

V-37

隔壁を有するコンクリート部材のねじり変形および耐力

北海道大学大学院 学生員 高橋 良直
北海道大学工学部 正 員 志村 和紀
北海道大学工学部 正 員 佐伯 昇
北海道大学工学部 正 員 三上 隆

1. はじめに

近年、海洋構造物の発達とともに、構造物が大型化している。海洋構造物で代表的なものといえば、防波堤があるが、防波堤用ケーソンの建設は、陸上で大型化され施工することが行われつつある。構造物が長大化すると、構造物に載荷するねじり荷重を考慮する必要があるがでてくる。大型ケーソンもその例外ではなく、曳航中の動揺、地盤の不等沈下、不陸等によってねじり荷重が生じる。このことへの対策として隔壁の設置方法が問題となっている。

そこで本研究では、両端に隔壁を設置した、鉄筋コンクリート部材の変形および耐力についてねじり載荷試験を行い、また、St. Venantのねじりだけでなく、そのねじりも考慮した混合ねじり解析を行い、検討したものである。

2. 実験概要

1) 実験供試体および使用材料

実験に用いた供試体を図-2.1(a)~(c)に示す。

(a)は供試体概要であり、(b)は側面図、(c)は上面図であり、斜線を施した部分が隔壁である。供試体断面は図-2.2に示すように30cm×30cm、側壁の幅8cmの溝型断面である。また、隔壁の断面は図-2.3に示す様なものを配置した。横方向鉄筋としてD6、軸方向鉄筋としてD10を用い、かぶり厚は1cm、横方向鉄筋の間隔は12cmとした。

コンクリートは早強ポルトランドセメントを使用し、材令14日で試験を行った。配合は単位水量160kgf、 $W/C=48\%$ 、 $s/a=43\%$ 、空気量5%とした。なお圧縮強度は 355kgf/cm^2 であった。

2) 実験方法

支間長 $L=165\text{cm}$ とし、一端をねじりに対して固定し、他端にねじり荷重を載荷した。トルクはねじり用ドラムを回転させることによって作用させた。ねじり角は傾斜計と変位計によって測定した。

鉄筋およびコンクリートのひずみは固定側隔壁付近と支間中央の2ヶ所で測定した。横方向鉄筋のひずみはそれぞれの箇所の上部、中央部、下部にひずみゲージを貼付した。軸方向鉄筋についても、端部付近と支間

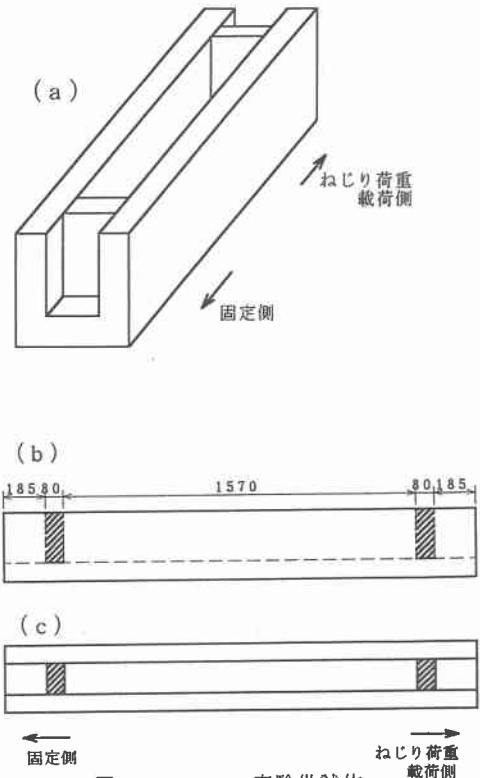


図 - 2 . 1 実験供試体

Ultimate Strength and Deformation of Concrete Member With Diaphragm Subjected to Torsion
by Yoshinao TAKAHASHI, Kazunori SHIMURA, Noboru SAEKI, and Takashi MIKAMI

中央の2ヶ所でひずみを測定した。コンクリートのひずみは直角ロゼットゲージで測定した。

図-2.2および図-2.3には供試体断面内でのひずみ測定位置も示してある。ただし、図-2.2は固定側から見たものであり、ねじり荷重は時計まわりに载荷される。

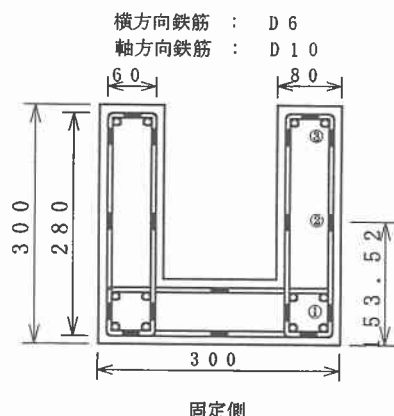


図 - 2 . 2 供試体断面図

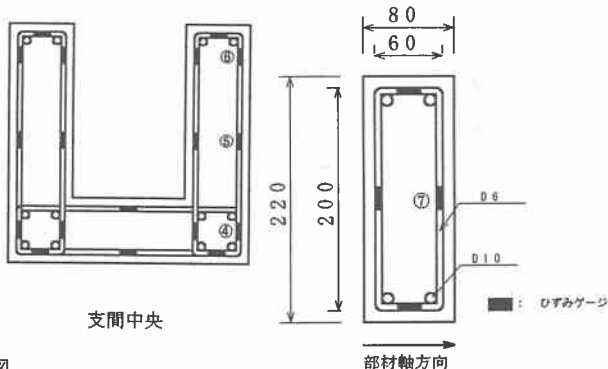


図 - 2 . 3 隔壁の断面図

3. 実験結果

実験で得られたトルク-ねじり角関係を図-3.1に示す。また、支間中央でのトルクと横方向鉄筋のひずみの関係は図-3.2、支間中央と端部隔壁付近の横方向鉄筋のトルクとひずみの関係の比較を図-3.3に、さらに隔壁に配置した横方向鉄筋のトルク-ひずみの関係を図-3.4に示す。なお、これらのグラフに付してある番号は図-2.2および図-2.3に示してあるゲージ貼付場所の番号である。これらの図を見ると、支間中央部の側壁中央部の鉄筋のひずみが顕著であることがわかる。図-3.4から最大トルクに達する直前まで横方向鉄筋のひずみは小さく、以後急激にひずみが増大し、それに伴ってねじり荷重が低下していることがわかる。

ひび割れ発生荷重は213kgfmであり、最大耐力は470 kgfmであった。また、供試体のひび割れ状況は図-3.5に示す様になった。ひび割れは供試体軸方向に対して45°方向に傾いたものが多い。が、端部隔壁付近では部材軸に対して直交する方向に走っているひび割れが観察できた。

ひび割れの発生状況について述べると、载荷開始後、まず供試体の側壁でひび割れが生じ、その後、底板の外

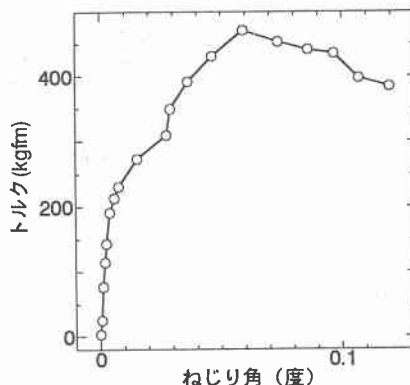


図-3.1 トルク-ねじり角関係

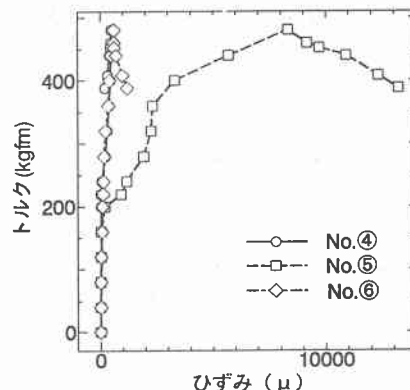


図-3.2 横方向鉄筋のトルク-ひずみ関係

側と端部隔壁に斜めひび割れが生じた。次に、側壁の横方向鉄筋が降伏し、最終的には、端部隔壁付近のコンクリートが圧壊した。隔壁にひび割れが生じた直後、最大耐力に達し、その後、ねじり荷重が低下していった。

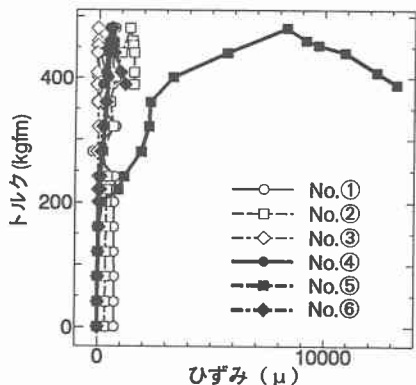


図-3.3 横方向鉄筋のトルク-ひずみ関係

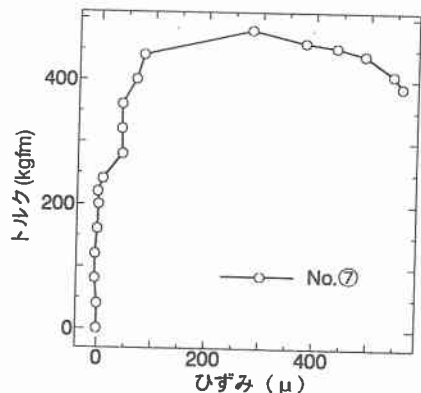


図-3.4 鉄筋のトルク-ひずみ関係（隔壁）

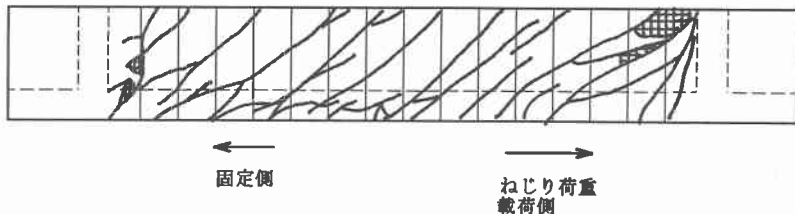


図- 3 . 5 ひび割れ状況

4. 解析概要

1) 解析手法

部材端部に隔壁を配置しているためそりが隔壁によって拘束される。そこで、解析を行うにあたり、St.Venantのねじりだけでなく、そりねじりも考慮した混合ねじり理論を用いる。混合ねじり理論を用いて、ひび割れ発生荷重（ねじり荷重）の算定を試みた。

まず、図-4. 1に示す様にx座標を設定し、y,z座標の原点は断面の図心にとる。

混合ねじりの支配方程式、すなわち任意の位置xにおけるトルクとねじり角の関係は以下になる。

$$T(x) = GJ(x) \cdot \frac{d^2 \phi}{dx^2} - EI_{\omega\omega}(x) \cdot \frac{d^3 \phi}{dx^3} \quad (4. 1)$$

ここに、Gはせん断弾性係数、JはSt.Venantのねじり定数、Eは弾性係数、 $I_{\omega\omega}$ はそり2次モーメントである。また、トルクはx軸方向に変化しないので(4. 2)式が成り立つ。

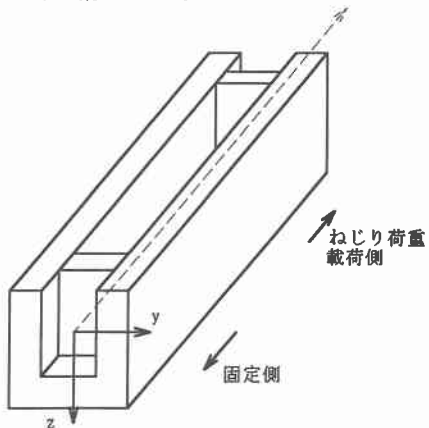


図- 4 . 1 座標系

$$\frac{dT}{dx} = 0 \quad (4.2)$$

次にねじり角をFourier級数を用いて(4.3)式のように表す。¹⁾

$$\phi = B_0 + \sum_{n=1}^{\infty} B_n \sin \frac{n\pi}{l} x + \sum_{n=1}^{\infty} B'_n \cos \frac{n\pi}{l} x \quad (4.3)$$

ここに、 l は支間長、 B_0, B_n, B'_n はFourier係数である。

隔壁によってそりが拘束されるという効果を次の様に評価する。²⁾

$$D(1-\mu)\Omega \cdot \frac{d\phi}{dx} = -EI_{\omega\omega} \frac{d^2\phi}{dx^2} \quad (4.4)$$

ここに、 D は板の曲げ剛性、 Ω は板の面積の2倍、 t は隔壁の厚さ、 x_0 は隔壁の位置を表す。

したがって、(4.3)式を仮定し、(4.4)式という境界条件のもとで、(4.1)式および(4.2)式解いていくことになる。その際未知数となるのがFourier係数で、(4.1)～(4.3)式をマトリックス方程式で表し、Fourier係数求めていくのである。

2) ねじり剛性の評価

混合ねじり理論を用いるため、St.Venantのねじり剛性およびそりねじり剛性を評価する必要がある。まず、ひび割れ発生前の剛性の評価の仕方から述べる。

St.Venantのねじり剛性はせん断弾性係数 G とねじり定数 J をかけたものである。ただし、ねじり定数は(4.5)式で算定する。

$$J = \beta_2 \sum x^3 y / 3 \quad (4.5)$$

ここに、 x, y はそれぞれ、断面の短辺、長辺であり、 β_2 は以下のようにして定める。³⁾

$$\beta_2 = 1 - 192x \tanh(0.5\pi/x) / (\pi^3 y)$$

そりねじり剛性は弾性係数 E とそり2次モーメント $I_{\omega\omega}$ の積として求める。 $I_{\omega\omega}$ は(4.6)式で求める。

ここに、 ω とはそり関数であり、その分布は断面の形状および寸法によって決まる値であり、その分布は図4.2に示す通りである。なお、後述する通りそり関数はそり応力を求める際にも用いられる。

次に、ひび割れ発生後の剛性の評価の仕方について述べる。

St.Venantのねじり剛性は立体トラス理論より得られた(4.6)式を用いる。⁴⁾

$$GJ = \frac{T}{\frac{1}{2A_0} \oint \tau ds} \quad (4.6)$$

これは、ひび割れが発生したあと、中実断面を図4.3の様中空断面に置き換え、Bredtのねじりを適用することにより、ねじり剛性を評価する。

本研究では溝型部材を用いたが、側壁と底板の剛性を足しあわせることによって断面全体のSt.Venantのねじり剛性を求めた。

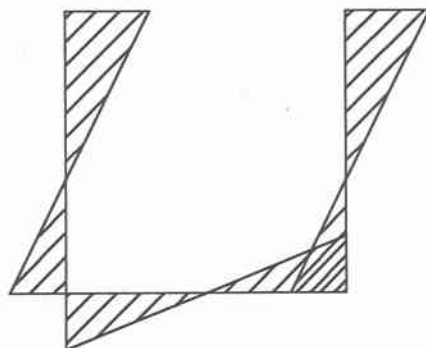


図-4.2 そり関数の分布

そりねじり剛性については、Hsu等によるBi-Material Model¹⁾によって剛性を評価する方法もあるが、本研究ではそりねじり剛性の減少についてはその方法を用いず、大まかにとらえることとした。

3) ひび割れ荷重の算定

St.Venantのねじりによって(4.6)式に示す様なせん断力が生じ、そりねじりによって(4.7)式におよぶ軸方向力、(4.8)式のようなせん断力が生じる。

$$\tau_{xz} = 2Gy \frac{d\phi}{dx} \quad (4.7)$$

$$\sigma_x = -E\omega \frac{d^2\phi}{dx^2} \quad (4.8)$$

$$\tau_{xz} = EQ_{\omega} \frac{d^3\phi}{dx^3} \quad (4.9)$$

ここに、 Q_{ω} はそり1次モーメントといわれている物理量であり、以下のようにして定義されている。

$$Q_{\omega} = \int \omega dA \quad (4.10)$$

そして、これら3つの応力から部材の任意の位置での主応力を計算し、その値がコンクリートの引張強度に達したらひび割れが発生すると考える。

5. 解析結果およびその検証

4. で述べた方法によって行った解析結果を図-6.1に示す。ひび割れ発生後のそりねじり剛性については先に述べたように詳細な計算は行わず、ひび割れ発生後も剛性は変わらないとした場合(CASE-1)、およびひび割れ後に剛性が1/10に低下すると仮定した場合(case-2)について計算を行った。

解析結果を実験結果と比較すると、ひび割れが発生するまでは比較的结果は一致しているが、ひび割れ発生トルクを解析では評価できていない。case-1については形はにているものの、変形が進むにつれて実験結果から離れていく。ひび割れ後のそりねじり剛性の低下を考慮していないためであると思われる。case-2については、その概略はとらえているが実験結果を十分に説明できていないとは言えず、そりねじり剛性の低下を一応考慮しているものの、それが充分でないことを示唆している。なお、case-1,2ともに解析結果の図が階段状を示しているのは、ひび割れ後のSt.Venantのねじり剛性を一定にしてあるからである。

さらに、溝型部材について、端部隔壁のないものについても解析を行い、比較検討を行った。その際、端部隔

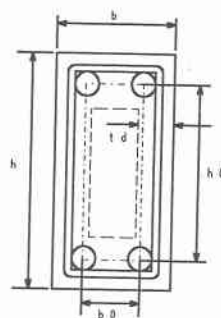


図-4.3 中空断面

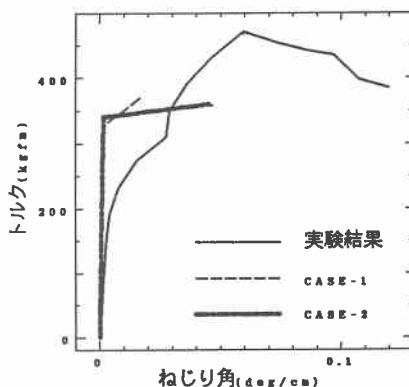


図-6.1 解析結果

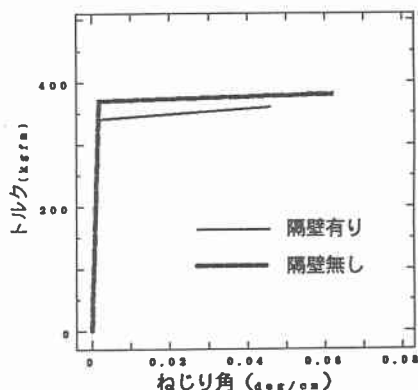


図-6.2 隔壁の有無による比較

壁のない部材の断面形状および寸法は今回実験を行った供試体と同一のものとした。その結果を図-6.2に示す。図-6.2を見ると、ひび割れ発生荷重は隔壁を有する部材の方が小さいが、変形は端部隔壁のない部材の方が上回ることになる。

6. まとめ

本実験および解析についてまとめると次のようになる。

- 1) 両端に隔壁を配置し、そりを拘束すると端部では直応力によるひび割れが発生したが、支間中央付近では単純ねじり試験と同様な、部材軸に対してほぼ斜め 45° 方向のひび割れが観測された。
- 2) また、隔壁に配置した横方向鉄筋のトルク-ひずみの関係を見ると、隔壁にひび割れが発生するのは側壁にひび割れが生じてからかなり後であり、隔壁にひび割れが入るとともに部材のねじり荷重増加量が減少していく現象が認められた。
- 3) 混合ねじりの変形挙動はフーリエ級数を用いた方法である程度追うことができた。その際、ひび割れ後のそりねじり剛性もきちんと評価する必要があるが、その目安として、ひび割れ発生前の1/10ぐらいと考えられる。

参考文献

- 1) Hwang, C. S. and Hsu, T. T. C.: Mixed Torsion Analysis of Reinforced Concrete Channel Beams
A Fourier Series Approach, ACI Journal, pp. 377~386, SEP. -Oct. 1983
- 2) 佐伯 昇：コンクリート部材のねじり応力と耐力, コンクリート工学, Vol. 29, No. 9, pp. 19~27, 1991. 9
- 3) 佐伯 昇：上部開放断面を有する長大ケーソンのねじれ特性 討議, 土木学会論文集
- 4) 田納・佐伯・藤田：ねじり荷重を受けるRC部材の変形挙動, 土木学会第42回年次学術講演会論文集, 1987年9月