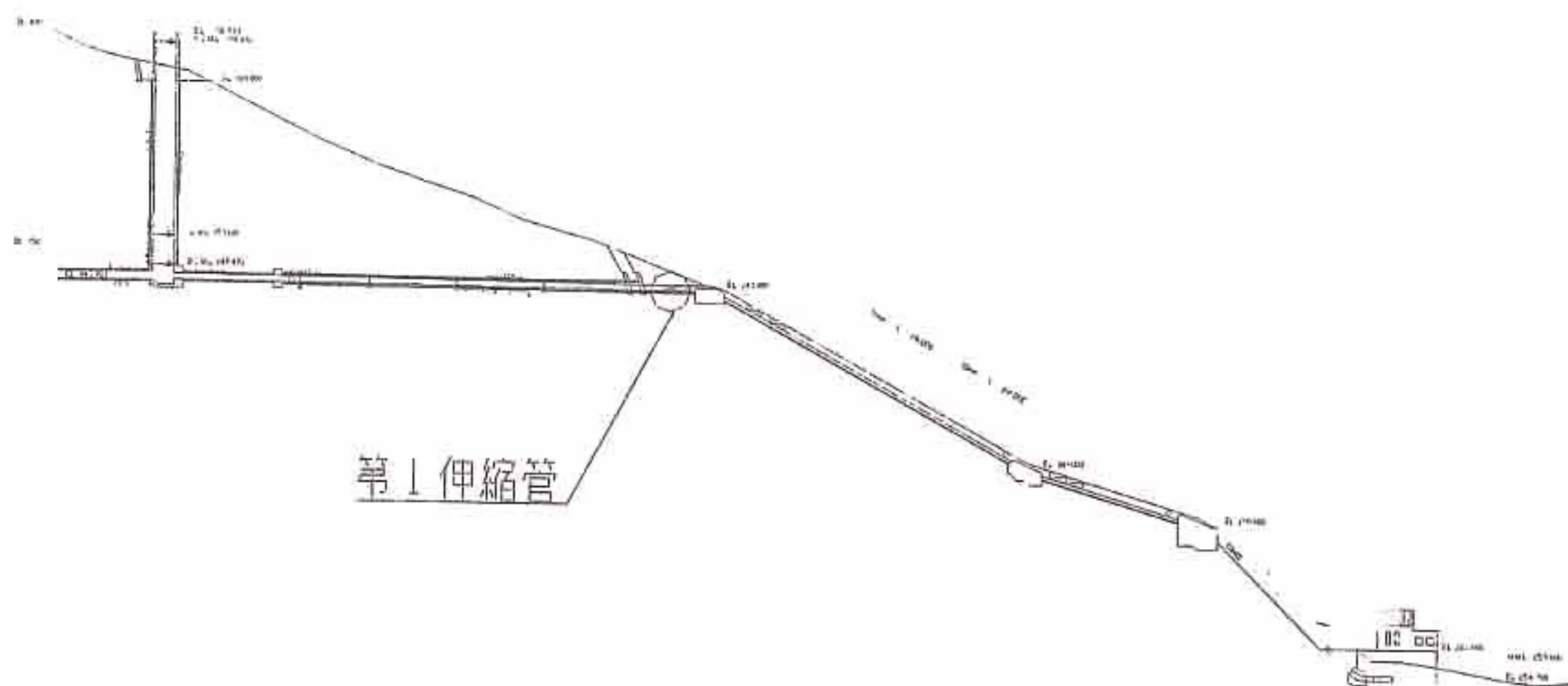


4. 変状原因の推定

4-1 第1伸縮管のズレ



第1伸縮管が、約5cm開いた状況にある。この原因として以下の3点が考えられる。

- ① 第1固定台本体が下流方向に滑動した。
- ② 鉄管と固定台の一体化が壊れ、鉄管が移動した。
- ③ 第1固定台付近の地山全体が、僅かではあるが川側方向に揺れ動いた。

①は、固定台周辺の痕跡から判断すると、

- ・ 固定台上下流面と地盤又はコンクリート面とに隙間、盛り上がりの痕跡無し。
- ・ 左側面は、地山とコンクリート面とに隙間を生じているが、これは埋戻土であること及び左側が谷地形となっていることによる揺れの影響と思われる。よって、固定台の滑動は無いと思われる。

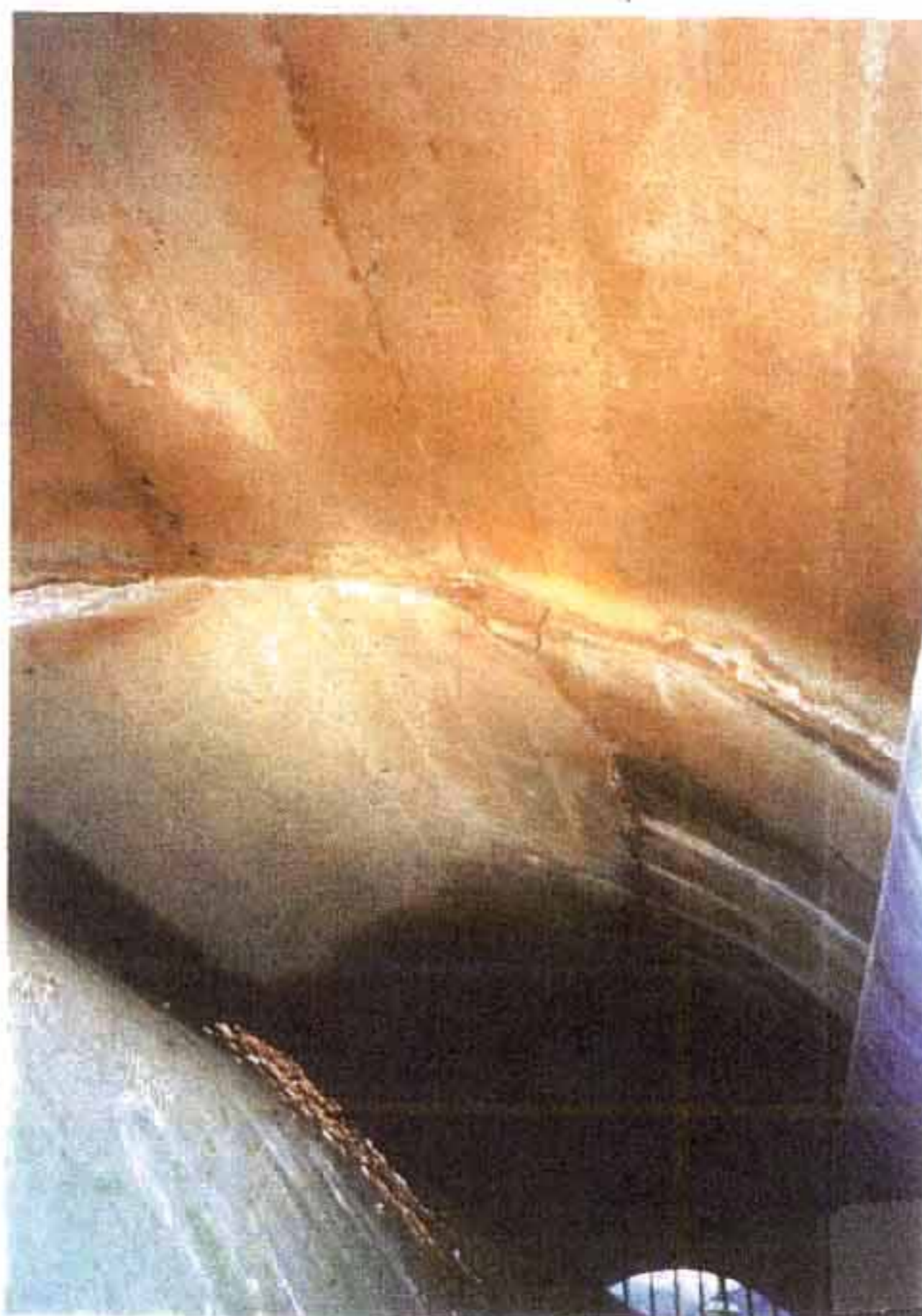
②についても、鉄管は固定台に一体化しており、境界面に異常は見られなかった。

③に関連して以下の点を確認した。

- ・ 監査用トンネル入口よう壁と第1固定台間の基礎面に顕著なひび割れは見られなかった。左右のよう壁も同様にひび割れは無い。
- ・ 監査用トンネルの一番奥の壁と鉄管に隙間・ひび割れ等の異常は無く、固定されていた。
- ・ 監査用トンネル入口から上流約60m間は、トンネルコンクリート横目地全てに1～5mmの開きが生じていた。(次頁写真参照)
- ・ 更に、監査用トンネル入口から40m間の天端コンクリート及びインバートコンクリートに縦方向のひび割れ(1～3mm)が生じていた。(次頁写真参照)
- ・ 第1伸縮管直上流側のロッカー支承部が地山と共に川側に少し移動した痕跡を呈している。



ア・子線
打線部開き：



縦断方向クラック

水圧鉄管

以上の点から、第1伸縮管の伸びの原因は、③の第1固定台付近の地山に対し、地震動による圧縮力が川側方向に働いたことによる地山変位の影響と考えられる。

理由は、

- ・ 第1固定台本体は、滑動していない。
- ・ 第1伸縮管より上流側の管は、監査用トンネル奥の壁で地山に固定されているから動かない。
- ・ 監査用トンネルにおいて、横断方向の打継ぎ目地が開いていた。これは、地山の川側への変位を示している。
- ・ 監査用トンネル内のロッカー支承は川側へ少し傾いている。
- ・ 地山変位の影響は、第1固定台下流部のような壁及び鉄管路インバートコンクリートのクラックに表れている。

監査用トンネルのアーチ部のクラックは、地震の揺れに伴い監査用トンネル上部の鉛直方向の荷重が増加し、このため許容応力を越え、縦方向にひび割れが生じたものと推察される。



No. 5 左側ロッカー支承

下流側
(川側)

4-2 第3伸縮管のズレ

第3伸縮管は、上部が約1cm 開き、塗装面が剥げ落ちている。下面の塗装面に剥げ落ちは無。

第2, 第3固定台の調査の結果は以下のとおりである。

- ・鉄管とコンクリートの境界面に問題は無く, 一体化している。
- ・固定台と周辺コンクリートとの間に隙間, 盛り上がりは無く, 滑動した形跡も無い。



塗装が残っている部分の境界面を見ると, やや盛り上がった跡が見られ, 第3伸縮管のズレの理由は, 一旦縮んだ後開いたものと思われる。上面塗装が剥げた理由は, 鉄管の重量により上面鉄板が接触して擦れたためと考えられ, 下面は間隔が開いていたため剥げ落ちなかったと推察される。

4-3 付帯構造物（階段，よう壁）

第1固定台より少し下流側の階段，よう壁にクラックが認められるが，これは地震動による揺れと地山圧縮力がこのあたりに作用し，一部はせん断破壊を生じたものと推察される。



右側階段，インパクト
張コンクリートのクラック



左側擁壁，クラック

5. 安定性・安全性について

5-1 伸縮管の伸縮量

伸縮継手及びロック支承の機能，構造を説明した資料（水門鉄管技術基準から抜粋）を7. 添付資料に示す。

温度変化による伸縮管の継手部滑動距離は，基準によると次式で与えられる。

$$Q = L \cdot \alpha_s \cdot \Delta T$$

ここに，L：アンカブロック間の距離

α_s ：鋼の線膨張係数 $=1.2 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

ΔT ：温度変化（ $^\circ\text{C}$ ）

現地での温度変化を一般的な値として $-10^\circ\text{C} \sim 40^\circ\text{C}$ とすると

平均では $15^\circ\text{C} \pm 25^\circ\text{C}$ （ ΔT ）となる。

滑動距離（Q）は，第1伸縮管上流水圧鉄管長を100mとすると

$$Q = 10,000\text{cm} \times 1.2 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \times 25^\circ\text{C} = 3\text{cm}$$

更に基準では5cm以上の余裕をつけるものとされている。

設計上伸縮量は， $Q = 3\text{cm} + 5\text{cm} = 8\text{cm}$ 以上必要となる。

これに変位量5cmを加えると13cmとなる。

当時の竣工図面から，伸縮量は20cmとして設定されており，第1伸縮管5cmの移動量では特に安全性に問題となるものではない。

水圧鉄管の温度は，通水時は主として水温に左右され，断水時には気温によって定まり，日光に晒される場合には直射光の影響を受ける。

当発電所は，貯水池内の低い水位から取水しており，このあたりの水温変化は比較的小さく，冬季において 5°C 程度とすれば通水時には縮む方向にあり，今後伸縮量は調査時より少し増加するものと思われる。

第3伸縮管は，伸縮量も1cmと少なく，塗装面の状況から元に戻ったような動きの痕跡も見られ，今後は運転時水温変化に見合った伸縮を呈し，安全性に問題となるものではない。

5-2 ロック支承の変位

(1) 第5リングガータ下のロック支承

第1伸縮管に最も近い第5リングガータ下の左側ロック支承は，表面塗装の剥げた状態や位置決め鋼板の傾きから下流側に移動したような形跡が見られる。下流側スリップ防止ボルトは破損して無くなっている。右側ロック支承のスリップ防止ボルトは両側とも残っている。

リングガータを支えるロック支承の長さは，図面から13cm（上下流6.5cmの可動長）あり，この長さの根拠は，概ね計算上の伸縮量の2倍程度とされている。

ロックカ支承基礎が、下流方向に仮に5 cm 移動、位置決め鋼板の中心が1 cm 移動した時の状態を、次頁図5-1に示す。

この状態では、6.5 cm のうち5 cm すでに移動したと考えれば、残り1.5 cm に加え0.5 cm の中心移動があるため約2 cm 程度の伸縮量が限界値となる。夏場は鉄管が伸びるためロックカ支承の傾きを戻す方向に作用するが、冬場は縮むため更に傾く方向に作用する。

計算上は、現在の貯水池内水温から15℃以内の低下であれば問題は無い。恒久的な対策は、支承部基礎の移設であるが長期の断水（抜水）や伸縮管の取り外し等が必要となる。

(2) 第8リングガータ下の右側ロックカ支承

第8リングガータ下の右側ロックカ支承は、位置決め鋼板の位置や支承板の露出状況から地震時リングガータ底部が少し浮き上がり、下流側に移動したような形跡が見られる。しかし、スリップ防止ボルトはそのまま残っている。左側ロックカ支承はこのような痕跡は無い。

この状況を、次頁図5-2に示す。

この状態では、ロックカ支承の受けが限界に近い位置にきており、早い段階での対策が求められる。

5-3 監査用トンネルのクラック

監査用トンネルアーチ及びインバート部のクラックは、上部地山に地割れ等の変状も無く、荷重の増大要因が無い場合、進行性のものではないと思われる。

地山の挙動（地震による鉛直力、地盤反力の作用）の影響を受けて発生したものと思われ、経過観察は必要であるが直ちに対策を必要とするものではない。

5-4 安定性・安全性

よって、水圧鉄管路全体について、周辺地盤及び構造物の状況から直ちに安定性・安全性に特に問題となるものは見られない。

しかし、以下の点の対策が望まれる。

- ① 第8リングガータ下の右側ロックカ支承の復旧
- ② リングガータに衝突している階段及び張コンクリートの除去（温度上昇時、鉄管が伸びようとした時に障害となり、鉄管に歪みが生じる恐れがある。）

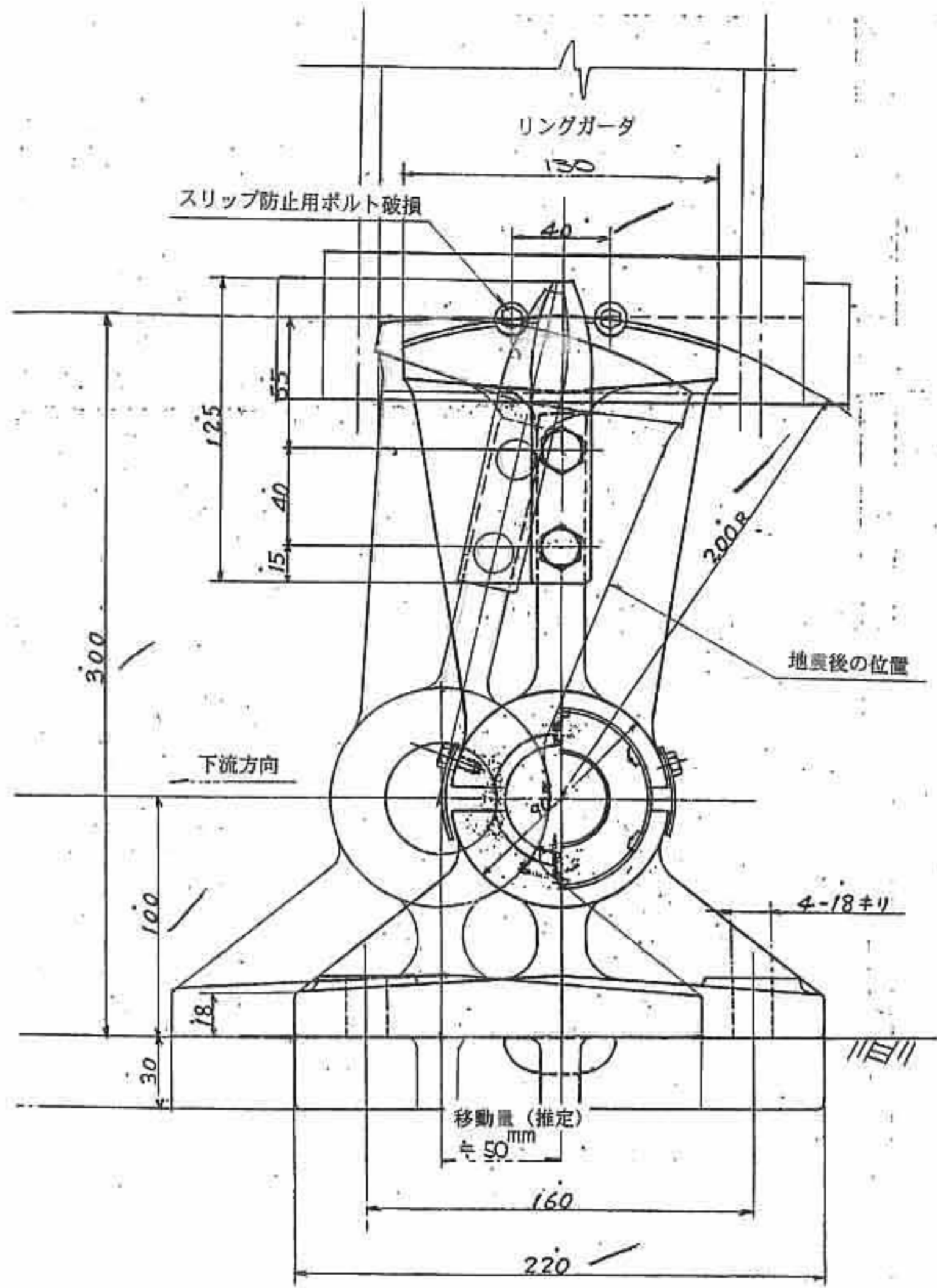


図5-1 No.5左側ロック支保

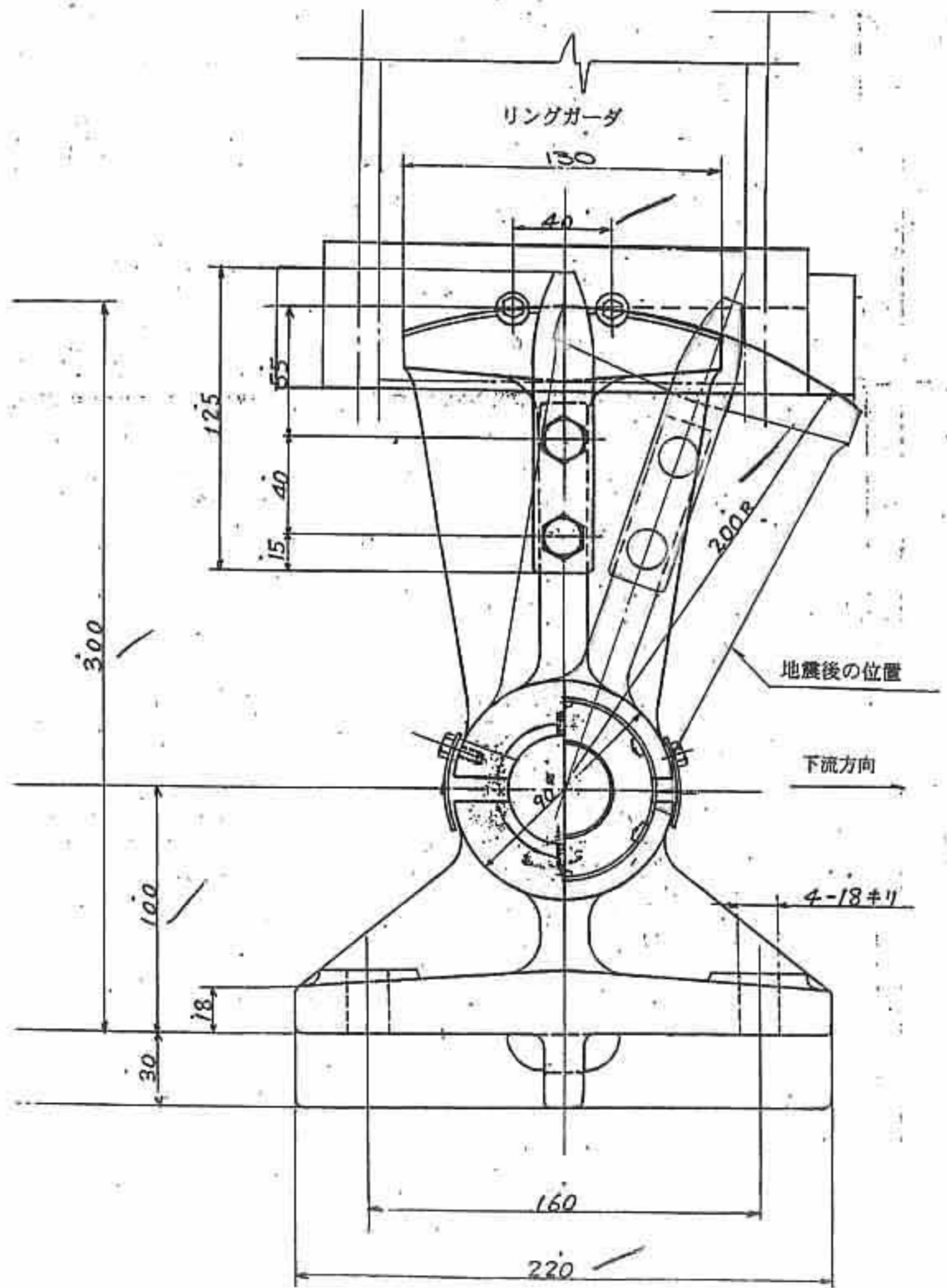


図5-2 No.8右側ロック支保 20

6. 今後の課題

鳥取県西部では、未だ余震が続いている。今後、発電所保守管理の際に、監視が望まれる箇所及び項目を以下に示す。

- ① 伸縮管の伸縮量（貯水池内水温も）
- ② 水圧管路監査用トンネル目地の開き
- ③ 水圧管路監査用トンネルアーチ及びインバート部縦方向のひび割れ幅と長さ

また、長期的観点から水圧鉄管路の現状の把握及び今後の監視に資するため以下の調査も望まれる。

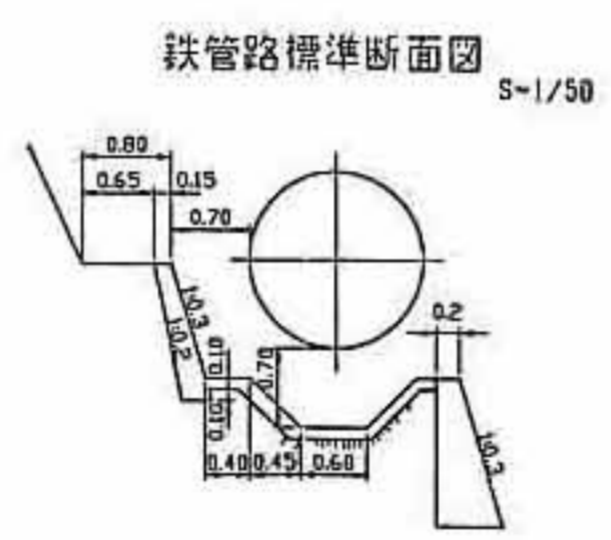
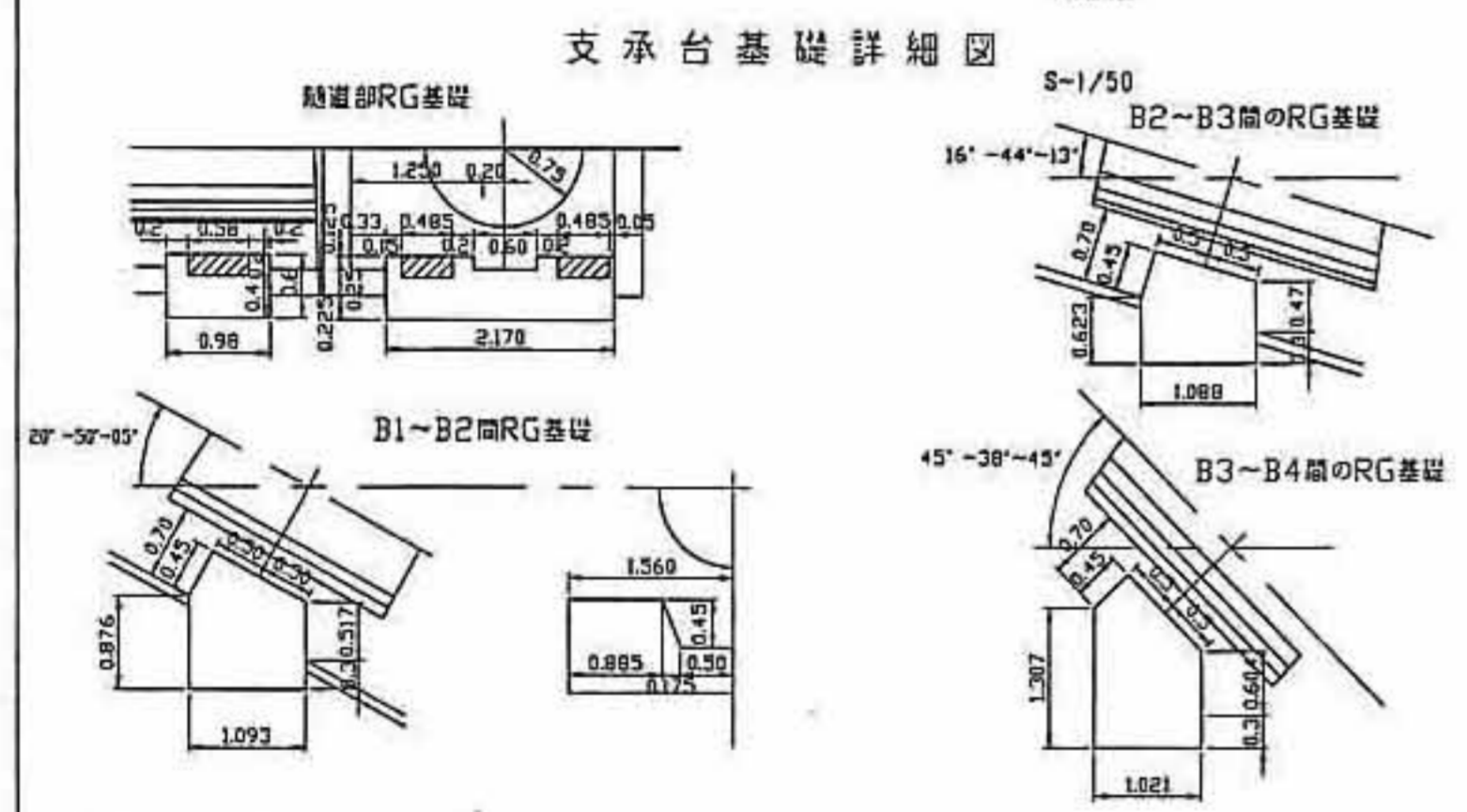
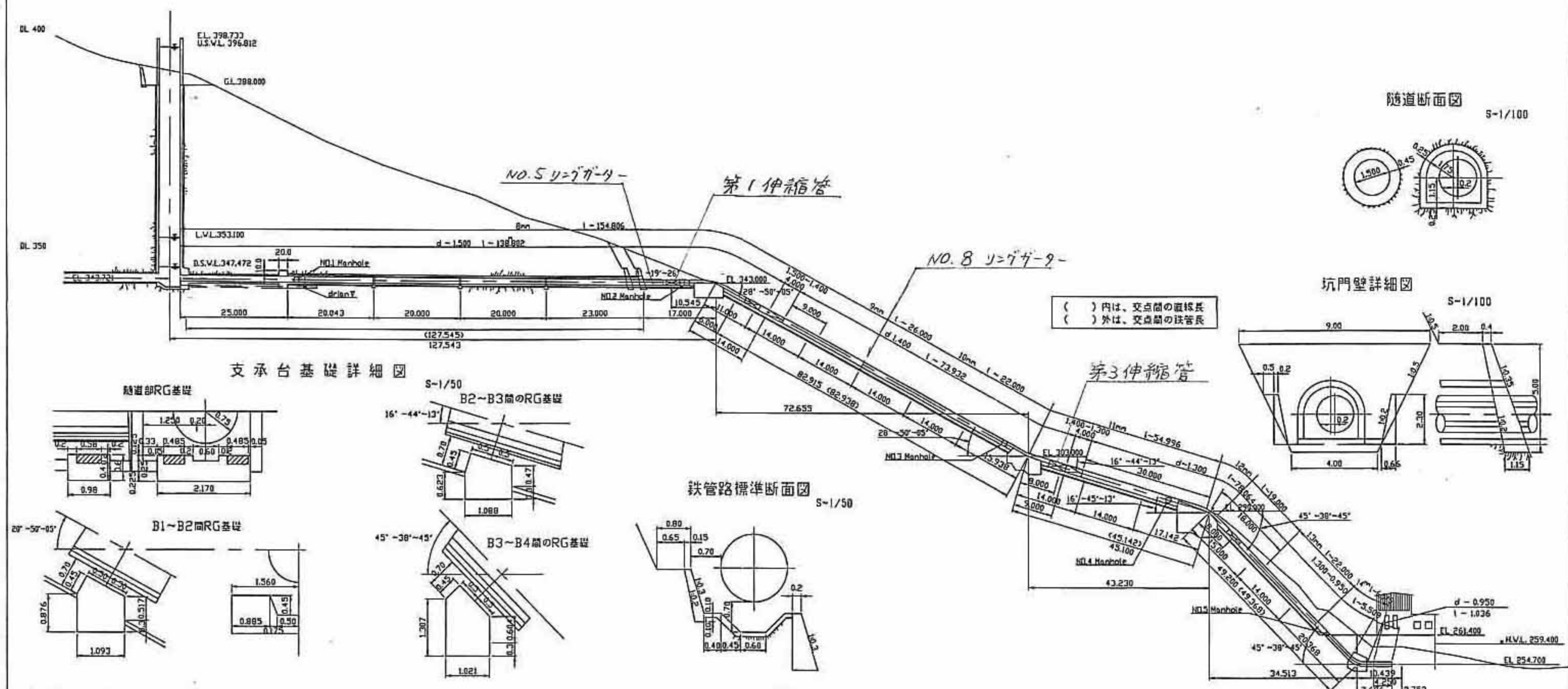
- ・ 水圧鉄管路中心線測量
- ・ 水圧鉄管路水準測量（間接）

7. 添 付 資 料

日野川第一発電所 第6~1~2号圖
 水圧鉄管構造圖
 枚ノ内其ノ 縮尺
 承認 設計 写圖
 製作年月日 昭和 年月日
 鳥取県企業局

水圧鉄管路縦断面図

変更認可圖



継手	透視距離	地盤高	計測高 (山頂中心)
S 6	0	398.798	
S 5	5	5.000	396.408
S 4	5	10.000	394.453
S 3	5	15.000	393.281
S 2	5	20.000	392.313
P 0'	5	25.000	391.407
P 0	4.977	29.977	390.476
P 1	7.356	37.353	387.149
P 2	10.410	47.413	380.995
P 3	14.440	62.183	374.700
P 4	13.795	75.978	369.282
P 5	20.432	96.410	362.886
P 6	10.675	107.085	358.280
P 7	17.590	124.675	353.327
P 8	22.868	152.543	342.641
P 8'	2.000	154.543	342.641
P 9	5.000	159.543	339.305
P 10	8.968	168.552	334.505
P 11	9.122	177.674	329.027
P 12	8.556	186.230	324.346
P 13	14.840	201.070	314.871
P 14	13.466	214.536	308.517
P 14'	6.244	220.780	305.078
P 15	4.000	224.780	303.016
P 15'	4.000	230.780	301.382
P 16	9.466	239.246	298.464
P 17	11.771	250.017	295.304
P 17'	10.000	259.928	291.928
P 18	8.000	268.017	289.792
P 19	2.202	270.219	288.807
P 20	3.405	273.624	286.342
P 21	15.681	289.305	272.329
P 22	4.181	293.486	267.722
P 23	2.237	295.723	266.278
P 23'	5.326	300.049	262.588
P 23''	1.481	302.530	254.700
P 23'''	1.019	303.549	253.790
P 24	2.500	306.049	251.699
P 24'	6.928	312.969	258.764
P 24''	0.128	313.097	258.764
P 26	18.100	331.197	

7-1 水門鐵管技術基準（抜粋）

水門鉄管技術基準

水圧鉄管・鉄鋼構造物 編

—付解説—

$$\phi_3 = \phi_2 \left\{ 2 - \frac{1+\nu}{2} \left(1 - \frac{1}{\kappa} \right) \right\} \left(1 - \frac{1}{\beta^2} \right)^2 + \frac{2(\beta^2+1)}{\kappa \beta^4 (\beta^2-1)} \right. \\ \left. + \left[1 - \frac{1+\nu}{6} \left(1 - \frac{1}{\kappa} \right) \right] \left(1 - \frac{1}{\beta^2} \right)^2 + \frac{1}{3\kappa \beta^4} \left[(\beta^2-1)^2 + \frac{4}{\beta^2-1} \right] \right\}$$

ここで、 $\beta = \frac{a+l}{a}$, $\kappa = \frac{b}{l_1}$

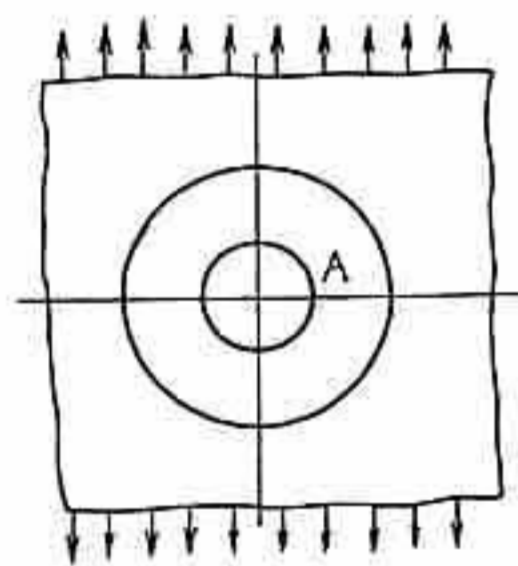


図-1-38-3 円形穴の補強

また、 $A_2 = (b-l_1)t$, $A_1 = l_1 a$ とおけば

$$\beta = \frac{A_2}{A_1} \cdot \frac{1}{(\kappa-1)} + 1$$

ここで ζ_c と A_2/A_1 の関係を κ をパラメータとして図示すれば図-1-38-4 のようになる。

円形穴を補強した場合の集中係数 ζ_c は、 ζ_c に次の係数 α を乗ずればよい。

$$\alpha = \frac{1+2\frac{a}{b}}{3}$$

この集中応力は極めて局部的であるので、第19条に示す許容応力の割り増

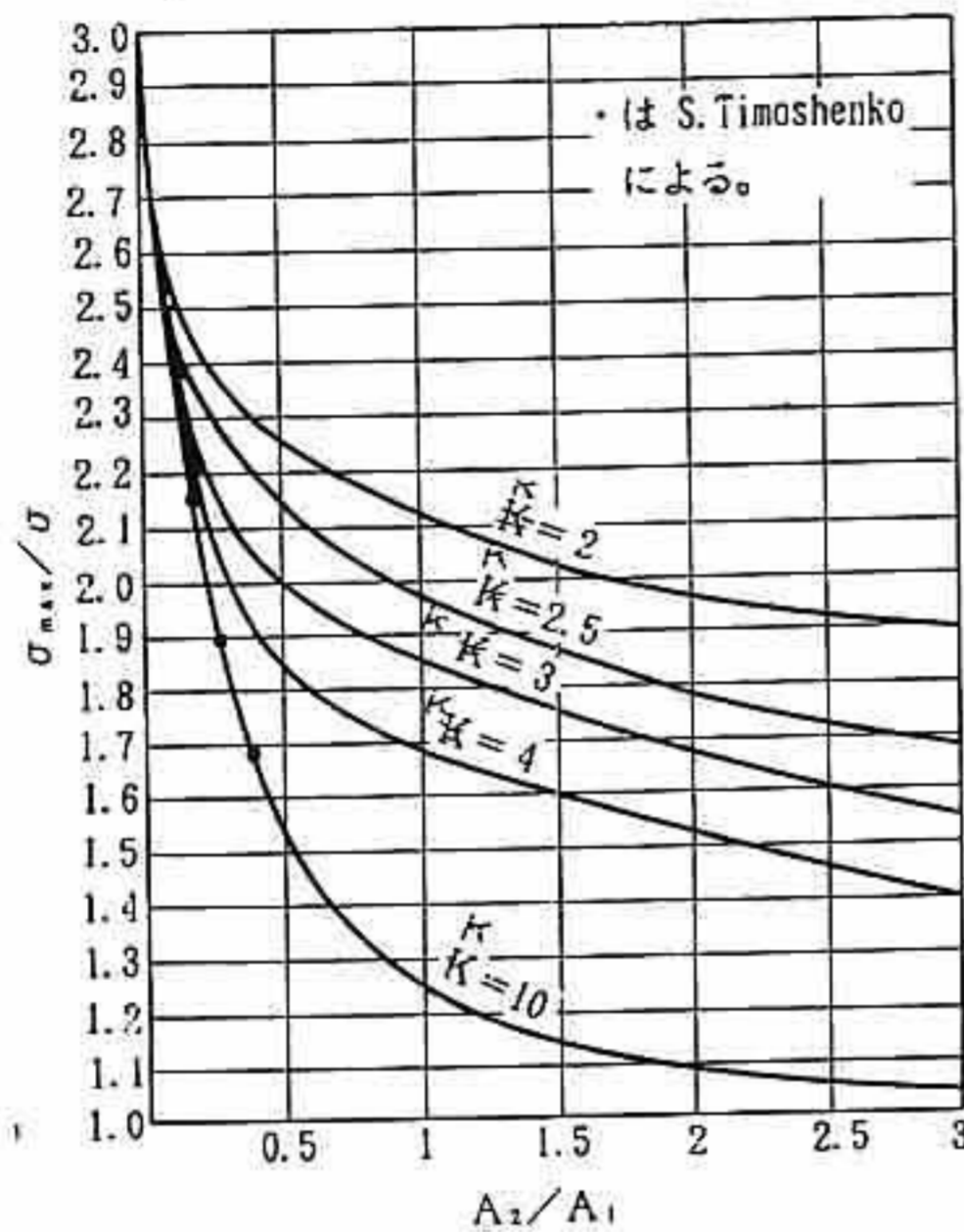


図-1-38-4 穴の補強

しが適用できる。ただし、 A_2/A_1 は100%以下にならないようにすることが望ましい。また、長軸を管軸方向におくと係数 α が大きくなるので、長軸を円周方向におくか、あるいは円形穴とすることが望ましい。しかし、あまり高圧でない位置で管の斜下方にマンホールをつける場合は、出入りの容易なように長軸方向におくことも行われている。

空気管等の小口径の管を取付ける場合は、空気管自体も補強に役立つので穴の断面積の100%を補強板で置換えればよい。

また、JIS B 8243「圧力容器の構造」によれば、計算厚さ10mm以下の板に設けられた単独の穴で呼び径3B以下の管または、外径90mm以下の取付物を溶接する場合や、計算厚さ10mmを超える板に設けられた単独の穴で、呼び径2B以下の管または、外径61mm以下の取付物を溶接する場合等は、管胴の補強を要しないとされている。ただし、露出管で管軸方向に圧縮応力を生じる場合は、応力集中係数がボイラに比べて不利となるので注意を要する。

第5節 付属設備

(伸縮継手)

第39条 主要耐圧部に温度変化その他の外力により、安全に支障をきたす管軸方向の応力及び変形を生ずるおそれがある箇所には、伸縮継手を設けなければならない。

2. 伸縮継手は、十分な強さ及び水密性をもち、かつ、伸縮にたいして十分にその機能を発揮できるような構造としなければならない。
3. 伸縮長さの計算に用いる水圧鉄管の温度変化の範囲は、現地の最高及び最低気温を考慮して決定しなければならない。
4. 滑動式伸縮継手長さは、計算値に対して5cm以上の余裕をつけなければならない。

〔解説〕 水圧鉄管の温度は通水時は主として水温に左右され、断水時には気温によって定まり、日光に曝される場合には直射光の影響を受ける。伸縮継手の主な目的は温度変化に応じて管軸方向の伸縮を可能とし、いちじるしい応力が生じないようにすることであるが、別に据付けのさいに管長を調整するのにも役立つ。一般に使用されている伸縮継手は、管軸方向の伸縮のみを許容するスリーブ形式のものであり、据付上の理由からアンカブロックの直下流か、水平に近い管路では両アンカブロックの中央に設置するのが普通である。

2. また、管が相対的変位の予想される二つの構造物を通る場合、管軸方向及びそれに直角方向の移動も許す伸縮可撓継手 (Expansion and deflection joint) を必要とする。

このような管軸方向及びそれに直角方向の移動を許容する継手には、スリーブカップリング形式が採用されている。

スリーブ形伸縮継手は、図-1-39-1に示すようにはめこまれた二つの管、即ち内外のスリーブの間でん充部 (Stuffing box) に漏水止めパッキンを挿入し、パッキングランド (Packing gland) で押し込む構造となっている。パッキンには角編みひもにグリースを十分に浸みこませたものを4~8個、並びに丸ゴムパッキング1~2個併用したものを一般に使用している。内側のスリーブはパッキンによる外圧に耐えるように設計しなければならない。

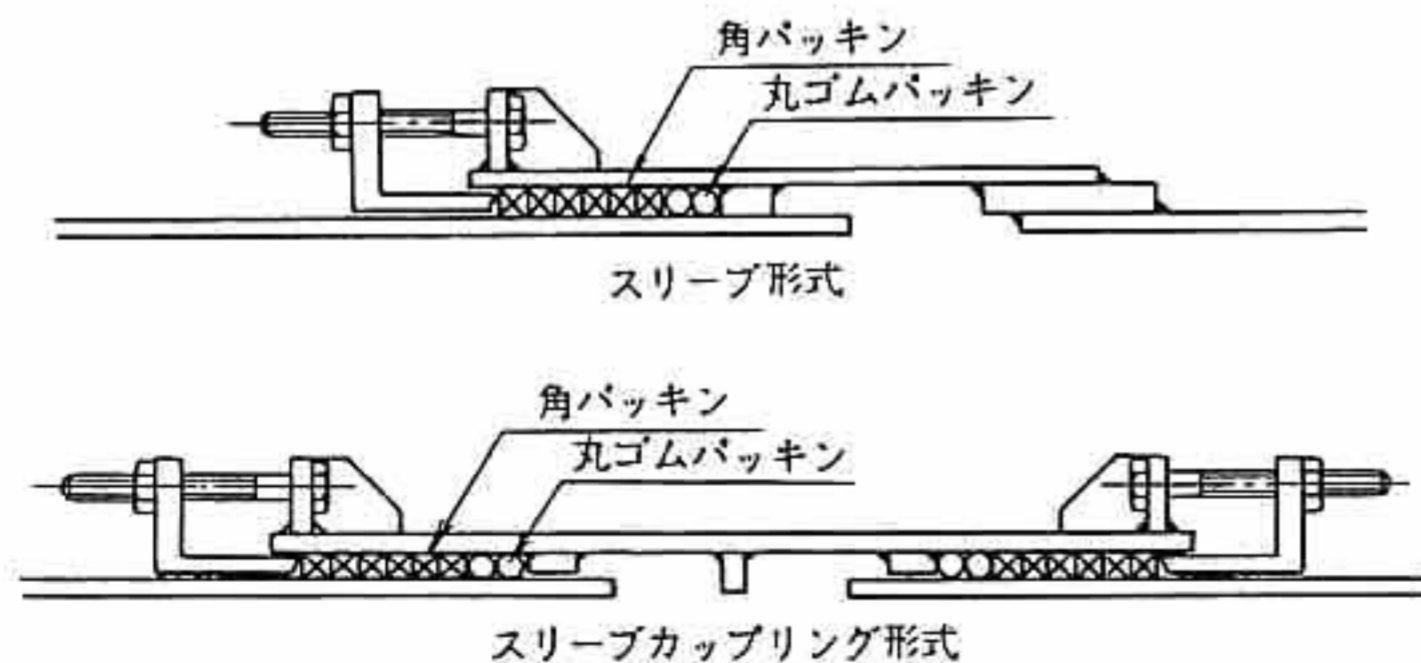


図-1-39-1 伸縮継手の例

内外面スリーブの滑動部は再塗装が困難であるために発生しやすいので、内側スリーブの外面にステンレスクラッド鋼を使用するか、メタリコン加工を行う等腐食を防ぎ滑動をよくすることが望ましい。

3. 温度変化による伸縮継手の滑動距離 l は次式で与えられる。

$$l = L \cdot \alpha_s \cdot \Delta T$$

ここに、 L : アンカブロック間の距離

α_s : 鋼の線膨張係数 $= 1.2 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

ΔT : 温度変化 ($^\circ\text{C}$)

上式の計算に用いる鉄管の温度変化の範囲は、現地の最高及び最低気温を考慮して決定しなければならない。特に空虚時に直射日光をうける管の温度は 60°C にも達するので注意を要する。空虚時に直射日光をうける場合の最高温度については、種々の観測資料が発表されているがその一例として次の実験式¹⁾がよく使われる。

$$T = 4 + \frac{27}{19} t$$

ここに、 T : 空虚時の管が直射日光をうける場合の最高温度 ($^\circ\text{C}$)

t : 大気の温度 ($^\circ\text{C}$)

又、空虚時の鉄管が直射日光をうけた場合の気温に対する鉄管温度と塗装の効果の一例を図-1-39-2²⁾に示す。

4. 滑動式伸縮継手の余裕については、構造上の安全性を保つためと据付上の調整を考慮して前述の式による計算値に対して 5 cm 以上と規定した。

1) 土木工学ポケットブック、第27編、鉄道保線、P2837、山海堂発行

2) 須藤堯、ペンストックのコールタール塗装について、水門鉄管No.4.1958.

表-1.44-1 アンカボルトの許容付着応力

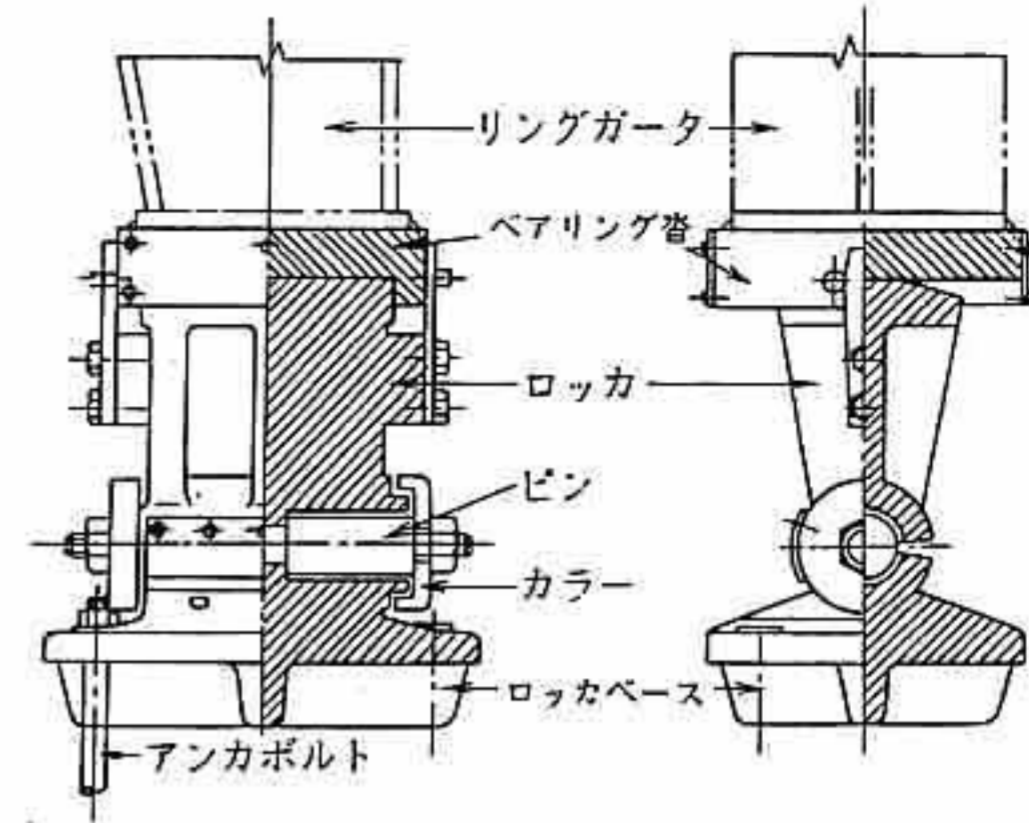
鋼棒の種別	コンクリートの28日設計基準強度 σ_{ck} N/mm ² [kgf/cm ²]			
	17.7 [180]	23.5 [240]	29.4 [300]	39.2 [400]
普通丸鋼	0.69 [7]	0.78 [8]	0.88 [9]	0.98 [10]
異形丸鋼	1.37 [14]	1.57 [16]	1.77 [18]	1.96 [20]

(支台の可動部)

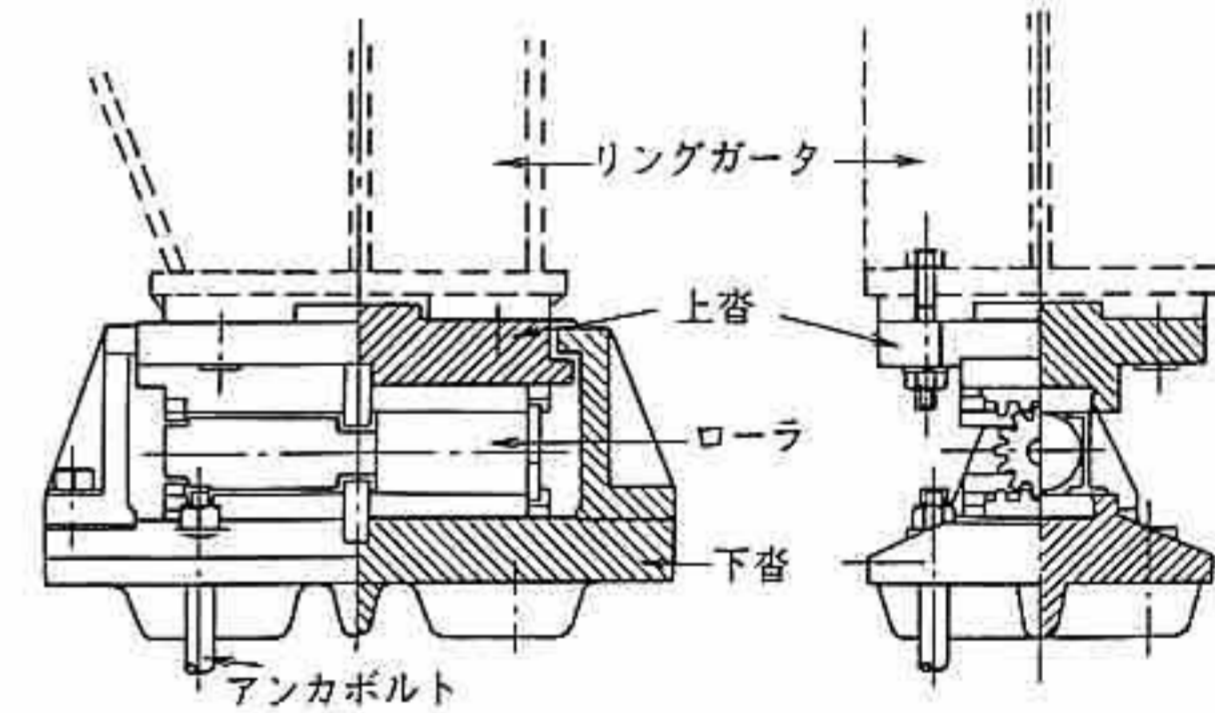
第45条 支台の可動部は、水圧鉄管が伸縮にさいして安全に、かつ、円滑に移動できるような構造としなければならない。

[解説] 鉄管の支持形式としては、サドルサポート形式とリングサポート形式とに大別される。サドルサポート形式は比較的小口径の水圧鉄管に、リングサポート形式は比較的大口径の水圧鉄管に採用される傾向がある。管の支持形式・支承の種類等の選定は、水圧鉄管の重要度・安全度・経済性等を考慮して決定すべきである。

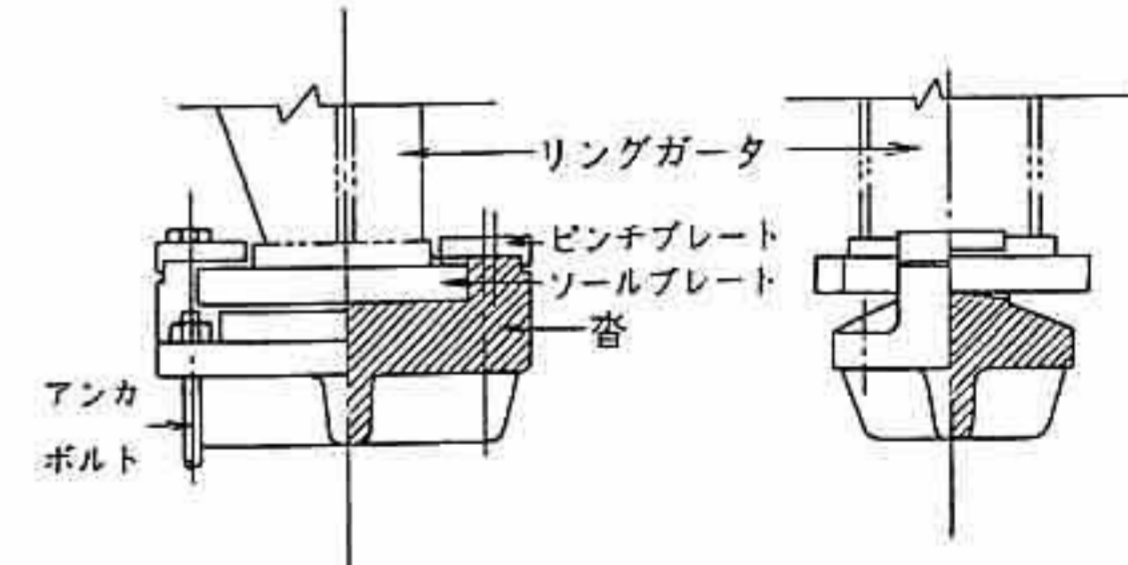
サドルサポート形式にはコンクリートサドルと鋼製サドルとがあり、後者はトンネル内又はダム堤体内等の特殊な場合の支持に使用されている。コンクリートサドルの支承には、コンクリートに直接接触して支持されるもの、管と支台との間にサドルプレートを入れて支台コンクリートにプレートを固定したもの、サドルプレート上面に潤滑材を使用したもの等がある。サドルサポート形式はリングサポート形式に比べて支台部での管の変形が大きいいため、水車部で発生する圧力変動による管の振動が生じやすい。従って管径に比べて板厚の薄い場合のサドル支承は特に注意が必要である。またリングサポート形式は、ロックアサ承、ローラアサ承又はスライドアサ承等が採用されている。(図-1.45-1参照)



ロックアサ承の例



ローラアサ承の例



スライドアサ承の例

図-1.45-1 各種アサ承の支持形式

管の支持方法としては、支台における管の変形を少なくし、且つ温度変化及び内圧等による管の軸方向の伸縮に対して管が容易に移動できる構造でなければならない。

各種支承の摩擦係数は本章第24条表-1・24-1に示すように、リングサポート形式の支承が管の軸方向の移動の点ですぐれており、コンクリートサドルサポート形式の支承においては、サドルプレートの使用が推奨される。

リングサポート支持の場合のロックア支承・ローラ支承及びスライド支承は「道路橋示方書」¹⁾に準拠して検討すればよい。

支台における管の変形は充排水時においてもっとも大きくなる。サドルサポートの場合にはこれに対する十分な検討を必要とする。サドルサポートには120°支持方法が一般的である。

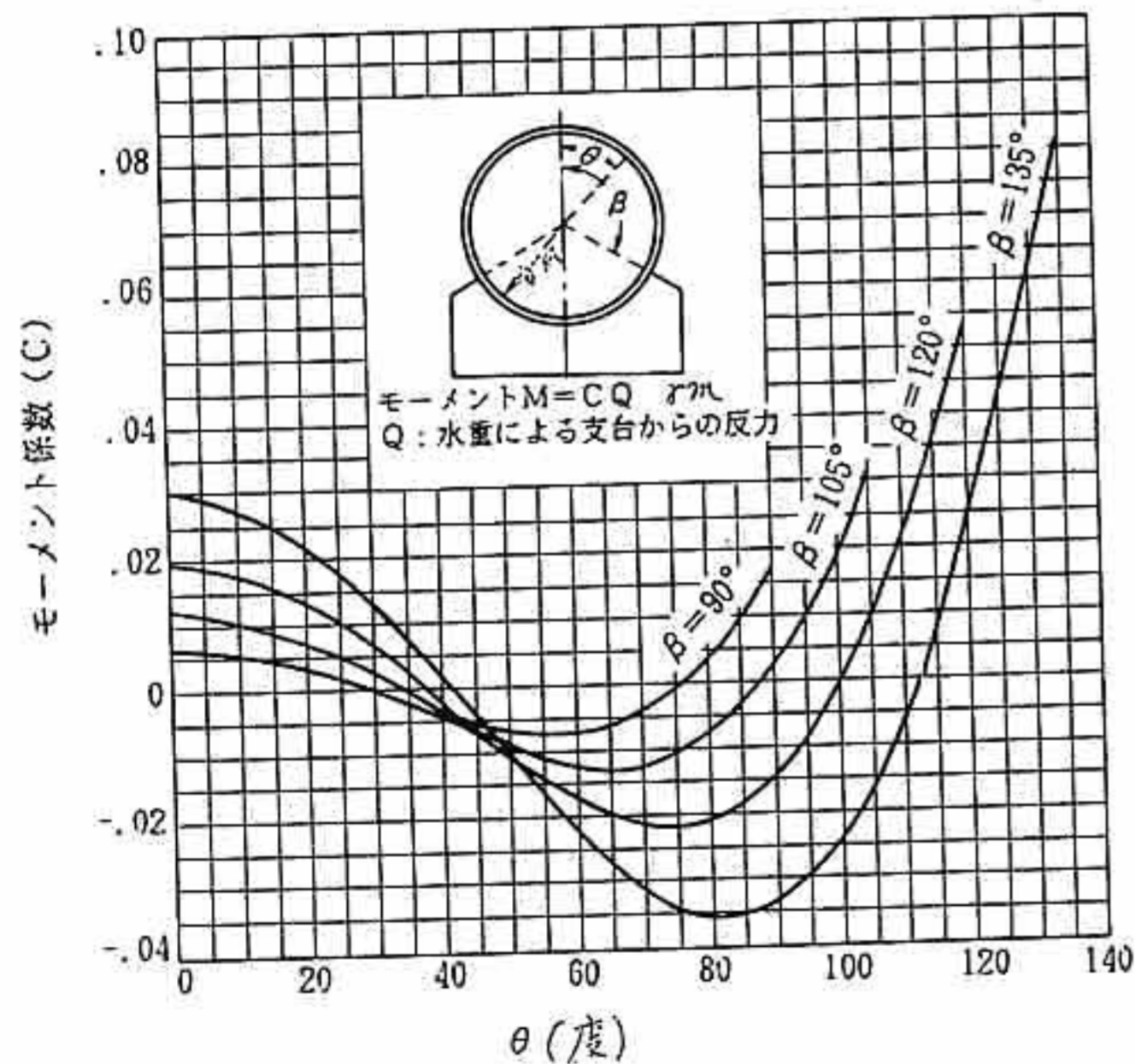


図-1・45-2 サドルサポート上の管の周方向曲げモーメント

1) (社)日本道路協会, 道路橋示方書・同解説 I 共通編, II 鋼橋編 平成2年2月

サドルサポート部は管の内圧の他に周方向曲げモーメントをうける。

周方向曲げモーメントは丁度満水時にもっとも大きくなり、その値は図-1・45-2²⁾から求めることができる。最大の曲げモーメントはサドルの肩部に生じ、 $\beta = 120^\circ$ の場合

$$M = 0.0528Q \cdot r^2$$

となる。

Arrigaの解析によれば、サドルサポートにおける曲げモーメントによる応力は内圧の増加にともなってかなり減ずるから、内圧をうけている管の場合は内圧による応力に曲げモーメントによる応力を加えなくてもよいとBier³⁾は述べている。しかし上部水槽に近い薄肉管は内圧が小さいので、 β を小さくするなどの配慮をすることが望ましい。

サドル付近にスチフナのないときはサドルを中心に夫々片側に管径と等しい長さか、又は支台間隔の1/2のどちらか短い方の長さの管胴板が、この曲げモーメントに対して有効に働くとされている⁴⁾。管胴のみで曲げモーメントに抵抗できない場合はサドル付近にスチフナを設ける。

この場合曲げモーメントに有効に働く断面は前記の管胴板にスチフナの断面を加えればよい。

2) University of Illinois, "Test of Cylindrical Shells," Bulletin. No.331.1941.

3) P. J. Bier, "Power Penstocks" Water Power, July. 1958.

4) L. P. Zick "Stress in Large Horizontal Cylindrical Pressure Vessels on Two Saddle Supports" Welding Journal, Sept. 1951.