\*20 cm のコンクリートブロックであり、目標強度 210 kg/cm<sup>2</sup>、粗骨材最大寸法 25 mm、打継目は処理又は無処理とし、予め割裂によりひびわれを入れた後に試験を行なった。载荷は静的と同様に振幅 20 mm の I 型又は D 型とし静的挙動との比較を試みた。以下にこれらの試験の最後に実施した 19\*10 cm のせん断面をもつブロックに 20 kg の鋼板を载荷した強制水平振動試験の上部ブロックの非線形振動について主として述べる。

供試体下部ブロックは鋼棒および山型鋼を用いて松平式振動台に固定し、台の水平方向の振幅を一定として振動数を段階的に増加すると、或るステップから上下ブロック間に振動方向の相対ずれを生じ、その

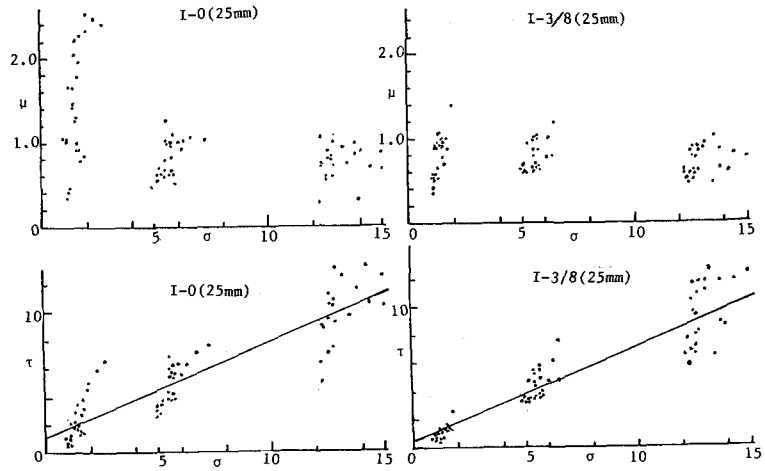


図 3 I 型载荷における $\sigma$ と $\mu$ 、 $\tau$

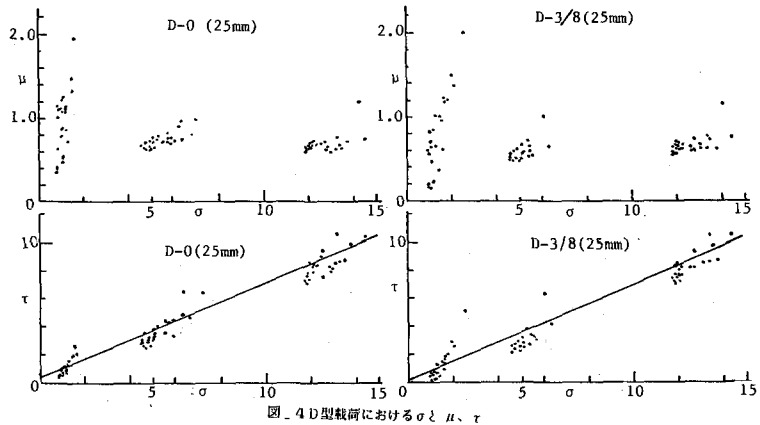
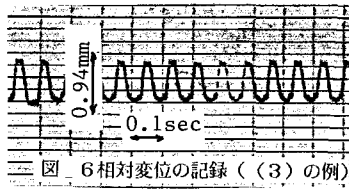


図 4 D 型载荷における $\sigma$ と $\mu$ 、 $\tau$

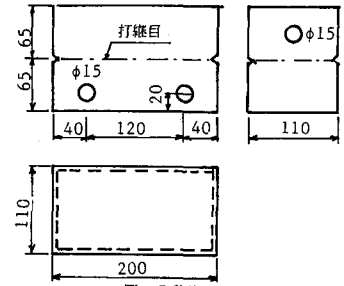
表 1  $\tau$ 、 $\sigma$  直線回帰式

| 载荷    | 式                                 | r: 相関係数       |
|-------|-----------------------------------|---------------|
| I-0   | $\tau=0.8013+0.6864 \cdot \sigma$ | ( $r=0.891$ ) |
| I-1/6 | $\tau=0.6247+0.7234 \cdot \sigma$ | ( $r=0.843$ ) |
| I-3/8 | $\tau=0.3475+0.6793 \cdot \sigma$ | ( $r=0.918$ ) |
| D-0   | $\tau=0.5340+0.6709 \cdot \sigma$ | ( $r=0.953$ ) |
| D-1/6 | $\tau=0.4747+0.6367 \cdot \sigma$ | ( $r=0.935$ ) |
| D-3/8 | $\tau=0.1352+0.6756 \cdot \sigma$ | ( $r=0.962$ ) |

記録の一例を図\_6に示す。台の目標振幅は0.04, 0.06, 0.1 cmの3種類とし、相対変位記録の得られたものを表\_2に示す。



図\_6 相対変位の記録 ( (3) の例 )



図\_5 動的試験用供試体

強制振動の解析に用いるせん断抵抗力と振動加速度との関係を求めるために、下部からの正弦振動を受けている上部ブロックのI型およびD型試験における振動台加速度と平均せん断抵抗力との関係から求めた

表\_2 変位記録

平均摩擦係数と加速度との関係を図\_7に示した。これによると、加速度200gal程度までは摩擦係数は静止状態のときと大差ないが、250

| ケース        | (1)   | (2)   | (3)   | (4)   | (5)   | (6)   | (7)   |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 台振幅 (mm)   | 1.0   | 1.0   | 1.0   | 1.0   | 0.6   | 0.6   | 0.44  |
| 振動数 (Hz)   | 10.34 | 11.24 | 11.90 | 13.16 | 15.00 | 16.67 | 20.0  |
| 台加速度 (gal) | 440   | 503   | 546   | 678   | 546   | 651   | 695   |
| 変位振幅 (mm)  | 0.117 | 0.188 | 0.310 | 0.986 | 0.211 | 0.516 | 0.422 |

galをこえると低下が起こり、特に水平動では低下勾配が大きい。また、摩擦係数はせん断面に作用する圧縮力が多い13または23kgでは小さく、自重のみの3kgでは約2倍の静試験と同様な傾向を示している。

また、動的せん断試験においてせん断面の滑動初期に現われる荷重と変位の関係で示されるせん断ばね定数の正確な数値が得られていなかったため、振動台上で加振の前後に行なった静的なせん断抵抗試験におけるせん断力降伏値に対応する降伏変位量の概略平均値0.1mmを解析の降伏変位量 $e$ として用いた。

#### 4 強制振動試験の解析

図\_8の復元力をもつ一質点系に外力 $F \cos (pt + \epsilon)$ が作用するときの運動方程式<sup>2)</sup>は

$$M \frac{d^2 y}{dt^2} + f(y+e) = -F \cdot \cos (pt + \epsilon) \quad (1)$$

振幅が小さいときは弾性復元力と考えると、

$$M \frac{d^2 y}{dt^2} + c \cdot y = -F \cos pt \quad (2)$$

$$y = a \xi, \quad pt = \tau, \quad n^2 = c/M, \quad \phi = ca/F, \quad \lambda = p/n,$$

$$\psi = f\{a(\xi + e/a)\}/ca, \quad c = f/e$$

とおくと

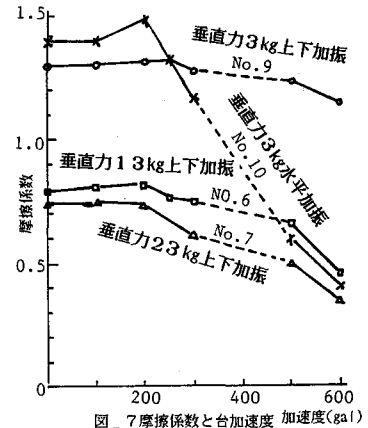
$$\frac{d^2 \xi}{d\tau^2} + \frac{1}{\lambda^2} \psi(\xi) = -\frac{1}{\phi \lambda^2} \cos(\tau + \epsilon) \quad (3)$$

図\_8において、

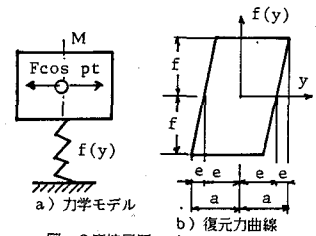
$$\text{AC間 } -1 \leq \xi \leq -(1 - 2e/a), \quad \psi(\xi) = \xi + 1 - e/a$$

$$\text{CB間 } -(1 - 2e/a) \leq \xi \leq 1, \quad \psi(\xi) = e/a \quad (4)$$

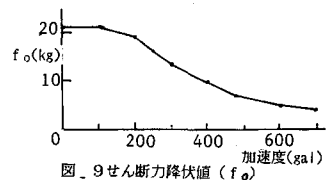
A点で $\tau = 0$ 、 $\xi = -1$ 、 $d\xi/d\tau = 0$ 、B点で $\tau = \pi$ 、 $\xi = 1$ 、 $d\xi/d\tau = 0$ 、C点で $\tau = \alpha\pi$ 、 $\xi = -1 + 2e/a$ とし、定常振動に対しては $0 < \alpha \leq 1$ の条件が存在する。



図\_7 摩擦係数と台加速度



図\_8 摩擦履歴モデル



図\_9 せん断力降伏値 ( $f_0$ )

AC間では(3)、(4)より

$$\frac{d\xi}{d\tau} + \frac{1}{\lambda^2}(\xi + 1 - e/a) = -\cos(\tau + \varepsilon)/\phi\lambda^2 \quad (5)$$

従って $\lambda \neq 1$ ならば

$$\xi = -1 + \frac{e}{a}(1 - \cos\tau) + (\sin\tau - \lambda \sin\tau) \frac{\sin\varepsilon}{\phi(1-\lambda^2)} - (\cos\tau - \cos\tau) \frac{\cos\varepsilon}{\phi(1-\lambda^2)} \quad (6)$$

CB間では(3)、(4)より  $\frac{d\xi}{d\tau} + \frac{e}{\lambda^2 a} = -\frac{1}{\phi\lambda^2} \cos(\tau + \varepsilon) \quad (7)$

$$\xi = 1 - \frac{e}{2a\lambda^2}(\pi - \tau)^2 + (\pi - \tau - \sin\tau) \frac{\sin\varepsilon}{\phi\lambda^2} + (1 + \cos\tau) \frac{\cos\varepsilon}{\phi\lambda^2} \quad (8)$$

(6)と(8)が $\tau = \alpha\pi$ において $\xi$ と $d\xi/d\tau$ の連続条件から

$$\sin\varepsilon = e \cdot \phi(1-\lambda^2)A(\alpha, \lambda)/aC(\alpha, \lambda) \quad \cos\varepsilon = e\phi(1-\lambda^2)B(\alpha, \lambda)/aC(\alpha, \lambda) \quad (9)$$

$$\phi = e\phi \{1 + (1-\alpha)^2\pi^2/4\lambda^2\}/a - \{(1-\alpha)\pi - \sin\alpha\pi\}\sin\varepsilon/2\lambda^2 - (1 + \cos\alpha\pi)\cos\varepsilon/2\lambda^2 \quad (10)$$

ここに  $A(\alpha, \lambda) = (1-\alpha)\pi(\cos\alpha\pi - \cos\alpha\pi/\lambda) + \sin\alpha\pi(1 + \cos\alpha\pi/\lambda) - \lambda(1 + \cos\alpha\pi)\sin\alpha\pi/\lambda$

$$B(\alpha, \lambda) = \{(1-\alpha)\pi\sin\alpha\pi - (1 + \cos\alpha\pi)(1 + \cos\alpha\pi/\lambda) - \lambda\{(1-\alpha)\pi + \sin\alpha\pi\}\sin\alpha\pi/\lambda + 2\lambda^2(1 + \cos\alpha\pi/\lambda)\}$$

$$C(\alpha, \lambda) = (1 + \cos\alpha\lambda)(1 - \cos\alpha\pi/\lambda) - 2\lambda\sin\alpha\pi\sin\alpha\pi/\lambda + \lambda^2(1 - \cos\alpha\lambda)(1 + \cos\alpha\pi/\lambda)$$

従って振動台による強制振動の場合は、台の振幅をDとすると $F = Mp^2D$ となり、 $\sin^2\varepsilon + \cos^2\varepsilon = 1$ より、 $ce/F = e\phi/a = e/\lambda^2D$ の関係から

$$\frac{e}{\lambda^2 D} = |C(\alpha, \lambda)| / \sqrt{1 - \lambda^2} \sqrt{A^2(\alpha, \lambda) + B^2(\alpha, \lambda)} \quad \tan\varepsilon = A(\alpha, \lambda)/B(\alpha, \lambda) \quad (11)$$

(11)を満足する $\lambda$ 、 $\varepsilon$ を求め、(10)の $\phi$ を用いて  $a = \phi\lambda^2D$  から応答振幅が求められる。

表 3 解析結果

| ケース               | (1)    | (2)    | (3)    | (4)    | (5)    | (6)    | (7)    |
|-------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 台振幅 (cm)          | 0.1    | 0.1    | 0.1    | 0.1    | 0.06   | 0.06   | 0.044  |
| 振動数 (Hz)          | 10.34  | 11.24  | 11.90  | 13.16  | 15.00  | 16.67  | 20.00  |
| 降伏力 f (kg)        | 10     | 7      | 6      | 4      | 6      | 4.5    | 4      |
| c (kg/cm)         | 1000   | 700    | 600    | 400    | 600    | 450    | 400    |
| $\omega_0$        | 205.7  | 172.1  | 159.3  | 130.1  | 159.3  | 138.0  | 130.1  |
| $\omega/\omega_0$ | 0.3159 | 0.4104 | 0.4693 | 0.6356 | 0.5916 | 0.7591 | 0.9660 |
| $\alpha$          | 0.8622 | 0.1837 | 0.1828 | 0.1880 | 0.2327 | 0.2402 | 0.2971 |
| a/e               | 1.075  | 10.07  | 10.71  | 10.86  | 6.896  | 6.810  | 4.666  |

図 7 から推定した図 9 のせん断力降伏値 f を用いて実測値の得られた7ケースに対応した計算を表 3 と図 10 に示した。これで見ると、測定値のばらつきのためか、計算値が実測値に近い場合と離れる場合がある。

## 5 むすび

無筋コンクリート橋脚のせん断ずれ被害に注目して、打継目のせん断特性に関する基礎資料を得るために静的および動的せん断試験に着手した。その結果、静的にはせん断抵抗力を一定の摩擦係数を用いて評価する従来の方式では、垂直力に大きい差があるときには無理があり、 $\tau = A + B\sigma$ の表現が適当である

また圧縮力がせん断面の中心に作用する場合と偏心する場合とでは、前者の方がせん断抵抗が大きい傾向がある。せん断面が振動の影響を受ける場合には、せん断抵抗が低下するので、これらを考えた解析を試みたが、実測値と一致しないケースがあり、更に実験、解析等を継続する計画である。この研究は構造研究室の卒研生によって実験が進められ、また文部省科学研究費補助金(No.62550351)を受けたものであり、深く感謝の意を表する。

1)田村、森地、辻、V\_317、土木学会 第43回年次学術講演会概要集

2)安藤範平：塑性系の強制振動について 日本建築学会研究報告 No. 31 1955

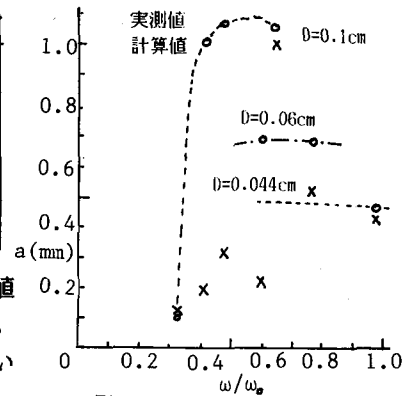


図 10 実測と計算値の比較