

曲げとねじりを受けるRC桁のひびわれと変形特性

北大工学部 正員 藤田嘉夫

〇佐伯 昇

高田宣元

奈良 久

1. まえがき

鉄筋コンクリート主桁橋に偏心荷重が作用すると、主桁にねじり荷重が作用すると、桁自体にねじりによるせん断応力が生じ、桁の耐力に影響を及ぼす。さらに曲げおよびねじり荷重によるひびわれが主桁の曲げ剛性およびねじり剛性の低下を起し、これが床版による荷重分担性を変化させて、床版応力の増加および変形特性に大きな影響を与えるものと考えられる。本研究では曲げ荷重を主体に設計された構造物について、ねじり荷重が作用した場合のひびわれおよび変形挙動を明らかにしようとしたもので次のような実験および解析を行った。オ/に曲げとねじりを受ける桁のひびわれ発生性状について、実験によりひびわれ発生荷重を求め、主応力を数値計算してひびわれ発生条件について検討した。又このひびわれ発生荷重に対するねじりモーメント、主鉄筋比、スターラップ量の影響について調べた。オ/に最大ひびわれ幅が α^m および α^m になる場合のねじりモーメント、スターラップ量の影響の度合およびこれらのひびわれによる曲げ剛性およびねじり剛性の低下率を明らかにした。さらにこれらのひびわれ状態でのねじり剛性低下の算定式を検討した。今回はこれらT桁および矩形桁の曲げねじり実験によるひびわれと変形についてまとめたものである。

2. 実験供試体および実験方法

実験桁は図-1に示すようにT形および矩形断面でスパン3mの鉄筋コンクリート桁である。主鉄筋は $2\phi 16$ および $2\phi 19$ (SD35)の2種類、スターラップは $\phi 10$ (SD35)を用い、そのピッチ $\delta = 7, 10, 15, 20$ cmの4種類である。曲げ載荷方法は2点載荷(タイプエ)、およびせん断スパンの短い1点載荷(タイプエ)を用いた。又ねじり荷重は桁端部で2台のオイルジャッキで偶力を発生させて、桁全体に一定ねじりモーメントを作用させた。

Zone Aは曲げモーメント(M)、曲げせん断力(S)、ねじりモーメント(T)が作用し、Zone BではMとT、Zone Cでは大きな曲げせん断力とM、Tが作用している。実験桁の材料はすべて同じで、セメントは普通ポルトランドセメント、砂は錦岡海岸砂で比重2.78、単位容積重量 1700 kg/m^3 、吸水量1.02%、砂利は静内川砂利で比重2.78単位容積重量 1747 kg/m^3 、吸水量1.06%のものを用いた。配合は水セメント比の43、砂と砂利の比は1.23である。桁は実験日まで20°Cの水槽で養生し、ほぼ30日前後の成長で実験を行った。テストピースは圧縮強度(σ_c)、ヤング率(E_c)およびポアソン比(ν)の測定のために3本、割裂引張強度用に3〜5本作製した。これらの試験の諸数値は表-1に示した。ひずみの測定は桁の中央点において主鉄筋のひずみ、スパンの $\frac{1}{4}$ 、 $\frac{1}{2}$ 、 $\frac{3}{4}$ 点のウェブ中央でスターラップのひずみ、および $\frac{1}{2}$ 点でコンクリート

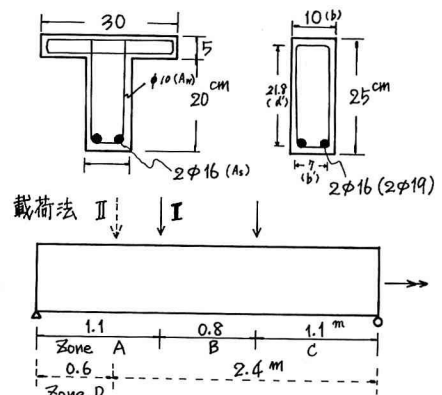


図-1

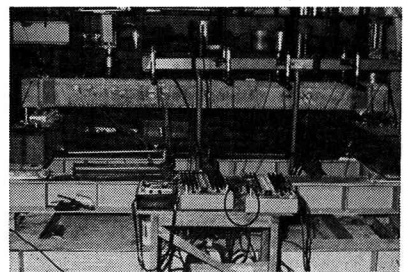


写真1 測定状況

ト床版の表面ひずみを取った。ひびわれ測定は断面の主鉄筋の位置に、スパン中央から対称に4cm間隔に35点(140cm)のコンタクトゲージを貼って行った。桁のたわみおよびねじり角は変位変換器によって測定した。測定状況を写真-1に示す。載荷はねじり荷重を一定($T/T_B = 0.25 \sim 0.7$)にして、曲げ荷重を段階ごとに増加し、各段階でコンタクトゲージ、主鉄筋ひずみ、スターラップひずみ、変形を測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 曲げねじり荷重下のひびわれ性状

曲げねじり荷重下の主鉄筋位置でのコンクリートの伸びをコンタクトゲージで測定し、伸びの値が10μ以上になるとひびわれが光学的(20倍測微鏡)に確認されるのでこの時点をひびわれ発生とする。その時の曲げモーメントを M_{ctr} 、ねじりモーメントを T_{ctr} とすると断面下面の中央の点のコンクリートの主応力は

$$\sigma_z = \frac{M_{ctr}}{S_x} + \gamma \sqrt{\left(\frac{M_{ctr}}{S_x} \right)^2 + \left(\frac{T_{ctr}}{J_t} \right)^2} \quad (1)$$

で求められる。γは断面下面の幅であり、μは断面によって決まる定数でほぼ1に近似できる。図-2にひびわれ発生時の最大の主応力を示す。主引張応力は20~50 kg/cm^2 に分布し、割裂引張強度にほぼ対応している。又T桁と矩形桁での差異はあまり認められなかった。図-3に T/T_B (T_B はねじり荷重のみによる破壊ねじりモーメント)と σ_z/σ_t (σ_t は割裂引張強度)との関係を示したもので、 T/T_B が0.25~0.80変化するに σ_z/σ_t は0.6~1.6に変化し、 $\sigma_z/\sigma_t = 1$ を中心にして分布して、ひびわれ発生荷重はほぼ σ_t によって決まることがわかった。又 T/T_B が大きくなるに従って、 σ_z/σ_t が大きくなる傾向を示した。ねじり荷重のみのひびわれ発生は破壊ねじりモーメントの50~80%で発生し、急激な変形剛性の低下が見られた。図-4は主鉄筋比 A_s/bd によるひびわれ発生荷重の性状でT桁の主鉄筋比は0.609で σ_z/σ_t は0.6~1.6にバラツクが、1.0を中心に分布している。矩形桁に比し2バラツキが大きかった。矩形桁の主鉄筋比は83%の場合、 σ_z/σ_t は1.0近傍に分布し、0.65~1.4の範囲にある。主鉄筋比2.57%の場合、 σ_z/σ_t は1.0よりわずかに大きい傾向を示しているが、全体から見ると主鉄筋比によるひびわれ発生荷重の影響はあまりない傾向を示した。スターラップの影響を見るため次式を用

表-1 実験桁諸元

実験桁	M/B kg/cm	T/m	σ_c kg/cm ²	σ_s kg/cm ²	σ_{st} kg/cm ²	E_c kg/cm ²	G_c kg/cm ²
T10-1	3.135	0.270	362	31.0	3670	319	135
2	0	0.624	449	35.7	3510	316	132
3	2.819	0.442	399	33.0	3480	347	144
4	2.819	0.156	473	37.0	3660	347	144
T7-1	3.067	0.265	424	34.4	3950	308	128
2	0	0.624	423	34.3	3460	333	140
3	2.956	0.442	393	31.6	3550	356	148
4	3.025	0.156	410	32.6	3560	327	136
R10-1	2.860	0.265	385	32.3	3730	327	140
2	0	0.477	402	36.3	3570	340	144
3	2.681	0.394	398	32.6	3470	333	139
4	2.923	0.162	377	35.6	3430	382	164
R7-1	3.053	0.156	343	30.0	3921	280	119
R15-1	2.684	0.156	332	28.4	3716	278	114
2	2.654	0.260	432	34.9	3785	273	115
3	0	0.314	409	33.6	3785	293	121
4	0	0.338	345	30.3	3741	302	124
R20-1	2.819	0.156	376	33.5	3801	283	123
2	3.011	0.268	380	28.9	4139	303	129
3	2.613	0.260	369	30.4	3808	327	139
4	0	0.377	345	32.7	3765	315	131
R10-18	2.928	0.156	444	31.4	—	304	131
25	2.592	0.260	349	30.6	3683	317	133
35	4.200	0.260	368	31.4	—	300	130
R15-15	2.880	0.156	368	30.6	3938	278	118
25	2.712	0.260	350	33.3	3598	353	148
35	3.984	0.260	359	31.2	3747	303	121
R20-15	2.760	0.156	403	33.9	3633	332	138
26	2.664	0.268	341	32.5	3625	303	130
35	4.292	0.260	355	32.1	3883	299	126

△推定値

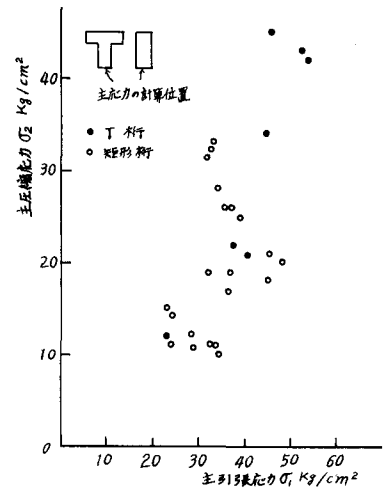


図-2 曲げねじり荷重下のひびわれ発生主応力

し、0.65~1.4の範囲にある。主鉄筋比2.57%の場合、 σ_z/σ_t は1.0よりわずかに大きい傾向を示しているが、全体から見ると主鉄筋比によるひびわれ発生荷重の影響はあまりない傾向を示した。スターラップの影響を見るため次式を用

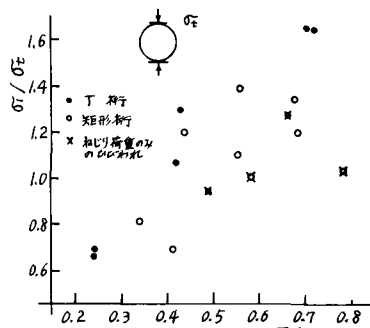


図-3 ねじり荷重の影響によるひびわれ発生

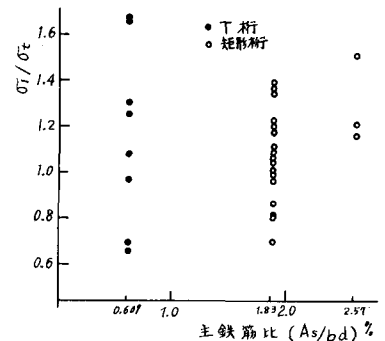


図-4 主鉄筋比によるひびわれ発生

いた。

$$P_w = \frac{2(b+d)Aw}{S} \quad \text{----- (2)}$$

その結果を図5に示す。矩形桁は $P_w = 2.3 \sim 6.4 \text{ cm}^2$ の範囲で σ_c/σ_t の影響は認めず、又T形桁についても $P_w = 7.9 \sim 11.2$ で、ひびわれ発生に対して影響はほとんどないことがわかった。図-6はひびわれ発生曲モーメント M_{cr} と破壊曲げモーメントとの比 M_{cr}/M_B についてねじり荷重の影響を調べたもので、矩形桁で T/B が0.3~0.7に増加すると M_{cr}/M_B は0.07~0.03に低下する傾向を示し、載荷方法による影響はあまり認められなかった。又T形では M_{cr}/M_B の T/B による低下の傾向がみられなかった。図-7は M_B に対する M_{a1} (最大ひびわれ幅が 0.1 mm になった時の曲げモーメント)の比 M_{a1}/M_B についてねじり荷重比 T/B の影響を検討したもので、 T/B が0.25~0.7に増加するに M_{a1}/M_B は0.5~0.3に低下し、ねじり荷重によって M_{a1} の状態により早くなることを示していた。この傾向はT形桁、矩形桁およびZ型B、Dについてほぼ同じような性状を示した。図-8は M_{a2}/M_B (M_{a2} は最大ひびわれ幅が 0.2 mm になった時の曲げモーメント)について図-7と同様に T/B の影響を調べたもので、矩形桁では $T/B = 0.3 \sim 0.7$ に増加すると M_{a2}/M_B は0.85~0.55に低下し、T形桁では M_{a2}/M_B はほぼ0.8で T/B に対して大きな変化はみられなかった。図-9は M_{a2}/M_B のスターラップ量の影響を検討したもので、 P_w が2.3から4.5に増加するに M_{a2}/M_B は0.6から0.8に増加するが P_w が4.5以上の増加に対しては M_{a2}/M_B の増加は認められず、 M_{a2}/M_B は0.75~0.8のほぼ一定値を示した。又同様に M_{a1}/M_B の値の P_w の影響を調べると P_w が2.3~11.2に変化しても、 $M_{a1}/M_B = 0.3 \sim 0.5$ の範囲に分布し、 P_w の影響はあまり認められなかった。すなわち M_{a2} 前後からスターラップの作用が顕著になることがわかった。

3.2 ひびわれと変形剛性性状

図-10、11に示すように変形剛性は荷重の増大とともに低下する。破壊近くの曲げ剛性は初期の荷重段階のそれに比べて約2/3になる。しかしかなりのひびわれ状態でも破壊近接まで急激な剛性低下は起らないで、各荷重段階で徐々に剛性低下してほぼ定常状態になっていた。ねじり剛性も同いように徐々に低下

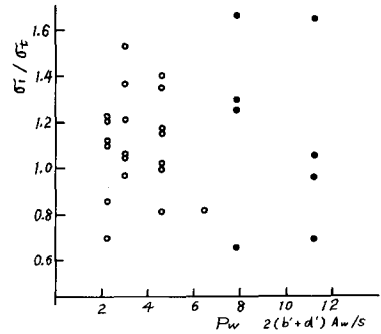


図-5 スターラップの影響によるひびわれ発生

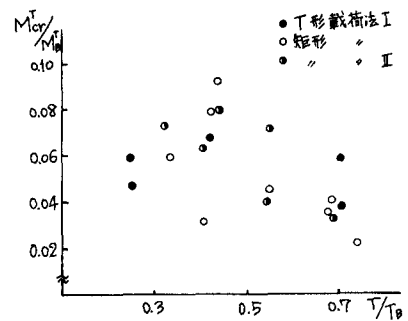


図-6 ねじり荷重の影響による M_{cr}/M_B

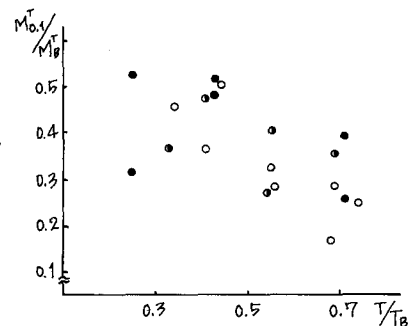


図-7 ねじり荷重の影響による M_{a1}/M_B

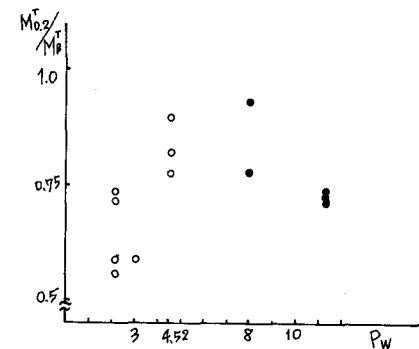


図-9 スターラップの影響による M_{a2}/M_B

図-8 ねじり荷重の影響による M_{a2}/M_B

し、破壊直前でほぼ定常状態になっていた。また曲げゾーンはせん断ゾーンに比較してねじり剛性の低下は大きいが、破壊近くでは大差がなくなる傾向を示した。ねじり荷重のみによるねじり剛性低下はひびわれが発生する $T_{cr}/T_0 = 0.6$ 前後から急激に低下し初期の剛性に比して $1/10$ 程度になった。変形剛性の低下率を弾性体としての剛性 ($E I_{m0}$ および $G I_{t0}$) との比で表わし、 M_{cr}^T 、 M_{a1}^T 、 M_{a2}^T の状態と比較してみると図-12、13 のようになる。T形断面の曲げ剛性低下率は M_{a1}^T で 0.55、 M_{a2}^T で 0.5 となり T 桁では M_{a1}^T で 0.3 で矩形桁より低下率が大きい傾向を示した。ねじり剛性は T 桁、矩形桁とも M_{a1}^T で 0.5、 M_{a2}^T で 0.3 程度の低下率を示した。 M_{a1}^T 、 M_{a2}^T の状態のねじり剛性の算定式として次式を用いた。

$$I_{ti} = I_{tc} + I_{ts} = \frac{1}{3} t x^3 b + \frac{E_s}{G_c} \cdot \frac{b d'}{s} A W \dots \dots \dots (3)$$

ここで I_{tc} は曲げの state II の状態のコンクリート左縮部のねじり剛度で、Saint-Venant 理論より求められる。 I_{ts} はスターラップによるねじり剛度で Cowan が誘導したものを応用したものである。図-14 に示すようにねじり剛性の算定式 $G I_{ti}$ はほぼ $M_{a1}^T \sim M_{a2}^T$ の状態に対応していることを示している。

4. 結論

1. 曲げねじり荷重下のひびわれ発生荷重はコンクリートの引張強度に支配され、主鉄筋、スターラップの影響は認められなかった

2. M_{a1}^T/M_0^T 、 M_{a2}^T/M_0^T は T/T_0 の影響を受け、 T/T_0 が大きくなるに従って低下する傾向を示した。又 M_{a2}^T/M_0^T はスターラップの影響を受けることがわかった。

3. 曲げ剛性、ねじり剛性はひびわれにより低下し、 M_{a2}^T の状態の剛性はひびわれ前に比して曲げ剛性が 0.5、ねじり剛性が 0.3 程度に低下することが認められた。又 $G I_{ti}$ の算定式はほぼ $M_{a1}^T \sim M_{a2}^T$ に対応することがわかった。

5. あとがき

本実験を行うに当り御助力して戴いた中津川氏および林君、井田君、元木君に厚く感謝の意を表します。

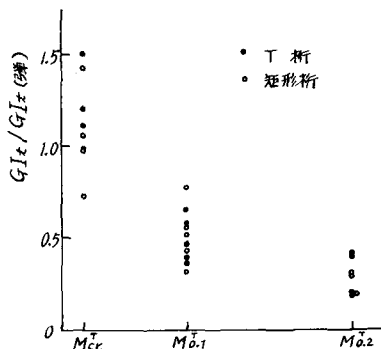


図-13 ひびわれによるねじり剛性低下性状

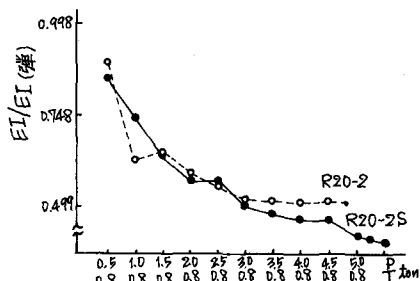


図-10 曲げ剛性低下性状

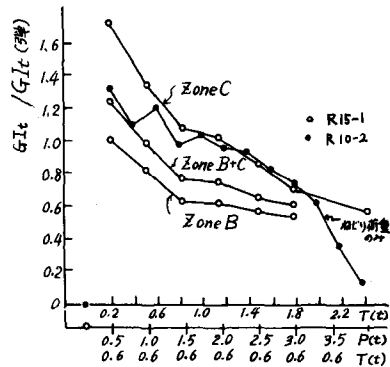


図-11 ねじり剛性低下性状

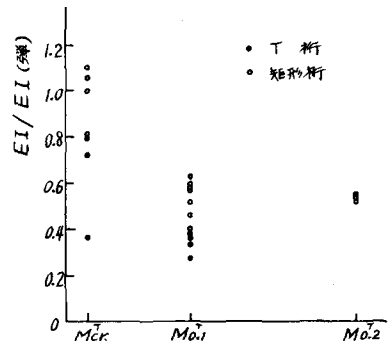


図-12 ひびわれによる曲げ剛性低下性状

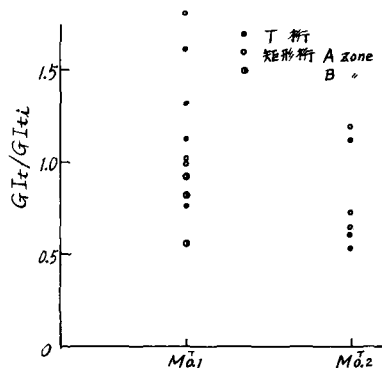


図-14 ひびわれ発生後のねじり剛性