

岩盤挙動の実測と予測 —— 動的粘弾性, ひびわれ性, 吸水膨脹圧など ——

電力中央研究所
土木第二部 地盤基礎研究室

○林 正夫 , 北原義浩

中新井克子 , 日比野敏

要旨 岩盤の動的弾性係数の周波数特性の実測, 圧力トンネル覆工コンクリートの挙動と水の作用の関連の実測, 地下発電所アーチ覆工の鉄筋コンクリートの鉄筋計の挙動とコンクリートの収縮やクリープとの関連の考察, およびひびわれた岩盤の変形挙動の実測と予測などにつき中間報告をする。

1. 岩盤の動的弾性係数の周波数特性 従来は約500 c/s, 0.1 t/m² 程度の周波数や応力のレベルでの弾性波テストによっていたのを, より実際にちかづけ上部構造物の主要周波数帯0.1~5 c/s, 応力水準10~100 t/m²で弾性や粘性を試掘坑内でしらべ(写真1), 地震時の動的応答解析の係数を求めることを試みた。動的変形用現場測定装置の試作品の仕様の大略は下表のようで, ほぼ目的を果しつつある。

表 1 現場用動的岩盤試験装置

載荷装置: 最大油圧200 kg/cm², 油量36 l/分, 最大出力50 t, 電気容量15 kW,

動的振幅±1 mmで5サイクル, 荷重検出方式で精度±0.5 % F.S

油圧制御装置: 発振周波数0.001~1000 c/s,

出力波形は正弦波, 矩形波, 鋸波, 任意波
サーボアンプ, 直流型で感度0.1 V/30 mA

測定計器, 動ひすみアンプDS6/RX, 差動変位ピックアップTR-50(総合計装), 電磁オシロEMO-121



写真1 現場用 動的変形測定装置

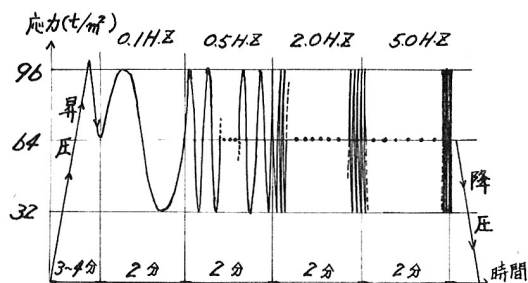


図-1 荷重履歴

この装置をつかって図1のような荷重履歴のもとで載荷板の動的変位をもとめ, 半無限体の

変形理論を介して弾性率 E_d を算出し, E_d と4要素モデル(図2)の4定数の間の関係式をつかって4定数を求めた3例が

表2の砂岩・粘板岩・凝灰岩

であり, 他の材料は実験室内での畑野, 渡辺氏らによ

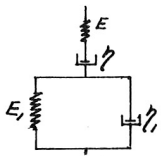


図-2 粘弾性4要素モデル

定数	単位	粘土	砂	砂岩	粘板岩	凝灰岩	モルタル	コンクリート
E	10 ⁴ (t/m ²)	1.7	5.9	5.9	20.4	138	60	291
η	10 ⁴ (s·t/m ²)	0.0071	0.019	0.019	2.5	16	42	210
E_1	10 ⁴ (t/m ²)	0.27	—	—	2.9	131	50	85
η_1	10 ⁴ (s·t/m ²)	0.18	—	—	14.2	173	112	44

表-2

る供試片での結果である。

従来は図3の右の弾性波テストEwと静的テストEsで岩盤の変形性を予測していたが、図3のように実際構造物との主要応答周波数と応力レベルの範囲での変形性を調べた結果はEwよりはかなり変形しやすい傾向が認められた。今後さらに試験を重ねて検討をつづけとくに粘性の影響を明らかにしたいと考えている。

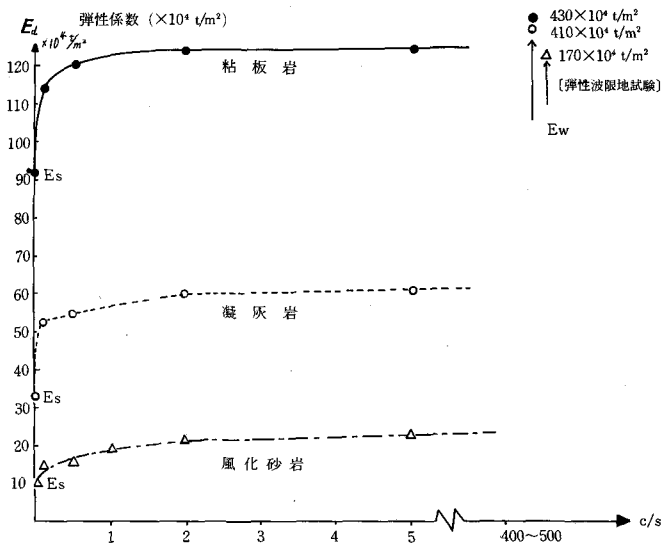


図3 砂岩、粘板岩、凝灰岩の場合の動弾性係数の周波数特性

2. 圧力トンネル覆工コンクリートの挙動に及ぼす水の作用 今後、大揚水発電が増加すると大規模圧力トンネルも増加し、圧力トンネルの工事の合理化をはかる助けとして、水圧を岩に負担させる設計が増す傾向にある。そのためには、岩盤、覆工、水の相互作用をよく究明しておくことが必要である。その一助として、図4の直径5m、巻厚50cm、最大水頭55mの頁岩の中の新設トンネルの通水時の挙動を図4の岩盤変位計、間げき水圧計、カールソン型ひずみ計、応力計などによってしらべた。図5には岩盤変位計の機械的固定方式と合成樹脂の注入による固定方式を示す。頁岩は比較的堅硬で静的弾性係数が現地試験で約70,000 kg/cm²であった。測定用リードワイヤーは約160m、横の支坑に引出され適時測定がなされた。(1) 覆工コンクリートがごく入念に施工され、裏込めグラウトも慎重に実施されたに拘らず、通水直後から直ちに覆工の裏側に図6のように背水圧を生じることが判明した。その透水経路は

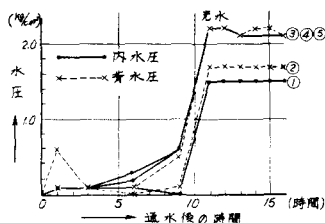


図-6 内・背水圧の作用状態

その透水時間が短いことからみてコンクリートの多孔性によるのではなく、施工つぎ目であると考えられる。設計面から見ると、

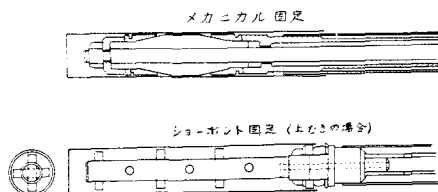


図-5 岩盤変位計アンカー部の機構

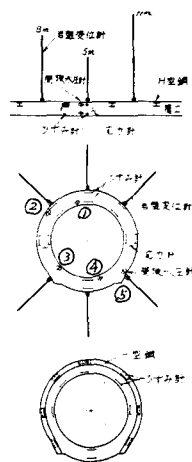


図-4 埋込計器配置図

コンクリート覆工や鉄筋コンクリートサージタンクが内水圧に対抗する構造物とする考え方は、岩盤中の施工条件を考えると、実態に合わない場合があることを物語っている。(2) 通水し内水圧が作用すると岩盤は山側に変位すると予測するのが通常である。しかし実際は図7のように内水圧上昇時AからBの間に岩盤はトンネル中心に変位したことが岩盤変位計で検出された。この現象の生じた理由は2つ推測され、頁岩の吸水膨脹(図8、図9)と吸水による強度低下で周辺が緩み、覆工に地圧が増すことの2つが考えられる。吸水膨脹ひずみとそれを拘束した場合の発生圧とはかなり密接な関係がありこれが上述の実測傾向の重要な要因と考えられるが、図9のように吸水、脱水をくりかえすと拘束圧が減少していくことが最近、実験室内で確認できた。吸水による強度低下による付加地圧の発生は岩盤力学上かなり一般的に考えておくべき要因で豪雨時の斜面の崩壊にも関係がある。このような意味で図7のAからBへの変位傾向は興味ぶかい教訓を含んでいるように思われた。

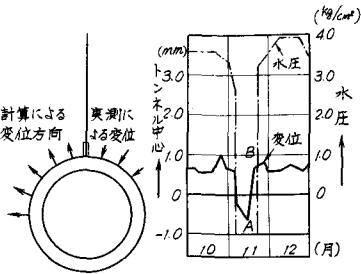


図-7 水圧と岩盤変位

(3) 年間の温度応力が内水圧による応力よりも12倍も大きいことが、実測の覆工コンクリート応力の年間変動から判った。(通水温度の年間変動は10℃)これは揚水運転の場合のように通水温度が激しく変化するトンネルでは覆工コンクリートの応力変動の主要因と考えておくべき事柄である。非均質場での温度応力解析法をすでに開発しておいたので²⁾それをつかって計算をしてみると表3のように、覆工コンクリート応力はやはり温度応力が水圧による応力の11倍となった。

表3 覆工応力(計算)

	コンクリート 応力	鉄骨 応力
内水圧と背水圧	圧縮 2	17kg/cm ²
岩盤内3mまで温度変化	22	58

(4) H型支保鋼を巻き込んだ鉛直断面①とそれがない断面②とは0.75mしか距っていないが、覆工コンクリートの応力は

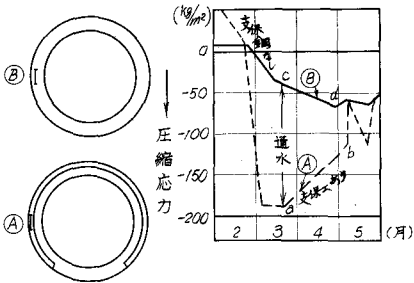


図-10 通水初期の覆工応力

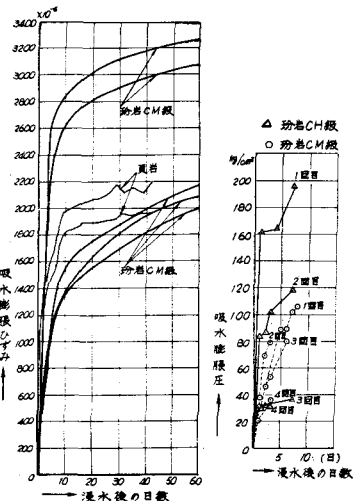


図-9 乾湿くり返しによる膨脹圧の変化

図10のように全く異なり

図-8 頁岩と砂岩の吸水膨脹ひずみ

①では通水によりa bと引張り側に移行する普通の傾向なのに、②ではc dと圧縮側に移行した。この②の現象は前述の(2)と軌を一にする現象であると考えられ、①は堀削後直ぐに支保工をとりつけたので岩の緩

みがすくなく水による変質が少ないものと考えられるので内水圧の影響が克ち a b の傾向となつたと推論される。以上、岩盤と水との相互作用について期せずして興味深い傾向がみつめられたので諸家の御討議に供したい。

3. 地下発電所アーチ覆工の鉄筋コンクリートの鉄筋計の挙動とコンクリートの収縮やクリープとの

相互作用 さきに地下の大きな堀削では発破による岩盤の緩みよりは地圧の解放による岩盤の緩

みの方がかなり卓越した影響を岩盤構造物に与えることを弾塑性的に解析手法を開発して³⁾ 実用して

いる。実際の地下発電所（地山のかぶり250m、堀削空間の高さ51m、長さ60m、幅26m）を粘板岩の岩盤の中に掘る場合の覆工アーチコンクリートの中の鉄筋計の測定が図13のようにえられた

が、その値が地山の安定な状況からみていかにも大きすぎることに疑問を抱いた。そこでまづ、覆工アーチ内の内部温度の経過を調べたところ図12のように打設後約3ヶ月間は過渡期にあることが判ったので、以下の鉄筋応力の課題に関してはこの期間を除外し

その後の堀削中の応力変化値 $\Delta\sigma$ を図13の右に抽出しこの値

を問題とした。その場合の着目点は「コンクリートの収縮とク

リープによる鉄筋への応力の遷移の現象」であるとまづ推論し

た。この推論を実証するために問題を基礎実験に移した。すな

わち、図14のように直径

15cm、高さ60cmの鉄筋コ

ンクリートの中に鉄筋を1、

3、4、6本と鑄込んだ場合

の外圧30kg/cm²でのコンクリ

ートクリープによる鉄筋応力の

増加を図15のようにしらべ通

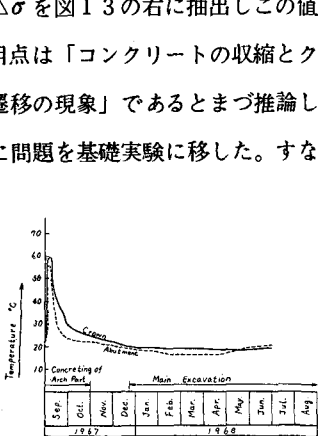


図-12 温度の経過

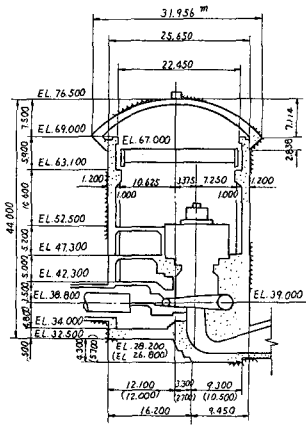


図-11

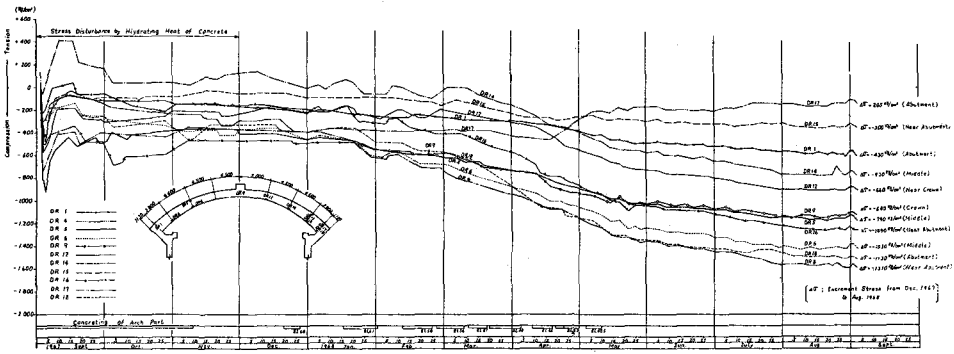


図-13 鉄筋応力の経過

常の概念ならば図15の鉄筋応力は経時的に変化しないはずなのに
 事実は図15のように顕著に変化することが明らかとなった。この
 図15ではコンクリートのクリープとコンクリートの収縮が重って
 影響しているので図16のように別途に実験をしてコンクリートの
 収縮による鉄筋計の挙動を抽出した。以上の事から図13の実測値
 の累増の原因は、従来は予測すらもしていなかったようであるが、
 筆者らの推論は実験によってかなり実証ができた。これらの実験に
 もとづきクリープと収縮の影響を割引き、外圧のみによる鉄筋コン
 クリートとしての応力をもとめると、実測ではクラウンで $42\text{kg}/\text{cm}^2$
 アバットメントで $27\sim 29\text{kg}/\text{cm}^2$ となった。一方、筆者らが別途に開
 発した逐次堀削時の覆工応力の計算ではクラウンで $23\text{kg}/\text{cm}^2$ 、
 アバットメントで $37\text{kg}/\text{cm}^2$ であった。いまだ十分な一致は見
 ていないが、すくなくとも図13の解釈について基本的に前進す
 ることができたように考えている。その後さらに、図15と図16
 の理論的な究明をつづけているので後刻報告したい。

4. ひびわれた岩盤の変形挙動の実測と予測の関連

岩盤には多かれ少なかれ節理、シーム、ひびわれなどが存
 在しているが設計時には連続体の弾性論の域を出ないのが普
 通であった。筆者の一人はさきにひびわれ面での局所滑りが
 巨視的な応力分布に与える影響を、弾塑性的に、ひびわれ面
 間の平均間隔 C と載荷幅 T との比、ひびわれ面のせん断抵抗
 や初期地圧に基づくみかけのせん断抵抗 τ_c と載荷圧 q との比
 などの関数として、応力が横方向には伝わり難いことと応力
 球根が載荷面直下に偏る現象を一部分、研究し予測したこと
 がある⁴⁾(図17, 図18, 写真2, 3, 4)。

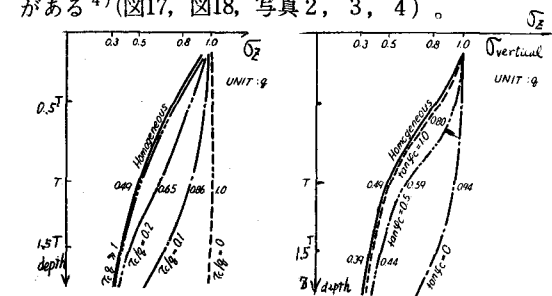


図-17 ひびわれ性基盤の鉛直応力 σ_z の深度 z 方向分布に及ぼす初期圧力によるみかけのせん断強度 τ_c の影響の計算値 (q : 載荷圧; T : 載荷幅)

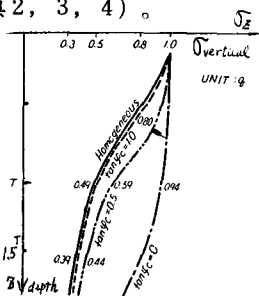


図-18 ひびわれ性基盤の鉛直応力 σ_z の深度 z 方向分布に及ぼす摩擦係数 $\tan \phi_c$ の影響の計算値

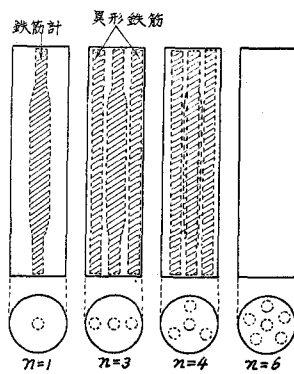


図-14 供試体中の鉄筋計および鉄筋の配置

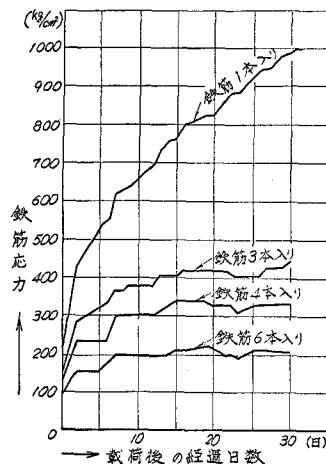


図-15 定荷重下の鉄筋応力の変化

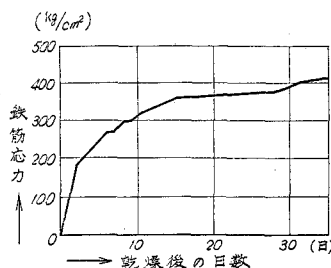


図-16 コンクリートの収縮による鉄筋応力の変化

$$\frac{c}{\tau} = 0.125$$

cracked model

oblique layers (60°)



写真 2

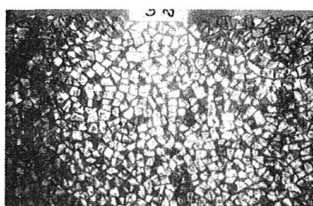


写真 3

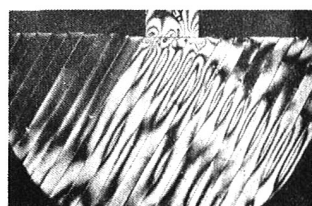


写真 4

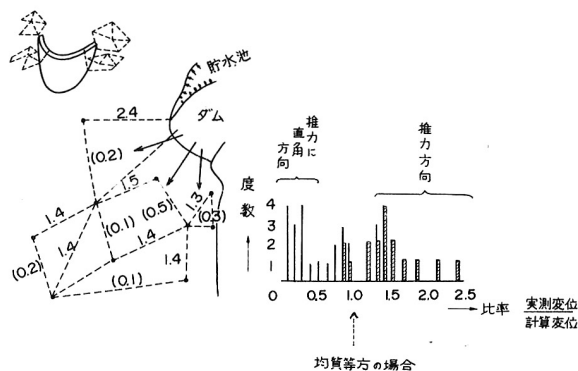
その後、実測の費用もないまゝに実証を諦めていたが、たまたま、管理測定のために黒四ダムの地下3角測定網の各測線の変形 δ_m と等方等質弾性平面変形の計算 δ_c の結果がえられた。⁵⁾ 筆者は測線
の方向との関係で δ_m/δ_c の比率を整理してみると、期せずして図19の歴然たる特性が見出された。こ
の実測値の特性図19は、さきに理論と実験によって予測したものと軌を一にするものである。(次頁
の図20) 厳密な定量的比較は今後の課題として残っているが、健全な挙動をしている岩盤ですら、巨
視的測定でこの種の特性がかなり明確にされたのは興味ぶかいことである。

結び

地下構造物が大きくなるのに
反比例して理論と測定は細かく
なりその結果信頼度は高められ
る。岩盤の動特性、含水による
影響、収縮とクリープなどとの
相互作用、ひびわれ特性などに
ついての寸見をのべ、皆様の御
批判を受けたいと考えています。
末尾をがら、関西電力、四国電
力の建設部の方々に厚く謝意を
表します。

参考文献

- (1) 畑野 正, 渡辺啓行 “粘土, 砂, 碎石の動的・静的粘弾性常数, ボアソン比について” 電力中央研究所 技術研究所報告
No. 68032 1968
- (2) 林 正夫, 北原義浩, 金川 忠 “非均質, 任意形状の物体の温度応力の解析法” 電力中央研究所 技術研究所報告 No. 67053 1967
- (3) 林 正夫, 日比野 敏 “地下の開削による周辺地盤の緩みの進展に関する解析” 電力中央研究所 技術研究所報告 No. 67095 1968,
第2回 岩の力学連合シンポジウム (土木学会) 1967
- (4) 林 正夫 “ひびわれ性基盤の応力伝播の機構に関する考察” 電力中央研究所 技術研究所報告 63007 1963
- (5) 関西電力建設部 “黒部第四ダムと基礎の挙動” 大ダム No. 37 1966 および 色部 誠 “黒部第四ダム基盤の実測変形量に関
する考察” 電力中央研究所技術研究所報告 65144 1966



図一19 ダムの岩盤の実測変位の計算変位
(均質等方の場合) に対する比率

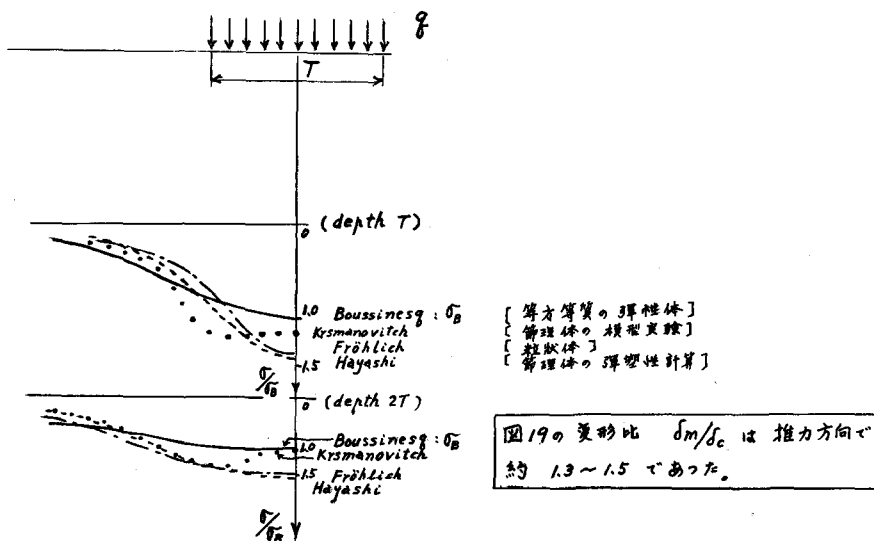


図 20 鉛直応力 σ の 比較 (算方算質, 粒状係, 算理係)

Behavior of Rock Foundation ——— Expectation and Observation ———

(dynamic visco-elasticity, jointed rock masses, swelling)

—— The 6th Interior Symposium on Rock Mechanics, JSCE 1970 ———

Masao HAYASHI, *

Yoshihiro KITAHARA, *

Katsuko NAKAARAI *

Satosi HIBINO *

(Members *, Foundation Engineering Section, Department of Civil Engineering
 Central Research Institute of Electric Power Industry, Komae, Tokyo)

Summary

- (1) Observation in situ on the dynamic visco-elastic loading in test adits was analysed based on the 4 elements visco-elastic model, particularly on the frequency characteristics of dynamic modulus of elasticity under the actual loading intensity by heavy structure.
- (2) Swelling pressure to a tunnel lining was measured and analysed in referring to laboratory test of swelling of rock. It was pointed out that the temperature stress due to change of water temperature in tunnel was dominant in lining stress.
- (3) Lining stress in ceiling concrete arch of an under ground power station was observed and analysed, pointing out the stress transition from creeping and shrinkaging concrete to elastic reinforcement.
- (4) Observed behavior of jointed rock foundation of dam was analysed and reviewed based on the published author's elasto-plastic analysis.