

大口径シールドセグメントの載荷試験

齋藤 二郎
内藤 和章
藤原 紀夫

概 要

この報告は某地下鉄工事に用いられた大口径、鉄筋コンクリートセグメント（外径：10.50m）の載荷試験に関し、試験方法および結果とその評価について述べたものである。試験は曲げ強度試験、継手曲げ破壊試験、ジャッキ推力試験の3項目について実施した。その結果、セグメントは単体としては46.4t・m以上の曲げモーメントに耐え、継手部は32.0t・mの曲げモーメントで破壊した。また、設計ジャッキ推力に対しても十分に耐えた。以上の結果、このセグメントは本工事の1次覆工として十分使用できることが判明した。

1. まえがき

セグメントの載荷試験に関しては、これまで各所で行なわれているが、その都度試験方法も一定せず種々の方法で実施されている^{1),2)}。以下に述べる載荷試験もその1例であるが、単純な仮定のもとに、大口径（外径：10.50m）の鉄筋コンクリートセグメントの載荷試験を行ない良好な結果を得たのでここに紹介することにした。

試験は施主の示した鉄筋コンクリートセグメント製作示方書に従って、約200リングに1回の割合で3回に分けて実施した。試験の内容は（1）曲げ強度試験（2）継手曲げ破壊試験（3）ジャッキ推力試験の3項目であった。いずれも力学的に単純な構造を仮定し、セグメント自身の挙動を調べた試験である。

2. セグメントの構造

セグメントは中子形で、ショック・ベトン社によって製作された。（図-1）に1リングの組み立て図を示す。1リングの総重量は33.14t、そのうちA型セグメント4.05t、B型4.10t、K型0.90tであった。鉄筋量は1リング3.2t、m³当たり266kg、コンクリート設計標準強度は550kg/cm²であった。コンクリートの各種試験結果を（表-1）に、鉄筋の引張り試験結果を（表-2）に示す。

3. 曲げ強度試験

3.1. 試験方法

A型セグメントを（図-2）に示すごとく両端単純支持とし、中央に鉛直荷重(P)を載荷する。載荷は0から10t刻みで、50tまで往復載荷とする。測定項目は（1）A～A断面のコンクリートおよび鉄筋の応力

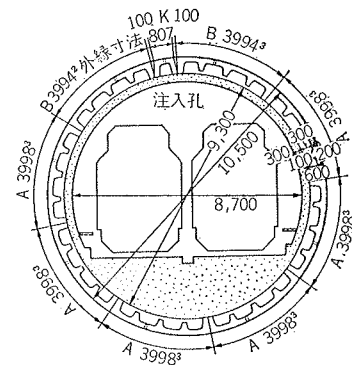


図-1 セグメント組み立て図

用途	材 令 (H)	単位体積重量 (t/m ³)	圧 強 度 (kg/cm ²)	弾 性 係 数 (×10 ⁵ kg/cm ²)
曲 げ 強 度	1	2.43	172	4.07
	7	2.42	571	3.90
	28	2.43	656	4.76
継 手 破 壊	2	2.45	334	4.13
	7	2.45	618	4.37
ジャ ッ キ 推 力	28	2.44	685	4.07
	1	2.47	206	3.22
	7	2.46	615	3.92
	28	2.48	734	5.13

表-1 コンクリートの各種試験結果

鉄筋の種類	原形断面積 (mm ²)	伸 び 率 (%)	降 伏 点 (kg/mm ²)	引張り強度 (kg/mm ²)
φ 9 (SR-24)	63.6	30.7	32.0	48.1
φ 13 (SR-24)	132.7	34.0	28.7	45.0
φ 16 (SR-24)	201.1	30.5	33.4	47.9
D 16 (SD-30)	198.6	25.9	34.8	52.9
D 22 (SD-30)	387.1	25.6	37.1	56.3

表-2 鉄筋引張り試験結果

(2)中央のタワミおよび両支点の移動(3)コンクリート表面のクラック発生状況であった。

使用した計器は次のとおりである。

- (1) 島津 300 t 構造物試験機(REH-300CV)
- (2) 多点デジタルひずみ測定装置 (SD-5F, ASB-60N)

- (3) ストレインゲージ 鉄筋用; KP-6-A1-11
コンクリート用; KP-70-A1-11
- (4) ダイアルゲージ (最小読取値; 1/100mm)

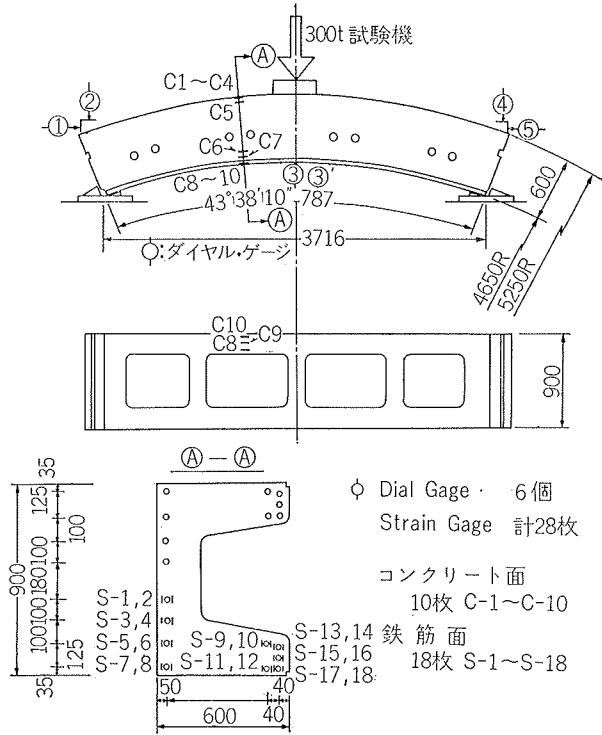


図-2 曲げ強度試験供試体設置図

3.2. 応力解析

3.2.1. コンクリートの引張り応力を無視した場合

A~A断面の応力を(図-3)の記号を用いて解析すると次のごとくなる³⁾。

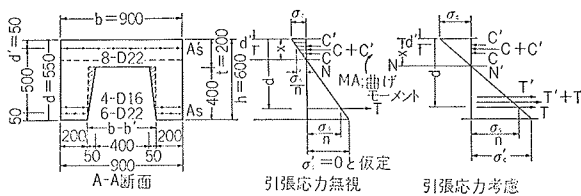


図-3 A~A断面応力図

$$A_s = 31.15 \text{ cm}^2, A_s' = 30.95 \text{ cm}^2, n = E_s/E_c = 5.4, E_c = 3.9 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$$

$$x = -n \frac{(A_s + A_s')}{b} + \sqrt{\left\{ \frac{n(A_s + A_s')}{b} \right\}^2 + \frac{2n}{b} (d \cdot A_s + d' \cdot A_s')}$$

$$= 11.77 \text{ (cm)} \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$I = \frac{bx^3}{3} + n \cdot A_s' (x - d')^2 + n \cdot A_s (d - x)^2$$

$$= 3.70 \times 10^5 \text{ (cm}^4) \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$\sigma_c = \frac{M_A}{\frac{bx}{2} \left(d - \frac{x}{3} \right) + n \cdot A_s' \frac{x - d'}{x} (d - d')} = \frac{M_A}{32010} \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$\sigma_c' = \frac{h - x}{x} \sigma_c = 4.1 \sigma_c \quad (\sigma_c' = 0 \text{ と仮定}) \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$\sigma_s = \frac{n(d - x)}{x} \sigma_c = 19.8 \sigma_c \quad \dots\dots\dots(5)$$

$$\sigma_s' = \frac{n(x - d')}{x} \sigma_c = 3.11 \sigma_c \quad \dots\dots\dots(6)$$

ここに、x; 中立軸距, I; コンクリート換算断面2次モーメント, σ_c ; コンクリートの圧縮応力, σ_c' ; コンクリートの引張り応力, σ_s ; 鉄筋の引張り応力, σ_s' ; 鉄筋の圧縮応力

3.2.2. コンクリートの引張り応力を考慮した場合

A~A断面の応力を(図-3)を参照して解析すると次のごとくなる³⁾。

$$x = \frac{n \cdot A_s' \cdot d' + n \cdot A_s \cdot d + \frac{b'}{2} h^2 + \frac{(b - b')}{2} t^2}{n \cdot A_s' + n \cdot A_s + b' h + (b - b') t}$$

$$= 24.6 \text{ (cm)} \quad \dots\dots\dots(7)$$

$$I = \frac{1}{3} [bx^3 - (b - b')(x - t)^3 + b'(h - x)^3 + n \cdot A_s' (x - d')^2 + n \cdot A_s (d - x)^2]$$

$$= 12.67 \times 10^5 \text{ (cm}^4) \quad \dots\dots\dots(8)$$

$$\sigma_c = \frac{M_A}{I} x = 1.945 M_A \quad \dots\dots\dots(9)$$

$$\sigma_s' = n \frac{x - d'}{x} \sigma_c = 4.30 \sigma_c \quad \dots\dots\dots(10)$$

$$\sigma_s = n \frac{d - x}{x} \sigma_c = 6.67 \sigma_c \quad \dots\dots\dots(11)$$

$$\sigma_c' = \frac{h - x}{x} \sigma_c = 1.45 \sigma_c \quad \dots\dots\dots(12)$$

3.3. 試験結果

3.3.1. A~A断面の応力 一般に、応力とひずみとの関係は $\sigma = E \cdot \varepsilon$ (E; ヤング率) で示される。測定されたひずみは上式を用いてすべて応力に換算した。(表-3), -4) はそれぞれコンクリート表面と鉄筋の応力測定結果の1例である。これらの表の中にはコンクリートの引張り応力を無視した場合の計算値を示しておいた。また、表中の符号(+)は引張り、(-)は圧縮応力を示す。(図-4)は3回の試験結果を比較して示したもので、コンクリートの圧縮側応力 ($\sigma_{c1} \sim \sigma_{c4}$) の平均値と鉄筋の引張り応力 ($\sigma_{s13} \sim \sigma_{s18}$) の平均値だけをPに対してプロットしたものである。また、この図に示した計算値はクラック発生前はコンクリートの引張り応力を考慮し、クラック発生完了後は引張り応力を無視し、その中間は直線で結んだ値である。3回の

載荷重 P	ton	0	2.5	5	7.5	10	12.5	15	17.5	20	0
A-A断面のモーメント M _s	t・m	0	3.428	5.312	10.233	13.710	17.135	20.565	23.993	27.42	0
コンクリート応力 σ _c	kg/cm ²	0	-15.9	-3.0	-45.1	-60.1	-75.2	-90.2	-105.2	-120.3	0
計算応力 σ _s	kg/cm ²	0	-48.8	-71.5	-100.2	-137.0	-183.8	-230.5	-277.3	-324.0	0
測定応力 σ _{s1.1}	kg/cm ²	0	-21.2	-63.0	-106.1	-122.9	-149.1	-171.2	-188.8	-	-
σ _{s1.4}	kg/cm ²	0	-23.1	-65.1	-111.3	-125.0	-147.0	-178.1	-195.0	-	-
σ _{s1.8}	kg/cm ²	0	-21.0	-62.0	-111.3	-127.5	-151.7	-173.5	-170.1	-	-
σ _{s1.11}	kg/cm ²	0	-23.1	-73.5	-103.7	-125.8	-130.0	-150.5	-131.4	-	-
平均	kg/cm ²	0	-22.8	-65.9	-117.4	-153.1	-187.7	-228.1	-	-	-
計算応力 σ _s	kg/cm ²	0	+227.1	+423.6	+831.4	+1198.3	+1563.9	+1927.7	+2294.8	+2165.9	0
測定応力 σ _{s1.11}	kg/cm ²	0	+20.0	+131.1	+293.1	+500.8	+731.8	+1054.1	+1532.0	+2290.1	+4314.9
σ _{s1.12}	kg/cm ²	0	+17.9	+68.3	+244.2	+483.6	+814.1	+1191.1	+1657.7	+226.8	+315.5
平均	kg/cm ²	0	+19.0	+101.4	+267.2	+522.2	+864.1	+1246.9	+1618.0	+1533.5	+239.2
計算応力 σ _s	kg/cm ²	0	+396.5	+453.7	+913.5	+1238.0	+1522.5	+1856.9	+2131.1	+2435.9	0
測定応力 σ _{s1.14}	kg/cm ²	0	+25.2	+215.2	+656.6	+1208.1	+1884.2	+2692.7	+3655.0	+4628.0	+1182.4
σ _{s1.15}	kg/cm ²	0	+27.3	+178.5	+582.8	+874.7	+1073.1	+1295.9	+1487.7	+1518.3	+777.0
σ _{s1.16}	kg/cm ²	0	+25.2	+102.1	+487.2	+734.0	+875.8	+1015.4	+1103.6	+1023.0	+451.7
平均	kg/cm ²	0	+25.0	+156.0	+573.7	+875.7	+1078.0	+1196.2	+1192.1	+1113.3	+738.0

表-3 コンクリート表面の応力測定結果

載荷重 P	ton	0	10	20	30	40	50	40	30	20	10	0
A-A断面のモーメント M _s	t・m	0	7.65	14.10	21.15	28.20	35.25	28.20	21.15	14.10	7.65	0
コンクリート応力 σ _c	kg/cm ²	0	22.0	43.7	65.0	83.0	11.0	88.0	66.0	43.7	22.0	0
計算応力 σ _s	kg/cm ²	0	-68.4	-135	-205	-271	-312	-271	-205	-135	-68.4	0
測定応力 σ _{s1.2}	kg/cm ²	0	-45.2	-100.8	-171.3	-213.6	-206.6	-277.2	-216.3	-151.9	-85.1	-16.8
σ _{s1.4}	kg/cm ²	0	-45.2	-95.6	-163.8	-226.8	-266.7	-278.3	-198.5	-133.5	-72.5	-10.5
σ _{s1.6}	kg/cm ²	0	-46.2	-100.8	-190.7	-272.6	-261.5	-295.7	-195.3	-131.3	-67.2	-7.1
σ _{s1.8}	kg/cm ²	0	-45.2	-68.7	-132.3	-211.1	-239.9	-246.5	-181.7	-120.8	-59.9	-6.3
平均	kg/cm ²	0	-45.7	-93.2	-162.8	-226.0	-237.0	-258.9	-198.0	-131.7	-71.2	-10.2
計算応力 σ _s	kg/cm ²	0	+405	+805	+1213	+1629	+2029	+1930	+1213	+805	+405	0
測定応力 σ _{s1.14}	kg/cm ²	0	+105.0	+210.8	+310.6	+420.0	+4813.4	+1914.3	+1614.0	+1215.3	+811.2	+436.8
σ _{s1.12}	kg/cm ²	0	+78.8	+212.1	+318.9	+350.6	+2162.4	+2025.3	+1713.6	+1327.9	+902.0	+212.6
平均	kg/cm ²	0	+91.9	+261.3	+305.8	+359.8	+1090.0	+1921.9	+1694.3	+1286.3	+823.1	+333.7
計算応力 σ _{s1}	kg/cm ²	0	+415	+835	+1238	+1709	+2230	+1780	+1238	+835	+415	0
測定応力 σ _{s1.14}	kg/cm ²	0	+153.5	+266.3	+406.1	+510.1	+2022.3	+1509.3	+1673.7	+1203.6	+881.0	+456.8
σ _{s1.15}	kg/cm ²	0	+115.8	+329.7	+465.3	+515.7	+1846.5	+1724.1	+1117.5	+1015.8	+611.7	+233.1
σ _{s1.16}	kg/cm ²	0	+102.9	+281.1	+406.1	+452.0	+1295.7	+1834.6	+1533.7	+1232.7	+816.3	+419.4
平均	kg/cm ²	0	+118.1	+325.9	+462.7	+533.4	+1938.5	+1892.0	+1590.3	+1199.7	+799.7	+373.8

表-4 鉄筋の応力測定結果

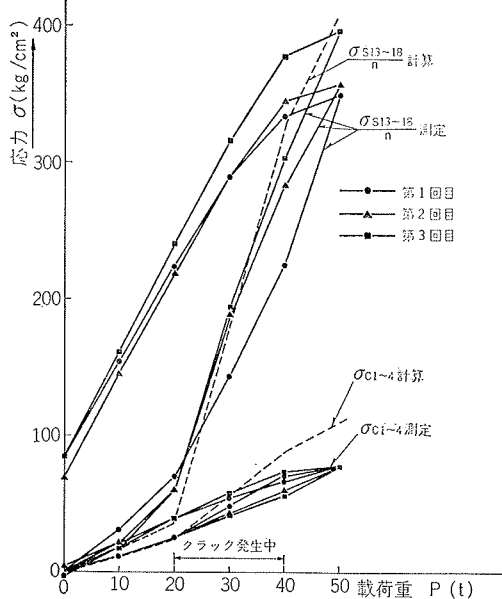


図-4 A-A断面の応力測定結果

試験結果はほぼ一致しており、かつ計算値ともよく一致しているのが見られる。

3.3.2. 中央のたわみおよび両支点の移動 中央に集中荷重(P)を受ける単純梁の中央点のたわみ(δ_{中央})は次式で示される。

$$\delta_{\text{中央}} = \frac{P\beta^3}{48E \cdot I} \dots\dots\dots(13)$$

ここに、 $l=371.6\text{cm}$, $E=3.9 \times 10^5 \text{kg/cm}^2$,

$$I=3.70\text{cm}^4$$

3回の試験結果を上式で求めた計算値と比較して図示すると(図-5)のごとくなる。測定たわみ曲線は磁気ヒステリシスに類した曲線となっている。両支点はPが大きくなるにつれて左右に広がり(最大: 0.3mm)ながら、わずかに沈下(最大0.16mm)した。

3.3.3. コンクリート表面のクラック クラック発生状況を示す写真を(図-6)に示す。

P=20tからクラックが発生しはじめ、P=40tでほぼクラックの発生が完了した。クラックはいずれもへアークラックではりの中央下部に集中して発生し、応力解析で求めた中立軸の位置 $x=11.77\text{cm}$ をこえることはなかった。

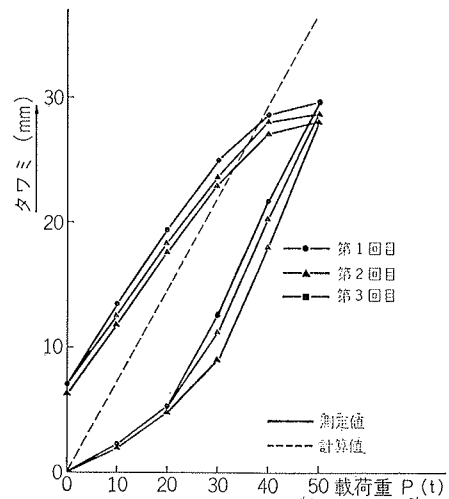


図-5 中央のたわみ測定結果

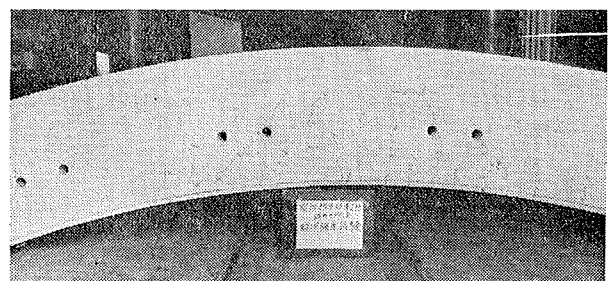


図-6 クラック発生状況

4. 継手部曲げ破壊試験

4.1. 試験方法

A型セグメント2体を(図-7)に示すごとく横ボルト5本により締結(トルク: 50 kg・m)し、両端単純支持として中央継手部に鉛直荷重(P)を載荷する。鉄筋のストレインゲージ貼り付け位置は曲げ強度試験の場合と同じである。(図-8)に横ボルトのゲージ貼り付け詳細図を示す。載荷は0tから2.5t刻みで破壊までとし、破壊後0tまでもどした。測定項目は(1)A~A断面のコンクリートおよび鉄筋の応力(2)中央のたわみおよび両支点の移動(3)継手ボルトの応力(4)コンクリート表面のクラック発生状況であった。使用した計器は曲げ強度試験の場合と同じであるが、ボルト用のストレインゲージはKP-6-1A-11を使用した。

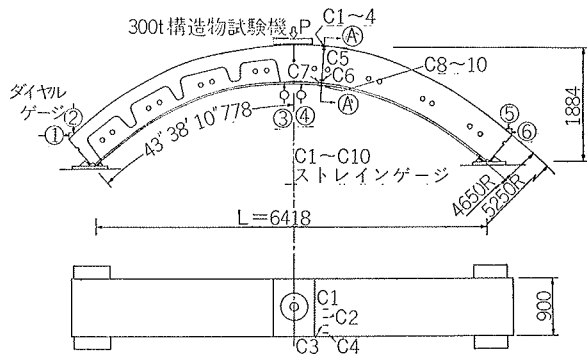


図-7 継手曲げ破壊試験供試体設置図

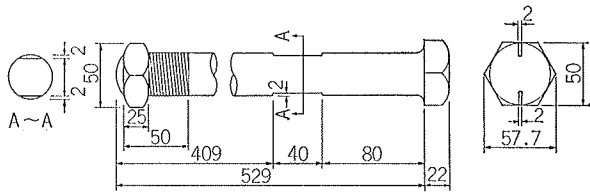


図-8 応力測定用ボルト加工詳細図

4.2. 応力解析

継手部の応力を(図-9)の記号を用いて解析すると次のごとくなる³⁾。

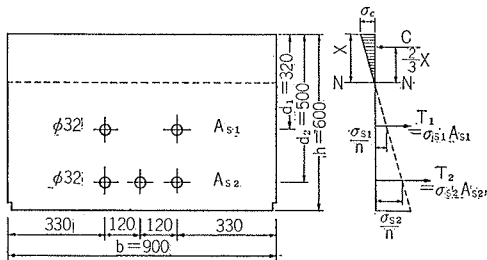


図-9 継手断面応力図

$$C = \frac{1}{2} \sigma_c b x = T_1 + T_2 \quad \dots\dots\dots(14)$$

縦ヒズミは断面の中立軸からの距離に比例するものと仮定し、 $n = E_s/E_c$ を考慮して

$$\sigma_{s1} = n \sigma_c \frac{d_1 - x}{x} \quad \dots\dots\dots(15)$$

$$\sigma_{s2} = n \sigma_c \frac{d_2 - x}{x} \quad \dots\dots\dots(16)$$

(14), (15), (16) 式から

$$x = -\frac{n}{b} (A_{s1} + A_{s2}) \sqrt{\left\{ \frac{n}{b} (A_{s1} + A_{s2}) \right\}^2 + \frac{2n}{b} (d_1 A_{s1} + d_2 A_{s2})}$$

$$= 12.1 \text{ (cm)} \quad \dots\dots\dots(17)$$

一方、モーメントの釣合条件から

$$M_A = \sigma_{s1} A_{s1} \left(d_1 - \frac{x}{3} \right) + \sigma_{s2} A_{s2} \left(d_2 - \frac{x}{3} \right) \quad \dots\dots\dots(18)$$

故に

$$\sigma_c = \frac{M_{\text{中央}}}{\frac{n}{x} \left\{ (d_1 - x) \left(d_1 - \frac{x}{3} \right) A_{s1} + (d_2 - x) \left(d_2 - \frac{x}{3} \right) A_{s2} \right\}}$$

$$= \frac{M_{\text{中央}}}{22800} \quad \dots\dots\dots(19)$$

$$I = \frac{b x^3}{3} + n A_{s1} (d_1 - x)^2 + n A_{s2} (d_2 - x)^2$$

$$= 2.753 \times 10^5 \text{ (cm}^4\text{)} \quad \dots\dots\dots(20)$$

4.3. 試験結果

4.3.1. A~A断面の応力 (表-5, -6) はそれぞれコンクリート表面と鉄筋の応力測定結果の1例である。これらの表の中にはコンクリートの引張り応力を無視した場合の計算値を示しておいた。(図-10)は3回の試験結果を比較して示したもので、コンクリートの圧縮側応力($\sigma_{c1} \sim \sigma_{c4}$)の平均値と鉄筋の引張り側応力($\sigma_{s13} \sim \sigma_{s18}$)の平均値だけをPに対してプロットしたものである。この図に示した計算値は(図-4)

載荷重 P	ton	0	2.5	5	7.5	10	12.5	15	17.5	20	0
A~A断面モーメントM	t・m	0	3.423	5.242	10.283	13.710	17.138	20.565	23.993	27.42	0
計算応力	σ_c	kg/cm ²	-15.0	-23.0	-31.1	-39.1	-47.2	-55.2	-63.2	-71.2	0
測定応力	σ_{c1}	kg/cm ²	0	-4.3	-12.1	-20.0	-27.9	-35.8	-43.7	-51.6	-59.5
	σ_{c2}	kg/cm ²	0	-4.7	-13.7	-25.0	-30.0	-35.5	-41.7	-48.0	-54.2
	σ_{c3}	kg/cm ²	0	-3.9	-12.1	-23.8	-32.1	-37.4	-43.1	-48.1	-53.3
	σ_{c4}	kg/cm ²	0	-4.7	-15.2	-31.2	-40.5	-49.6	-58.5	-67.6	-76.2
平均	kg/cm ²	0	-4.4	-13.3	-25.6	-34.3	-42.1	-51.9	-60.3	-68.6	-76.3
計算応力	σ_{s1}	kg/cm ²	0	-8.7	-13.2	-16.9	-21.6	-26.0	-30.6	-35.2	0
測定応力	σ_{s1}	kg/cm ²	0	-5.1	-15.2	-23.5	-31.9	-38.1	-44.3	-50.3	-56.3
計算応力	σ_{s2}	kg/cm ²	0	0	0	0	0	0	0	0	0
測定応力	σ_{s2}	kg/cm ²	0	+2.7	+5.5	+10.0	+13.2	+16.6	+20.1	+23.0	+26.2
計算応力	σ_{c1}	kg/cm ²	0	0	0	0	0	0	0	0	0
測定応力	σ_{c1}	kg/cm ²	0	+3.1	+6.6	+13.8	+19.9	+26.1	+32.1	+38.5	+45.0
計算応力	σ_{c2}	kg/cm ²	0	0	0	0	0	0	0	0	0
測定応力	σ_{c2}	kg/cm ²	0	+8.2	+15.9	+23.0	+30.1	+37.2	+44.3	+51.2	+58.2
計算応力	σ_{c3}	kg/cm ²	0	+7.4	+13.2	+19.5	+26.0	+32.1	+38.5	+45.0	+51.2
測定応力	σ_{c3}	kg/cm ²	0	+1.7	+28.5	+38.5	+48.6	+58.2	+68.6	+78.6	+88.2
平均	kg/cm ²	0	+6.8	+12.5	+18.4	+24.0	+30.1	+36.1	+42.1	+48.1	+54.0

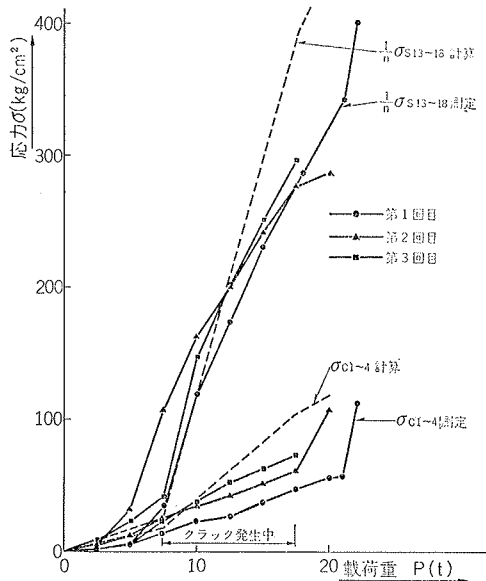
表-5 コンクリート表面の応力測定結果

載荷重 P	10t	0	2.5	5	7.5	10	12.5	15	17.5	20	0
A-A断面モーメントM _s	kg・m	0	3,128	5,212	8,288	12,719	17,150	20,565	23,993	27,42	0
コンクリート引張力	kg/cm ²	0	15.0	3.0	45.1	60.1	75.2	90.3	105.2	120.3	0
計算応力	kg/cm ²	0	45.8	71.5	102.2	137.0	171.8	206.5	241.3	276.0	0
測定応力	kg/cm ²	0	24.2	63.0	106.1	122.9	143.1	171.2	191.6	—	—
σ ₁₋₁	kg/cm ²	0	23.1	65.1	111.3	126.6	147.0	168.1	185.0	—	—
σ ₁₋₂	kg/cm ²	0	21.0	63.0	111.3	131.6	151.7	176.6	193.1	—	—
σ ₁₋₃	kg/cm ²	0	23.1	73.5	113.7	225.8	230.0	190.5	431.1	—	—
平均	kg/cm ²	0	23.8	65.9	117.1	151.1	167.7	170.6	238.1	—	—
計算応力	kg/cm ²	0	221.1	438.8	631.1	1198.5	1753.5	1862.7	1991.6	2,216.0	0
測定応力	kg/cm ²	0	29.0	134.4	524.1	599.8	1,127.8	1,584.1	1,592.8	1,270.1	1,111.9
σ ₁₁₋₁₂	kg/cm ²	0	17.9	68.3	121.2	683.6	827.1	520.1	1,058.2	1,826.8	1,315.5
平均	kg/cm ²	0	19.0	100.1	557.2	822.2	1,011.1	1,216.9	1,208.9	1,153.5	1,890.2
計算応力	kg/cm ²	0	136.5	456.7	913.5	1,113.5	1,152.5	1,125.9	1,211.1	1,243.0	0
測定応力	kg/cm ²	0	25.2	215.3	626.8	1,018.1	1,131.2	1,022.3	1,063.0	1,062.0	1,112.4
σ ₁₁₋₁₃	kg/cm ²	0	21.3	178.5	582.8	1,011.7	1,093.1	1,279.3	1,493.7	1,828.8	1,777.0
σ ₁₁₋₁₄	kg/cm ²	0	25.2	192.1	547.2	731.0	1,016.8	1,045.4	1,093.6	1,023.0	1,517.7
平均	kg/cm ²	0	25.9	167.0	526.9	825.7	1,016.0	1,136.2	1,132.1	1,151.3	1,758.9

表一六 鉄筋の応力測定結果

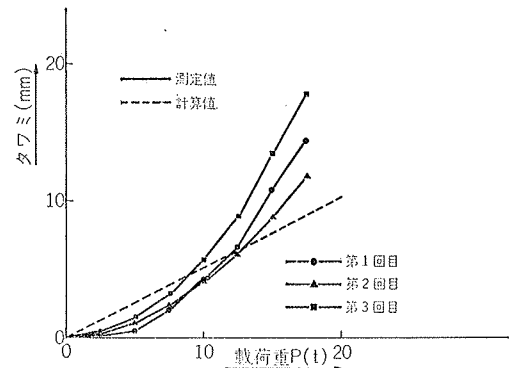
の場合と同じ考え方でコンクリートの引張り応力を考慮した値である。3回の試験結果はほぼ一致しているのが見られる。

4.3.2. 中央のたわみおよび両支点の移動 3回の試験のたわみ測定結果を計算値と比較して図示すると(図一11)のごとくなる。計算値は曲げ強度試験の場合と同様にして求めたが、梁の断面2次モーメントは継手部のそれを用いた。測定値はPが大きくなるにつれて計算値に近づきついにはこえてしまう。これはコンクリートの引張り応力の影響と継手断面が供試体の断面と異なっていることに起因するものと思われる。両支点はPが大きくなるにつれて左右広がり(最大;



図一〇 A～A断面の応力測定結果

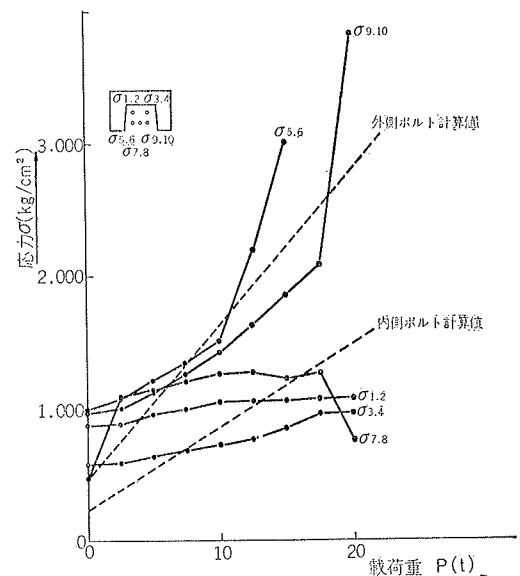
10mm), ながらもわずかに上がった(最大; 3 mm)。上がったのはダイヤルゲージ取り付け位置の関係によるもので、実際には 0.2mm程度下がっているものと



図一〇 中央のたわみ測定結果

思われる。

4.3.3. 中央継手ボルトの応力 (図一12) はボルトの測定応力を載荷重(P)に対してプロットしたものである。ボルトのひずみは締め付け前を0としているので、中央継手断面の作用モーメントはセグメントの自重も考慮して求めた。上部2本と下部中央1本のボルトにはあまり力が作用せず、下部両側2本に大きな力が作用している。同様な結果はダクタイルセグメントの場合にも報告されている¹⁾。Pが小さいときに測定応力が大きいのはボルト締め付け(50 kg・m)の影響である。観察によると、P=20 tで頂部のコンクリートのほうがまず圧壊した。また、残留応力が大きく(250~7200 kg/cm²)でたがこれはP=20 tでボルトも降伏していることを示している。



図一二 ボルト応力測定結果

4.3.4. コンクリート表面のクラック クラック発生状況を示す写真を(図一13)に示す。クラックはP=5 tでまずボルト周辺で発生しはじめ、側部はP=12.5 tから発生した。P=20 tで起こった破壊は

継手リブがはずされるような型で起こった。参考のために継手断面とA～A断面の剛度(E・I)を示すと、それぞれ 5.77×10^{11} , $7.77 \times 10^{11} (\text{kg} \cdot \text{cm}^2)$ である。

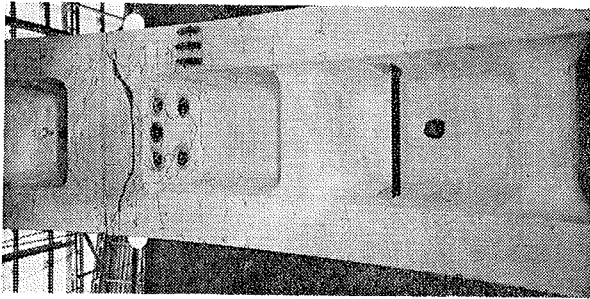


図-13 クラック発生状況

5. ジャッキ推力試験

5.1. 試験方法

(図-14) に示すごとく、反力受けセグメントの上に供試体セグメントを置き、これらを横ボルトで締め付ける。この上からスプレッダーに相当する鉄板を介して載荷する。載荷点の偏心量は設計芯とクリアランスを考慮して23cmとした。載荷位置はリブ芯とリブとリブの中間の2種類とし、前者を第1試験、後者を第2試験と呼ぶ。載荷は0から50t刻みで250tまで往復載荷した。測定項目は(1)コンクリート表面のひずみ、(2)供試体のたわみ、(3)コンクリートのクラック発生状況であった。使用計器は曲げ強度試験の場合と同じである。

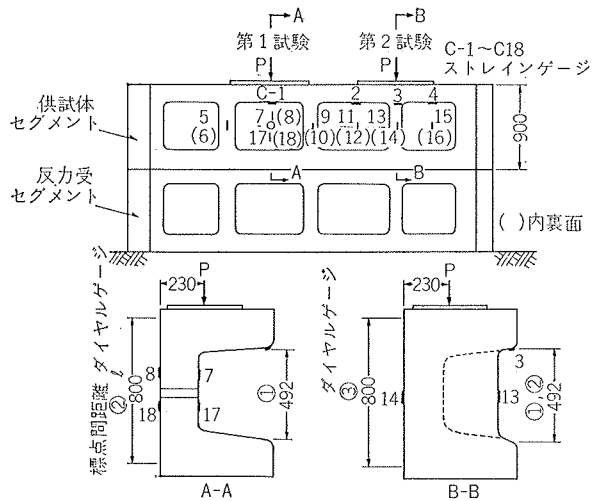


図-14 ジャッキ推力試験供試体設置図

5.2. 試験結果

5.2.1. コンクリート表面のひずみ (表-7), (表-8) に第1試験と第2試験のひずみ測定結果の1例を示す。引張り応力を受けたのは第1試験ではC-1, 第2試験ではC-3とC-2またはC-4の位置だけで、ほ

かはすべて圧縮応力を受けている。また載荷による力の伝達は広範囲にわたっており、3回の試験を比較して考えると、供試体のセットのわずかな差によってかなり変化するようである。

ゲージ	P (t)					
	50	100	150	200	250	0
C-1	+45	+53	+31	+26	+19	-24
2	-21	-37	-52	-65	-80	0
3	-13	-23	-35	-50	-55	-2
4	-19	-40	-61	-74	-91	-9
5	-22	-44	-80	-117	-160	-1
9	-34	-67	-90	-123	-160	+15
6	-9	-26	-32	-33	-37	+2
10	-1	-20	-27	-37	-47	+10
7	-60	-99	-175	-256	-344	-7
17	-24	-30	-69	-115	-160	+7
8	-11	-18	-19	-41	-48	+10
18	-24	-56	-59	-65	-78	+7
11	-4	-11	-26	-37	-58	-14
12	-5	-7	-7	0	+12	+18
13	+5	+3	-6	-21	-32	-16
14	0	0	+2	+4	+2	+7
15	0	0	-1	-2	-5	+3
16	+1	+1	+1	+2	+2	+7

表-7 表面のひずみ (第1試験)

ゲージ	P (t)						
	50	100	150	200	250	300	0
C-1	-3	-9	-13	-16	-18	-22	-1
2	+5	+12	+21	+30	+37	+40	-8
3	+34	+50	+67	+66	+63	+53	-43
4	-7	-14	-23	-21	-12	+1	+3
5	+1	+1	0	0	-1	-4	-4
6	0	0	-2	-2	-1	-2	-1
7	-3	-5	-7	-8	-7	-10	-6
17	+4	+7	+9	+10	+11	+11	+2
8	0	0	0	-1	+3	+3	0
18	-9	-13	-15	-17	-18	-17	-9
9	+3	+5	0	-7	-18	-32	-6
10	-4	-12	-16	-18	-19	-19	-15
11	-15	-34	-57	-83	-109	-141	-30
15	-27	-63	-110	-162	-220	-278	-101
12	-18	-32	-43	-52	-57	-62	-30
16	-14	-29	-40	-40	-34	-28	+6
13	-39	-88	-137	-195	-255	-328	-53
14	-17	-39	-60	-83	-110	-139	-30

表-8 表面のひずみ (第2試験)

5.2.2. コンクリート表面のクラック クラック発生状況を示す写真を(図-15)に示す。クラックはすべてヘアークラックで、中子とリブの境界付近のコーナー部分で $P=200\text{t}$ 以上でも生じたものが多かった。第2試験では3回ともセグメント端部継手部に1本長いクラックが発生した。

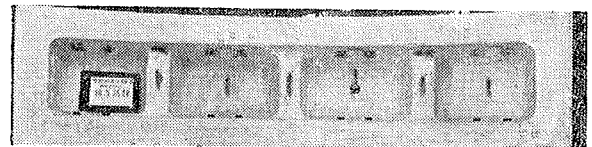


図-15 クラック発生状況

5.2.3. たわみ測定結果 (表-9) —(10) にそれぞれ第1試験と第2試験のたわみ測定結果の1例を示す。いずれも標点間距離の変化を $1/100\text{mm}$ 単位で示し、(+)は伸び(-)は縮みを示す。供試体のセット方法のわずかな差によって異なるが、ひずみ(Δ/l)にして $\frac{1}{3000} \sim \frac{1}{1000}$ の値であった。

荷重位置	0	50	100	150	200	250	200	150	100	50	0
1	0	-5.0	-8.0	-0.5	10.6	23.4	16.5	5.6	-2.5	-11.0	-22.8
2	0	39.0	7.5	16.5	27.9	19.0	20.0	24.0	29.5	40.0	48.0

表一 9 たわみ測定結果 (第 2 試験)

荷重位置	0	50	100	150	200	250	300	250	200	150	100	50	0
1	0	1.2	-1.8	-3.5	-1.4	6.5	12.0	7.0	-1.0	-5.5	-7.9	-8.0	-7.8
2	0	-2.5	7.1	10.2	16.0	24.0	36.0	25.5	30.0	27.0	22.8	20.5	22.0
3	0	4.9	5.4	11.5	14.8	15.5	18.3	15.5	14.0	13.0	10.3	6.5	2.7

表一 10 たわみ測定結果 (第 2 試験)

6. まとめ

大口径のセグメントでは 1 リングを組み立て、種々の荷重条件を仮定して載荷試験を行なうことは困難である。ここでは単純な力学構造を仮定して載荷試験を行なった。その結果をまとめると次のごとくなる。3 回の試験はよく一致し、セグメントは単体としては 46.4 t・m 以上の曲げモーメントに耐え、継手部は 32.0 t・m の曲げモーメントで破壊した。また、設計ジャッ

キ推力に対しても十分に耐えた。以上の結果を設計断面力と比較して、このセグメントは本工事に十分使用できると判定される。今後、でき上がったセグメントに対して上記の載荷試験を行なって設計断面力と比較する方法を用いれば、コンクリートおよび鉄筋の各種管理試験は必要なくなり、管理面はそれだけ楽になるであろう。

最後に、この試験に際してはショック・ベトン社の諸橋氏と錦町工事事務所の故鈴木公雄氏にご協力をいただいた。ここに記して深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 石川・山田：ダクタイトイルセグメントの強度試験 土木施工 6 巻 5 号
- 2) 齋藤・鈴木：セグメント強度試験報告書 大林組技研所内報告書
- 3) 吉田徳次郎：鉄筋コンクリート設計方法，養賢堂版