3.5 掘削管理のための計測システム

3.5.1 一　般

近年計測技術が急速な進歩を遂げ、いわゆる計測工法と呼ばれる施工方法が定着化されるに至っている。これは難工事，あるいは重要土木工事に際し、各種計測を行いつつ工事を進め、工事の安全性や合理性の向上を図ろうとするものである。計測結果より事前に危険を察知し、その対策を科学的，定量的判断に基づいて行うことにより、工事そのものの科学性を増し、設計者と施工者を有機的につなごうとするものである。

本十三陵地下発電所でも上記考え方に基づき、綿密な計測計画が北京勘測設計院により成されているが、設計者のみならず、実際に掘削施工する施工者共々、その主旨を充分理解し、現実の施工管理にその結果を反映すべきである。一般に地下発電所を含めた地下大規模空洞群の掘削施工におけるトラブルは、大幅な工程の遅延を招く。従って、トラブルの発生を事前に察知して、その手当てを先手，先手にしていくことがこのような地下空洞掘削工事の基本である。

ここでは、中国側でなされている計測計画に対する評価と共に、下郷発電所（電源開発株式会社）での実績を踏まえて、測定結果の評価方法について言及する。

3.5.2 計測項目及び目的

北京勘測設計院で計画されている計測項目，計測位置，数量，目的等を表－Ⅱ.3.5-1に示すと共に、図－Ⅱ.3.5-1に計測位置，方法を示す。主たる計測断面としては、発電所については3断面を選定している。Ⅰ断面は、1号機中心断面、すなわち発電所空洞掘削断面で最も大きい断面であり、Ⅱ断面は組立室中心断面で、掘削断面としては最小の断面位置である。また、Ⅲ断面は3号機と4号機中心断面のほぼ中央にある。また、主変圧器室でも、2断面を選定し、計測を計画している。これら中国側での計測計画は、計測断面，項目，数量とも必要且つ充分であり、妥当であると言える。但し、発電所の掘削段階で地質を充分観察し、断層や破砕帯等地質不良箇所では、空洞の不安定現象が発生し易いので、この様な箇所では必要に応じ計測箇所の追加を予定しておくべきである。また、クレーンの支持コンクリートの補強のためのＰＣ鋼線の荷重管理は特に重要であると考えられるので、計測数量はもう少し増やすべきと考えられる。例えば、発電所長軸方向で約20m毎に1箇所の測定が目安となろう。

3.5.3 計測方法

前表に示した計測項目の内、コンバージェンスメジャーによる変位測定，ロックボルト軸力測定，岩盤内の緩み測定以外は、電気的に測定がなされる。計測設備は掘削の進行に合わせて適当な時期に設置しなければならない。特に、設置直後は発破位置に近いため、計測機器の発破からの防御と共に、ケーブルの発破による断線に注意しなければならない。設置後は計測機器が正常に作動しているかどうかを確認するために、比較的頻繁に計測を行うことが重要である。その後は、掘削の進行状況に応じて計測することになる、下郷地下発電所では、原則として1日定刻に1回の割合で測定を実施している。本十三陵揚水発電所においても、1日1回の計測頻度が適当と考えられる。しかし、前表に示した計測の項目及び数量から考えると、計測点数はかなりの数となり、自動計測設備の導入が必要と思われる。ここに、一例として、下郷発電所での実績例について述べる。

図－Ⅱ.3.5-2は地下発電所掘削施工中に適用された自動計測の全体システム図である。所定の位置に設置された計器のケーブル（充実型キャプタイアケーブル0.5mm² ×4芯）　はすべて、アーチ部アバット部に設けたジョイントボックスまで延長され、ここでジョイントボックス内の端子に接続される。ケーブルは側壁部岩盤に沿って配線されたが、この部分では発破に対する防護及び施工機械による損傷を受けないようにすべて、鋼管に通して配線した。ジョイントボックス内では個々のキャプタイアケーブルから多芯ケーブ（0.9mm² ×160芯）に接続され、この多芯ケーブルはアーチアバットに沿わせて配線し、図に示す位置に別途建築された測定室にまで引き込まれた。測定室の中には自動多点切換器及びデジタル記録計を備えて、全測定点を集中的に制御できる機構としている。これら自動多点切換器及びデシタル記録計は最新のマイクロコンピューターによる機能を持っており、コンパクトであり且つ最大1000点までのデータ処理が可能である。また、測定の頻度を任意に指定することができ、ひずみ量を物理量に換算して、自動的に所定の時間が来ると印字してアウトプットされる。下郷発電所の場合、全測定点数は286点であったが、測定及びデータ処理に要する時間は約1分間であった。また、データは発電所の本体掘削中は毎日得ることとし、午前10：00にアウトプットされるよう記録計をセットした。本体掘削終了後は1回／3日の頻度で、周辺岩盤が安定していることが確認されるまで継続して計測を実施した。

3.5.4　計測結果の評価

毎日得られる計測結果は、空洞掘削による空洞の安定性や局部的な岩盤の安定性を管理するために、常に整理し、評価し易い様にグラフ化しておくことが重要である。どのデータも経日変化として整理しておくことが、先ず基本であることは言うまでもない。更に、大規模空洞掘削における施工管理のためのモニタリングの要点は以下の通りであり、それぞれについて説明を加える。

① アーチ部岩盤の挙動の監視

② 発電所本体掘削中の側壁部岩盤のはらみ出しの監視

③ 岩盤補強工の妥当性の評価

④ 発電所周辺岩盤内の緩み領域の評価

(1) アーチ部岩盤の挙動の監視

有限要素法解析による結果から分かる通り、一般にアーチ部岩盤の沈下や変形等、挙動はアーチ部の岩盤掘削中にのみその動きが見られ、本体掘削中には殆ど影響は見られない。従って、アーチ天端に設置した岩盤変位計やコンバージェンスメジャーによる天端における岩盤の変位が本体掘削中にも長く継続して生じているようであれば、アーチ部岩盤の安定性に問題があると言える。その場合には、本体掘削を一時中止し、その挙動を精密に監視すると共に、ロックボルトの増し打ちや吹き付けコンクリートの増し吹き等の対策を取らなければならない。

(2) 側壁部岩盤のはらみ出しの監視

計測管理の内、側壁部岩盤のはらみ出しの監視が最も重要である。これは、はらみ出しがあまりにも大きくなると、空洞全体の安定性が損なわれる可能性があるからである。一方、計測結果の評価の上からは、はらみ出しの現象が最も理解し易く、また施工上からはロックボルト，ＰＣ鋼線の増し打ちや吹き付けコンクリートの増し吹き等の対策が取り易い。

一般に、多段式岩盤変位計で計測した岩盤掘削面の相対変位の経日変化は、図－Ⅱ.3.5-3に示すような傾向を示す。変位の増加の曲線は段階状を呈し、計測位置直下での発破により、急激な変位が生じる。しかし、この直下での発破による変位量は、一般的には盤下げが測定位置より遠ざかるにつれて減少する。この

場合には岩盤は安定方向に向かいつつあると考えられるが、逆に、盤下げが進行しても、ほぼ変わらないか、増大する場合には、不安定方向に向かっていると考えられる。また、この模式図におけるもう一つの顕著な傾向は直下以外の掘削あるいは掘削が休止していても、岩盤の変位は進行し、いわゆるクリープ現象が見られることである。経日曲線の傾きは、岩盤の状態や深度に関係するものと考えられる。深度の浅い位置での変位は盤下げが深くなると共に、直下の発破の顕著な影響がなくなり、ほぼ一定勾配の曲線となる。一方、深度の深いものは盤下げが進行しても発破の影響がかなり残っている。これは盤下げによって緩み領域が大きくなっていく傾向を物語るものである。

また、コンバージェンスメジャーによる内空変位の計測結果も側壁部岩盤のはらみ出しを評価するのに重要である。内空変位測定は頻繁には測定出来ないが、本体掘削の盤下げ進行に合わせて測定し、図－Ⅱ.3.5-4に示すように、内空変位測定の標高毎に盤下げ標高と内空変位量を整理しておくことが必要である。その場合、有限要素法解析による解析値を予想される変位量の目安値としてプロットしておくと、掘削施工の管理に使うことが出来る。

図－Ⅱ.3.5-5に下郷地下発電所での岩盤変位計及びコンバージェンスメジャーによる側壁部岩盤のはらみ出しの計測結果の例を示す。

(3) 岩盤補強工の妥当性の評価

本十三陵地下発電所等地下空洞の岩盤補強は、主としてロックボルトと吹き付けコンクリートによる。解析および岩盤補強の設計によりロックボルトの長さ、本数を決定しているが、この設計の妥当性を評価するためにロックボルトの軸力を測定する。軸力が過大である場合には、ロックボルトの増し打ちをしなければならない。また、軸力が殆ど発生していない場合には、ロックボルトの本数が多すぎるか、ロックボルトが短すぎて岩盤の緩みの範囲内にあり、その効果が発揮されていないかのどちらかであると考えられる。従って、岩盤変位や緩み領域の計測結果等も考慮して、岩盤補強の設計を見直す必要がある。

(4) 岩盤の緩み領域の評価

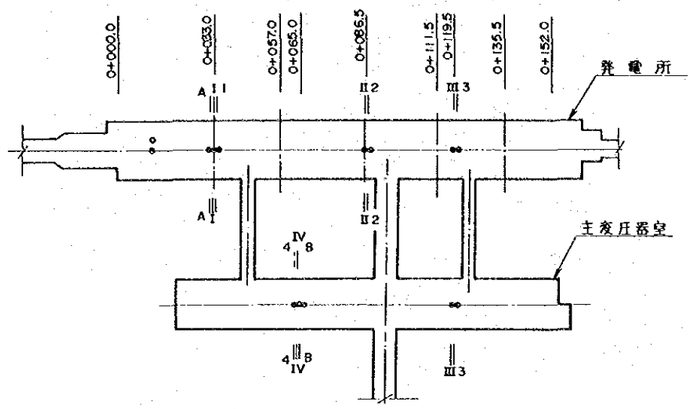
空洞掘削に伴う周辺岩盤の緩み領域の発達の程度は、空洞の安定性にとって重要であり、岩盤変位の測定からある程度評価出来る。本地点で計画されている弾性波探査による方法は、より確実にその範囲を知ることが出来、極めて有用である。

下郷発電所では、発電所側壁から約14mの位置に側壁と平行に鉛直下向きにボーリング孔を設け、盤下げ掘削の進行に合わせて発電所側とボーリング孔との間で弾性波探査が実施された。その結果より岩盤内の弾性波速度の初期値からの変化を求め、弾性波速度の低下領域を算出した。この弾性波速度低下領域は、ほぼ岩盤の緩み領域に担当しているものと考えられる。下郷発電所での測定結果の例を図－Ⅱ.3.5-6に示す。

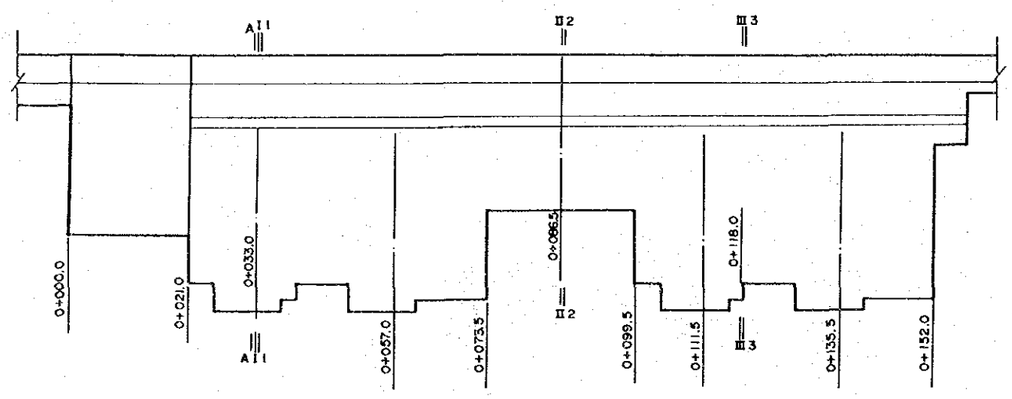
表－Ⅱ.3.5-1　　計測項目及び目的

計測項目		計測機器	数量	計測概要及び目的
1	岩盤内変位測定	多段式変位計	24 組	1組当たり岩盤内の4深度において、掘削表面と岩盤内の相対変位を計測する。 岩盤内の各深度における変位を測定することにより、変位の不連続面、あるいは緩みの範囲を知る。
2	ｱｰﾁ天端沈下計測	ｺﾝﾊﾞｰｼﾞｪﾝｽﾒｼﾞｬｰ	5 断面	ｺﾝﾊﾞｰｼﾞｪﾝｽﾒｼﾞｬｰ及び岩盤変位計によりアーチ部天端沈下量を把握し、空洞上部の岩盤の安定性を知る。
3	内空変位測定	ｺﾝﾊﾞｰｼﾞｪﾝｽﾒｼﾞｬｰ	24測線	ｺﾝﾊﾞｰｼﾞｪﾝｽﾒｼﾞｬｰにより空洞内の変形量を計測する。
4	ﾛｯｸﾎﾞﾙﾄ軸力測定	ﾛｯｸﾎﾞﾙﾄ軸力計	25 組	ﾛｯｸﾎﾞﾙﾄ内の軸力及びその分布を計測し、ﾛｯｸﾎﾞﾙﾄの配置設計の妥当性を評価する。
5	岩盤内温度測定	電気式温度計	4 深度	岩盤内の温度変化を測定し、岩盤の膨張、収縮量を評価する。
6	ＰＣ鋼線緊張力測定	ロードセル	6 箇所	クレーン支持コンクリートを補強するＰＣ鋼線の緊張力を管理する為ＰＣ鋼線にﾛｰﾄﾞｾﾙを設置する。
7	クレーン支持 ｺﾝｸﾘｰﾄ間隙測定	間隙計	6 箇所	クレーン支持コンクリートと岩盤の間の間隙量を計測，管理し、間隙が無いことを確認する。
8	岩盤内間隙水圧測定	間隙水圧計	7 箇所	岩盤内の間隙水圧を測定し、空洞周辺外水圧分布を評価する。排水トンネル，排水工の効果を知る。
9	岩盤緩み領域測定	弾性波探査		弾性波探査により弾性波の速度分布を測定する。速度あるいはその分布の変化より緩み領域を評価。

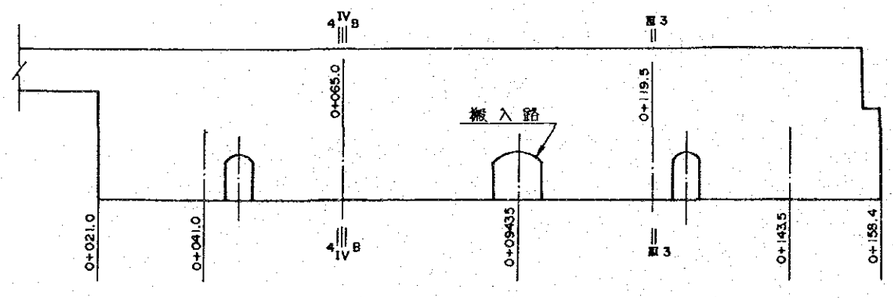
平　面



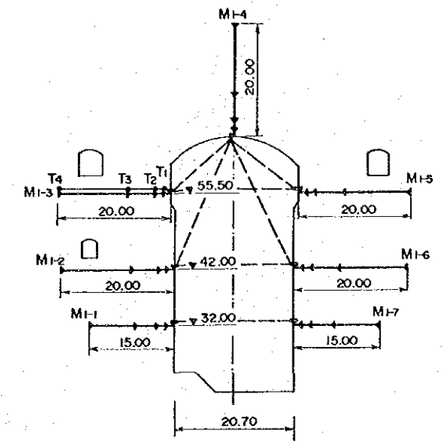
発電所縦断面



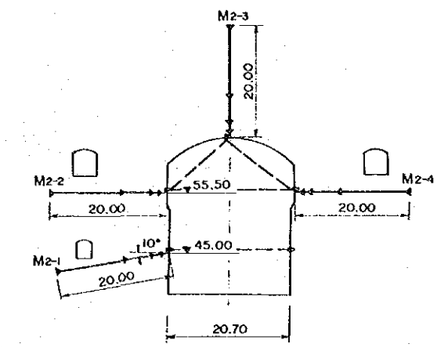
主変圧器室縦断面



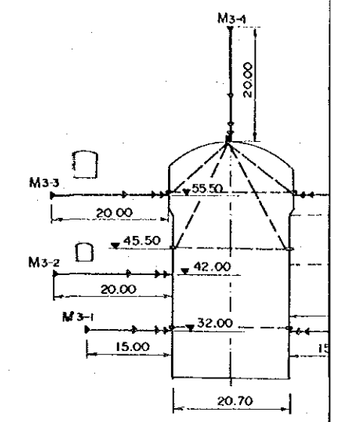
I－I



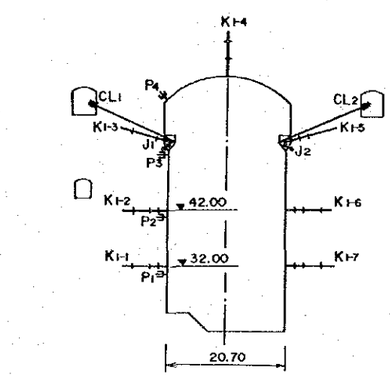
II－II



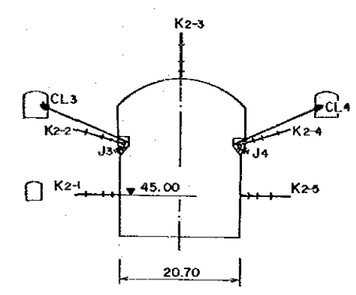
III

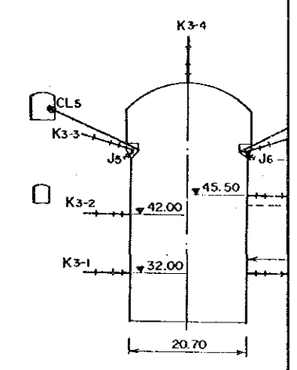


1－1

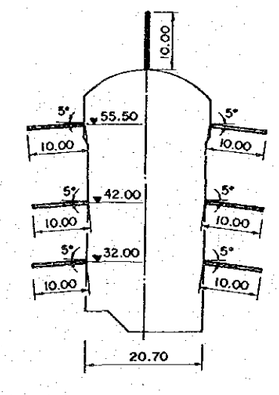


2－2

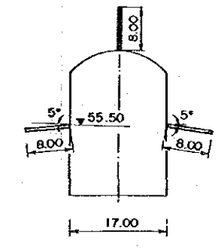




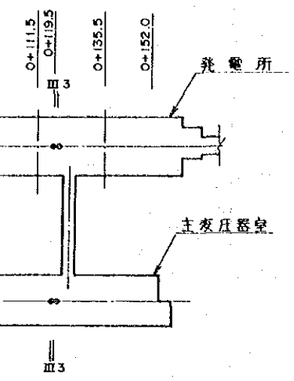
A－A

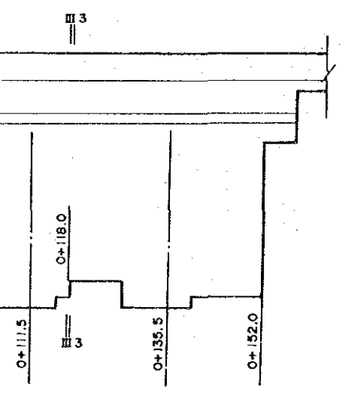


B－B

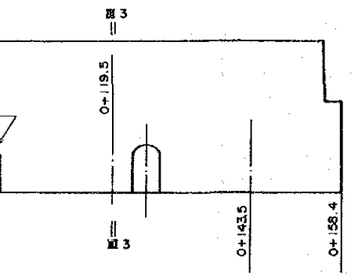


番号	計測項目	計測機器
1	岩盤内変位	多点変位計
2	天端沈下	コバージェンスメジャー
3	内空変位	〃
4	ロックボルト軸力	ロックボルト軸力計
5	岩盤内温度	電気式温度計
6	PC鋼線荷重	ロードセル
7	グレーブ支持コンクリート間隙	ジョイント計
8	地下水浸透圧	間隙水圧計
9	岩盤内緩み	発震器,受震器

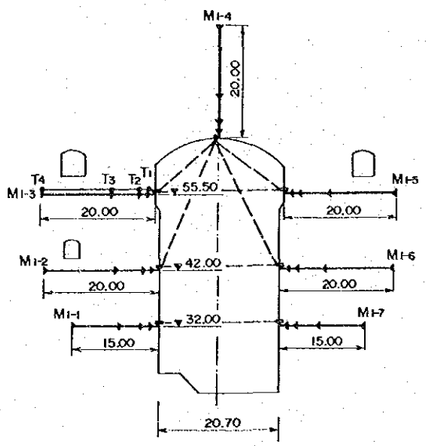




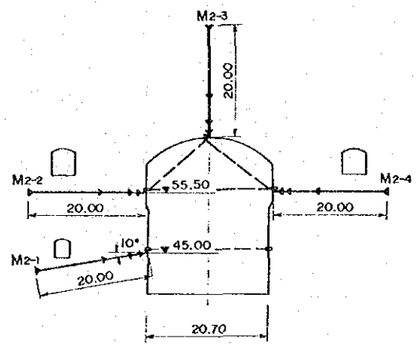
面



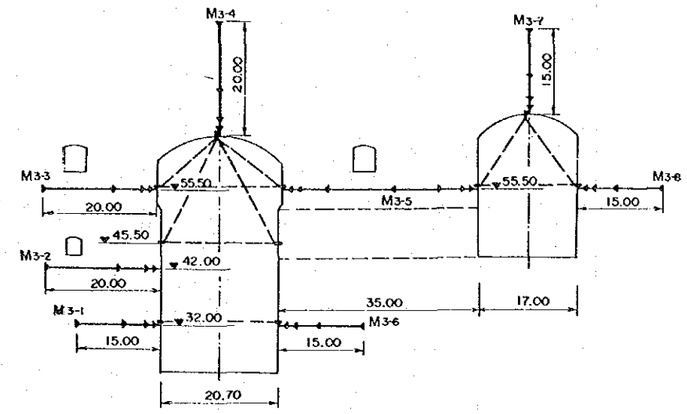
Ⅰ－Ⅰ



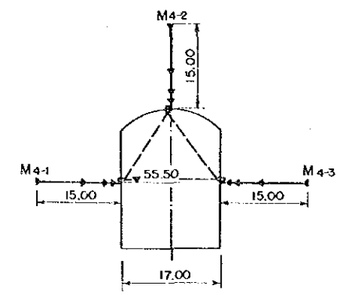
Ⅱ－Ⅱ



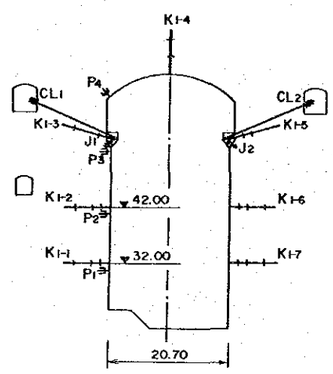
Ⅲ－Ⅲ



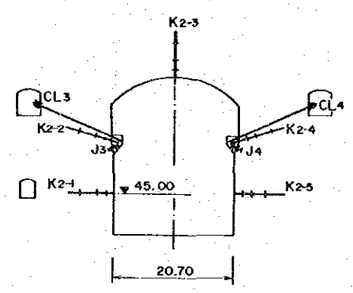
Ⅳ－Ⅳ



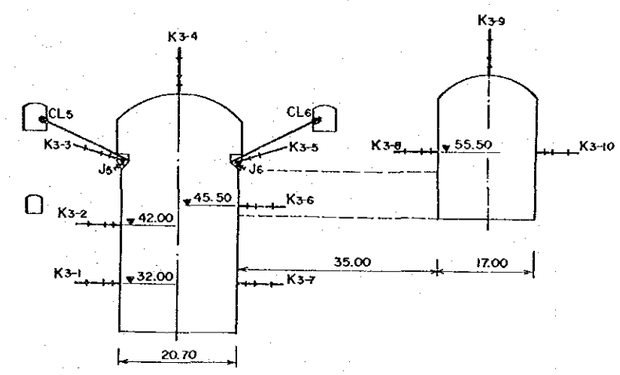
1－1



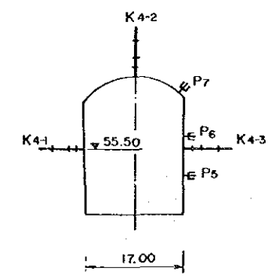
2－2



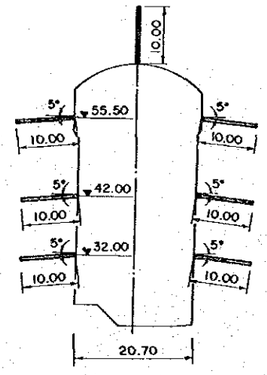
3－3



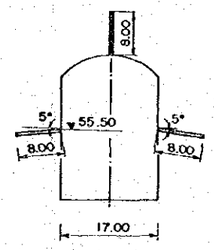
4－4



A－A



B－B



番号	計測項目	計測機器	凡例	数量
1	岩盤内変位	多点変位計	M1-5	24
2	天端沈下	コンバージェンスメジャー		
3	内空変位	〃		24
4	ロックボルト軸力	ロックボルト軸力計	K1-1	25
5	岩盤内温度	電気式温度計	T1 T2 T3 T4	4
6	PC鋼線荷重	ロードセル	CL1	6
7	クレーン支持コンクリート間隙	ジョイント計	J1	6
8	地下水浸透圧	間隙水圧計	P1	7
9	岩盤内緩み	発震器,受震器	15°	

0 50m

十三陵揚水発電開発計画

発電所
計測設備

図－Ⅱ.3.5－1 | 199 年 月 日

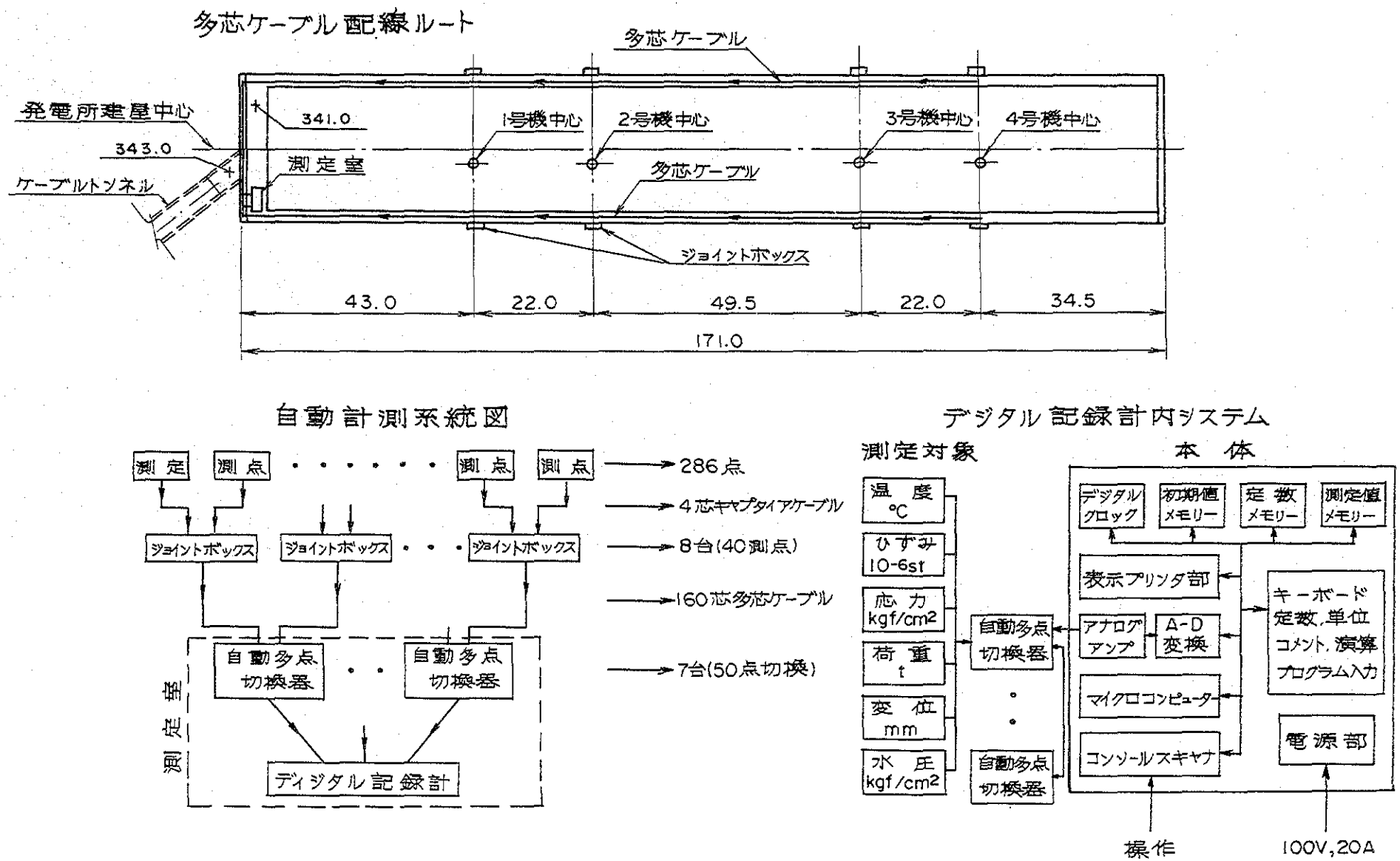


図-II.3.5-2　発電所自動計測設備（下郷発電所）

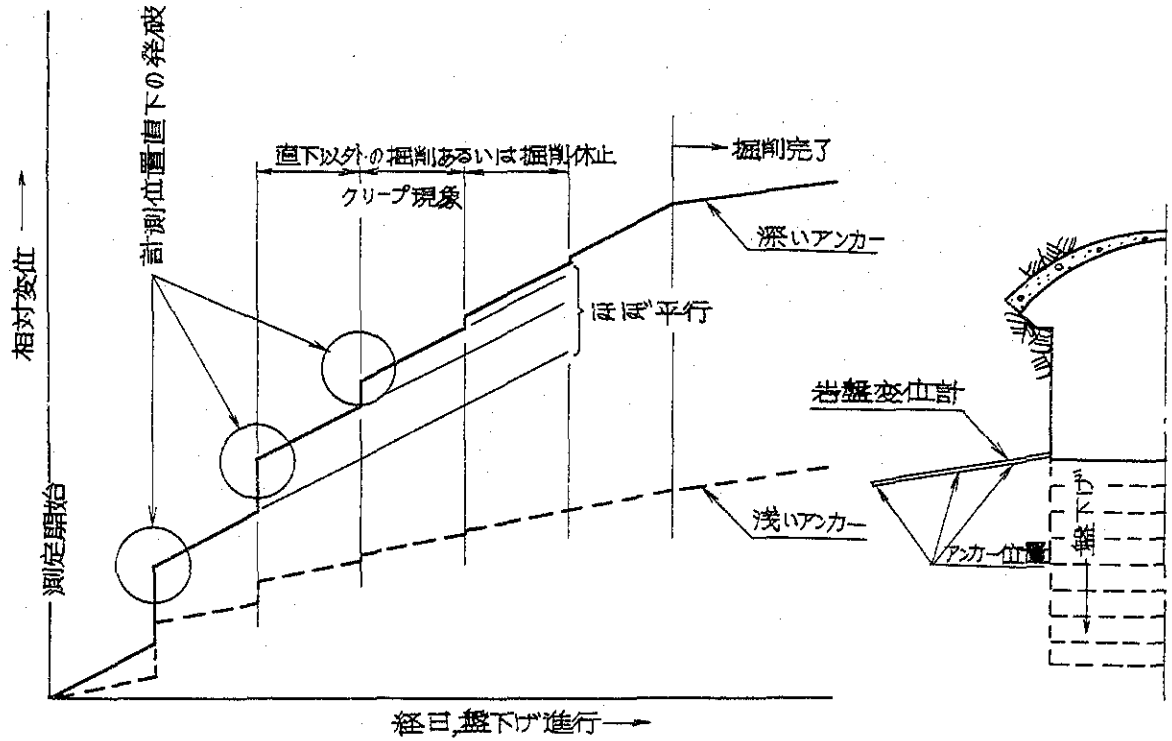


図-II.3.5-3　側壁部岩盤の相対変位経日変化の模式図

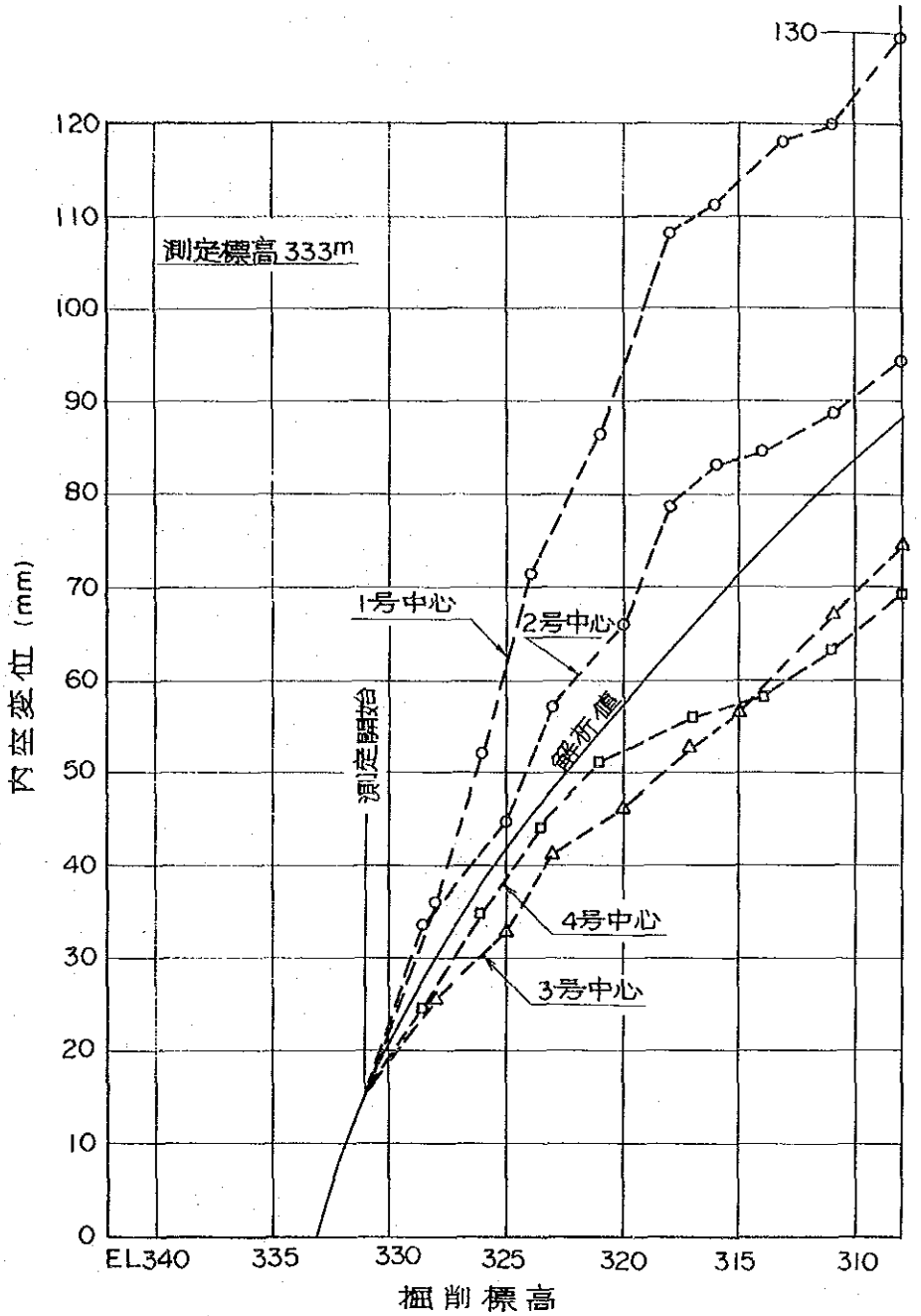


図-Ⅱ.3.5-4　内空変位の解析値と実測値の比較
（下郷発電所）

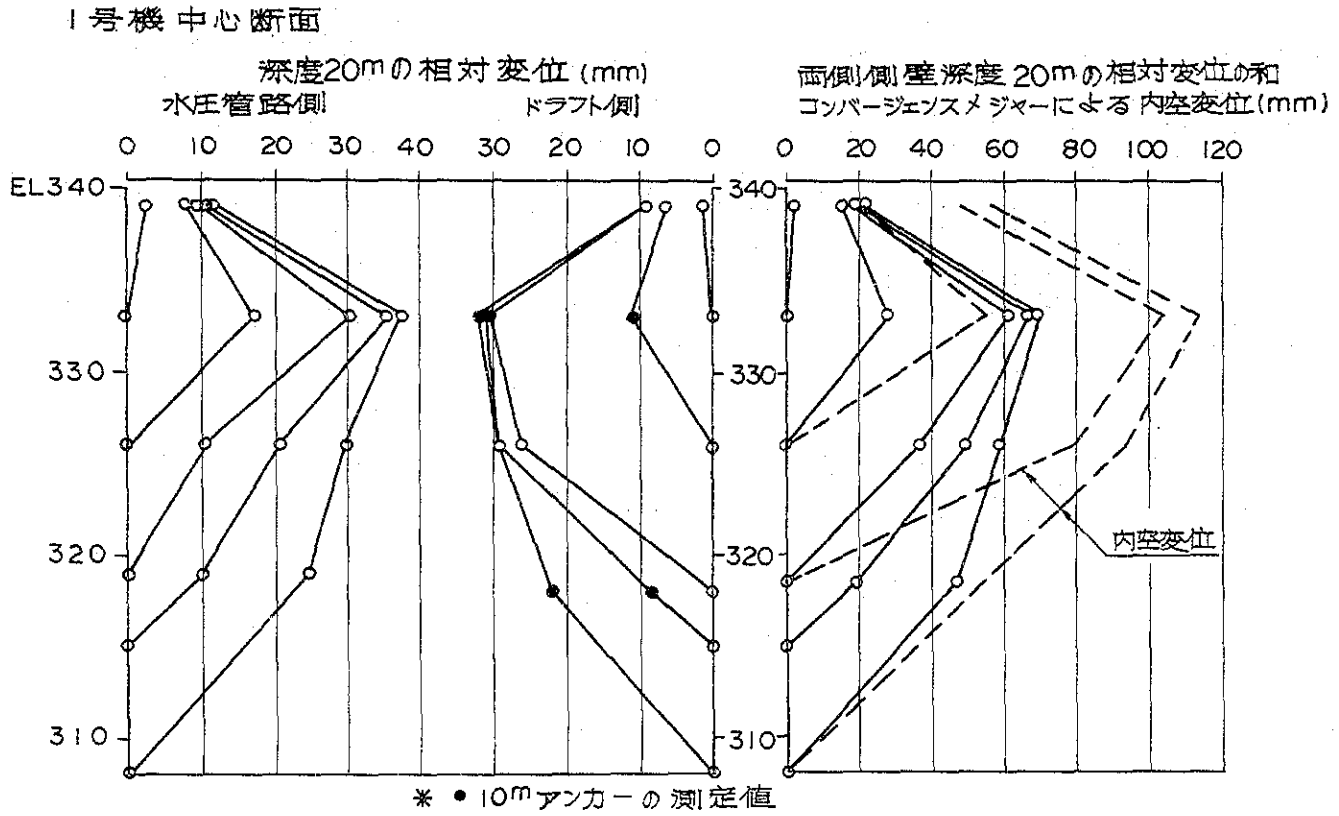


図-Ⅱ.3.5－5　盤下げによる側盤岩盤のはらみ出し（下郷発電所）

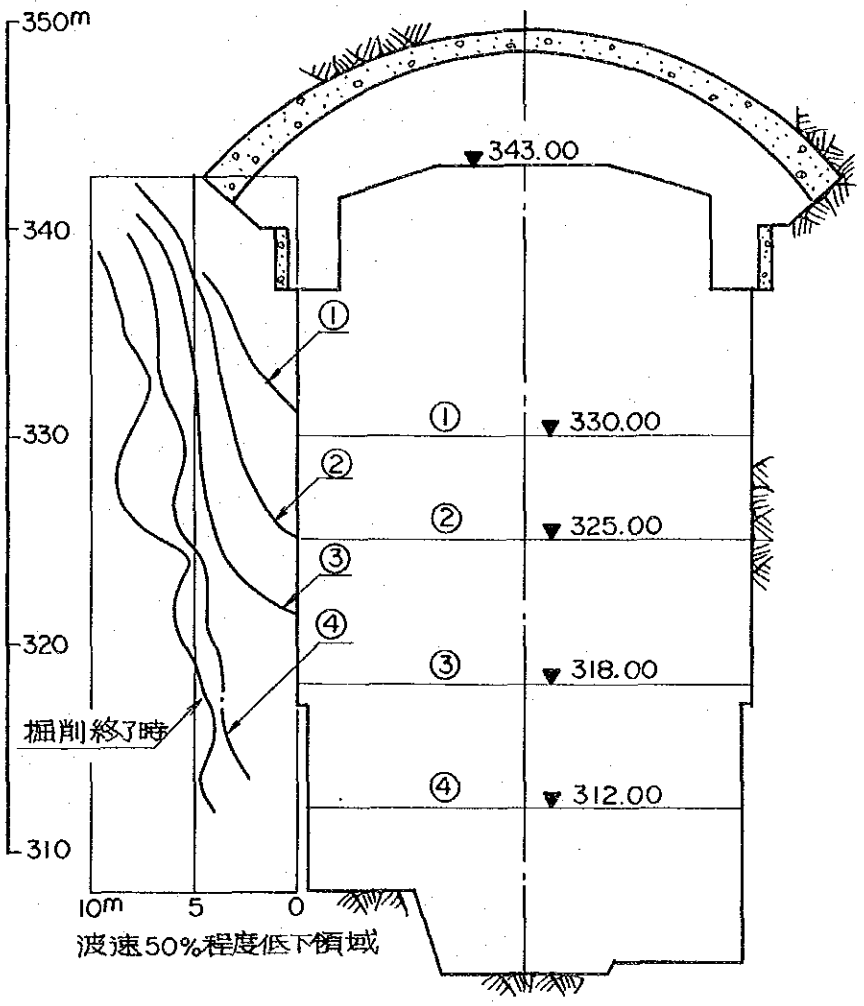


図-Ⅱ.3.5-6　孔間弾性波速度測定による緩み領域の推定
（下郷発電所）

3.6 まとめ

本計画における地下発電所周辺には、主変圧器室、ドラフトゲート室及び種々機能トンネルが集中して配置されており、大規模地下構造物群が構成されている。これら地下構造物群は、断層が発達しておらず比較的亀裂の少ない礫岩を選択してその岩塊の中にすべて配置されており、土木地質の観点からは妥当な地点選定と結論できる。地質調査はボーリング及び調査横坑により実施されており、かなり明確となっている。また、ボーリングコアによる岩石試験や現位置岩盤試験も充分実施されており、岩石や岩盤の工学的性質を充分把握することが可能である。また、大規模空洞の安定性を支配する要因の一つである地山応力についても調査横坑内で測定されている。これらの調査結果に基づき発電所空洞のレイアウトが決定されており、妥当であると考えられる。しかし、調査横坑はEL.210m のレベルに掘削されており、発電所アーチ部天端標高(EL.64.9m)より約145m上方に位置している為、ここでの調査結果は発電所レベルでの地質状況や岩盤の工学的性質等を必ずしも代表するものではないと考えられる。一方、既に掘削中の換気トンネルは発電所頂設導坑に通じ、そのまま継続して発電所アーチ部の掘削が行われる為、その掘削が完了すれば発電所位置での地質状況が明確になるものと考えられる。同時にこの頂設導坑内あるいは周辺トンネル内で岩盤変形あるいは強度試験を実施することが可能である。従って、調査団は今後行われる詳細設計に向けて以下の調査、試験項目を中国側で実施すべく勧告する。

① 平板載荷試験による現位置岩盤変形試験

② 岩盤剪断試験あるいはブロック剪断試験による岩盤強度試験

③ 岩盤内地山応力測定による主応力の方向と大きさの確認

発電所、主変圧器室等の構造設計に関しては中国側で基本設計を完了しており、本調査では基本設計について技術評価を実施した。

発電所及び主変圧器室空洞は共に「かまぼこ型」の断面形状であり、ロックボルトと金網入りの吹き付けコンクリートにより岩盤補強を行い、これで最終覆工としている。現在までに得られている地質結果が発電所位置においても適用しうるならば、本設計は充分妥当であると結論できるが、仮に地質条件が想定した条件と大幅に異なり、強度、変形特性共に悪ければ断面形状として「きのこ型」を採用し、アーチコンクリート及び側壁コンクリートを設置して空洞の永久的な安定性を確保すべきである。特にクレーン支持コンクリート桁に関しては、ＰＣ鋼線により緊張してクレーンの荷重

を支持し得たとしても、岩盤条件によっては極めて不安定となり、危険である。従って、本設計については今後更に詳細な地質状況の把握と、岩盤力学的な検討が必須である。本方法を採用する場合には地質状況の変化に対応できるよう対策案を準備しておくことを推奨する。例えば、ＰＣ鋼線の増し打ちは勿論のこと、桁を支持するためのコンクリート柱の設置やコンクリート側壁の設置等が考えられる。

ドラフトゲート室を別空洞としてそこに４門の高圧スライドゲートを設ける計画となっているが、これらゲートを主変圧器室内に設置するごとにより、ドラフトゲート室空洞を省略することも可能である。この場合、主変圧器室空洞は若干延長が長くなるが、構造的にも機能的にも特に問題はないと考えられる。このことにより掘削量及びコンクリート量の削減と、工程の緩和に寄与するものと思われる。

発電所内への地下水の湧水処理の為に排水工が必要である。特に本計画では吹き付けコンクリートによる永久覆工が考えられていることから、排水処理対策は重要である。現設計で計画されているように、発電所、主変圧器室及びドラフトゲート室を取り囲む排水トンネルの設置は妥当であると思われる。また、湧水が特に多いようであれば、排水トンネルから更に排水ボーリングを設け、積極的に集水して地下水位を下げ、吹き付けコンクリート覆工に外水圧が作用しないようにすることが必要である。

本調査では発電所及び主変圧器室の大規模地下空洞としての安定性を評価するために、有限要素法による応力、変形解析を実施した。本解析では岩盤のマスとしての剪断破壊領域の検討と同時に、卓越する亀裂面を仮定し、この亀裂面上での滑り破壊を生じる領域についても検討を行った。また、初期条件としての地山応力については、実測結果に基づいて側圧係数を２.０とした。更に、比較参考の為に、側圧係数1.0 及び0.５のケースについでも解析を行い、初期地山応力条件による空洞安定性に与える影響について評価した。

解析結果によると、掘削時の空洞変形（側壁部岩盤のはらみ出し）は最大で約30㎜程度であり、また剪断破壊領域も大きく発生しないことが予想された。一方、亀裂面上での滑り破壊領域は広範囲に発生し、側圧係数２.０の場合には発電所と主変圧器室空洞間で連続してしまう程度に広がることが判明した。しかし、この領域では発電所に対し亀裂面は差し目となり、空洞の安定性には特に問題とならないと予想される。また、このような破壊形態に対してはロックボルトが充分その効果を発揮するものと期待できる。これら解析結果の評価、検討により現設計で計画されているロックボル

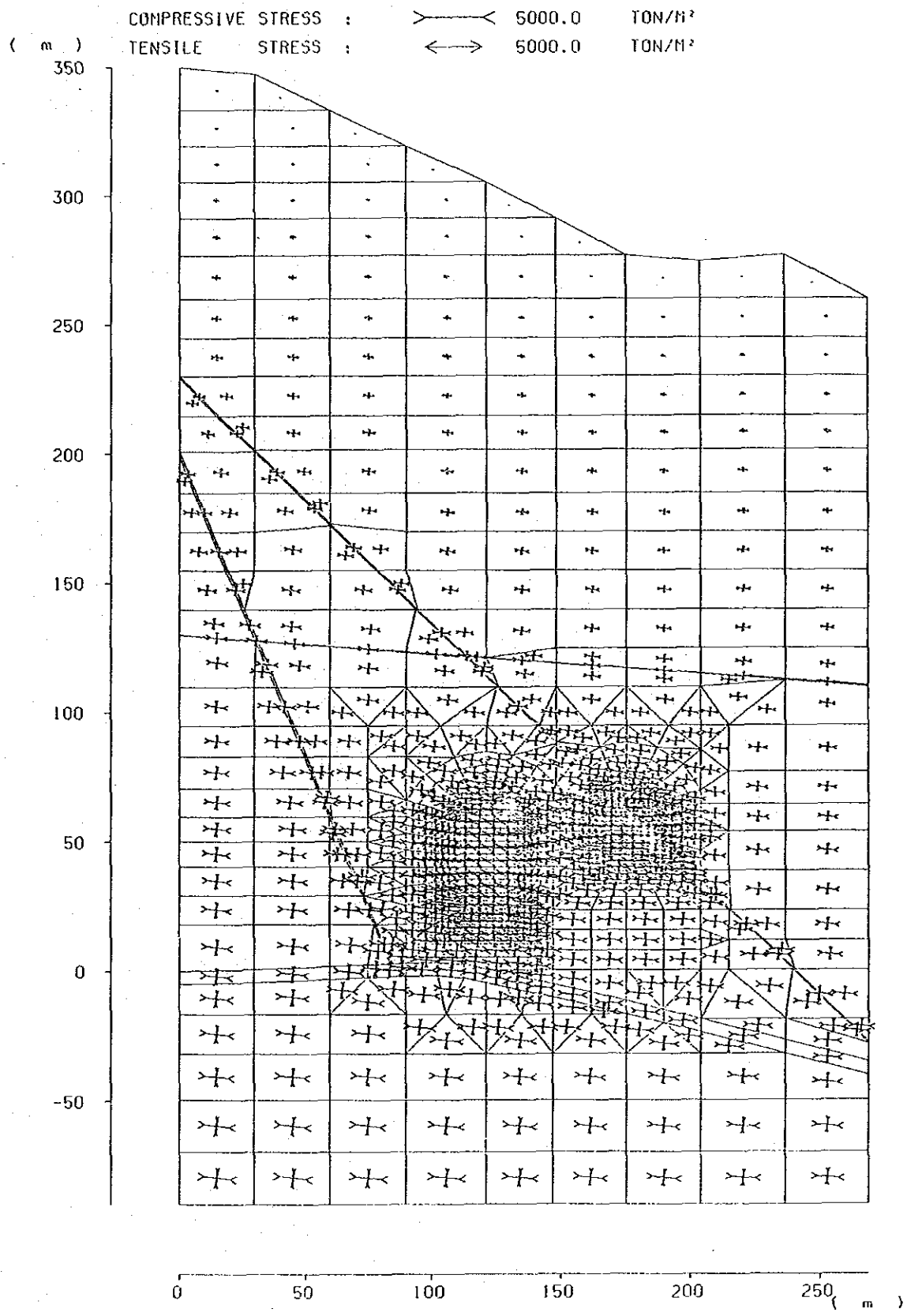
ト、吹き付けコンクリートによる岩盤補強工は現時点での地質、岩盤条件が成立する限り妥当であると言える。しかし、発電所レベルでの地質条件が現在想定しているよりも悪いと判断される場合には、現設計の岩盤補強工では空洞安定性を確保することが難しく、アーチコンクリートと側壁コンクリートにより岩盤を保護するいわゆる「きのこ型」を採用すべきものと考えられる。

発電所及び主変圧器室空洞の掘削段階では、計測を充分に、定常的にまた精度良く実施し、計測結果に基づいた掘削施工管理を行うべきである。現設計での計測基本計画は必要且つ充分であり、妥当であると言える。

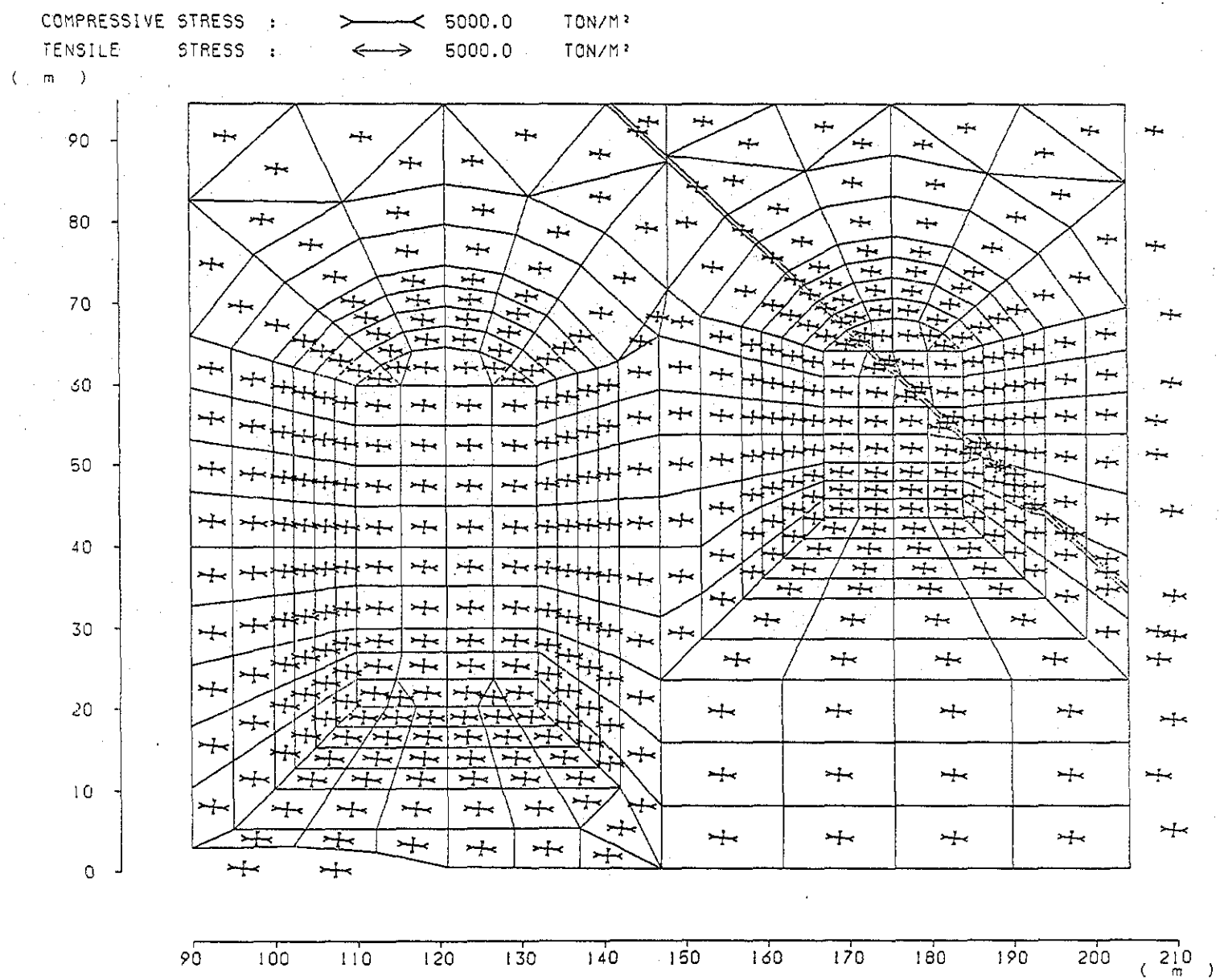
参考資料

参考資料として下記の計算結果を添付する。

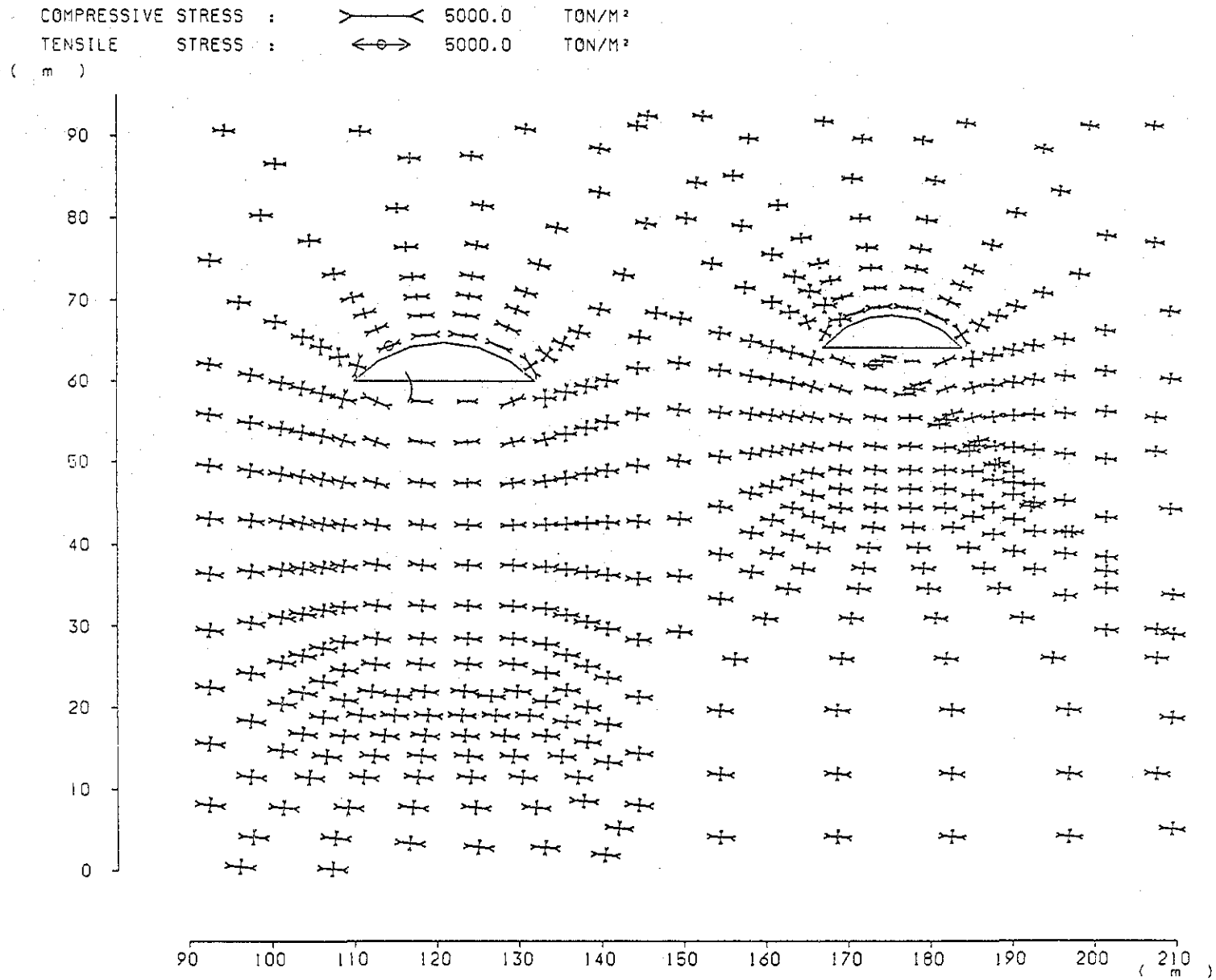
解析ケース名	内　　容
解析ケース1	主応力図　（初期状態～最終掘削時） 変形図　（　〃　） 剪断破壊による要素安全率　（　〃　） 滑り破壊（第1亀裂群）による要素安全率（　〃　） 滑り破壊（第2亀裂群）による要素安全率（　〃　）
解析ケース2	主応力図　（初期状態，最終掘削時） 変形図　（最終掘削時） 剪断破壊による要素安全率　（　〃　） 滑り破壊（第1亀裂群）による要素安全率（　〃　） 滑り破壊（第2亀裂群）による要素安全率（　〃　）
解析ケース3	主応力図（初期状態，最終掘削時） 変形図　（最終掘削時） 剪断破壊による要素安全率　（　〃　） 滑り破壊（第1亀裂群）による要素安全率（　〃　） 滑り破壊（第2亀裂群）による要素安全率（　〃　）



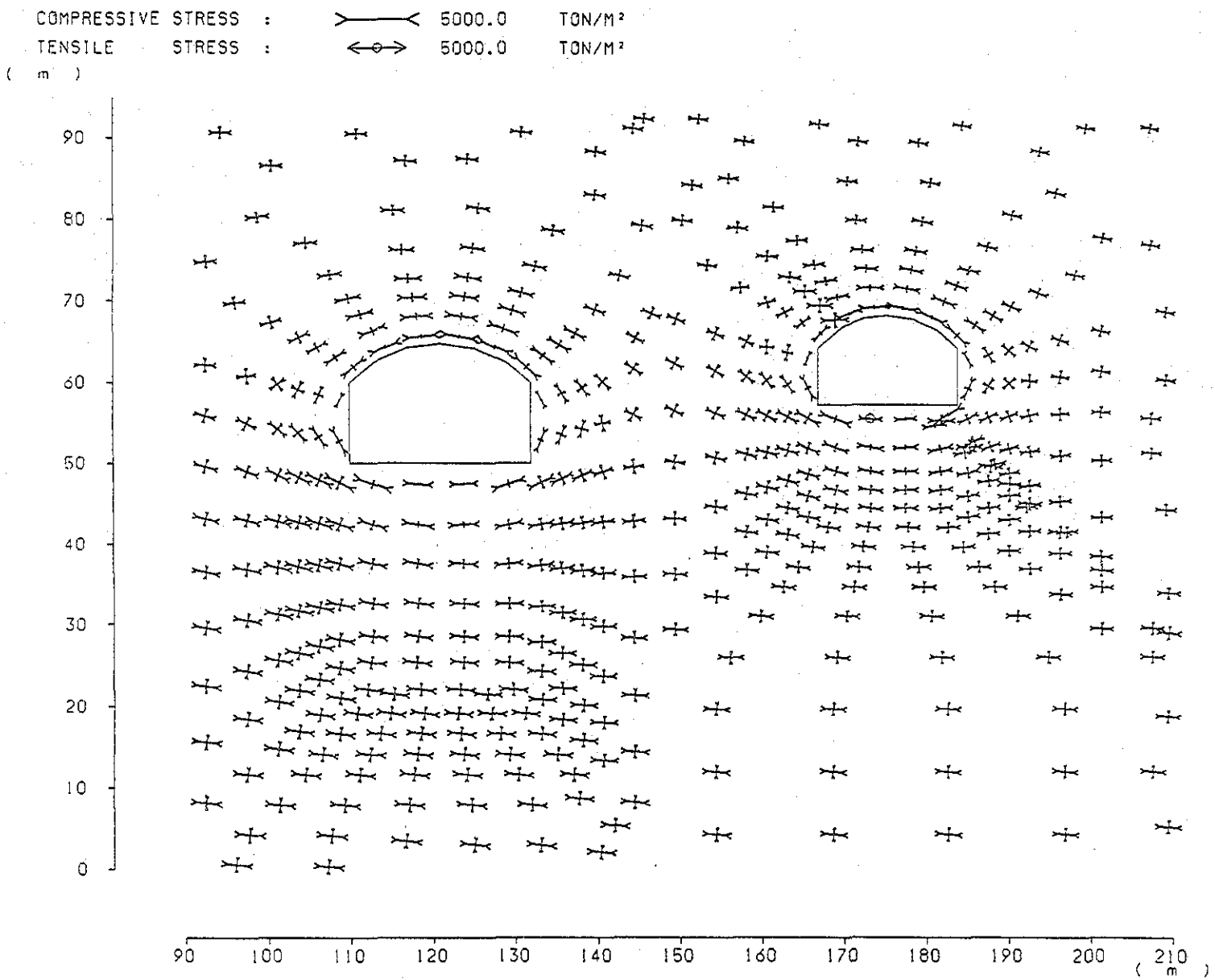
ケース1（λ＝2．0）・・主応力図（初期状態）



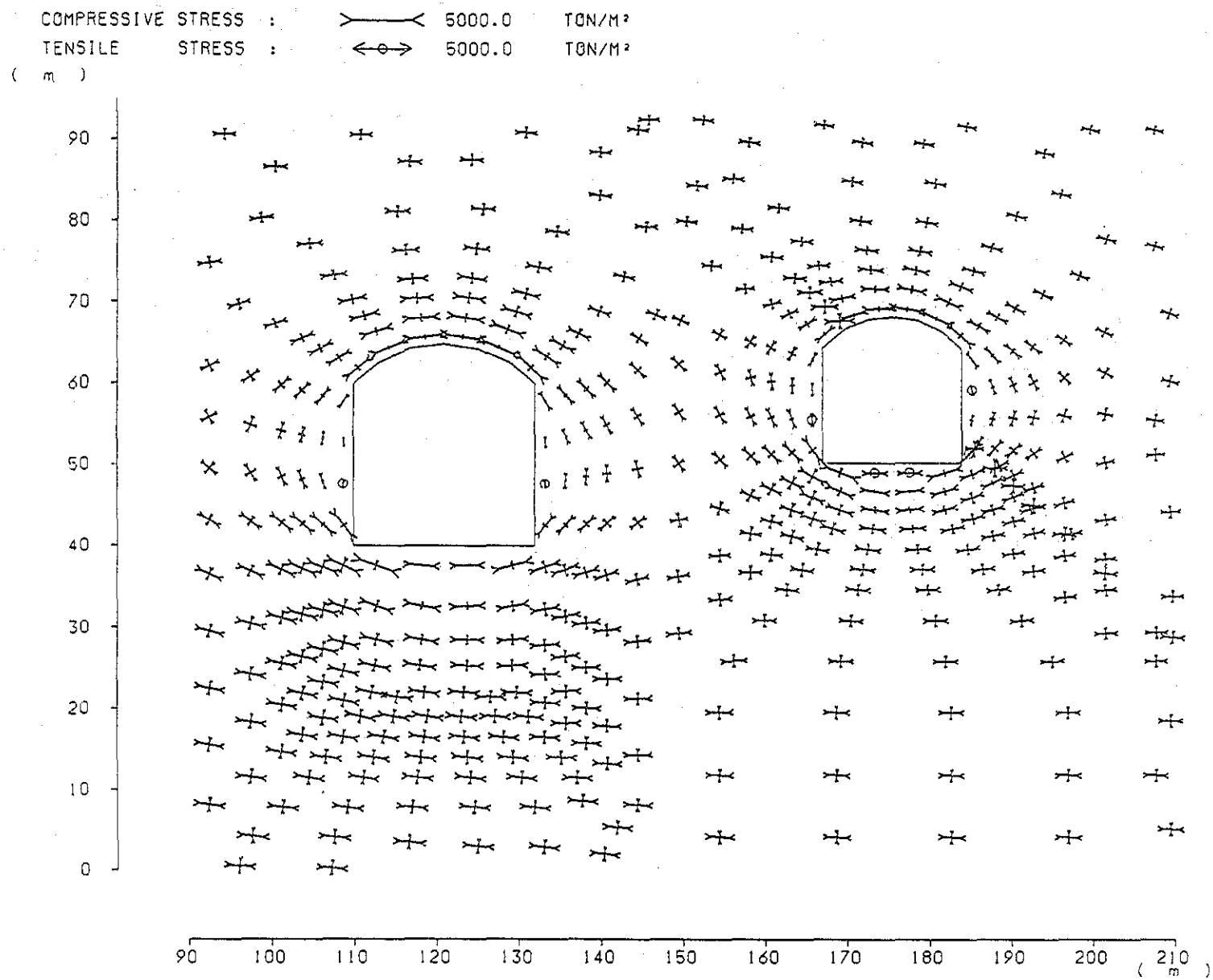
ケース1（λ＝2．0）・・主応力図（初期状態）



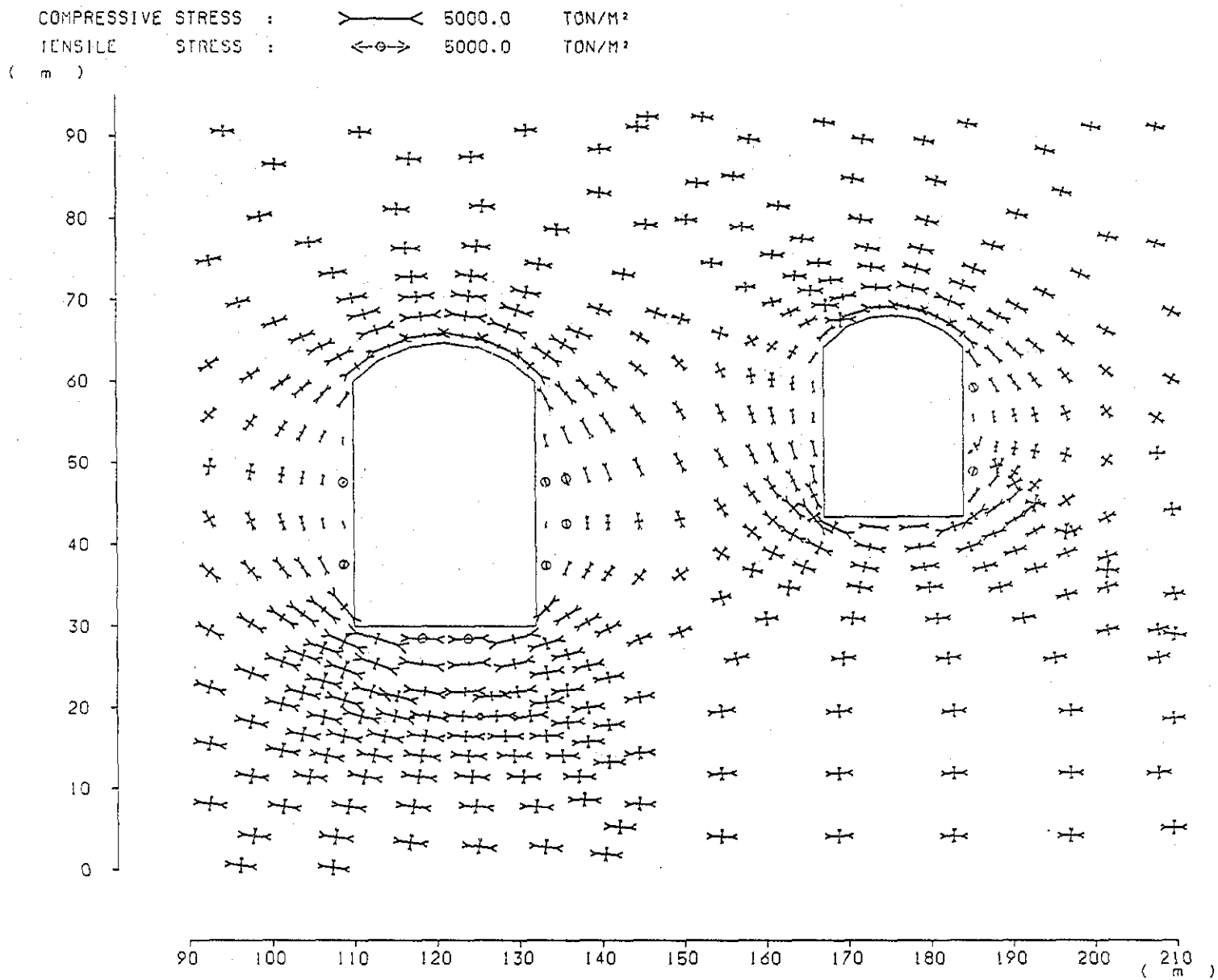
ケース1（λ＝2．0）・・主応力図（第1段階掘削）



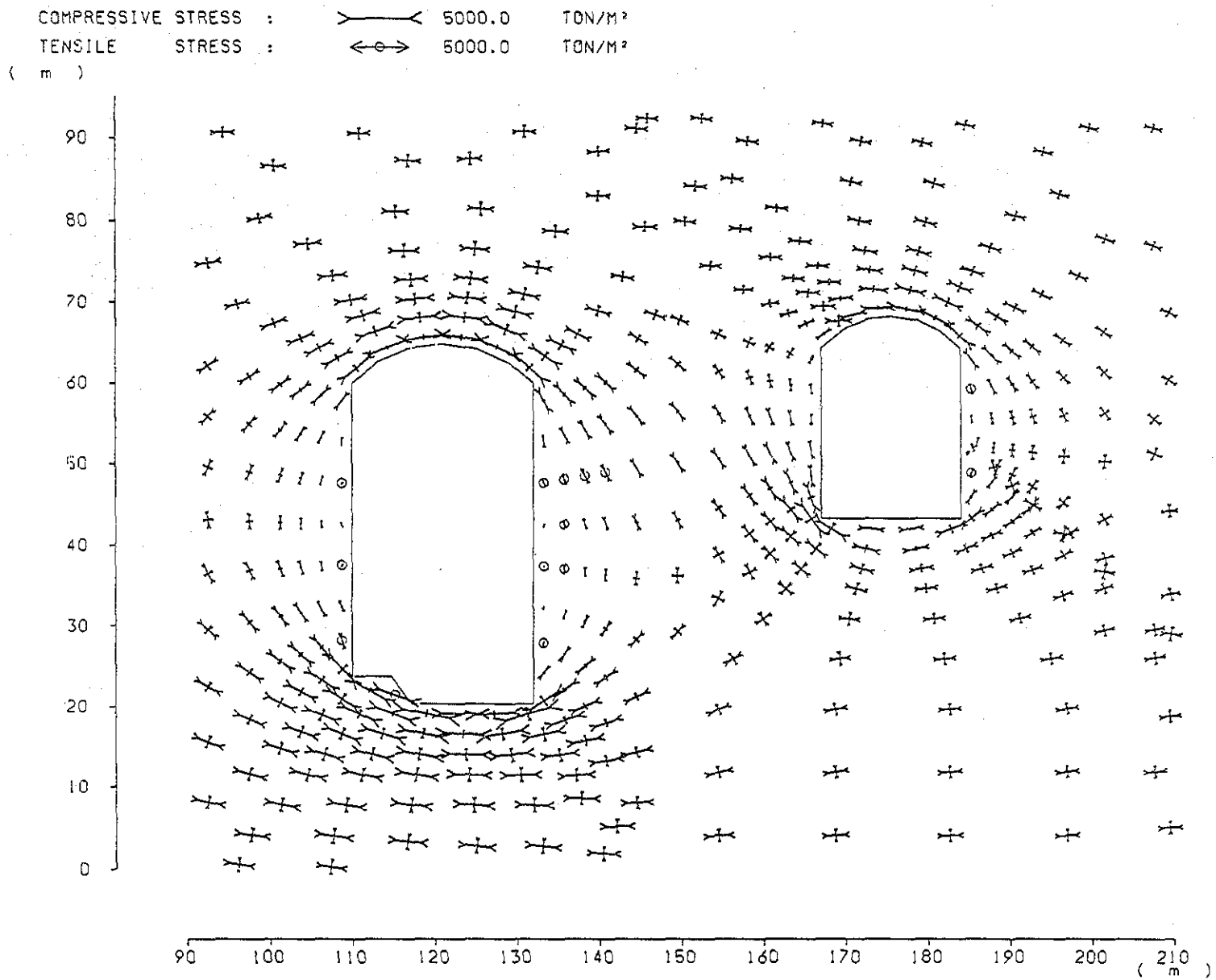
ケース1（λ＝2．0）・・主応力図（第2段階掘削）



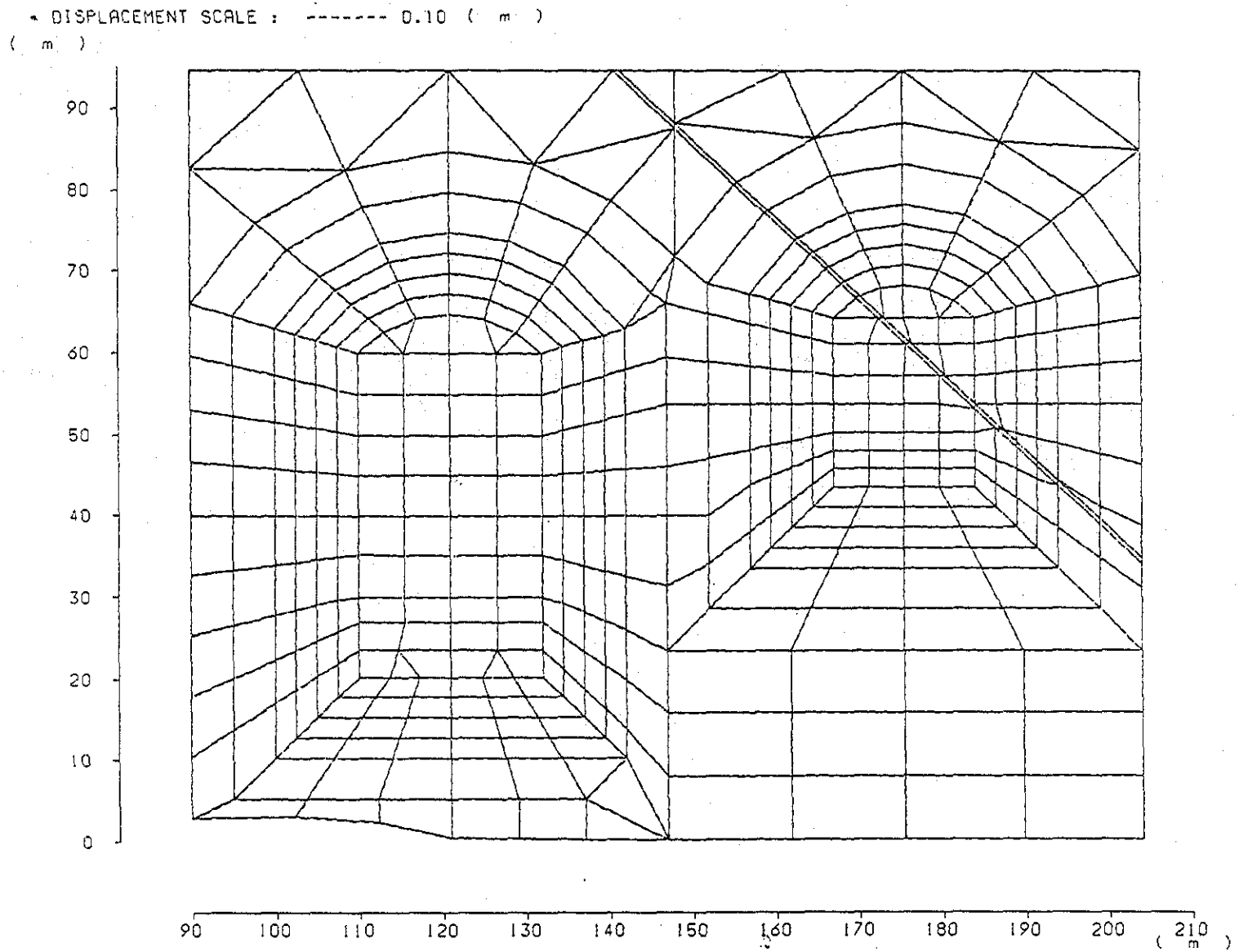
ケース1（λ＝2．0）・・主応力図（第3段階掘削）



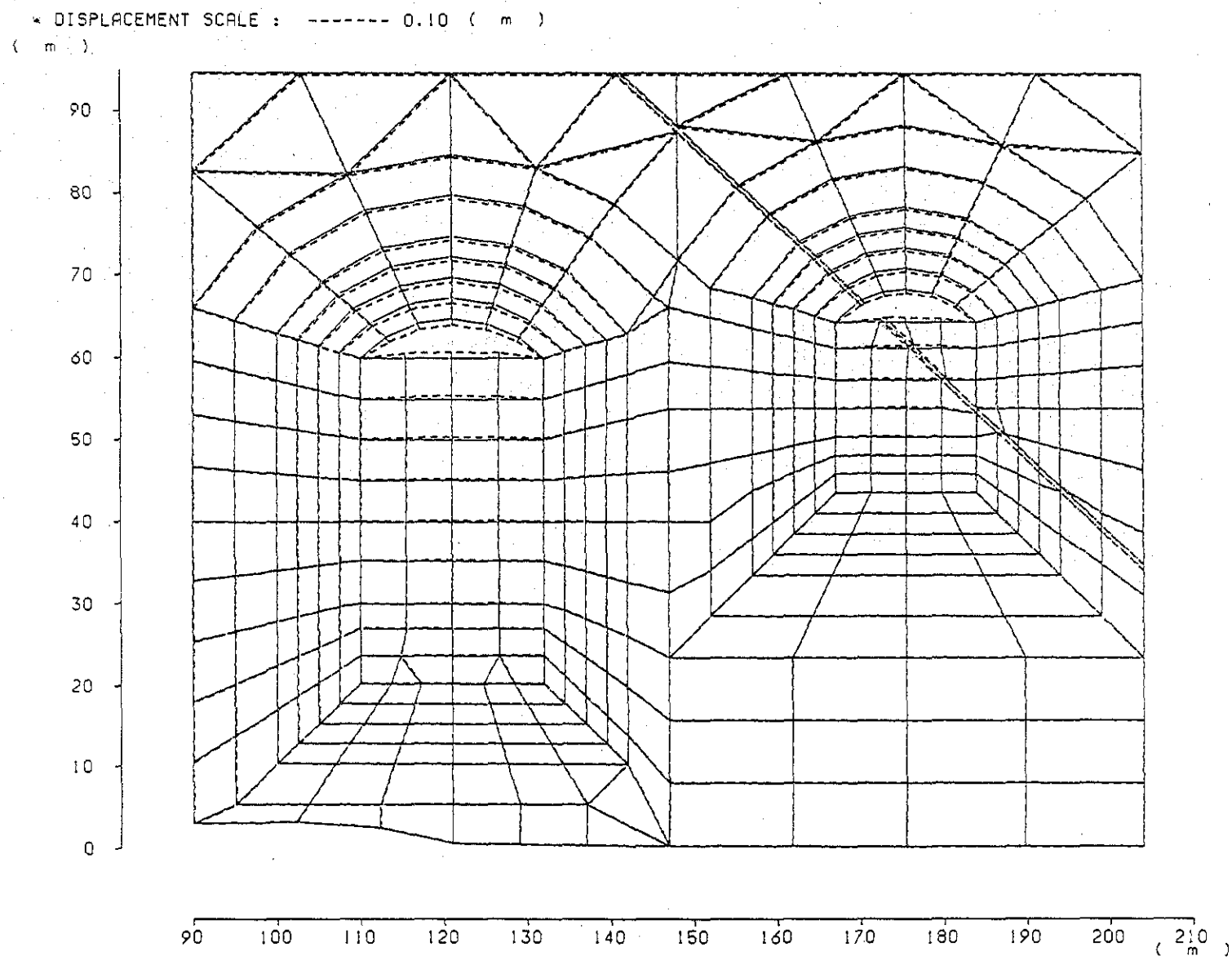
ケース1（λ＝2．0）・・主応力図（第4段階掘削）



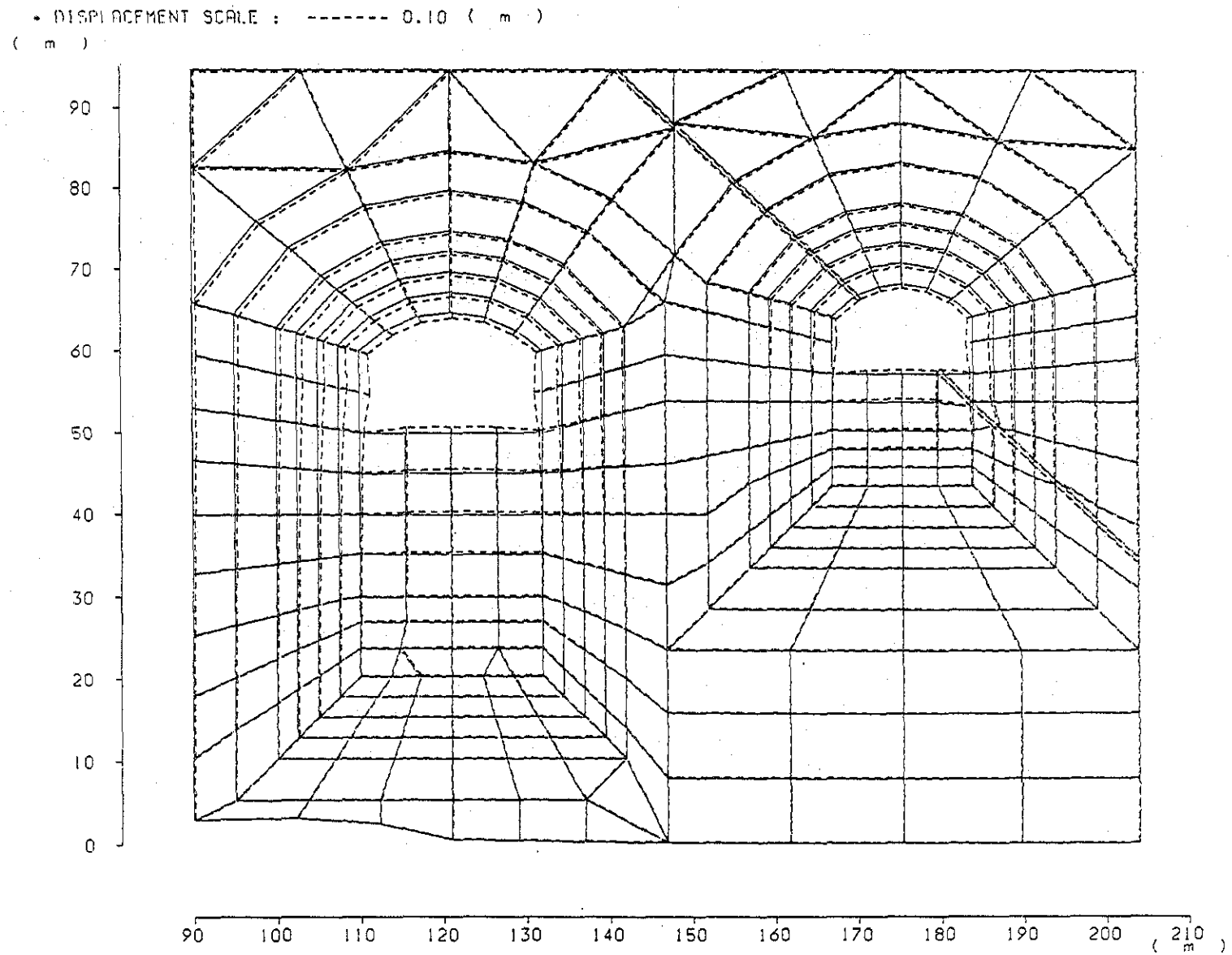
ケース1（λ＝2．0）・・主応力図（第5段階掘削）



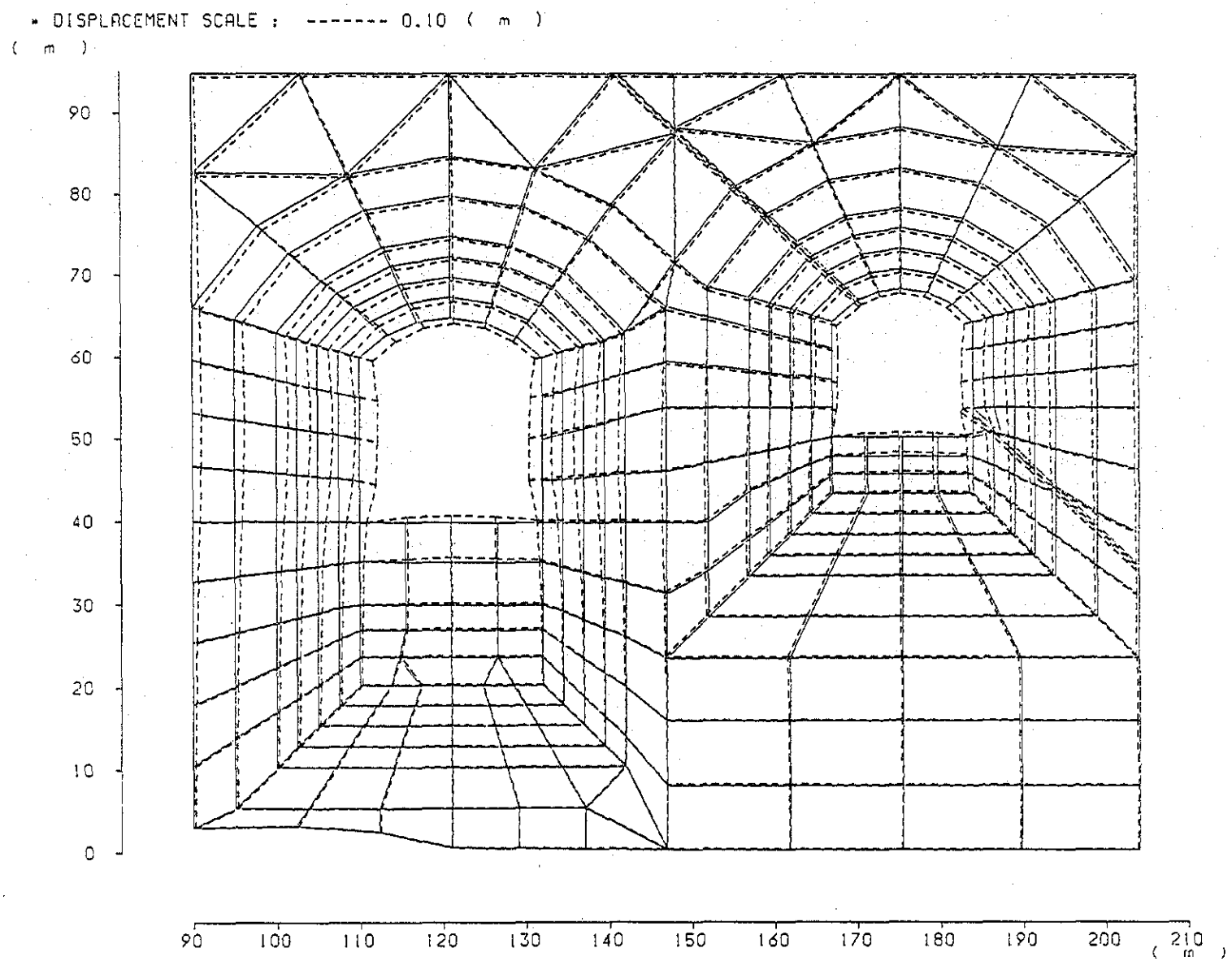
ケース1（λ＝2．0）・・変形図（初期状態）



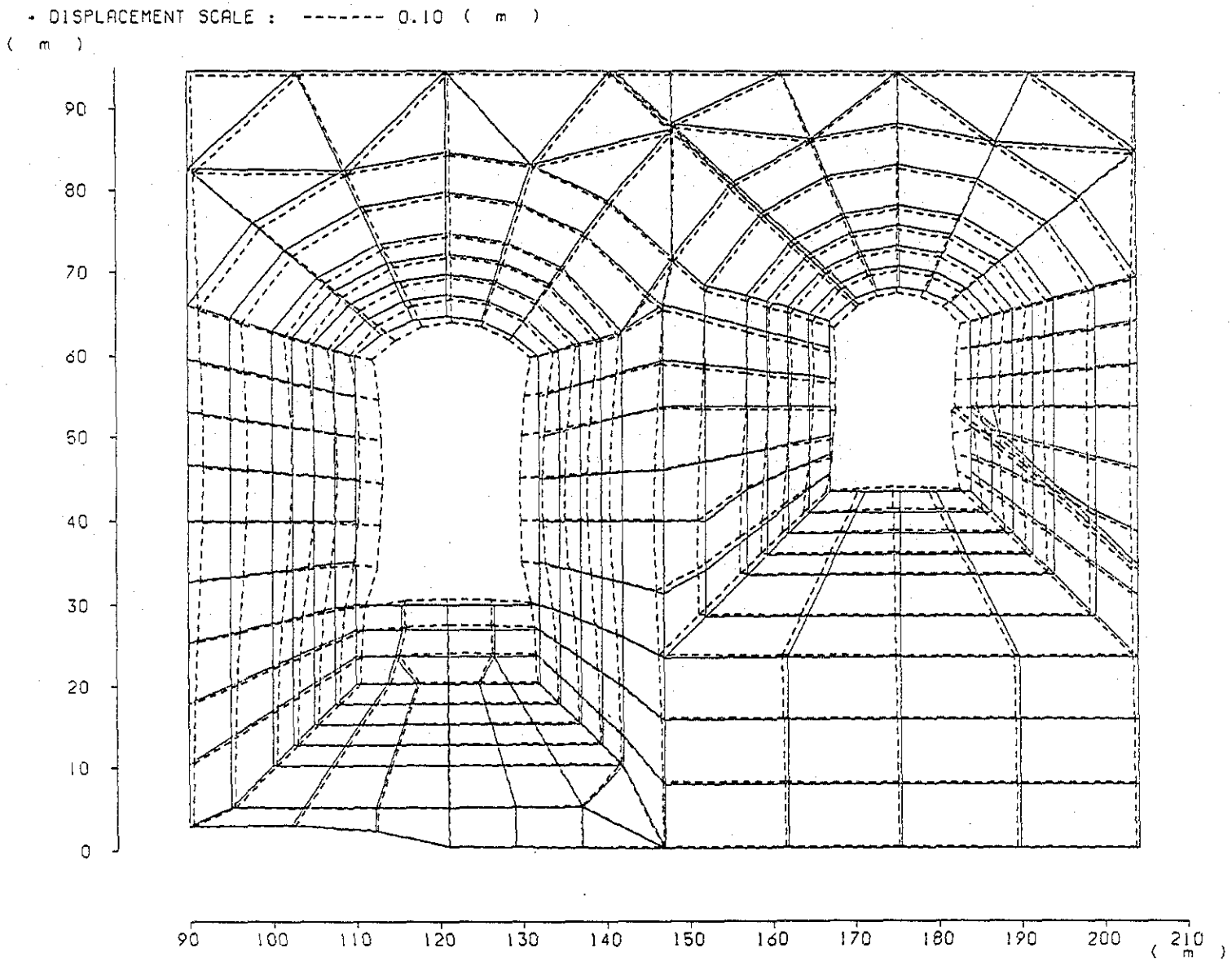
ケース1（λ＝2．0）・・変形図（第1段階掘削）



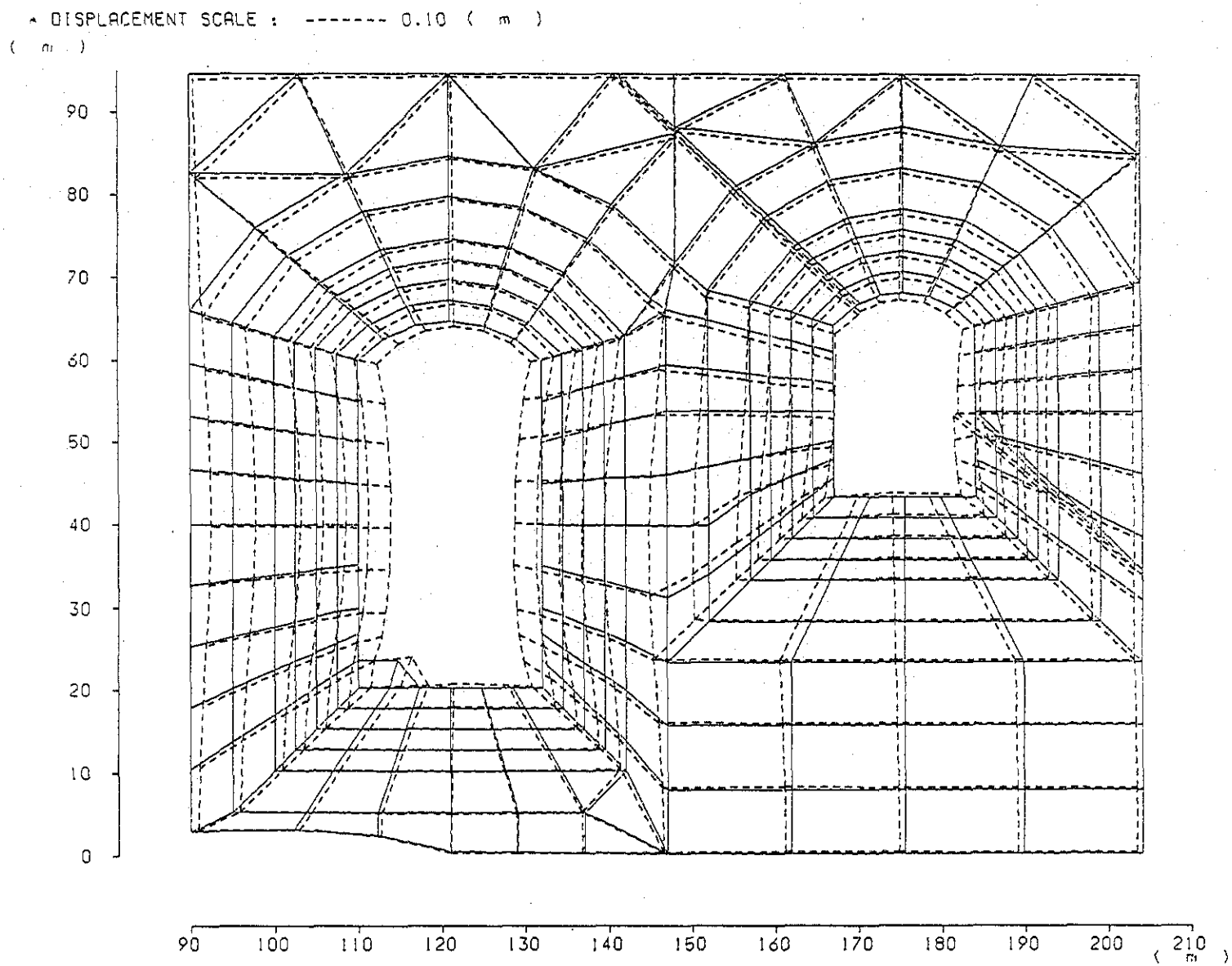
ケース1（λ＝2．0）・・変形図（第2段階掘削）



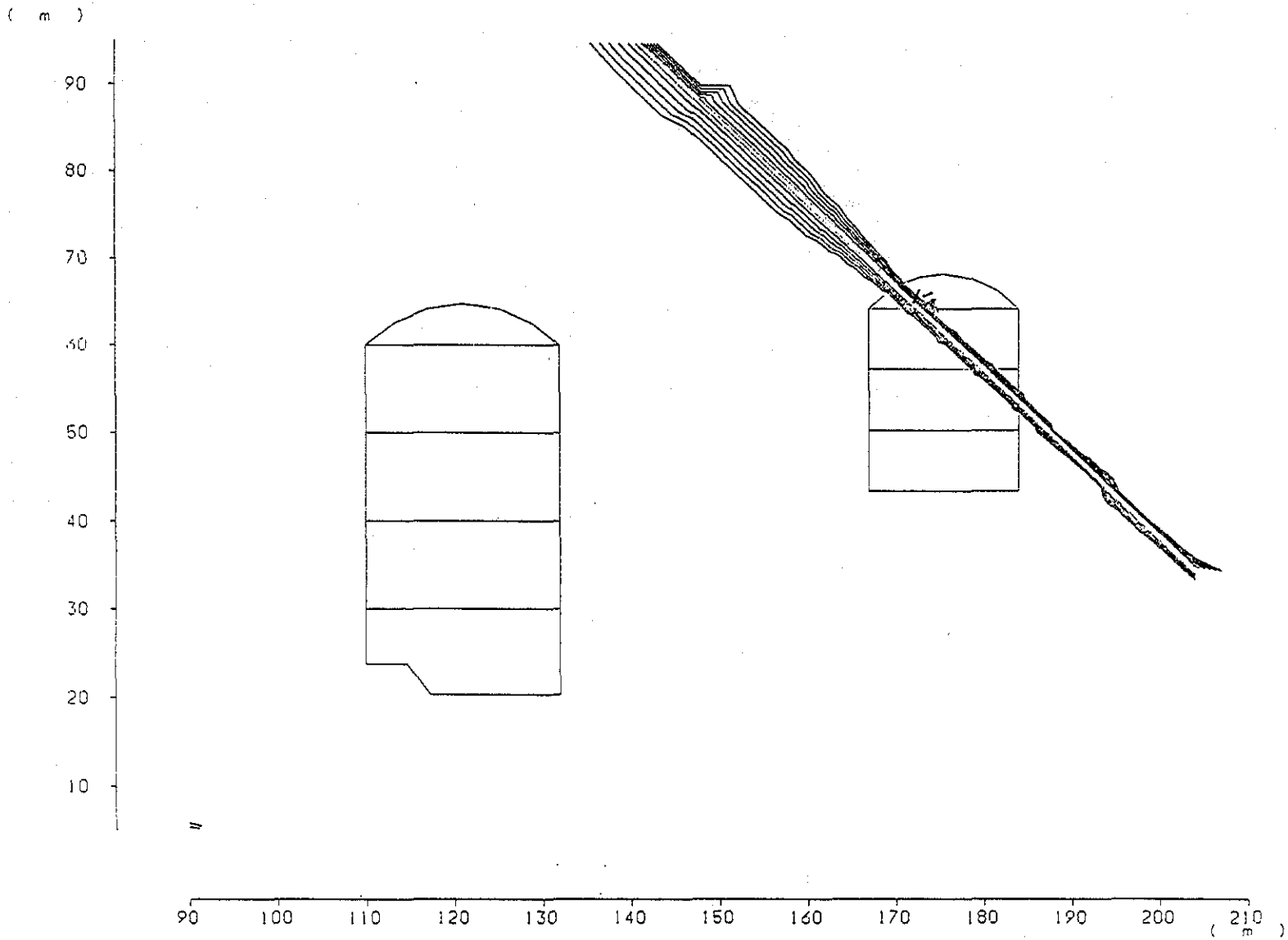
ケース1（λ＝2．0）・・変形図（第3段階掘削）



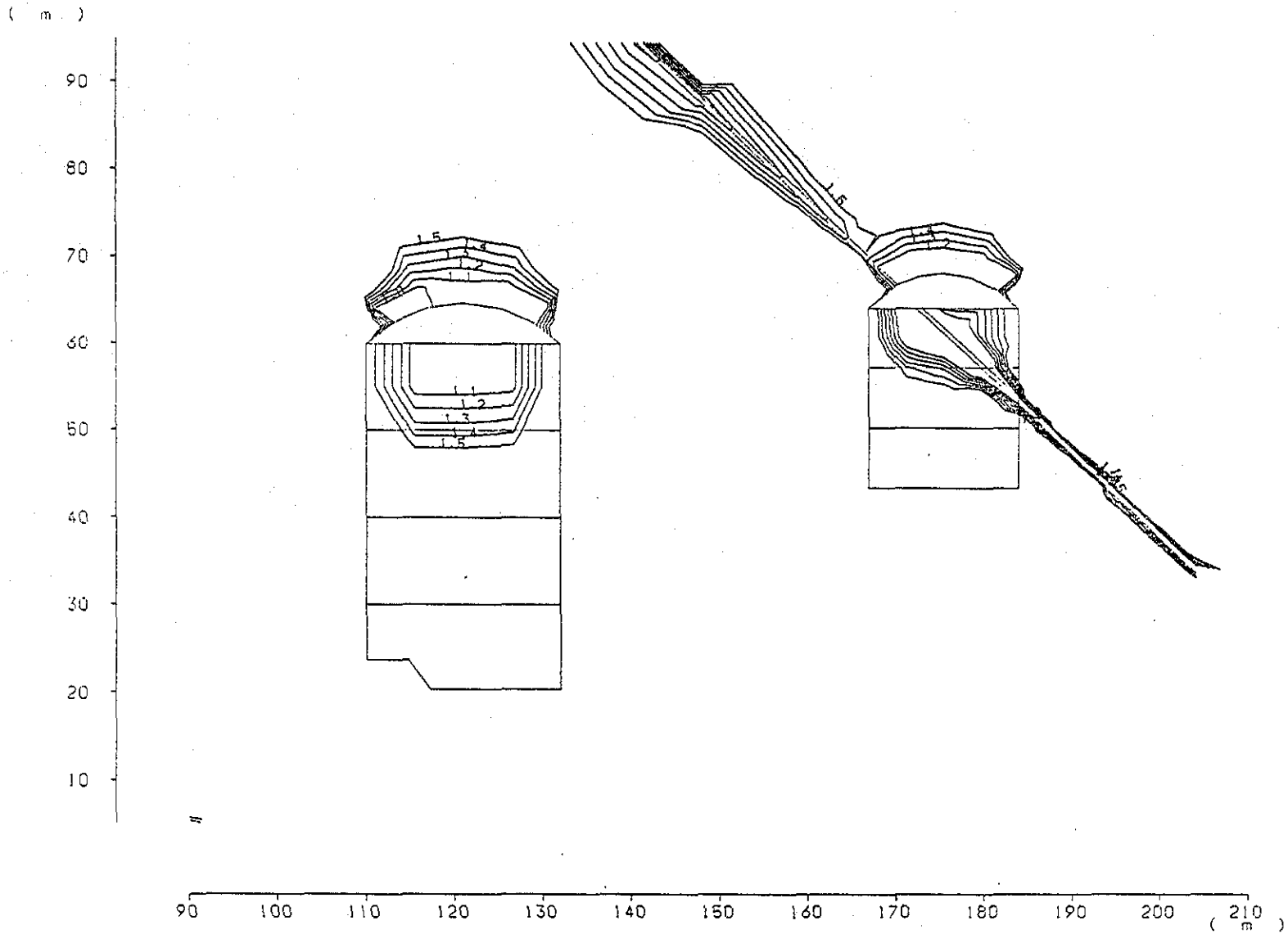
ケース1（λ＝2．0）・・変形図（第4段階掘削）



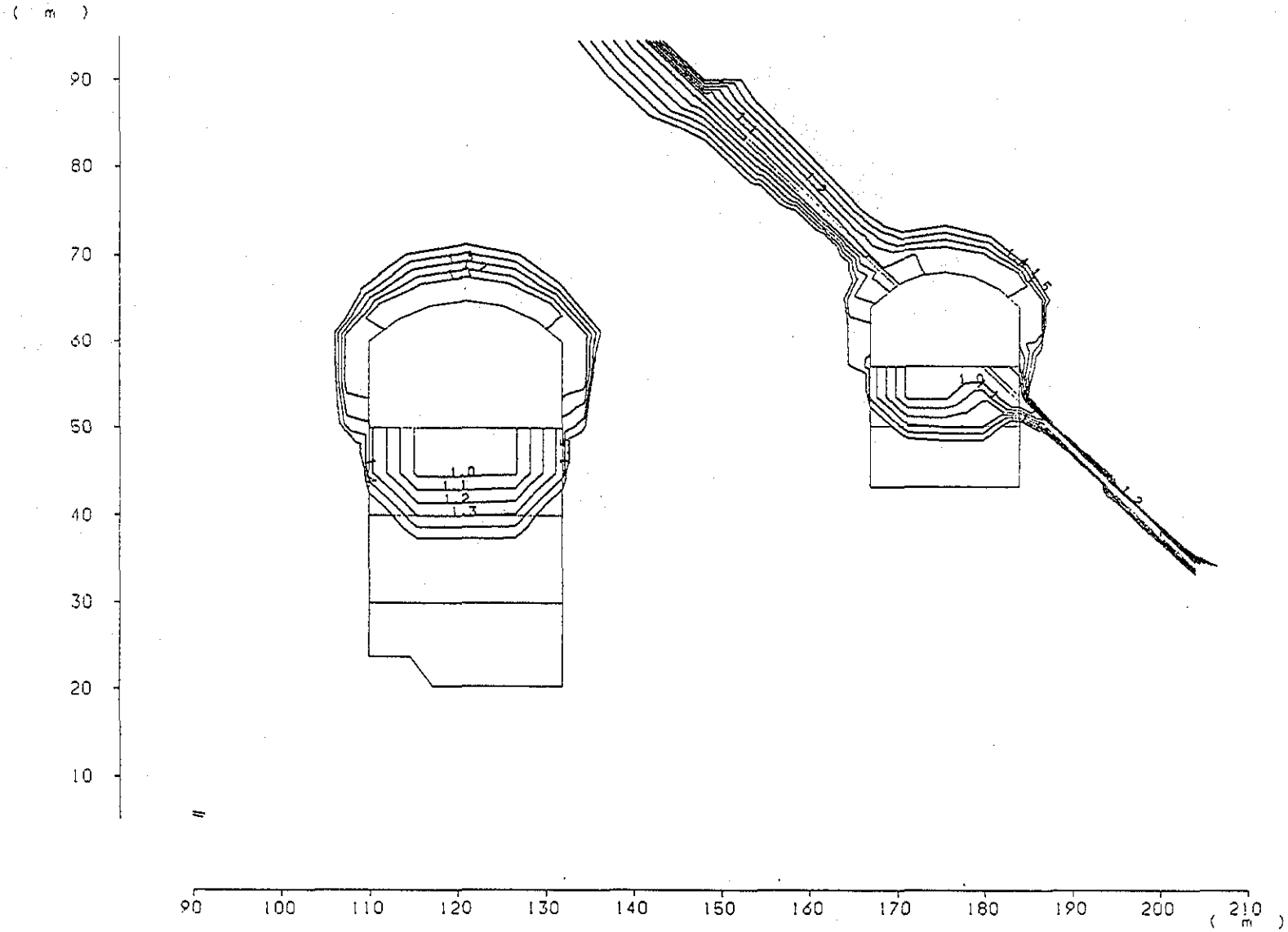
ケース1（λ＝2．0）・・変形図（第5段階掘削）



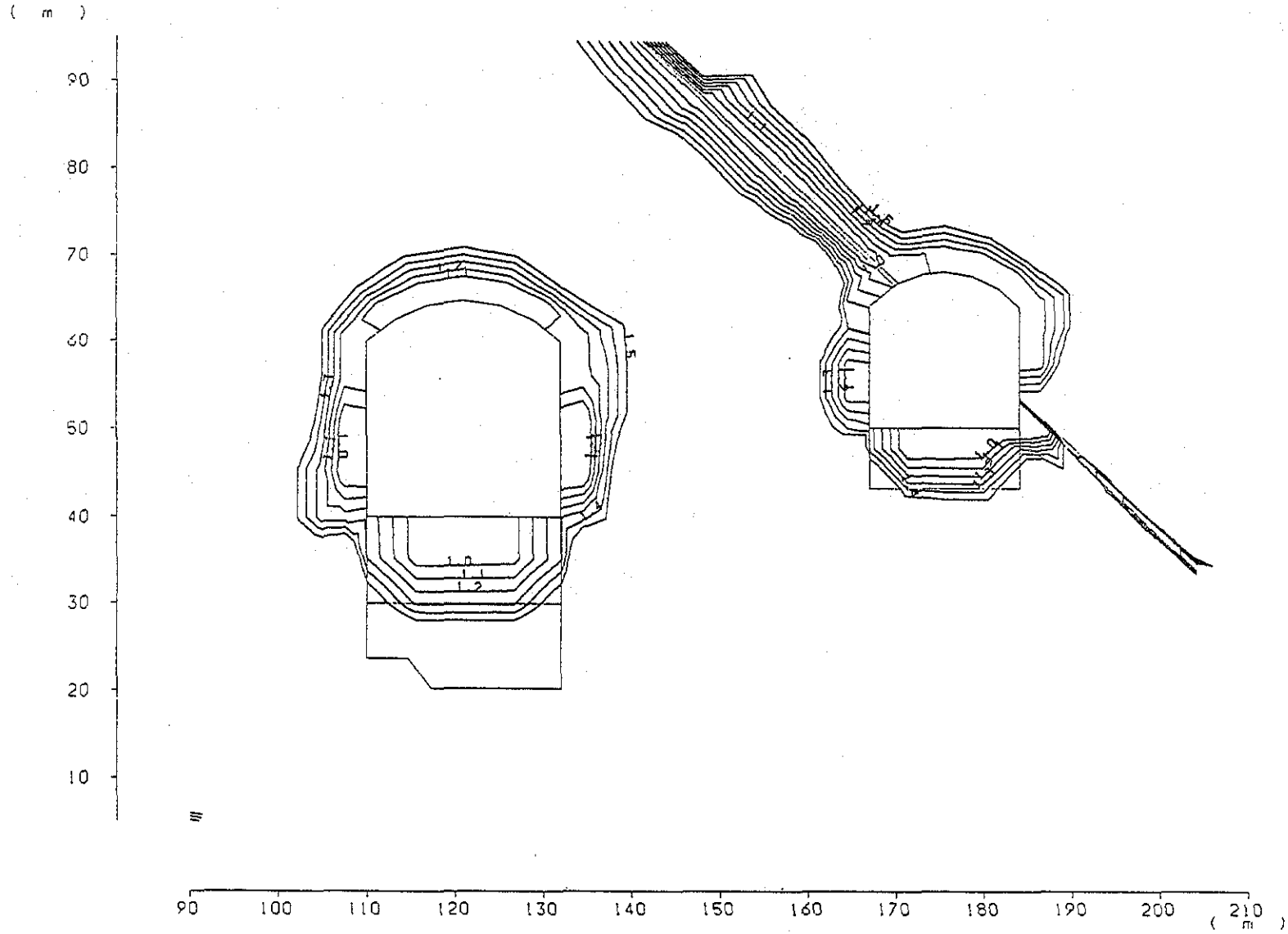
ケース１（λ＝２．０）・・せん断破壊による要素安全率（初期状態）



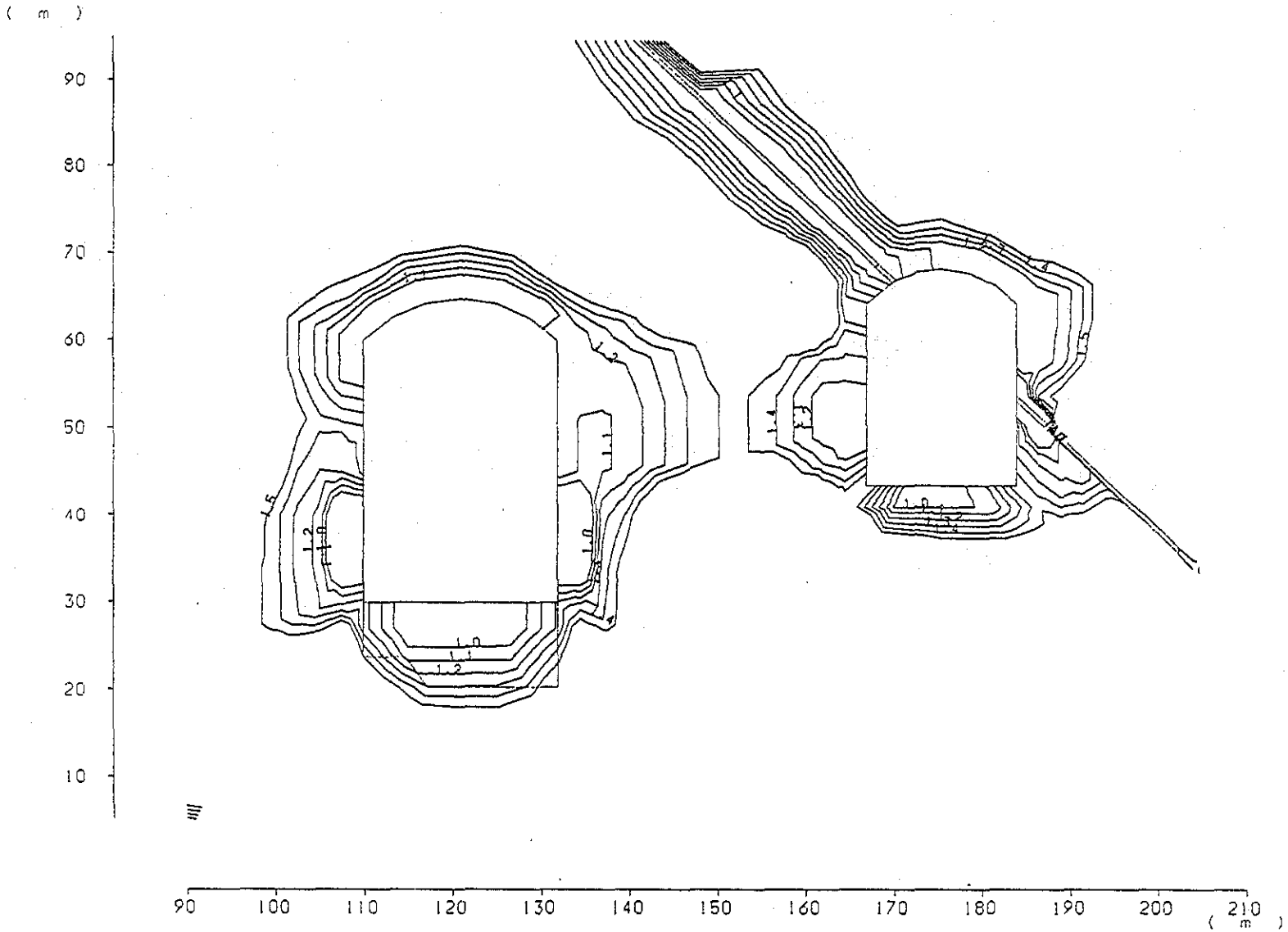
ケース1（λ＝2．0）・・せん断破壊による要素安全率（第1段階掘削）



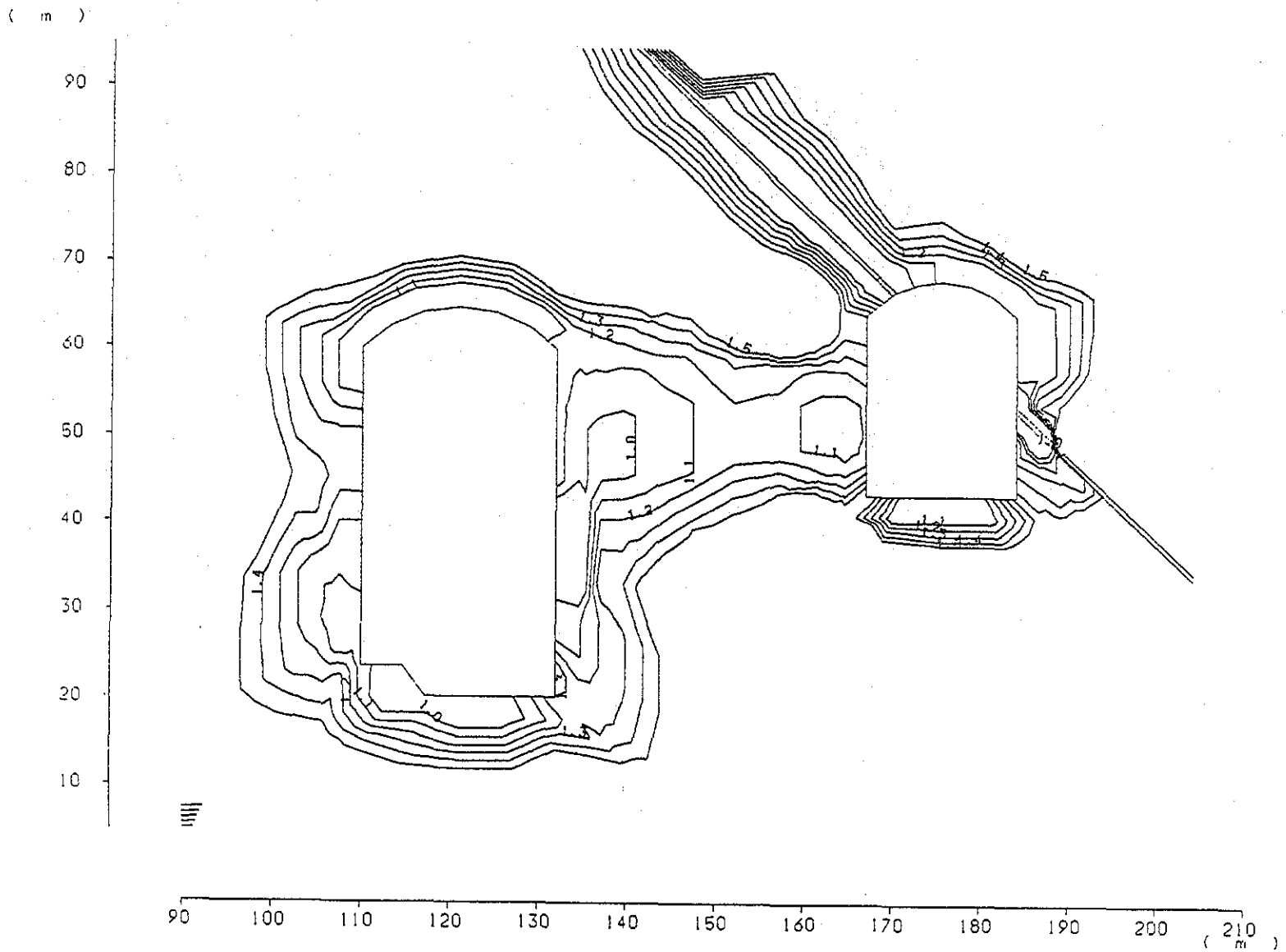
ケース1（λ＝2．0）・・せん断破壊による要素安全率（第2段階掘削）



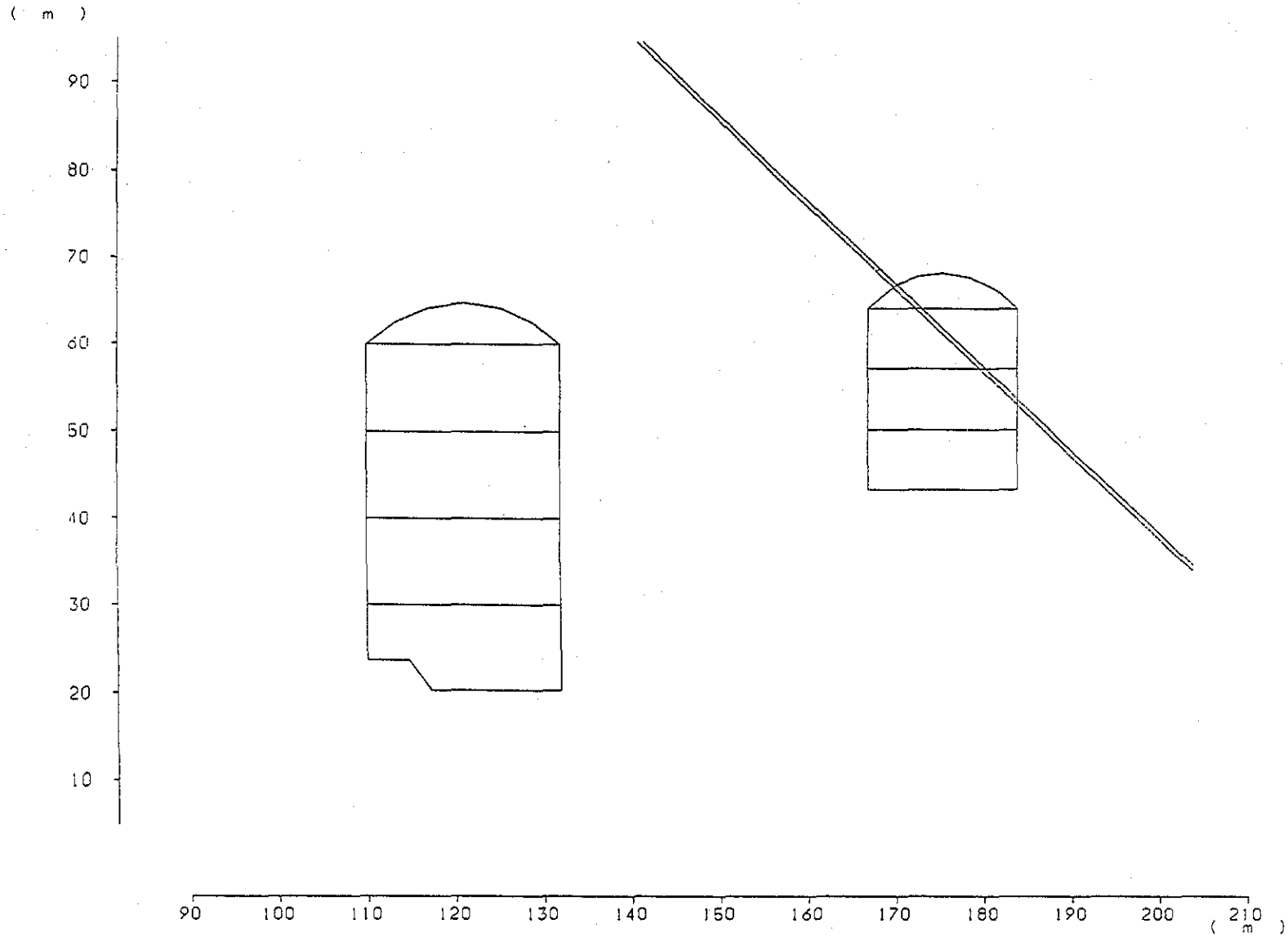
ケース1（λ＝2．0）・・せん断破壊による要素安全率（第3段階掘削）



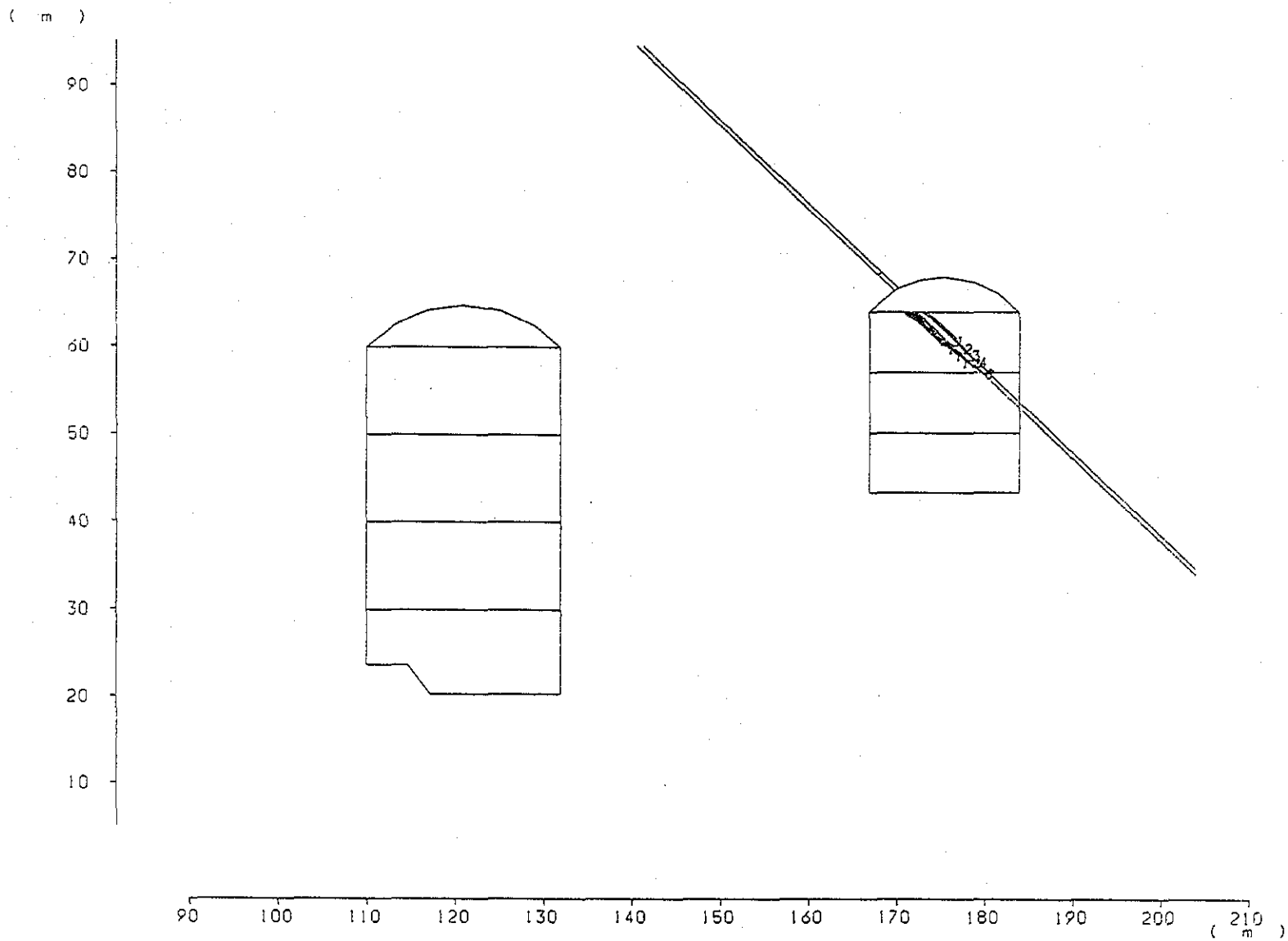
ケース1（λ＝2．0）・・せん断破壊による要素安全率（第4段階掘削）



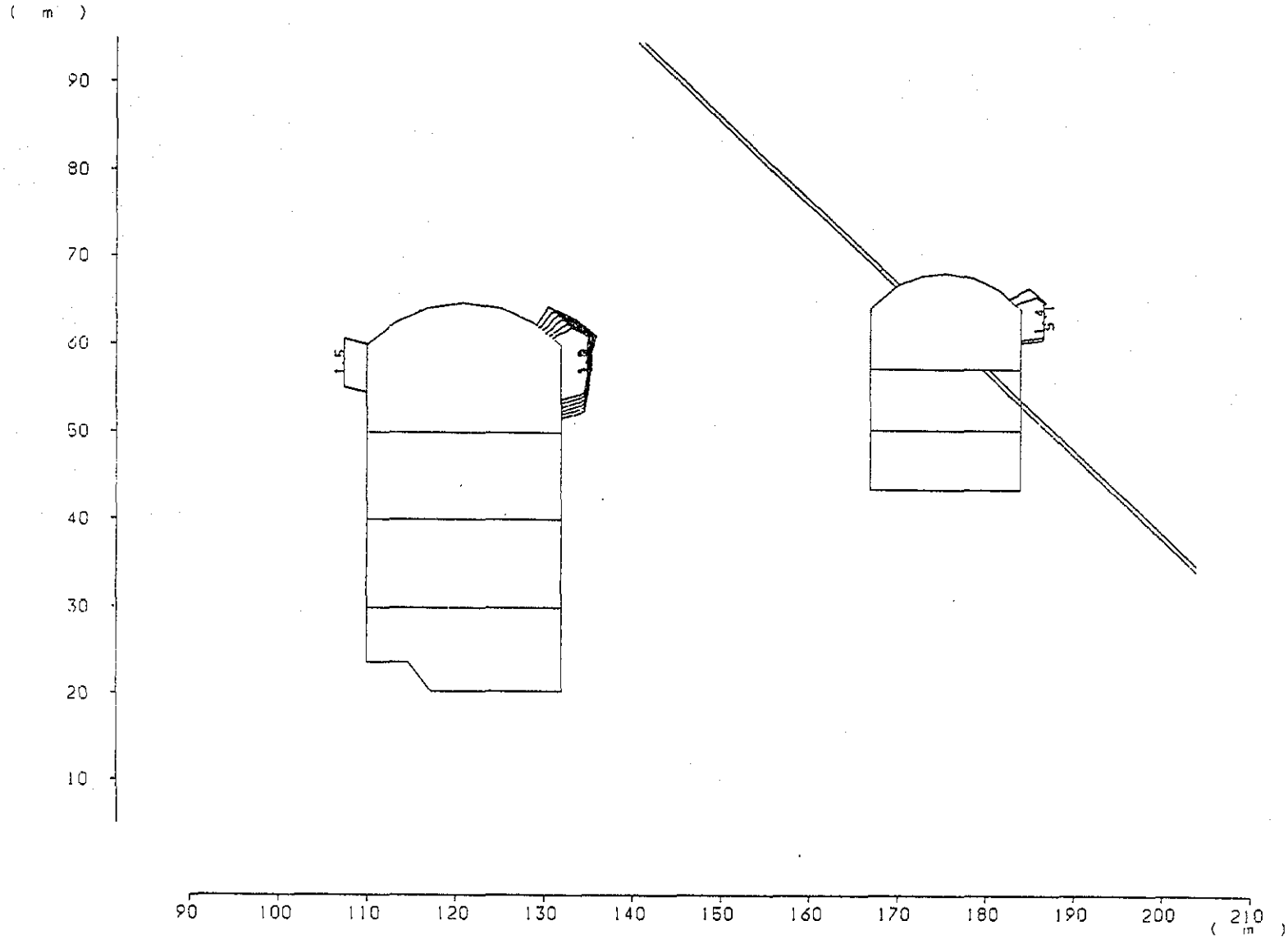
ケース1（λ＝2．0）・・せん断破壊による要素安全率（第5段階掘削）



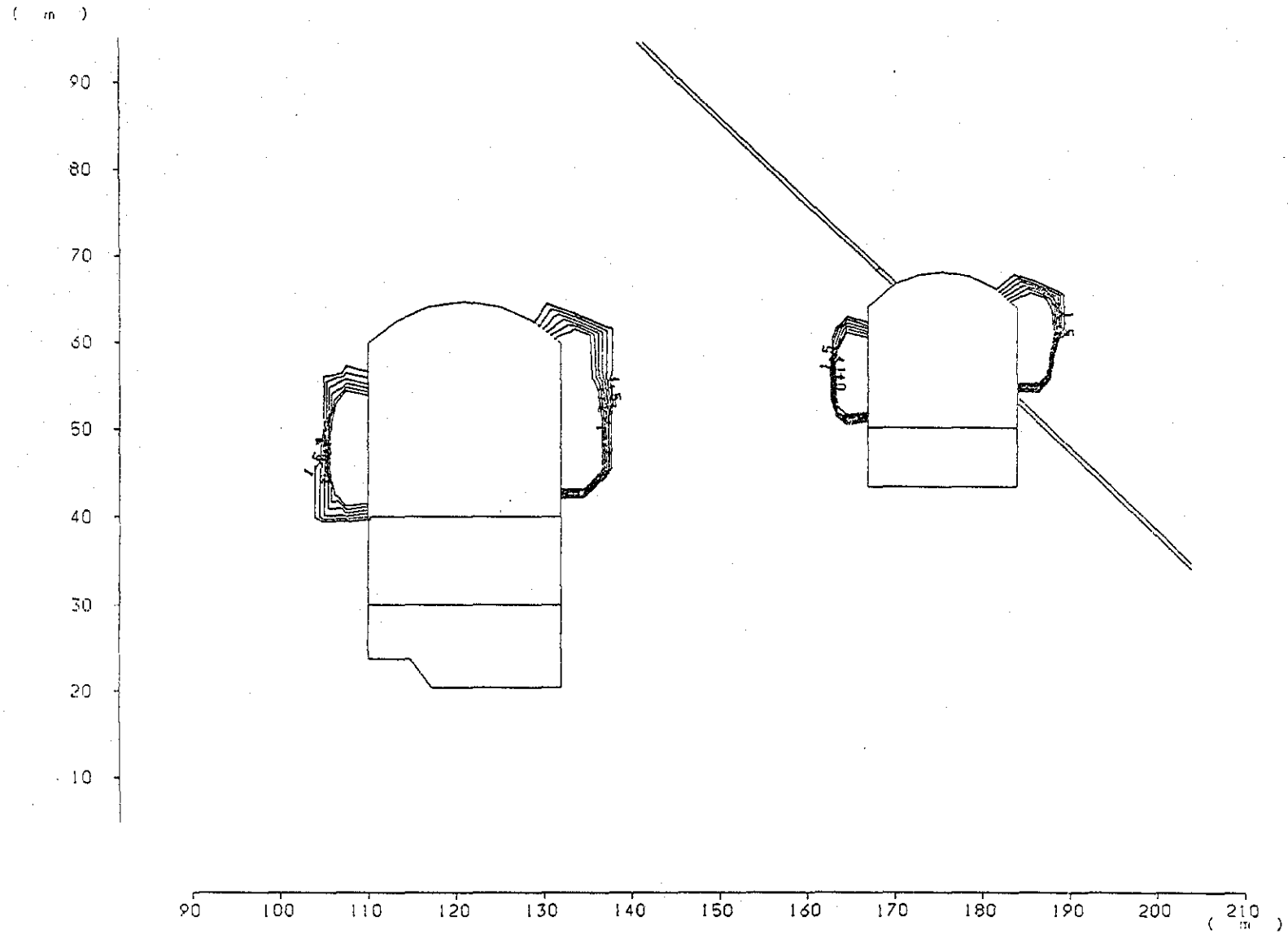
ケース1（λ＝2．0）・・滑り破壊（第1亀裂群）による要素安全率（初期状態）



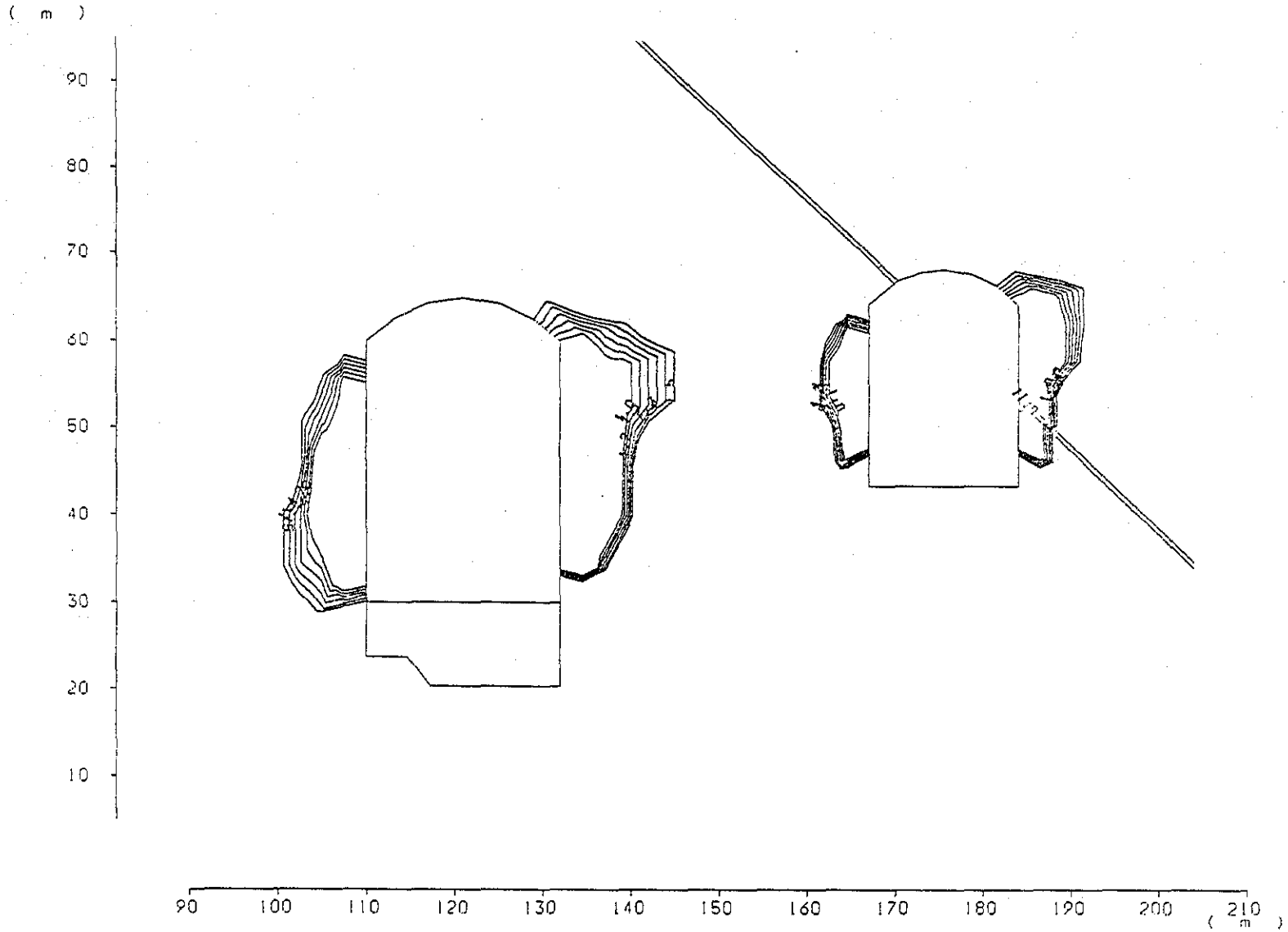
ケース1（λ＝2．0）・・滑り破壊（第1亀裂群）による要素安全率（第1段階掘削）



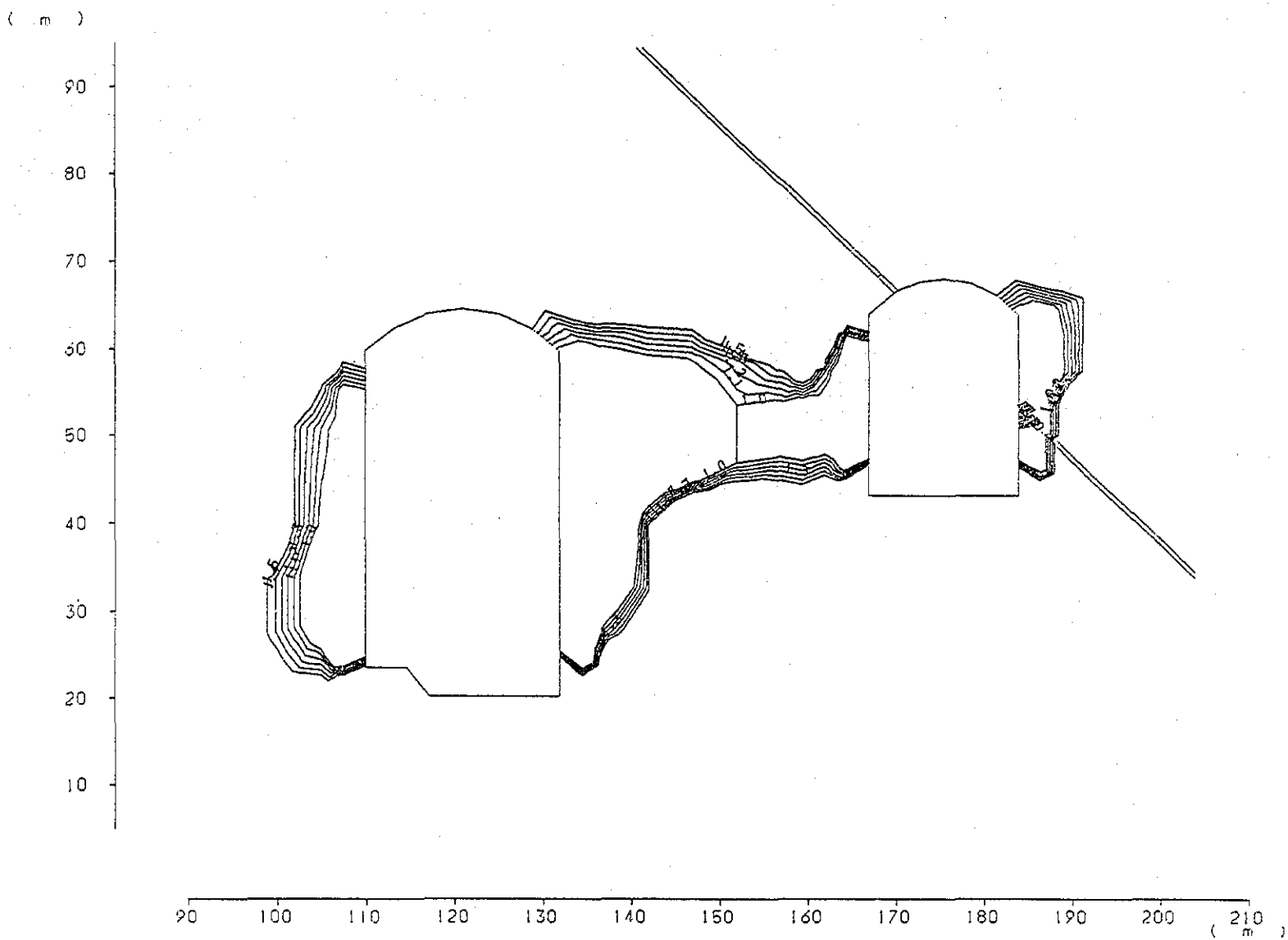
ケース1（λ＝2．0）・・滑り破壊（第1亀裂群）による要素安全率（第2段階掘削）



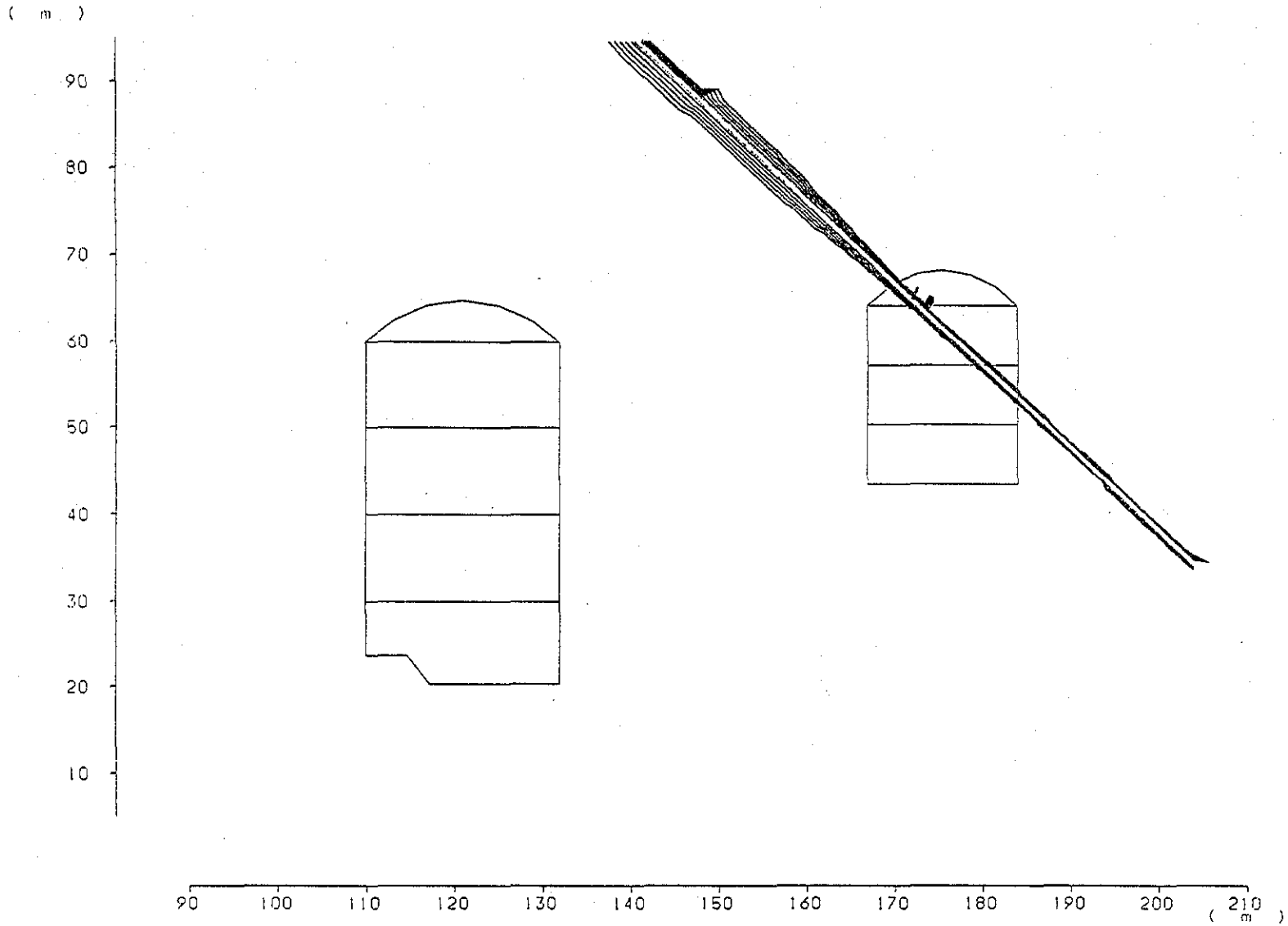
ケース１（λ＝２．０）・・滑り破壊（第１亀裂群）による要素安全率（第３段階掘削）



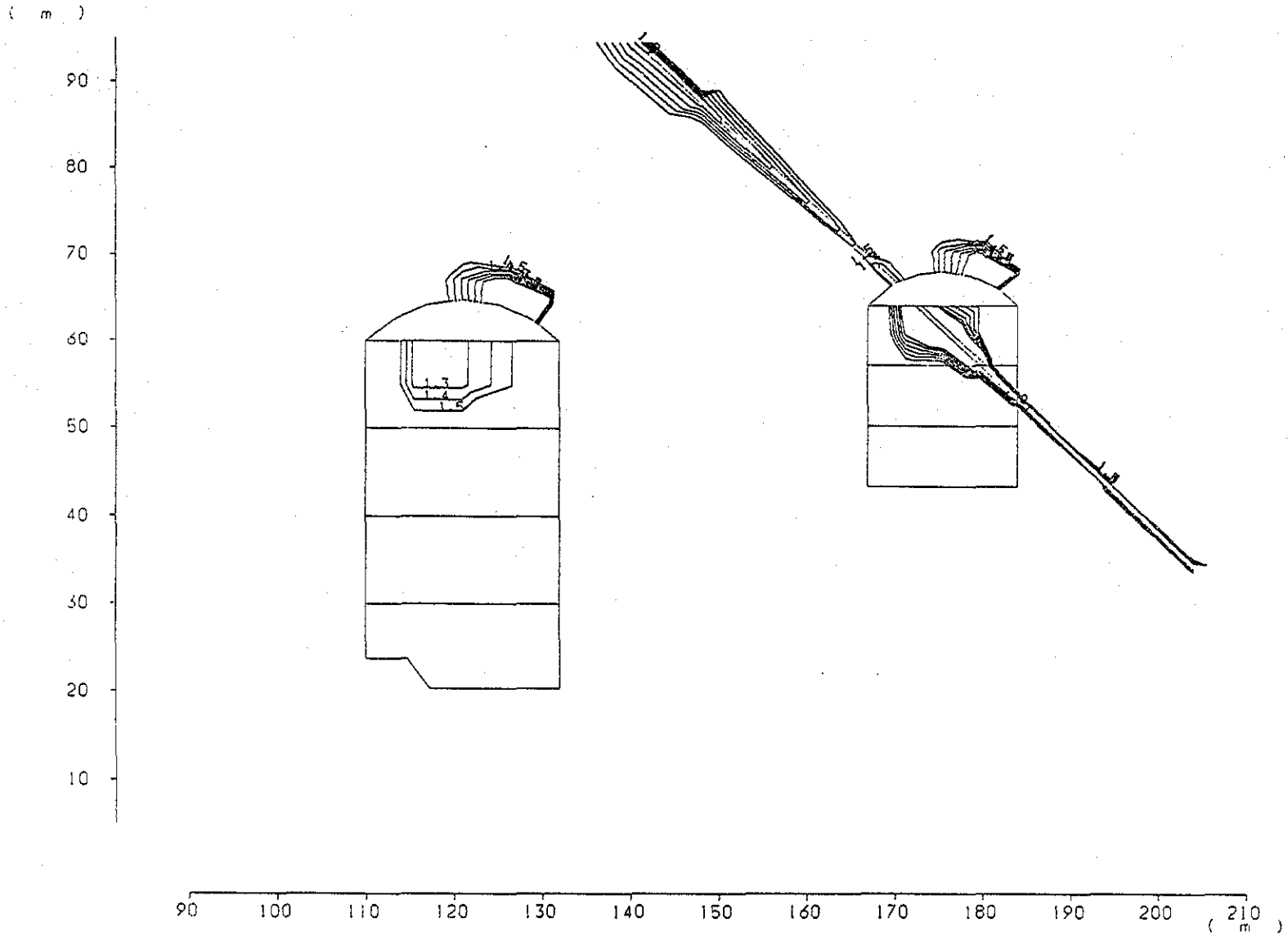
ケース1（λ＝2．0）・・滑り破壊（第1亀裂群）による要素安全率（第4段階掘削）



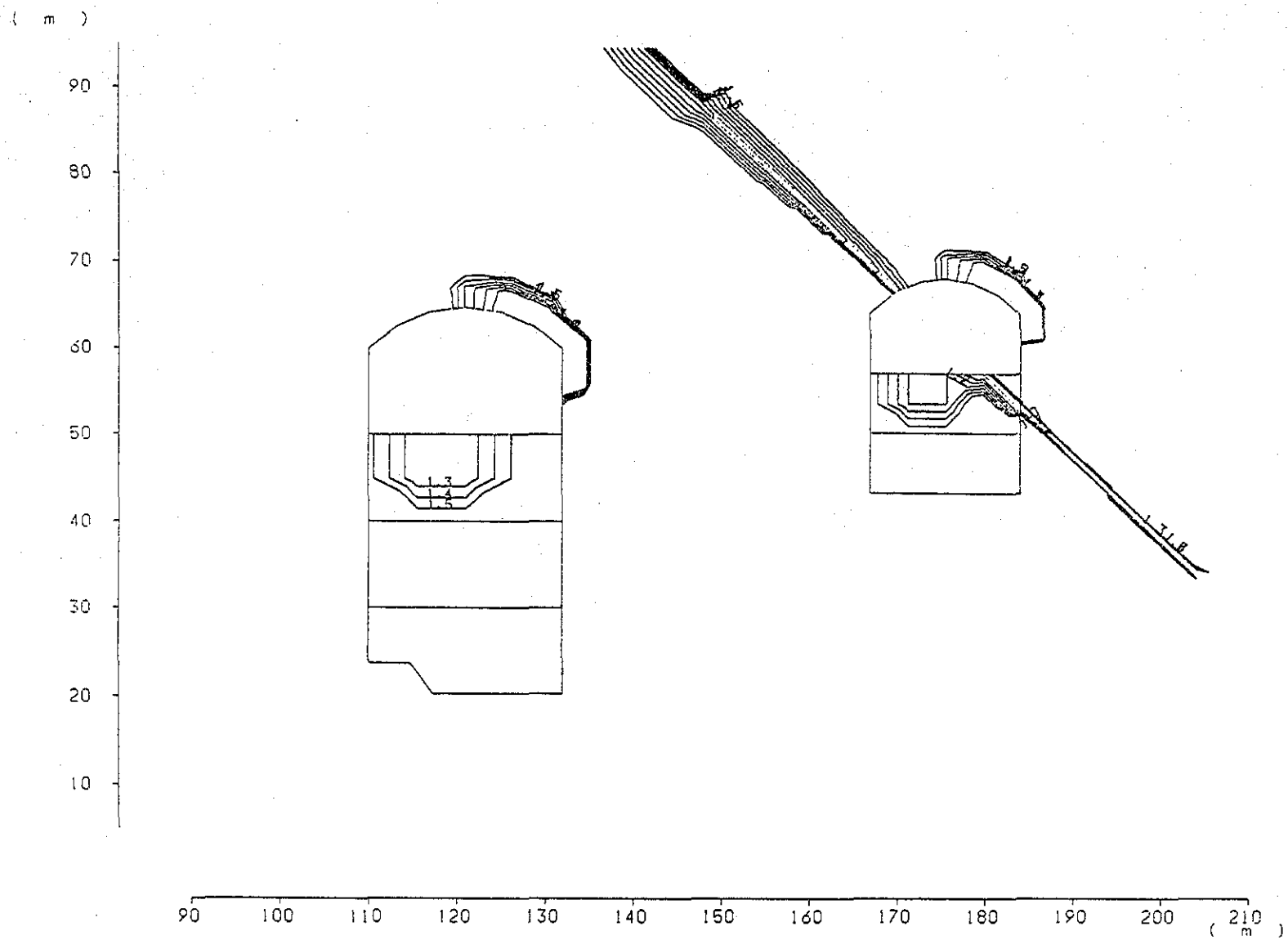
ケース1（λ＝2．0）・・滑り破壊（第1亀裂群）による要素安全率（第5段階掘削）



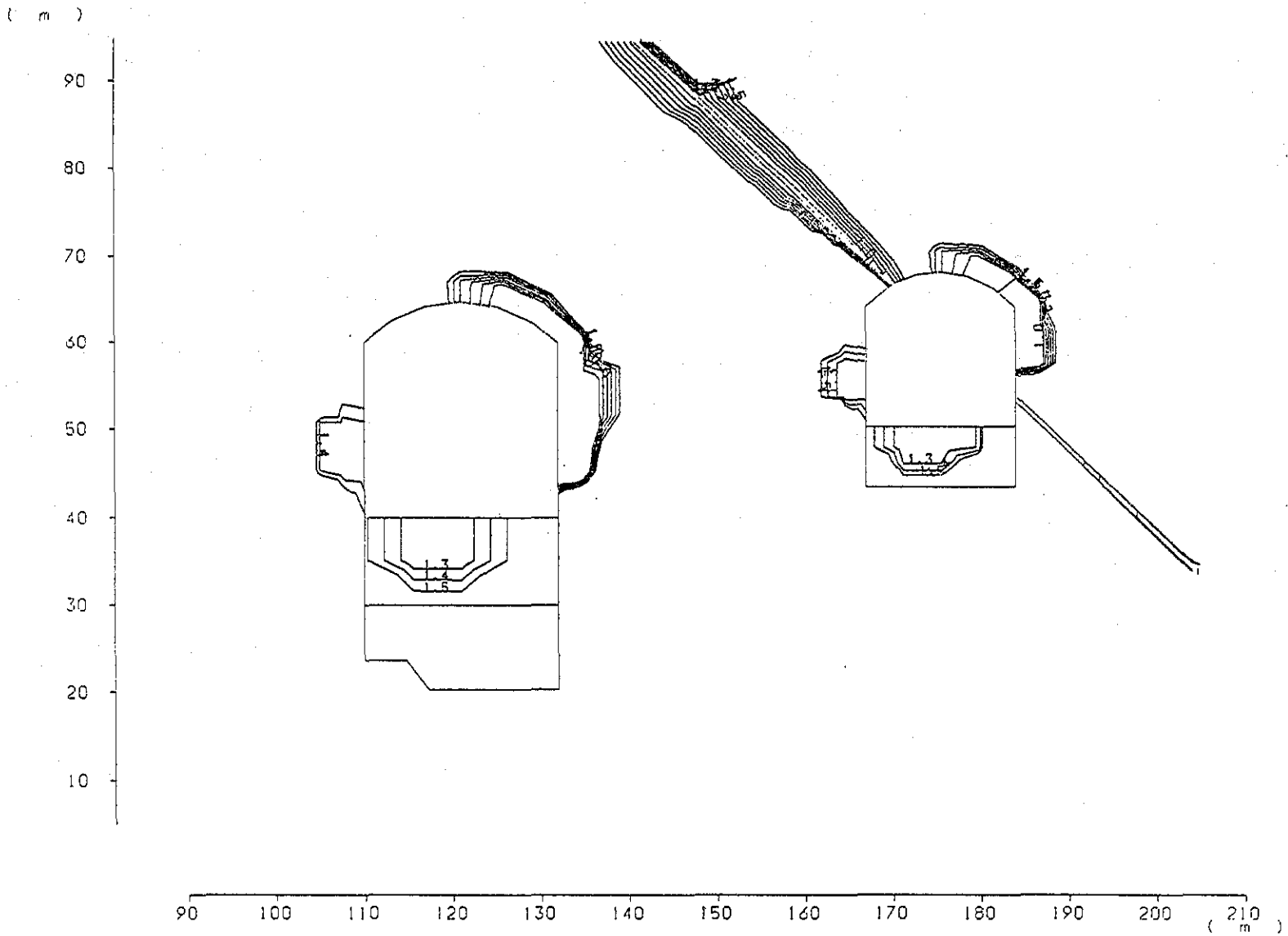
ケース１（λ＝２．０）・・滑り破壊（第２亀裂群）による要素安全率（初期状態）



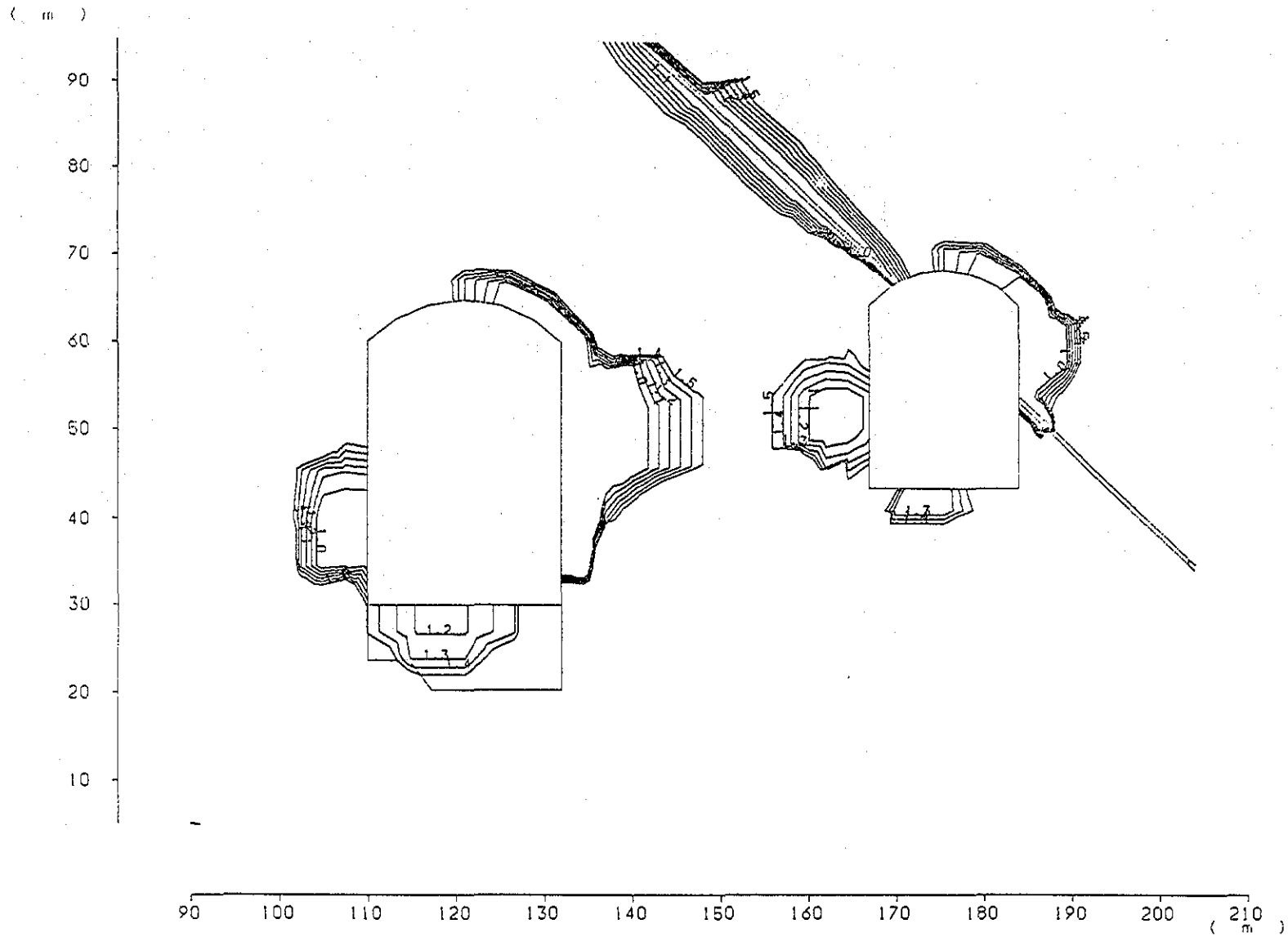
ケース１（λ＝２．０）・・滑り破壊（第２亀裂群）による要素安全率（第１段階掘削）



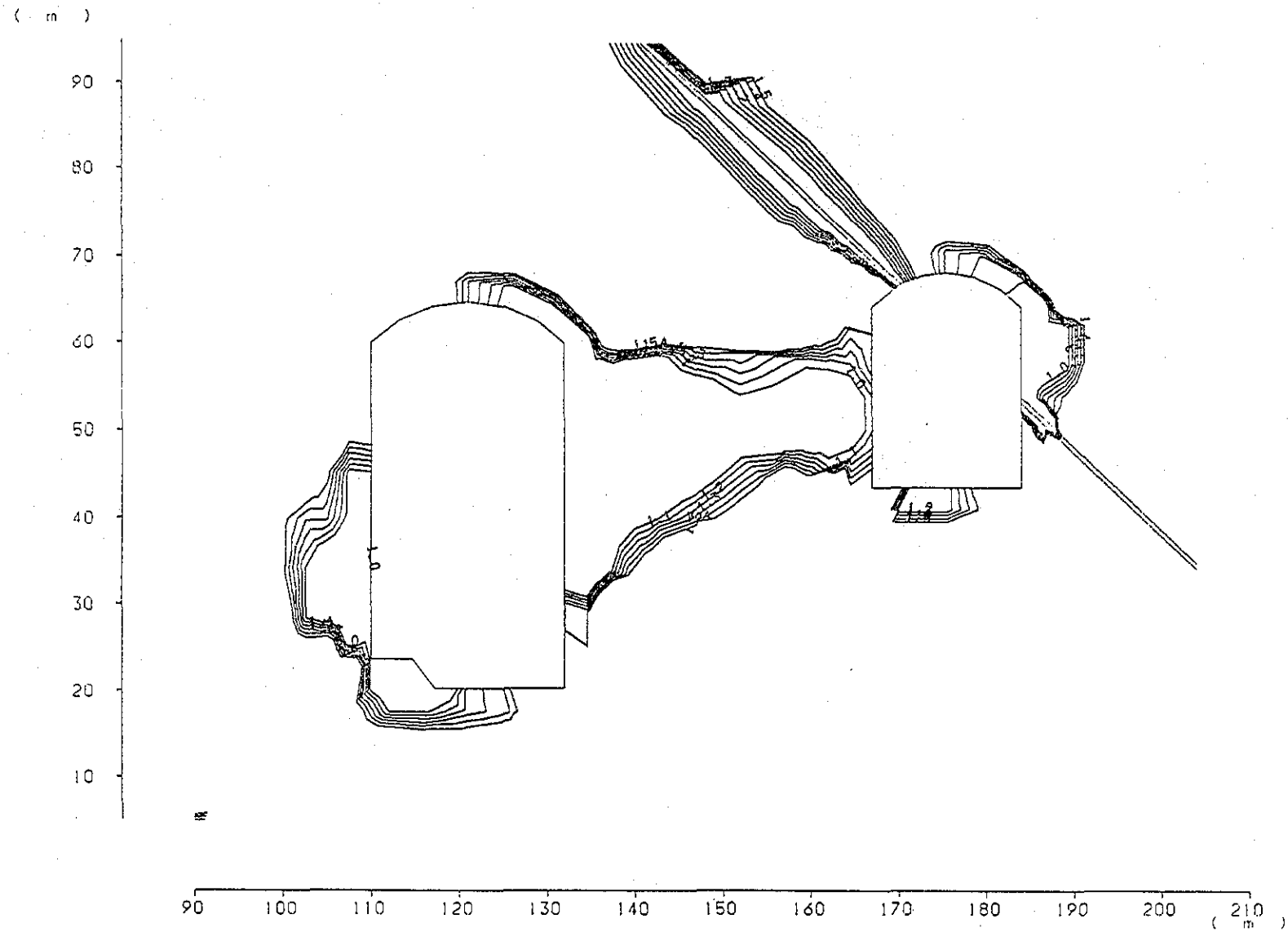
ケース1（λ＝2．0）・・滑り破壊（第2亀裂群）による要素安全率（第2段階掘削）



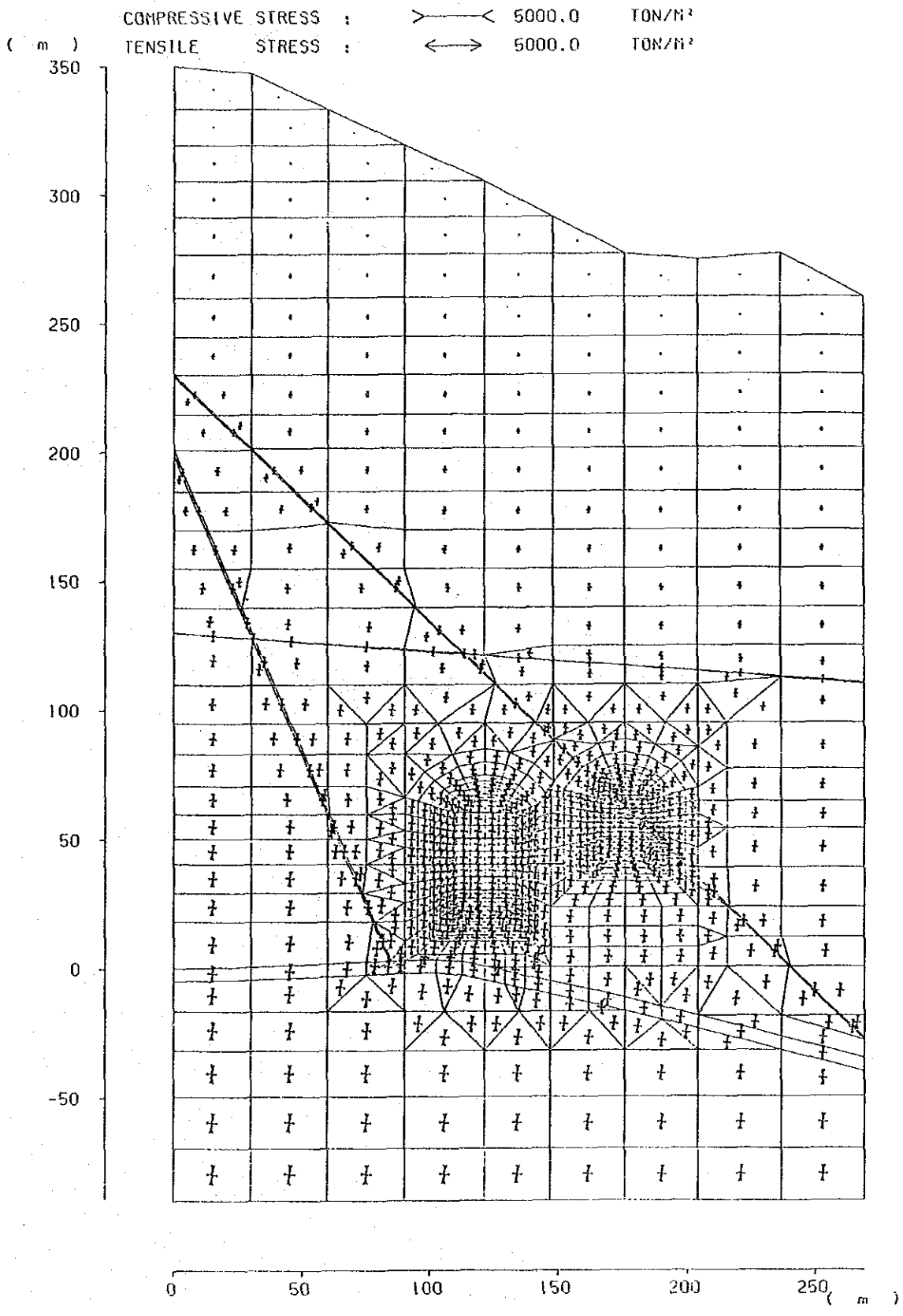
ケース1（λ＝2．0）・・滑り破壊（第2亀裂群）による要素安全率（第3段階掘削）



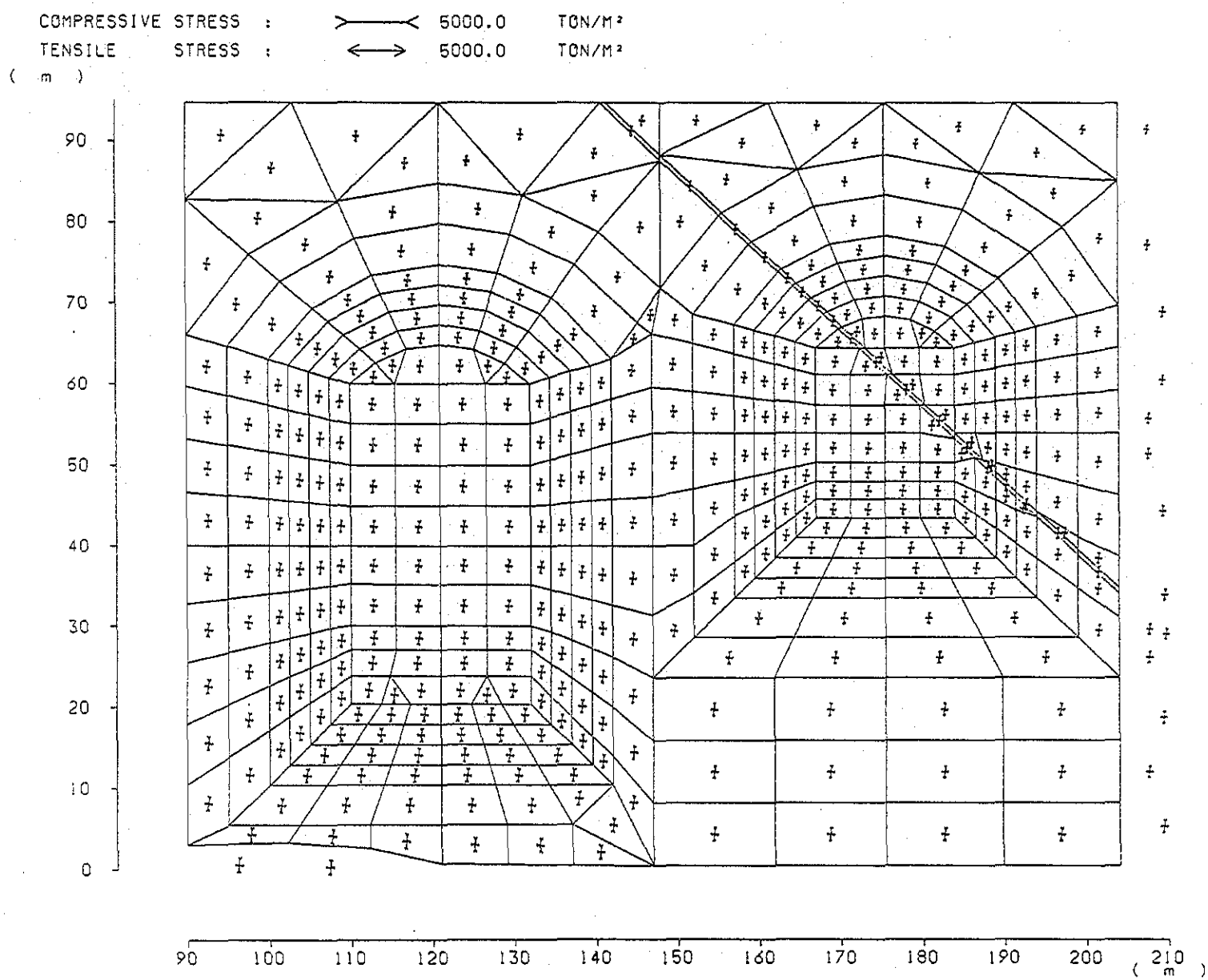
ケース1（λ＝2．0）・・滑り破壊（第2亀裂群）による要素安全率（第4段階掘削）



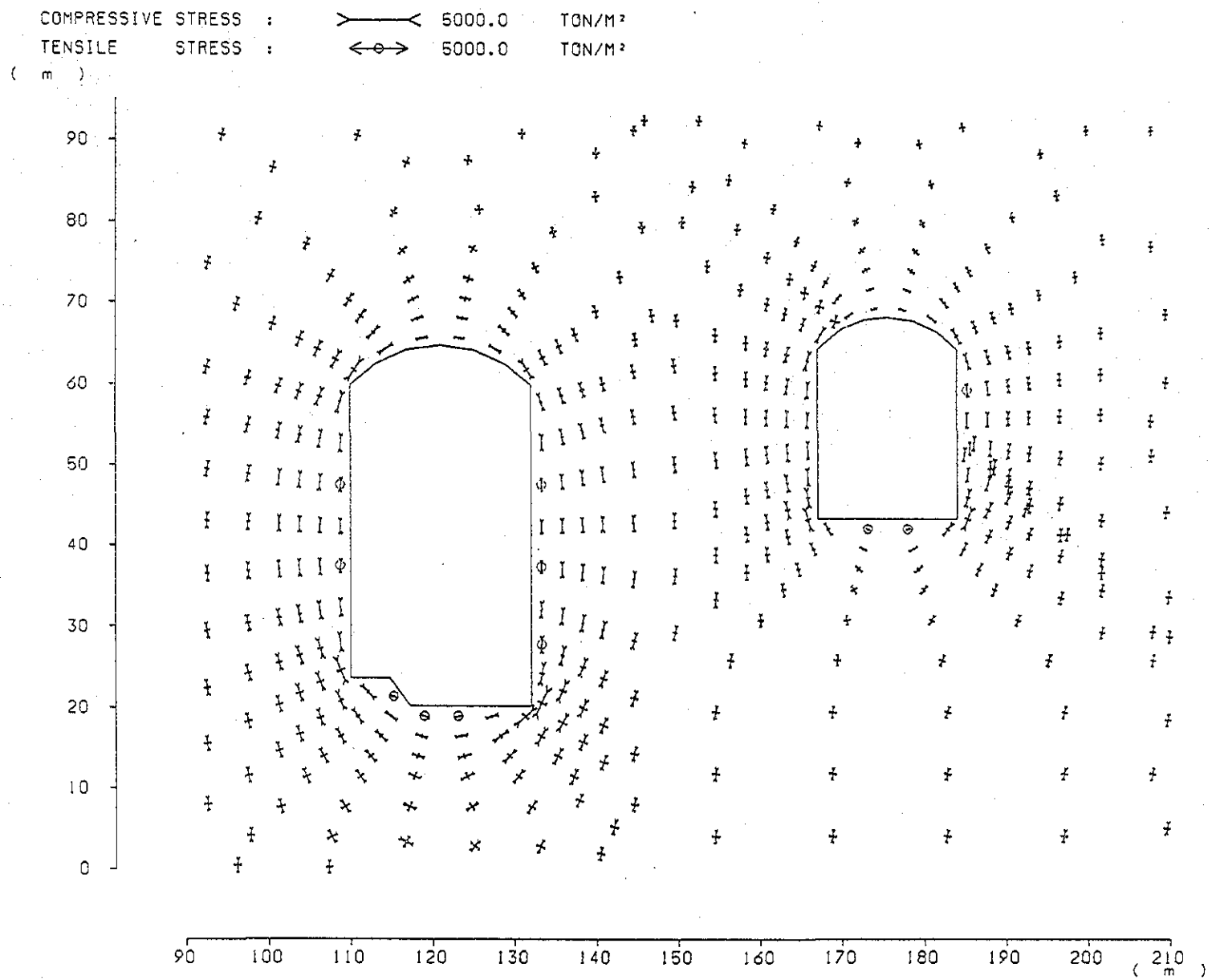
ケース1（λ＝2．0）・・滑り破壊（第2亀裂群）による要素安全率（第5段階掘削）



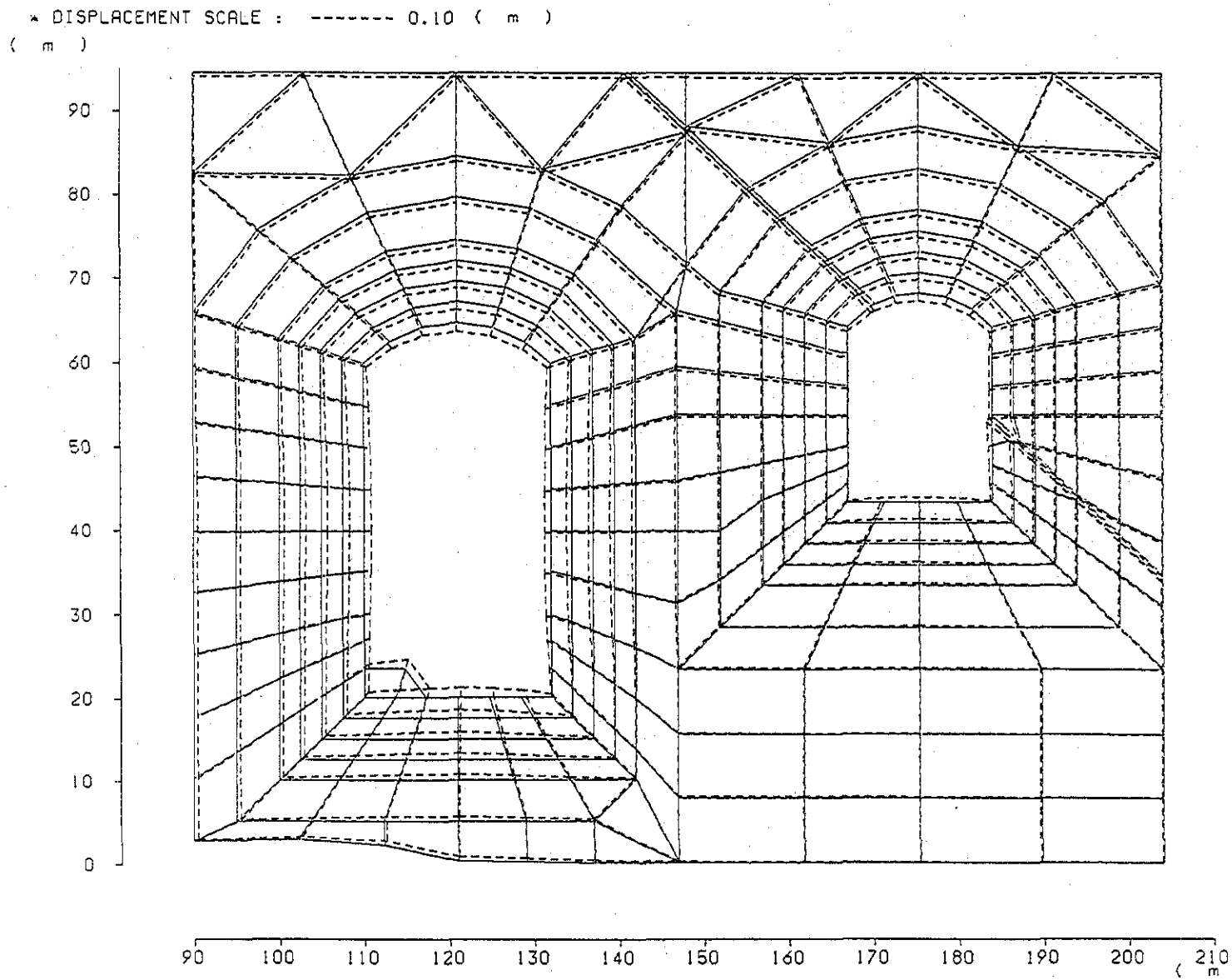
ケース2（λ＝0．5）・・主応力図（初期状態）



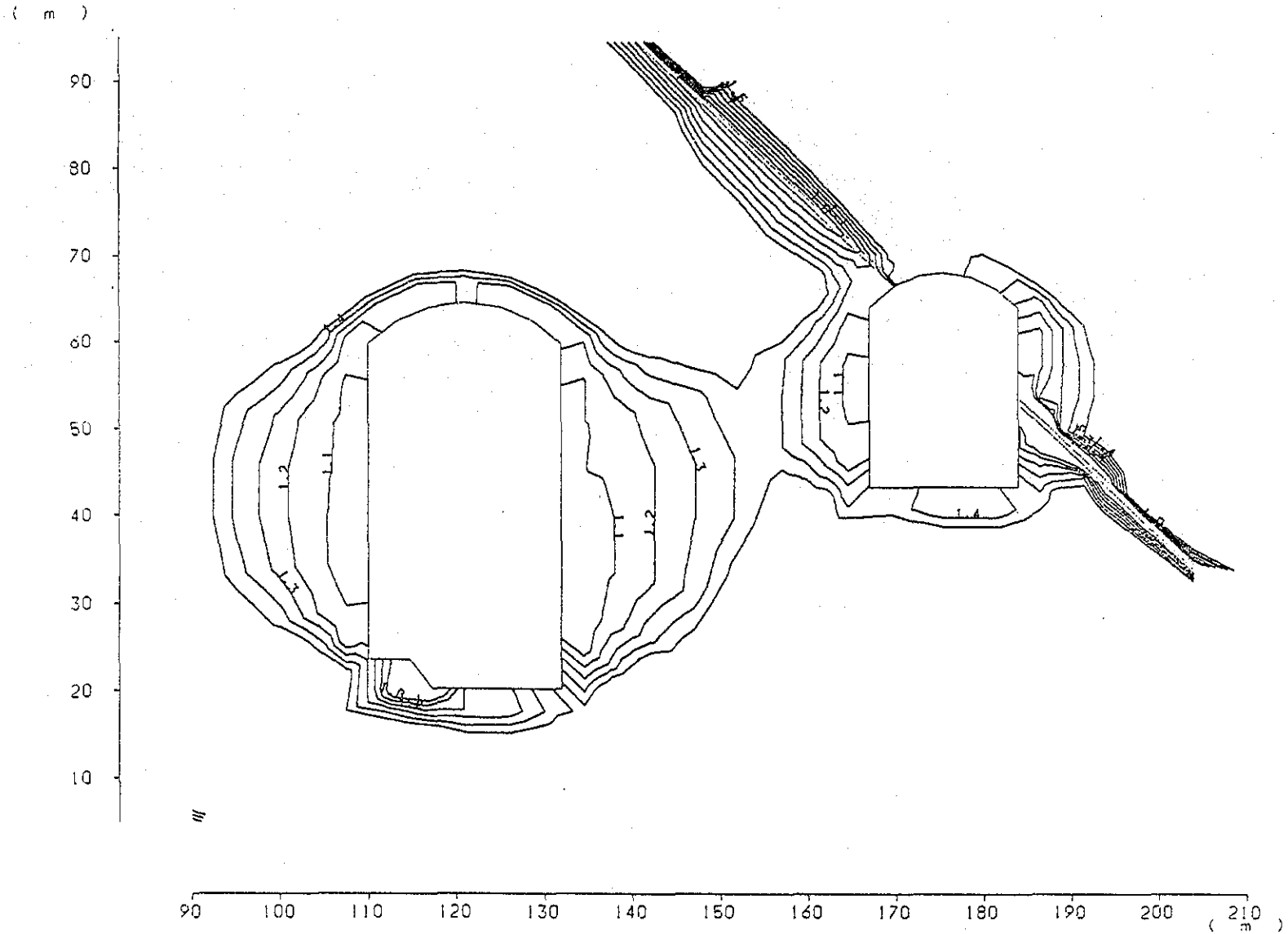
ケース2（λ＝0．5）・・主応力図（初期状態）



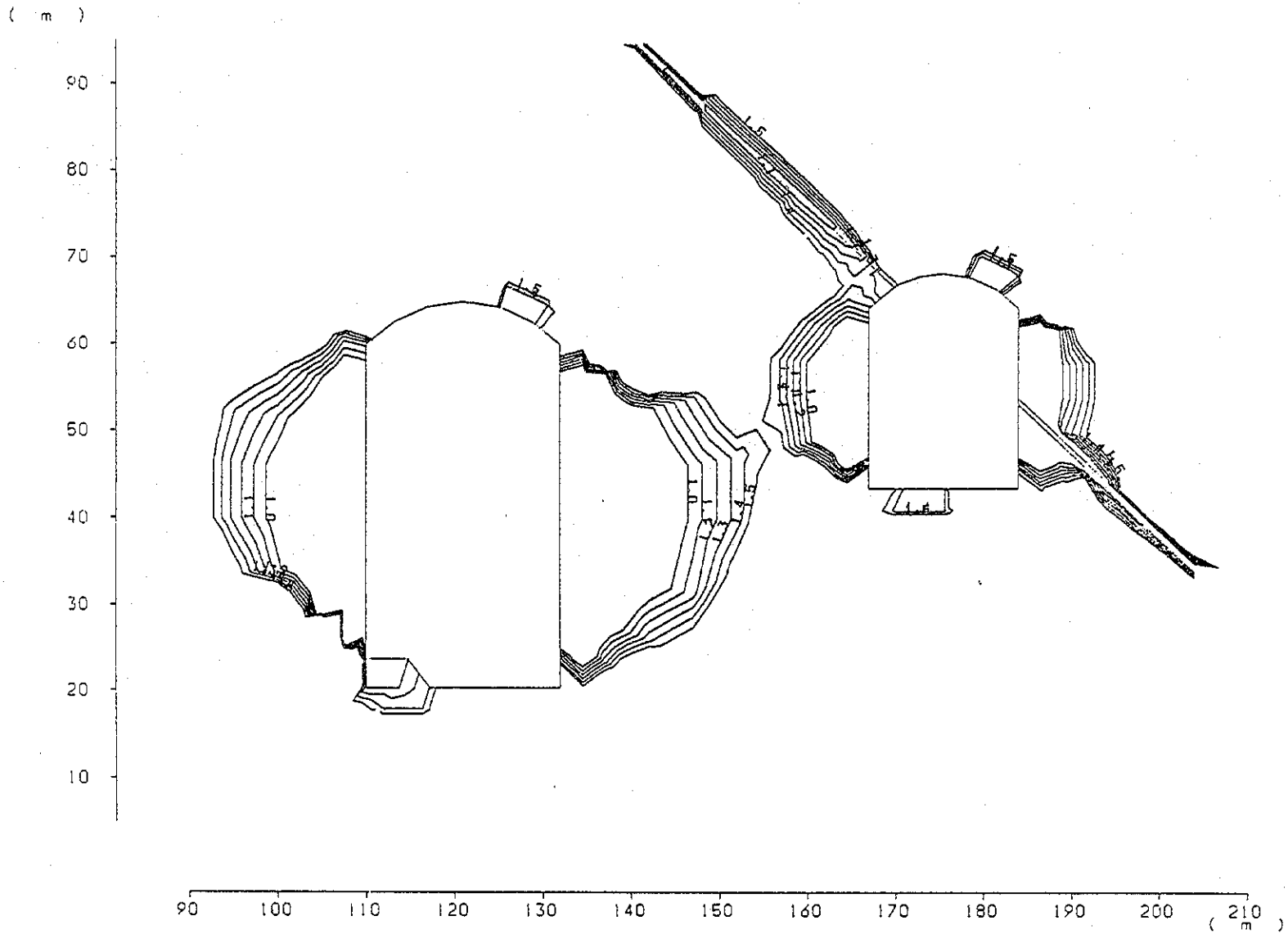
ケース2（λ＝0．5）・・主応力図（第5段階掘削）



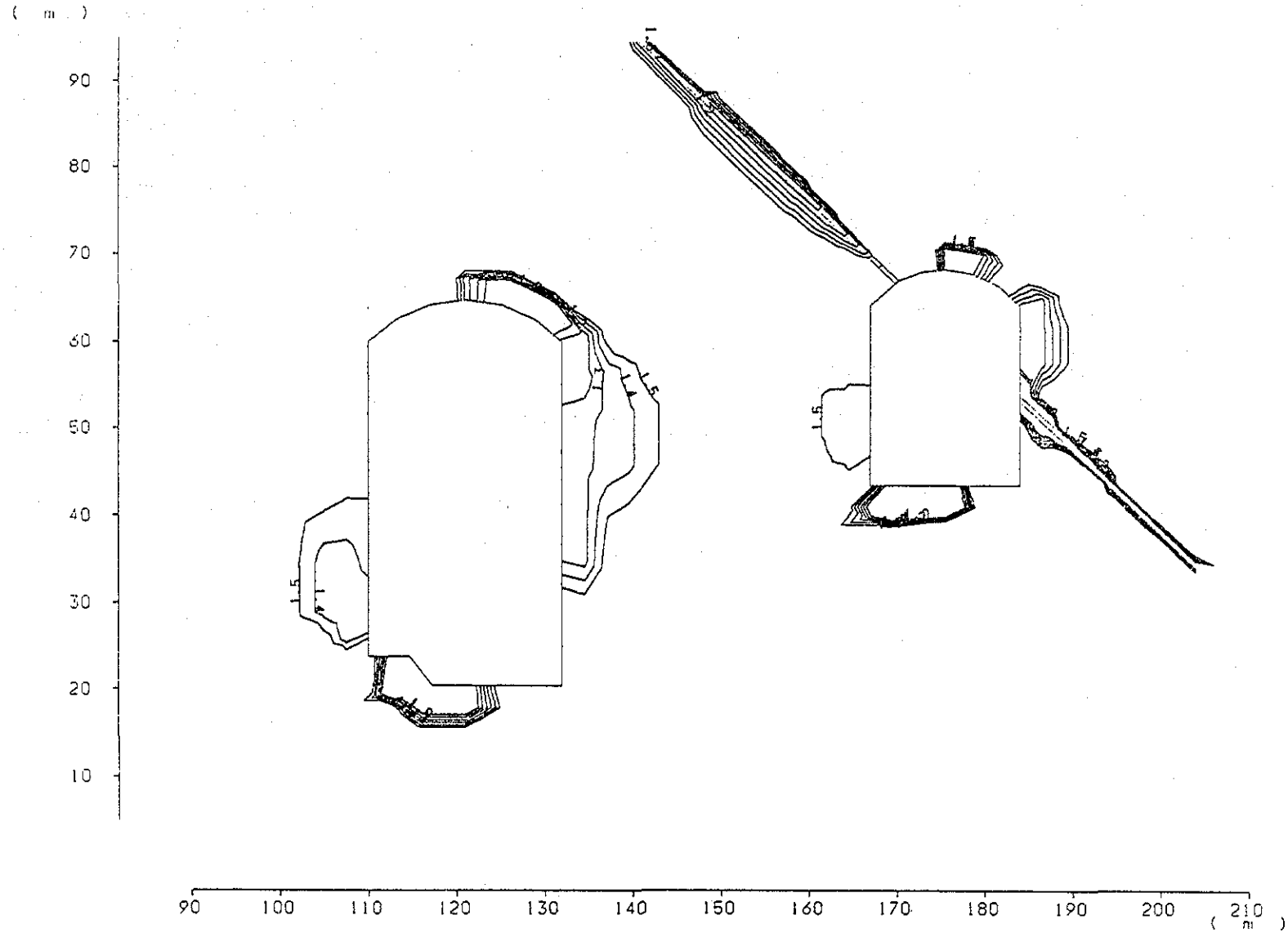
ケース2（λ＝0．5）・・変形図（第5段階掘削）



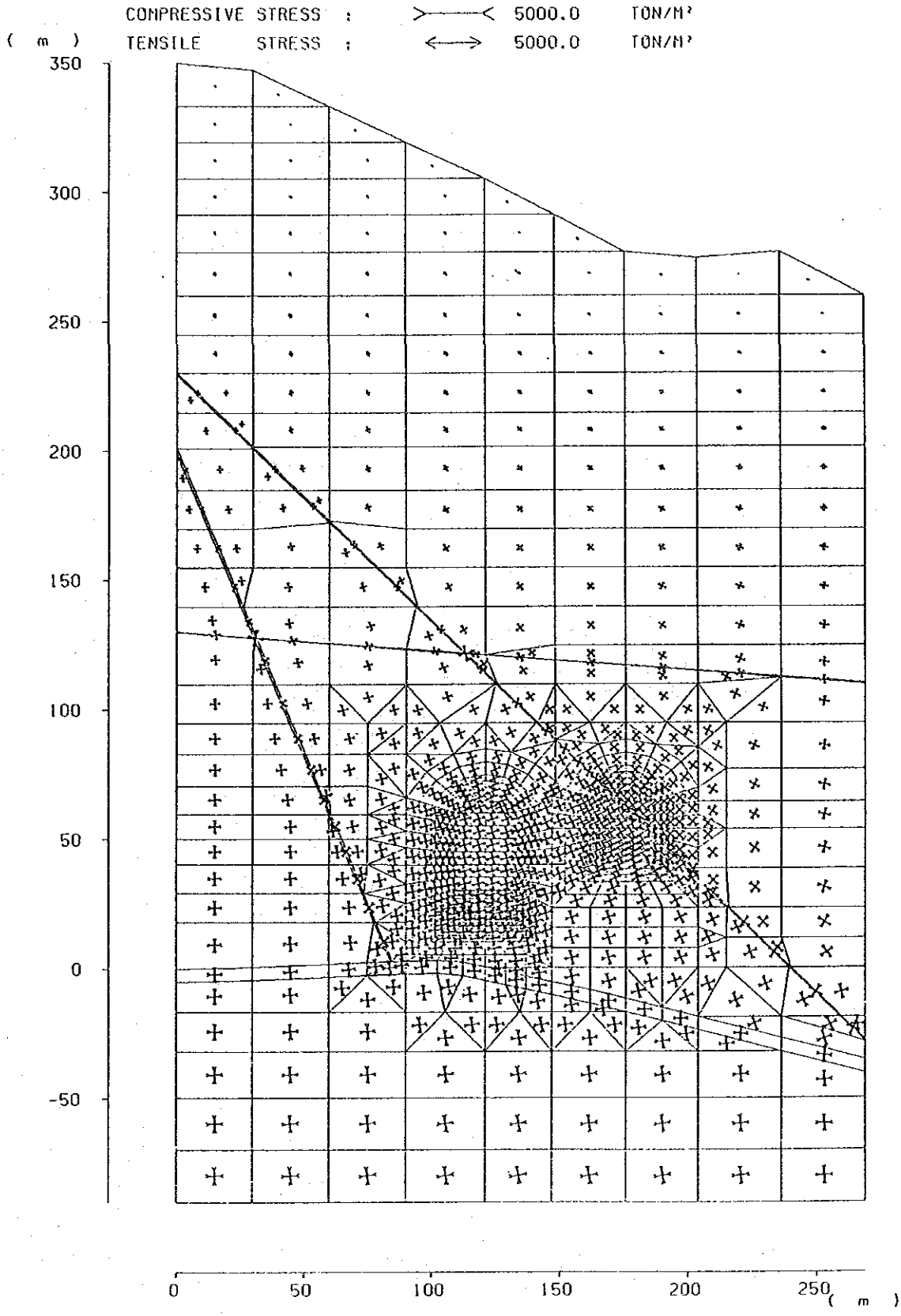
ケース２（λ＝０．５）・・せん断破壊による要素安全率（第５段階掘削）



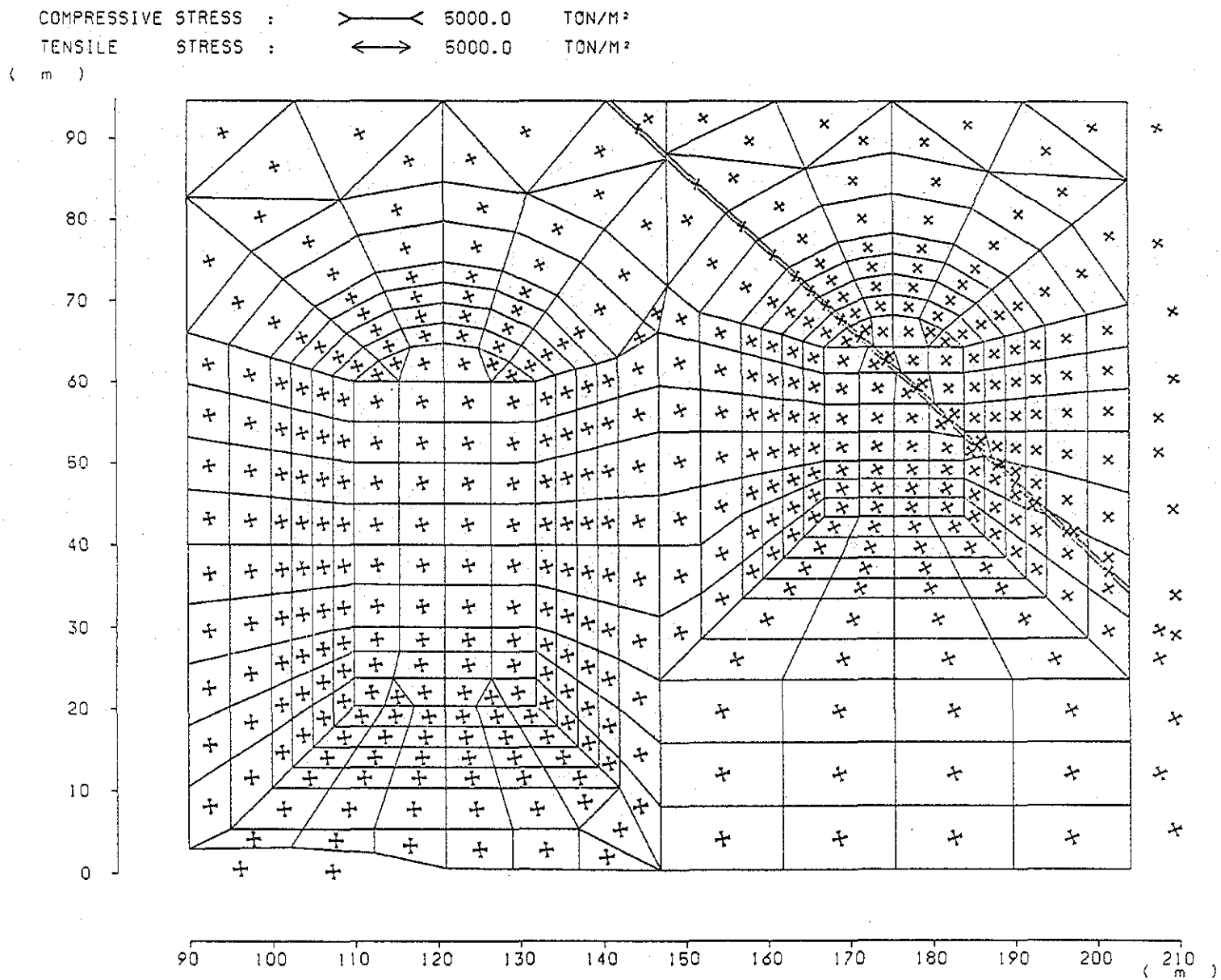
ケース2（λ＝0．5）・・滑り破壊（第1亀裂群）による要素安全率（第5段階掘削）



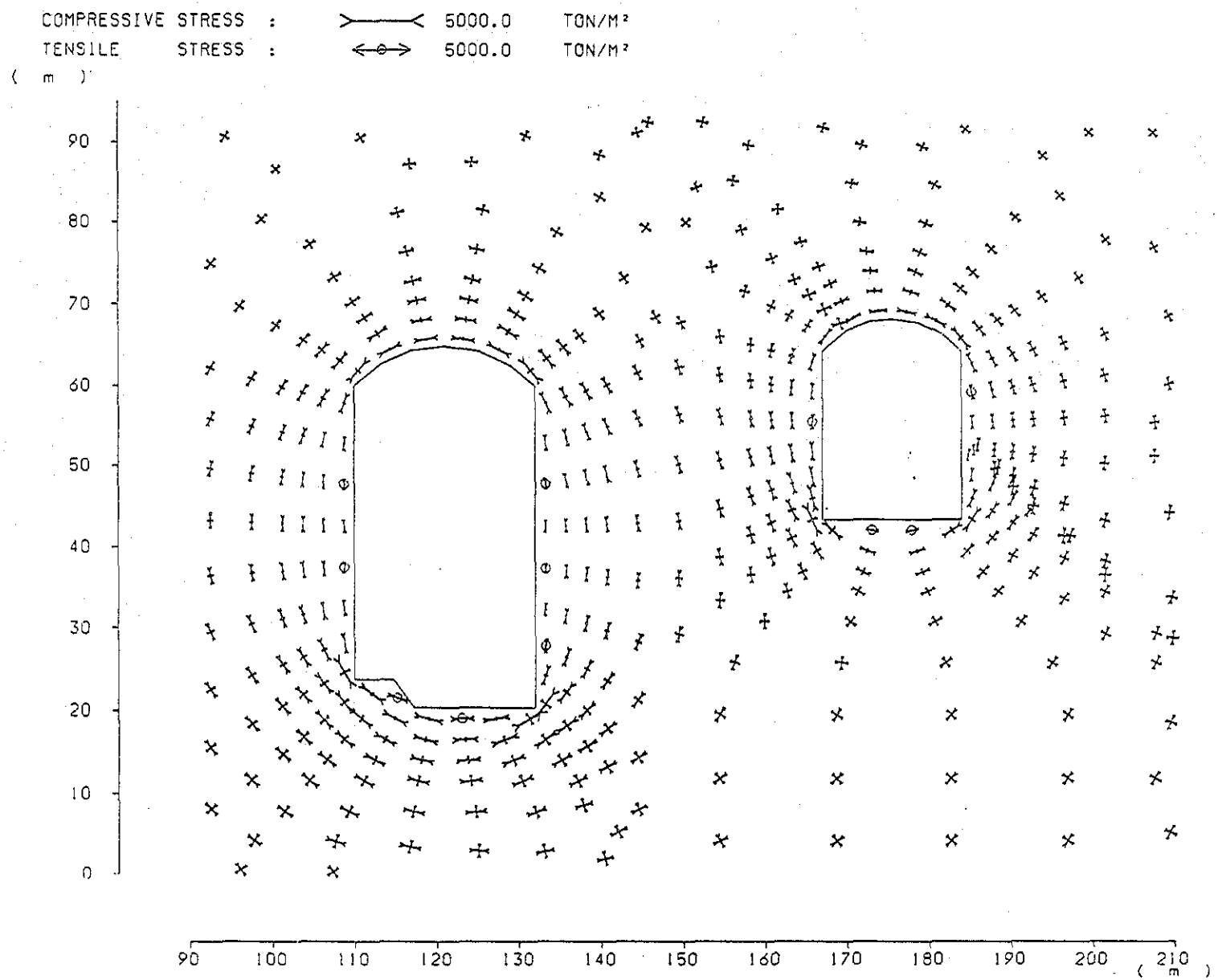
ケース２（λ＝０．５）・・滑り破壊（第２亀裂群）による要素安全率（第５段階掘削）



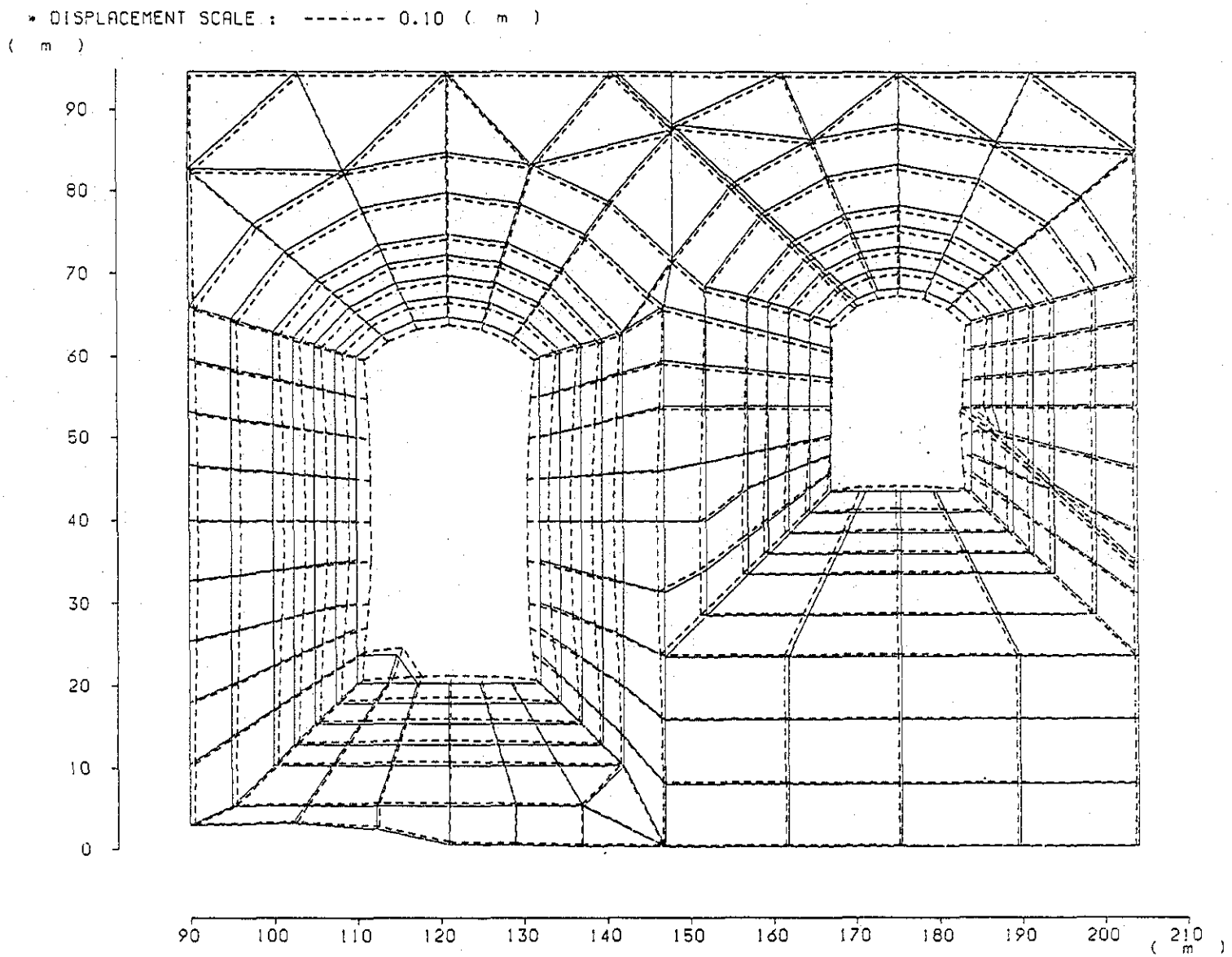
ケース3（自重解析）・・主応力図（初期状態）



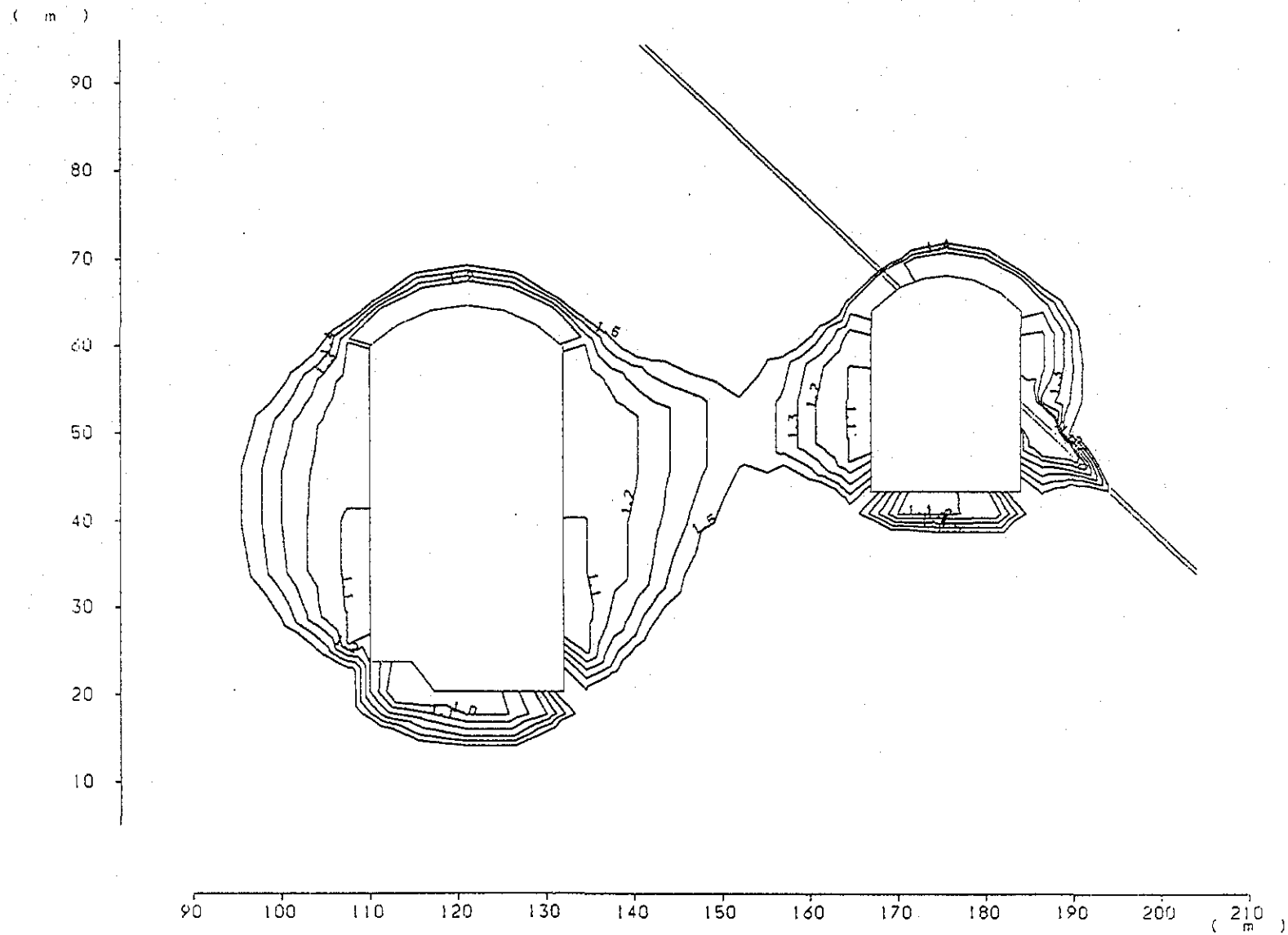
ケース３（自重解析）・・主応力図（初期状態）



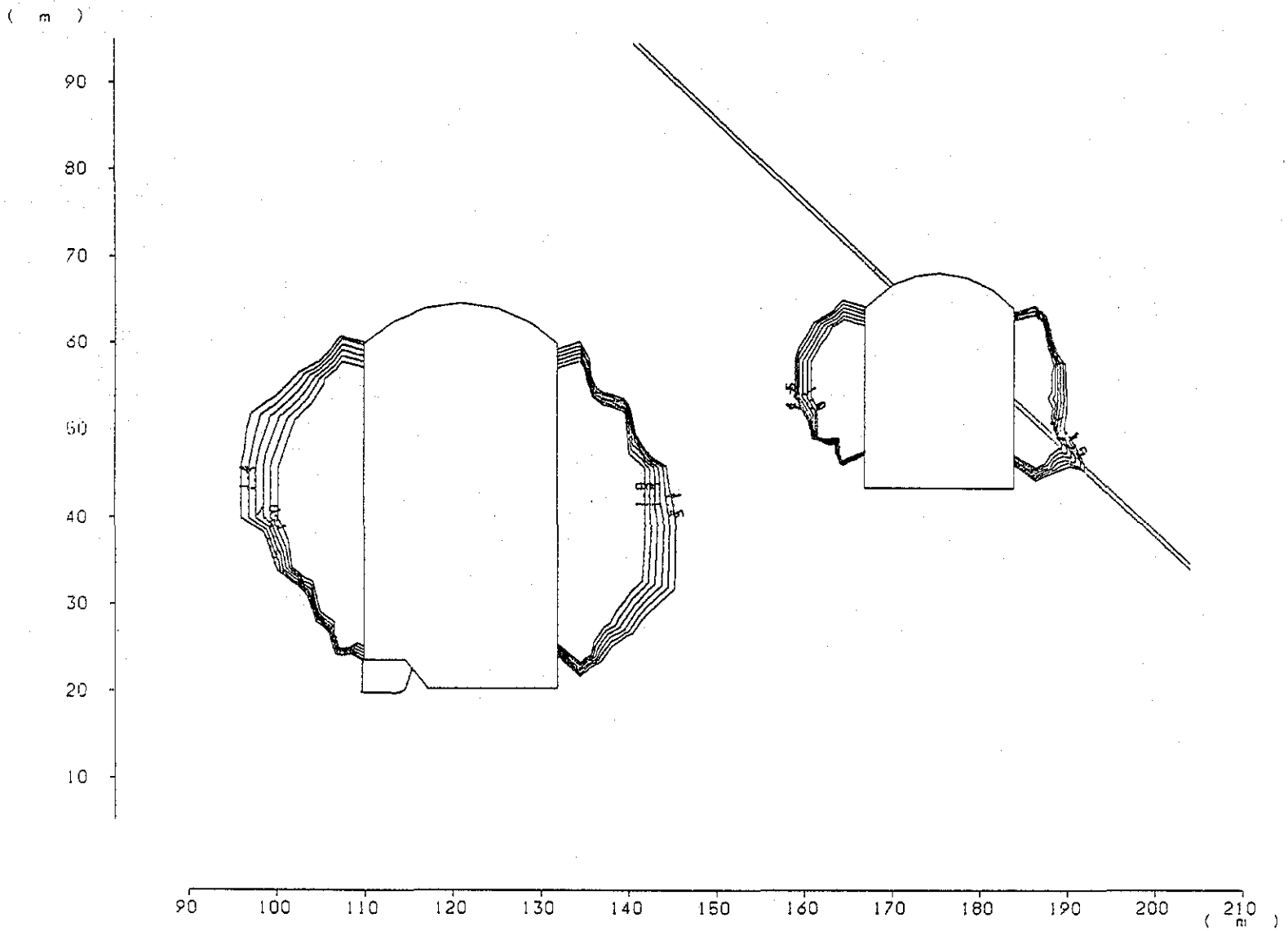
ケース3（自重解析）・・主応力図（第5段階掘削）



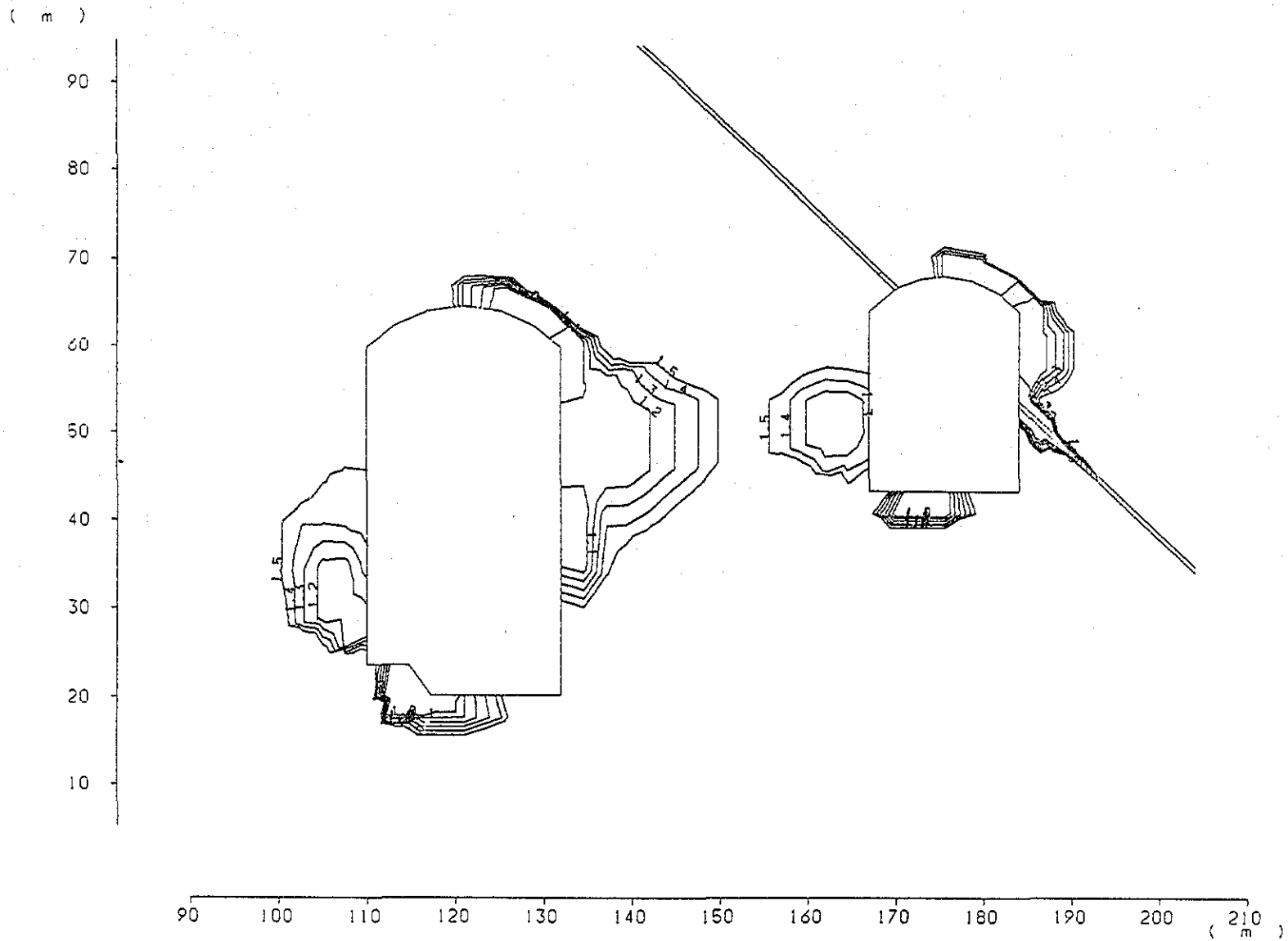
ケース3（自重解析）・・変形図（第5段階掘削）



ケース３（自重解析）・・せん断破壊による要素安全率（第５段階掘削）



ケース３（自重解析）・・滑り破壊（第１亀裂群）による要素安全率（第５段階掘削）



ケース３（自重解析）・・滑り破壊（第２亀裂群）による要素安全率（第５段階掘削）

4．ポンプ水車設備の機械特性に関する調査

4．ポンプ水車設備の機械特性に関する調査

頁

4.1　計画の関連地点特性の分析 …… Ⅱ－4-1

4.1.1　ピーク電源 …… Ⅱ－4-1

(1)　高稼動率、高信頼度 …… Ⅱ－4-1

(2)　運転機能 …… Ⅱ－4-1

4.1.2　高落差、大容量揚水発電所 …… Ⅱ－4-3

(1)　水理諸元 …… Ⅱ－4-3

(2)　発電所出力 …… Ⅱ－4-4

(3)　回転速度の選定 …… Ⅱ－4-4

(4)　水圧、速度変動 …… Ⅱ－4-5

(5)　機器設計、製作 …… Ⅱ－4-6

4.2　可逆式フランシスポンプ水車の技術動向 …… Ⅱ－4-7

4.2.1　単段可逆式ポンプ水車の落差、揚程 …… Ⅱ－4-7

4.2.2　ポンプ比速度～揚程 …… Ⅱ－4-7

4.2.3　ポンプ比速度～効率特性 …… Ⅱ－4-7

4.2.4　超高落差（800m級）揚水発電所 …… Ⅱ－4-8

(1)　800m、400MW級単段可逆式ﾌﾗﾝｼｽﾎﾟﾝﾌﾟ水車及び発電電動機 …… Ⅱ－4-8

(2)　800m、300MW級可逆式ﾌﾗﾝｼｽﾎﾟﾝﾌﾟ水車の適用 …… Ⅱ－4-10

4.2.5　揚水始動方式 …… Ⅱ－4-12

(1)　制動巻線始動方式 …… Ⅱ－4-12

(2)　同期始動方式 …… Ⅱ－4-12

(3)　低周波始動方式 …… Ⅱ－4-12

(4)　直結電動機始動方式 …… Ⅱ－4-12

(5)　サイリスタ起動方式 …… Ⅱ－4-12

4.3　予備設計仕様の策定 …… Ⅱ－4-15

4.3.1　設計条件 …… Ⅱ－4-15

(1)　耐震設計 …… Ⅱ－4-15

(2)　気象条件等 …… Ⅱ－4-15

(3) 水　質 …… Ⅱ－4-15
(4) 輸送制限 …… Ⅱ－4-16
4.3.2　ポンプ水車 …… Ⅱ－4-16
(1) 定格諸元 …… Ⅱ－4-16
(2) キャビテーション性能 …… Ⅱ－4-18
(3) 水圧、速度変動 …… Ⅱ－4-19
(4) 騒　音 …… Ⅱ－4-21
(5) 出力及び周波数変動範囲 …… Ⅱ－4-21
(6) 水圧脈動 …… Ⅱ－4-22
(7) 振　動 …… Ⅱ－4-22
(8) 軸受温度 …… Ⅱ－4-23
(9) 無拘束速度 …… Ⅱ－4-23
4.3.3　入口弁 …… Ⅱ－4-24
4.3.4　発電電動機 …… Ⅱ－4-24
(1) 形式、構造 …… Ⅱ－4-24
(2) 力率・出力・効率 …… Ⅱ－4-25
(3) 冷却通風方式 …… Ⅱ－4-25
(4) 電　圧 …… Ⅱ－4-25
(5) 短絡比 …… Ⅱ－4-26
4.3.5　主要変圧器 …… Ⅱ－4-26
(1) 形　式 …… Ⅱ－4-26
(2) 電　圧 …… Ⅱ－4-26
(3) 容　量 …… Ⅱ－4-26
(4) 電圧調整 …… Ⅱ－4-26
4.3.6　給排水システム …… Ⅱ－4-27
4.3.7　主回路単線結線図 …… Ⅱ－4-28
(1) 発電電動機中性点設置方式 …… Ⅱ－4-28
(2) 発電電動機 …… Ⅱ－4-28
(3) 同期始動回路 …… Ⅱ－4-28
(4) 220kVＧＩＳ用避雷器 …… Ⅱ－4-30

4.3.8　サイリスタ始動 …… Ⅱ－4-30
4.3.9　運転制御方式 …… Ⅱ－4-31
4.3.10　発電所機器配置 …… Ⅱ－4-31
(1)　建屋構造物構成 …… Ⅱ－4-31
(2)　水圧鉄管、ポンプ水車、放水路と発電所本館とのレイアウト …… Ⅱ－4-31
(3)　主機据付様式 …… Ⅱ－4-31
(4)　220kV、ＸＬＰＥケーブル …… Ⅱ－4-31
(5)　天井クレーン …… Ⅱ－4-31
4.3.11　運転モード切替 …… Ⅱ－4-32
4.3.12　製作、据付工程 …… Ⅱ－4-33

4　ポンプ水車設備の機械特性に関する調査

4.1　計画の関連地点特性の分析

本計画地点の連系系統内の電源設備のほとんどがベース対応の火力発電設備であること、本計画が高落差、大容量揚水発電計画であることから、本計画地点の特性としては華北電力網、とりわけ北京－天津－唐山系統（以下京津唐系統と呼ぶ）のピーク電源としての重要な役割を有することとなり、揚水機特有の様々な機能を期待されることとなる。また、高落差・大容量発電所であるため、これらの機能を満足に発揮するには、技術的に十分事前調査する必要がある。

以下に本計画地点の特性を考慮した技術面についての項目を列挙する。

4.1.1　ピーク電源

(1)　高稼働率、高信頼度

年間発電運転予想時間は1,500時間程度と日本の揚水発電所に比べピーク電源としては著しく高稼働であり、高信頼度を要求されるプロジェクトである。

また、京津唐系統における十三陵揚水発電所の設備出力は非常に大きく、事故時の系統に与える影響は大きくこの点からも高信頼度を要求されるプロジェクトである。

(2)　運 転 機 能

火力発電所に比べ、揚水発電所は瞬動予備力としての様々な運転機能が要求されるが、現在計画中の機能は以下の通りである。

(a) 運転モード及びモード切替

停　止	⇄	発　電	発　電	⇄	発電調相
停　止	⇄	揚　水	揚　水	⇄	揚水調相
停　止	⇄	発電調相	発　電	⇄	揚　水
停　止	⇄	揚水調相			

なお、揚水 ⟶ 発電の直接切替は、4.3.11で述べる通り適用しない方が好ましい。

(b) 試 送 電

発電機による送電線充電範囲は、220kVの昌平変電所迄十三陵発電所から6kmと距離が短く、発電機の自己励磁現象を起こさず定格発電機容量で十分充電可能である。発電機電圧を定格値の20～30%より除々に昇圧し充電することとなるが、距離が短いため送電線と直接運転電圧で充電する方法（試充電）も可能である。なお、2回線送電線事故時の試送電（試充電）を考えると、主機始動用として補機用電源の確保が必要であり、35kV配電線からの受電あるいはディーゼル発電機の設置が必要となる。

(c) ＡＦＣ運転

常時の発電時ガバナフリー運転に加え、ＡＦＣ運転の実施を計画中であるが、ＡＦＣ信号の振幅がポンプ水車の許容出力範囲内にあれば機器側からの制約は特にない。但し、ＡＦＣ信号の周期がサージタンク～貯水池間の固有周期と一致すると、サージング振幅が大となるので、サージタンクの設計及びＡＦＣ周期の決定に際しては十分留意する必要がある。また、負荷・入力遮断に加え負荷急増及び急減時におけるサージング特性についても検討し、サージタンク設計を行う必要がある。中口では設備容量の２～３%を負荷急増や負荷変動に備える考え方を持っており、十三陵計画ではＡＦＣ運転の出力変動巾は定格出力の2.5%程度を考えている。

(d) 出力変動幅

水力発電所の場合は、火力発電所に比べ大幅な出力調整が可能であるが、低出力の場合、ランナ入口圧力側でキャビテーションの発生が現れ、特に低落差の場合この傾向が著しい。また、低出力時はランナ出口旋回流の発生による振動問題がある。また、揚水機は水車及びポンプの両特性を満足する必要があるので、低出力に対する制限は一般水車に比べ厳しいが、通常、ポンプ水車は50%～100%の出力調整が可能である。

(e) 周波数変動幅

京津唐電力系統の目標周波数変動幅は、49.8～50.2Hzであるが、この変動幅を維持する上で、当プロジェクトの果たす役割は大きい。

通常、揚水機では系統周波数の低い場合の揚水運転時に入力不足となり、ポンプ水車及び系統に悪影響を与え問題となるので、日本では49.5Hz以下となる

と停止するのが一般的である。一方、京津唐電力系統では系統周波数が高い深夜の揚水運転の問題が予想されており、この場合の問題点としては、揚程・揚水量が回転速度の増加に応じて、増加するのでポンプ入力増による発電電動機及び変圧器の熱的問題、特に低揚程では揚水量が大きくなり、ポンプ入口圧力側にキャビテーションが発生等の問題が生ずる。しかし50.4Hz程度の周波数上昇では、特に問題とはならない。従って、中国側で考えている周波数変動範囲49.8～50.4Hzをポンプ水車の設計条件とすることは問題がないが、49.5Hz程度の周波数低下時には揚水停止するのが好ましい。

4.1.2 高落差、大容量揚水発電所

(1) 水 理 諸 元

計画中の運転水理諸元は、以下の通りである。

上　池

最高水位	EL. 566 m
基準水位	EL. 535 m
最低水位	EL. 531 m

下　池

最高水位	EL. 96 m
基準水位	EL. 87 m
最低水位	EL. 85 m

静 落 差

最高水位	EL. 481 m
基準水位	EL. 448 m
最低水位	EL. 435 m

損失水頭

発 電 時	$296.8265\times10^{-5}Q^2$	1台運転
	$156.8125\times10^{-5}(2Q)^2$	2台運転
揚 水 時	$306.5146\times10^{-5}Q^2$	1台運転
	$164.5379\times10^{-5}(2Q)^2$	2台運転

（Q：1台運転流量　m^3/s）

(2) 発電所出力

200MW × 4台＝ 800MW

(3) 回転速度の選定

上記の落差、出力規模から回転速度は429rpmあるいは500rpmのいずれかとなる。

近年のポンプ水車、発電電動機の技術進捗と相まって、最近の機械は高速度、高比速度化し、経済性を高める傾向にある。

(a) ポンプ水車の技術動向

ポンプ水車の技術的難易度を示すパラメータとして揚程～K（但し、$K = N\sqrt{Q_P}$、N：回転速度（rpm）、Q_P ：揚水量（m^3/s））特性があるが、Q_Pは45m^3/s程度であり、500rpmでは$K = 3,354 < 3,500$となり、500rpmは採用可能である。

(b) 発電電動機の技術動向

発電電動機の技術的難易度を示すパラメータとして、N・kVAがあるが、発電電動機容量は222,000kVAであり、500rpmではこの値が110×10^6 となる。現状の技術水準からは250×10^6(rpm・kVA)程度まで開発可能であり、500rpmの採用が可能である。

以上から、現状の技術水準からは500rpmの採用が可能であり、また十三陵地点のポンプ比速度からいえば、500rpmを採用し高比速度化した方がポンプ効率は高くなる傾向にあるが、高速度機の採用にあたっては下記の点をも留意し、十分な検討が必要である。

(c) 振動・強度

高落差、大容量、高速機であり、また種々の運転モードがあるので、特に水圧脈動、変動応力、水圧加振力、ランナ加振周波数、ランナ固有振動数を把握し、ランナ、上カバーの振動と強度を確認する必要がある。従って、通常のモデル性能試験に加えて、実落差・実揚程試験を実施し実物変動応力の推定、振動解析を行うことが望ましい。

(d) キャビテーション特性

回転速度の上昇に伴い、ポンプ比速度が大きくなり、高揚程のポンプ運転時にポンプ入口負圧側キャビテーションが厳しくなるので、適正な吸出し高さ

(Hs) を確保する必要がある。

現計画では最小Hs＝－56mとしており、この場合のプラントキャビテーション係数（σ_{pl}）は最高全揚程時でσ_{pl}＝0.135程度であり、Hsにそれ程余裕はないがキャビテーション面では問題がないと思われる。また、Hsについては、負荷遮断時の放水路側の水柱分離現象を防止するよう、適正値を確保する必要があるが、後述するように現計画で問題ない。

(e) 機器据付・試験

高速機の場合はポンプ水車ランナ径が小さくなることと相まって、ポンプ水車及び発電電動機の据付に際しては適正な管理値のもとに慎重を期す必要がある。特に軸受ギャップのクリアランス量も小さくなるので、据付時の軸振れ見試験での注意が必要である。

また、メタル馴らし運転は、低・中速機においては定格回転速度までバランス調整なしで昇速できることが多いが、高速機の場合は定格回転速度までいっきに昇速出きず許容範囲内での最高回転数でメタル馴らしを含めてバランス調整を行う必要がある。

発電方向または揚水方向でバランス調整完了後、次の４条件で振動確認を行う必要がある。

- 発電無負荷無励磁および無負荷有励磁
- 発　電　(4/4 負荷)
- 揚水待機（空　転）
- 揚　水　（実負荷）

(4) 水圧・速度変動

500m級の高落差揚水発電所であるため、ケーシング及び鉄管側においては負荷遮断時の水圧上昇に留意する必要があるが、この場合高落差であるため水圧脈動が大きくなるので、最大水圧値は計算値に対し、この脈動分を加え決定する必要がある。水圧脈動は回転速度上昇率が大きくなる程大きくなる傾向にあり、特に無拘束速度近辺で最大水圧となる場合は脈動値は片振幅で負荷遮断前の有効落差の５～10%程度となる。

現計画によれば、ケーシング中心において最大水圧値は690mとなっているが、

後述する如く、この設計水圧値で問題はない。

また、負荷遮断時の吸出し管側の水圧低下については、放水路側に下部サージタンクがあることにより、水柱分離・再結合を起こす水圧（計算値－脈動分－余裕分≦－4～－6m）となることはない。

入力遮断時には吸出し管側の最大圧力を検討する必要があるが、後述する如く現計画の130mで問題はない。

一方、負荷遮断時の過渡回転速度上昇については、後述する如く現計画の145%（725rpm）で問題はない。

(5) 機器設計・製作

ポンプ水車の設計・製作に当たっては、高落差、高速度機がゆえに効率特性のみならず、キャビテーション特性につきモデルテストでの検証を十分行うとともに、ランナには13%Cr高Niの耐キャビテーション特性の優れた材質を選定し、ランナ鋳造方法についても十分留意する必要がある。また、高水圧、高周速特性に優れた主軸封水装置を採用する必要がある。　また、振動に対しては、実落差・実揚程試験を実施して振動の解析を行うとともに、ランナ外周部の振動加振源に対し、コンクリート構造物と協調を取ってステーベーンには十分剛性を持たせる等の振動を抑制する設計とする必要がある。

また、高速、大容量機のため、無拘束速度に十分耐える発電電動機の回転部の設計、材料の選定をするとともに、スラスト軸受構造および材質選定等にも留意し、スラスト力及び振動に十分耐えるブラケットの構造及び剛性の確認、更に軸系臨界速度の検討も必要となる。

4.2　可逆式フランシスポンプ水車の技術動向

4.2.1　単段可逆式ポンプ水車の落差・揚程

可逆式フランシスポンプ水車の揚程実績推移を図－Ⅱ.4.2-1 図に示す。500mクラスの高落差地点への単段式ポンプ水車の適用は1972年に日本で運転開始した沼原揚水発電所（基準有効落差478m、最高全揚程528m）をかわきりに、積極的に開発が進められ、現在は500mクラスの揚水技術は十分確立しており、技術的に800mクラスまでは単段式で開発可能である。

4.2.2　ポンプ比速度～揚程

図-Ⅱ.4.2-2図に単段式フランシスポンプ水車のポンプ比速度（Nsp）と揚程（Hp）の関係を示す。

近年の揚水発電所は技術進捗と相まって、高落差・大容量化する傾向にあり、これとともに回転速度も高速度化し、経済性を図る傾向にある。高速度化によりNspも大きくなるわけであるが、K値（$K = Nsp \cdot Hp^{3/4} = N\sqrt{Q_p}$）もおおきくなり、現在は技術的にはKは4,500程度まで可能といわれている。

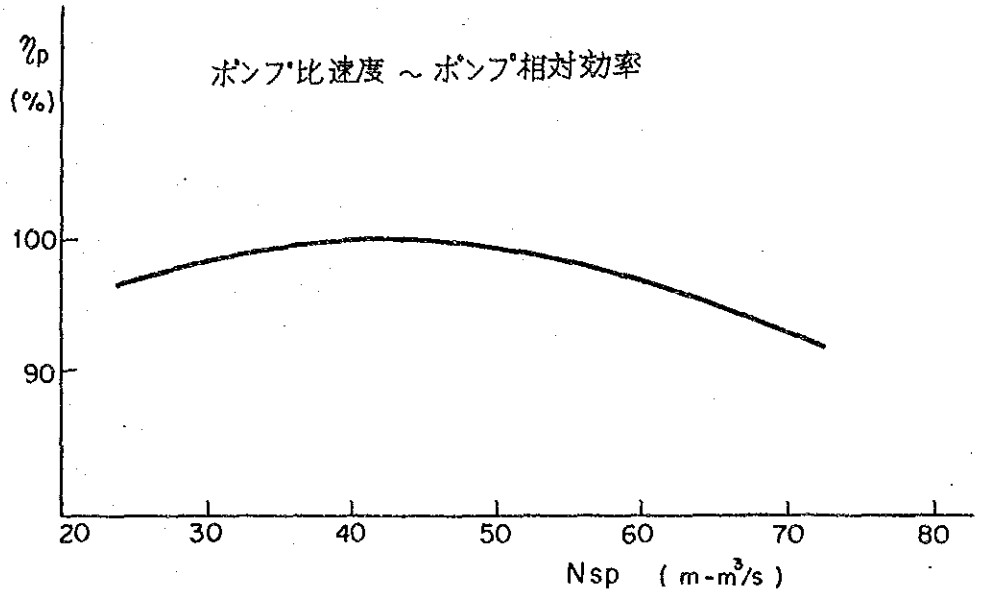
4.2.3　ポンプ比速度～効率特性

可逆式ポンプ水車は発電方向及び揚水方向の両運転を行うため、発電・揚水の両方の効率をバランスよく得るよう設計するため、運転範囲、特に変落差（揚程）特性により効率特性は左右されるが、一般的には発電運転時には最高有効落差で、また揚水運転時には最低全揚程付近で最高効率となり、各々の効率はさほど差がない。

変落差（揚程）が大き過ぎると発電時には基準有効落差以下で、揚水時には最高全揚程で極端に効率が低下する。

このような可逆式ポンプ水車特有の一般的特性があるので、運転範囲（特に変落差・揚程）の選定には注意を要する。

Nsp（最低全揚程時）～ポンプ効率（最低全揚程時）の一般的特性を下記に示すが、比較的比速度の高い（Nsp＝40～50程度）方が効率が良くなり、高速度、高比速度化しランナ入口径を小さくすることにより、円盤摩擦損失を少なくし効率向上を図るのが得策である。しかし、あまりNspを大きくすると、ランナ周速増加に伴う摩擦損失増加のため、下図から明らかなようにあまりNspを大きくしない（Nsp≦60）方が効率特性上好ましい。



4.2.4　超高落差（800m級）揚水発電所

超高落差化、大容量化に伴う単段可逆式フランシスポンプ水車の技術上の問題点として、① 800m級における揚水性能の実証、② 500m級ポンプ水車と同等な性能水準の確保、③高水圧、高周速に対する構造、強度上の問題、④高速大容量発電電動機の冷却方式、⑤軸系の振動対策、⑥水理的過渡現象等があるが、下記に述べる如く400MW程度のユニット容量であれば、本質的な問題はすでに解決済といえる。

(1)　800m、400MW級単段可逆式フランシスポンプ水車及び発電電動機

既に研究済の800m、400MW級のポンプ水車及び発電電動機の概要を紹介する。

（a）特性及び製作限界

①　特性上の限界

効率特性及びキャビテーション性能を500m級ポンプ水車の水準に置くものとし、K（$=N\sqrt{Q_P}=Nsp\cdot Hp^{3/4}$）=4,000程度とする。

②　機械加工の限界

ランナの鋳造及び仕上加工上ならびに保守作業からランナ入口高さ≧280mmとする。

③　強度限界

ランナ材料5Ni－13Cr鋳鋼の適用限界は疲労強度上900m程度である。

④ 発電電動機製作限界

冷却方式 ……空冷

最大過速度……140%

回転子構造……主軸とロータリムを一体としてマッシブ構造

⑤ 輸送限界

4.3m（幅）×4.0m(高)、45t（重量）

（b）基本仕様

上記の限界をクリアし、プロジェクト地点特性を考慮し、下記仕様を適用した。

ポンプ水車

発電運転

	有効落差 (m)	流量 (m^3/s)	出力 (MW)	比速度 (m－kW)	回転速度 (rpm)
最高	760	60	388	93.7	600
基準	736	60	374	95.7	
最低	682	56.7	325	98.1	

揚水運転

	全揚程 (m)	揚水量 (m^3/s)	入力 (MW)	比速度 ($m\text{-}m^3/S$)	回転速度 (rpm)
最高	812	37.3	——	24.1	600
最低	742	46.1	401以下	28.7	

吸出し高さ-96 m

発電電動機

発電機出力　420MVA

電動機出力　401MW

電圧　16.5KV

力率　0.90（遅れ）／0.95（進み）

短絡比　0.9

（c）研究結果

有限要素法による強度解析、模型試験あるいは実揚程試験などを実施し、800m級揚水の実用化の目途をつけることができた。即ち、

ポンプ水車

① 模型試験による効率、キャビテーション性能、振動特性等の検証

② 実揚程試験による揚水可能性の検証

③ 主軸封水装置性能の検証

④ ガイドベーン漏水対策の検討

⑤ 強度の検証

発電電動機

① 推力軸受の実物大モデルによる性能検証

② 水流モデルによる冷却方式の究明

土木構造物

① 水理解析による水圧鉄管等の土木構造物の安全性検証

② 軸系の振動解析による発電電動機バレル構造の検証

等であり、500m級と何ら遜色のない研究結果が得られたが、800m級プロジェクトの実用化にあたっては、以上の事も含め振動・応力変動等、今後十分検討する必要がある。

(2) 800m、300MW級可逆式フランシスポンプ水車の適用

800m級のポンプ水車及び発電電機の設計に当たっては、前述4.2.4(1)(a)項の種々の制限を熟慮する必要があるが、とりわけ、300MWとこの落差では比較的小容量となると、ランナ入口高さの確保が困難となる。特に、単段式ポンプ水車の場合はこれが問題となる。

800m級ということだけで、落差（揚程）の変動幅等が明確でないので、基準有効落差、最低全揚程、水車出力を以下の通り仮定する。

基準有効落差　　Ht＝810 m

最低全揚程　　Hp＝830 m

水車出力　　Pt＝350 MW（3台の設備出力1,000MW想定）

（a）単段式可逆ポンプ水車

600rpmと750rpmの2通りの回転速度が考えられる。600rpmの場合はNspが約23.5m³/sと小さく、ランナ入口高さが240mm程度と小さく余裕はないが、現

状の製作加工技術レベルでは可能である。

一方、750rpmの場合はNspが約29.3㎥/sと大きく、K値も4,500程度となり、詳細な技術的検討が必要となる。この場合、ランナ入口高さは280㎜程度となり問題ない。但し、マッシブタイプの発電電動機容量の空冷限界近くにあり、この面からも詳細検討が必要であるが、750rpm採用の可能性はある。

従って単段式ポンプ水車では、この落差（揚程）の条件では、回転速度は600rpmを採用し、ランナ入口高さを確保するため水車出力を400MW程度に増加することが好ましい。この場合、K値は3,800程度、ランナ入口高さは285㎜程度となり、発電発動機の空冷限界もクリアできる。

以上から、前述の落差（揚程）条件では、水車出力及び回転速度が350MW×600rpmと400MW×600rpmの２通りについて詳細な技術検討を経て、いずれか選択すべきである。

b）２段式可逆ポンプ水車

この場合は、ランナ１段当りの落差（揚程）は半分になり、流量（揚水量）は変わらないので、比較的大きなNspとなり、ランナ入口高さの制限は出てこない。

また単段式に比べ、出（入力）も半分となるのでランナ径が小さくなりメリットがある。しかしながら、制御面では２段とも可動ガイドベーン付とすると、ガイドベーン開度制御が複雑となり、また給排気制御も難しい。構造面でもランナ下抜き構造、下段ランナスラスト軸受構造の採用等により複雑化し、非常に高価となる（単段式の２倍）。効率が単段式と比べ不変となれば、１段当りのポンプ水車仕様は水車出力が350/2＝175MW、500rpm、Nsp＝33.1m－㎥/s、K≒3,000、ランナ高さが360㎜程度となる。

c）勧　告

以上から、600rpm×350MW（単段）、600rpm×400MW（単段）、500rpm×175MW×２（２段）のポンプ水車が検討対象となるが、ランナ入口高さの製作限界は更に小さくなる可能性があり、今後は　①落差（揚程）変動の確認、②ポンプ水車の運用範囲、③経済性、系統面からのユニット容量選定等に関するF/Sを行うとともに、ポンプ水車の形式、出力、回転速度の選定に当たってもメーカーと共同研究開発を行って、技術的な確認を経て最終決定をすることが必要である。

4.2.5 揚水始動方式

各種揚水始動方式の比較を下記に示すが、最近の傾向としては、主機が複数台の場合はサイリスタ始動（主）と同期始動（後備）の組合せが非常に多い。

(1) 制動巻線始動方式

単機容量が150MVA 以下の揚水発電所ではその設備の簡易さから1960年代には標準的に採用されていた。現在でも比較的単機出力が小さい場合、最も経済的であるので電力系統への影響を十分検討した上で採用することがある。尚、この方式には低減電圧始動方式と全電圧始動方式がある。

(2) 同期始動方式

従来、発電専用機を有する揚水発電所で採用されるケースが多かったが、その後大容量で主機台数の多い発電所に主始動方式として、また後述のサイリスタ始動方式のバックアップ装置として採用することが多い。

(3) 低周波始動方式

本方式は、①始動時は制動巻線始動をするので単機出力に制限を受ける。②加速時は同期始動と同じ制御で加速され、シーケンスが複雑である。との理由で日本に於いては採用されたことがない。

(4) 直結電動機始動方式

1960年代後半にアメリカで採用されて以来、大容量機を中心に主機台数の比較的少ない揚水発電所に標準的に採用された。しかし、1980年代に入り発電電動機がさらに、高速大容量化されると、軸系振動問題と誘導電動機の空転損失及び液体抵抗器の保守上の問題により採用は少なくなりつつある。

(5) サイリスタ始動方式

1970年代の後半より大容量サイリスタ素子が実用化され、またディジタル制御技術の進歩と相まって、現在ては高速大容量機に標準的に採用している。

通常は本始動装置を１組とし、そのバックアップとして同期始動方式を採用することが多い。

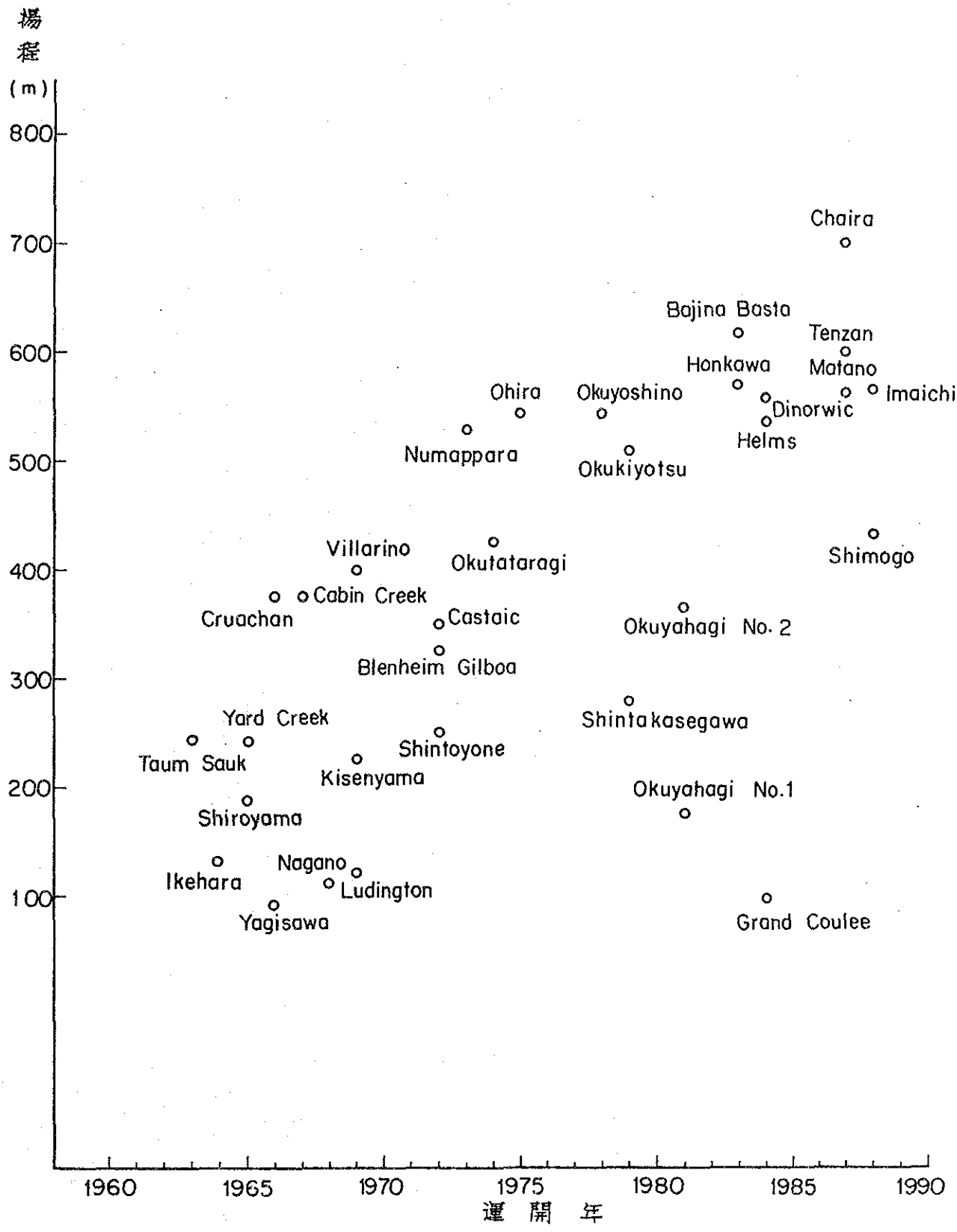

揚程
(m)
800
700
600
500
400
300
200
100
Chaira
Bajina Basta
Tenzan
Honkawa
Matano
Ohira
Okuyoshino
Imaichi
Dinorwic
Helms
Numappara
Okukiyotsu
Villarino
Okutataragi
Shimogo
Cabin Creek
Cruachan
Castaic
Okuyahagi No. 2
Blenheim Gilboa
Yard Creek
Shintakasegawa
Shintoyone
Taum Sauk
Kisenyama
Okuyahagi No.1
Shiroyama
Nagano
Ikehara
Ludington
Yagisawa
Grand Coulee
1960
1965
1970
1975
1980
1985
1990
運開年

図-Ⅱ.4.2-1　揚程の推移

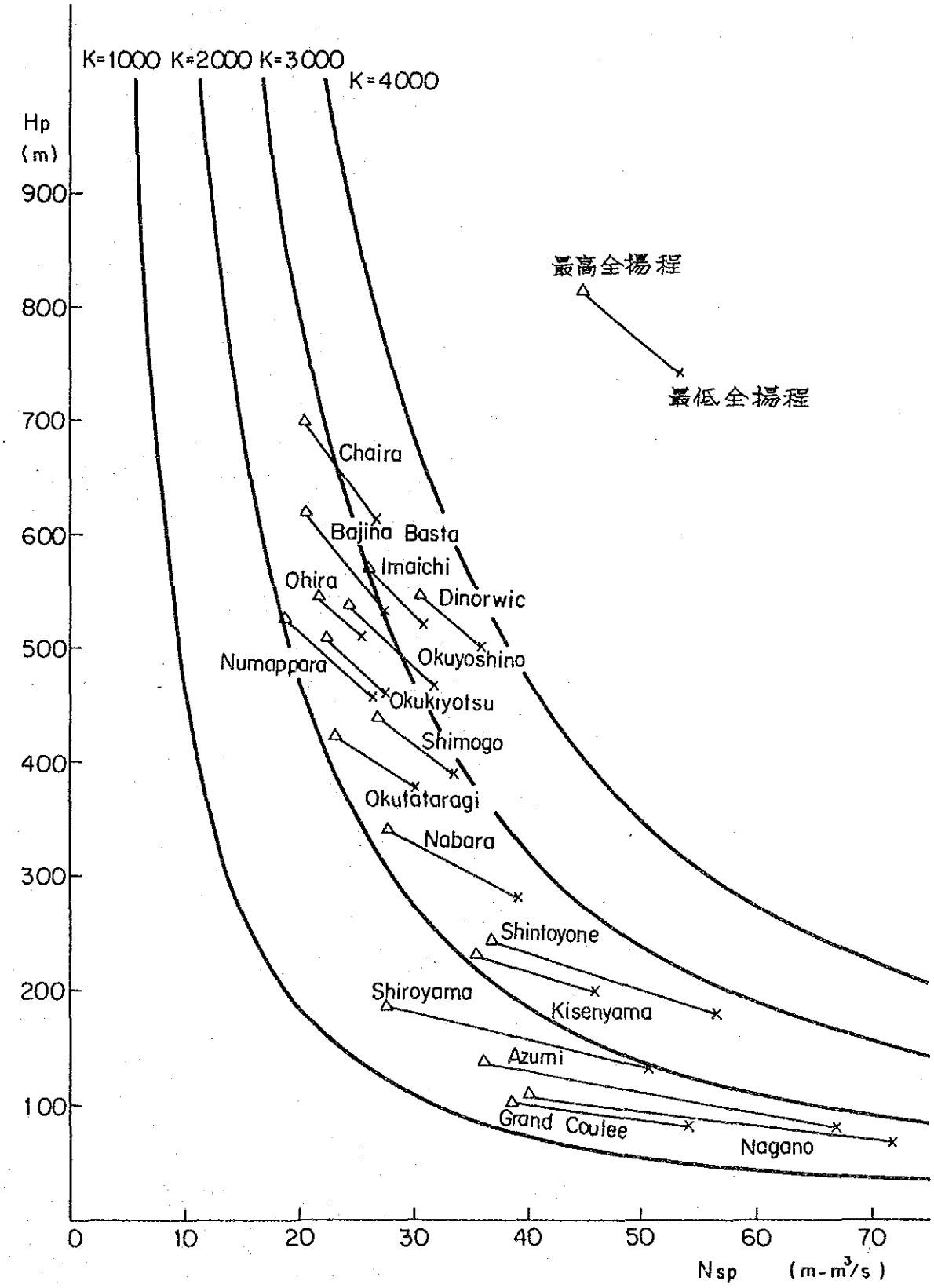


図-Ⅱ.4.2-2　ポンプ比速度～揚程

4.3 予備設計仕様の策定

現地調査結果を通じ、中国側より入手したデータを整理、紹介するとともに、必要に応じこれらに対するコメントを加えるものとする。

4.3.1 設計条件

(1) 耐震設計

水平加速度　0.2 g

垂直加速度　0.1 g

(2) 気象条件等

気温（屋外）	最高 40.3 ℃		最低	-19.6 ℃
室温（地下発）	最高 30.0 ℃		最低	5.0 ℃
（主変室）	最高 40.0 ℃		最低	5.0 ℃
湿度	最大相対湿度	85 %（20℃）		
水温	最高 28.0 ℃		最低	0 ℃
風速	平均風速	4.5 m/s		
	最大風速	23 m/s		

(3) 水質

PH	8.4		
Na^{+}, K^{+}	43.47 mg／ℓ	Ca^{++}	53.15 mg／ℓ
Mg^{++}	13.44 〃	Cl^{-}	13.86 〃
HCO_3^{-}	169.33 〃	SO_4^{--}	89.58 〃
遊離CO_2	0		
酸素消費量	8.9 mg／ℓ		
総アルカリ度	3.391mg当量／ℓ		
総硬度	10.53 ドイツ硬度		
一時硬度	9.51 ドイツ硬度		
永久硬度	1.03 ドイツ硬度		
泥砂特性	不明（特に問題なし）		

(4) 輸送制限

9.6m（長）×6.5m（幅）×3.8m（高）、 140ton（重量）

4.3.2 ポンプ水車

(1) 定格諸元

発電運転

	有効落差 (m)	流 量 (m³/s)	出 力 (MW)	比速度 (m－kW)	回転速度 (rpm)
最 高 ※	474.1	48.3	204.1	102.1	500
基 準 ※	430.0	54.1	204.1	115.4	
最 低 ※	417.4	53.0	192.9	116.4	

揚水運転

	全揚程 (m)	揚水量 (m³/s)	入 力 (MW)	比速度 (m-m³/S)	回転速度 (rpm)
最 高 ※	488.9	34.7	187.8	28.3	500
最 低 ※	441.3	45.4	217.0	35.0	

吸出し高さ －56m

※ 最高有効落差 1台運転 最高全揚程 2台運転

基準 〃 2台 〃 最低 〃 1台 〃

最低 〃 2台 〃

定格諸元の他、中国側の要望として、

- 最高全揚程時の揚水量は35m³/s以上
- 最低全揚程時最大入力は218MW以下
- 発電及び揚水時の最高効率92%以上

があるが、これらについて以下の通り検討した。

(a) 有効落差、全揚程

中国案と比較すると、全般的に大きな差異はないが、最高有効落差(Htmax)と最低全揚程（Hpmin）が3m程相違している。これはいずれも1台運転時であり、損失水頭計算値が中国原案に比べ、今回入手データによると大きくなっているためである。

(b) 最大ポンプ入力

ポンプ入力の決定に当っては、NspとNstの適正なバランス、所要揚水量が大きな要因となるが、これに加えて発電電動機の経済設計を考えることも必要である。即ち、中国案の最大ポンプ入力計算値はHpminにて前述の如く211.9MW（効率0.915）であり、保証値は218MW以下としているが発電電動機を経済設計するためには、所要の揚水量を確保し、発電機出力（MVA）以内に電動機入力（MVA)を抑える設計が最適である。

発電機出力(有効電力)：　200 MW

発電機出力　：　$200 \times \frac{1}{\text{力率}} = 200 \times \frac{1}{0.9} = 222$　MVA

から、ポンプ入力を217MWとすれば

電動機出力　：　217 MW

電動機入力　：　$217 \times \frac{1}{\text{電動機効率}} \times \frac{1}{\text{力率}} = 217 \times \frac{1}{0.978} \times \frac{1}{1} = 222$ MVA

となるので、発電機出力MVA＝電動機入力MVAとなり、またこの場合揚水量が45.4m³/s程度となり、中国案と差がないので、ポンプ入力は217MWとして発電電動機を経済設計した方が得策である。

(c) 発電、揚水時の最高効率

いずれの運転に於いても、中国案は92%と高い保証値を求めており、現状のメーカ技術レベルからすれば92%でも可能であると思われるが、多少余裕をみて考えることが現実的であるので、本レポートでは最高効率は以下の通り想定した。

発電運転	91	%（最高有効落差時）
揚水運転	90.5	%（最低全揚程時）

(d) 最高全揚程時の揚水量

中国案による揚水量は計算値が37.4㎥/sで保証値として35㎥/sを計画しているが、十三陵のように揚程変動範囲が大きい（$\sqrt{Hpmax/Hpmin}>1.05$）と、最低全揚程時の揚水量に比べ、最高全揚程時の揚水量が極端に小さくなり、最高全揚程時の効率が非常に悪くなる特性を有する。揚程が高くなるとランナ内の流れに逆流を生じ、振動、騒音が発生し始めるが、これを避けるため揚水量が小さくなり、特に十三陵計画のようにNspが比較的小さい地点で揚水量は小さくならざるを得ない。又、最高全揚程時の揚水量があまり大きくなると最低全揚程時の入力が過大となる。

従って、最高全揚程時の揚水量は34.5㎥/s以上を保証値とすべきである。

(2) キャビテーション性能

前述の通り吸出し高さを-56m確保すれば、キャビテーションの問題は特にないが、中国案によるキャビテーション保証値は以下の通りであり、これらに対する見解を述べる。

- キャビテーション対象部位

  ランナ、吸出し管、ガイドベーン、上カバー、ボトムリング

- 運転時間

  ポンプ運転3,000時間あるいは2年間のうち早い方

- 過負荷時間

  発電（定格以上）、揚水（最低全揚程時以下時）とも100時間以内

- 低負荷時間

  発電（40%定格以下）、揚水（最高全揚程以上時）とも100時間以内

- キャビテーション許容値

  上記対象部位に対し壊食量6kg以下

  ランナ他流路部に対し、壊食深度5mm以下

  但し、上記条件はいずれも満足する。

(a) 対象部位

ＩＥＣ、ＮＥＭＡのいずれもフランシス（ポンプ）水車の場合はキャビテーション対象はランナとしており、国際入札を前提とする本プロジェクトに於ては、国際慣例を考慮し、キャビテーションの一番過酷なランナについてのみ

キャビテーション保証の対象とすべきである。

(b) 運転条件

上記運転時間はＩＥＣを踏襲しており、合理的である。

(c) キャビテーション許容値

ランナは入口径が約3.6mのステンレス材であるので、ＩＥＣに基づくとランナ許容壊食量は6.1kg、許容壊食深度は7.8mm、許容壊食面積は0.17㎡となる。現計画の吸出し高さ－56mは耐キャビテーションに対してさほど余裕があるわけではないので、とりわけ壊食深度の５mmはメーカにとって厳しいと考える。さらに、中国案では深度のみ５mm以上になった場合、即ちピンホールの状態でも保証対象としているが、キャビテーションは一定の面積を伴った深度を考えるべきである。

以上より、キャビテーション許容値は以下を推奨する。

◦許容壊食量　　6 kg

◦25mm^2 以上の壊食面積を有した場合の許容壊食深さ５mm

(3) 水圧、速度変動

負荷遮断及び入力遮断結果を図-Ⅱ.4.3-1～図-Ⅱ.4.3.6に示す。

(a) 計算条件

２台同時負荷遮断

Case 1

上池水位	EL. 535 m	(基準)
下池水位	EL. 87 m	(基準)
水車出力	204.1 MW	

Case 2

上池水位	EL. 566 m	(最高)
下池水位	EL. 85 m	(最低)
水車出力	204.1 MW	

２台同時入力遮断

上池水位	EL. 531 m	(最低)
下池水位	EL. 96 m	(最高)
ポンプ入力	217 MW	

(b) 計算結果

最大ケーシング水圧 (Case 2)	1号	639.6m	2号	637.7m
最小吸出し管水圧 (Case 1)	1号	32.4m	2号	30.9m
最大回転速度 (Case 2)	1号	695.8rpm	2号	695.4rpm
最大吸出し管水圧	1号	98.6m	2号	100.5m

最大ケーシング水圧及び最小吸出し管水圧の決定に当たっては、水圧脈動分を考慮する必要があるが、脈動値については以下のように求めた。特に吸出し管は、水柱分離・再結合による圧力急増のため機器の損壊を生じる恐れがあるので最小水圧については注意が必要である。

ケージング

Δhp（片振幅）＝466（遮断前有効落差，He）※×0.08

＝37（m）

（注）

※ He＝566－85－156.8125×10^{-5}×（2×48.9）^{2}

＝466（m）

吸出し管

Δhd（片振幅）＝577（最小水圧時有効落差）※×0.035

＝20（m）

（注）

※ 577；計算機による解析値

以上から、

ケーシング最大水圧　639.6＋37＝676.6＜690m

吸出し管最小水圧　30.9－20＝10.9＞0m

吸出し管最大水圧　100.5＜130m

最大回転速度　695.8rpm，最大速度上昇率139％＜145％

となり、中国側の計画設計値で問題はない。

(4) 騒　音

中国案による騒音許容値は、

○水車ピット内踏板から上方１mの位置で95dB以下

○ドラフトマンホールから１m離れた位置で98dB以下

であるが、騒音、振動については、建屋構造物との関係が非常に深く、通常製作者側のみに保証扱いさせることはない。

一方、ポンプ水車の場合特に揚水過程におけるプライミング確立時が非常に大きな振動、騒音を発生するし、また部分負荷時にも大きな騒音を発生するので、あらゆる運転状態に於いてこの許容値をクリアすることは困難である。日本に於ける経験では、ポンプ水車ピット内騒音は、定格運転状態でも95dB以上、110dB程度であるが、この程度の騒音でもピット内において人間に悪影響を与えるほどの大きさではない。したがって、騒音許容値はもう少し緩和する（100～105dB）ことが現実的であり、また定格発電、揚水運転時のみに限定すべきである。

(5) 出力及び周波数変動範囲

揚水運転はその時の揚程に応じて最高効率となるよう水位差応動装置によりガイドベーンが自動的に制御され揚水量、入力は任意に変えることはできない。

一方、発電運転は落差の如何にかかわらず任意に出力調整できるが、可能最低出力が問題となる。これについては、中国案では40％であるが、4.1.1(2)(d)で述べた理由から50％とし、機械を大事に使用し寿命を長くするのが好ましいと考える。一方、周波数変動については前述の通り、中国案の49.8～50.4Hzをポンプ水車の設計条件とすることで問題はない。ただし、この範囲を超える場合、例えば周波数低下時は系統に対する悪影響も考え、49.5Hz程度に下がる場合はポンプ停止することが好ましい。また、周波数上昇時も回転速度の上昇に伴い、4.1.1(2)(e)で述べた問題があるのでポンプ停止するのが好ましい。また、ポンプ水車の設計強度面から中国側より締切圧力を52Hz相当で決める考え方もあるとのことであったが、この程度の周波数上昇による締切圧上昇であってもポンプ水車強度上は短時間であれば問題ない。しかし、ポンプ締切圧力は回転速度の２乗に比例するので50Hz設計に比べ、$(52/50)^2=1.08$倍の締切圧力となり負荷遮断時の最大水圧とほぼ同程度になり、また締切入力も回転速度の３乗に比例し大きくなるので

電力損失が増えることとなる。従って、振動、応力変動、経済性等を考慮するとプライミング水圧等、52Hzをポンプ水車の設計条件とすることは好ましくない。

(6) 水圧脈動

水圧脈動の原因の大半はポンプ水車内の各部及び吸出し管に発生する渦によるものである。この渦の持つエネルギーはQH（1-η）に比例するので、水圧脈動振幅と損失は比例関係にあり、効率の悪い流量での運転では脈動が大きくなる。

また、ポンプ水車特性でdq/dn（$q=Q/\sqrt{H}S^2$、$n=NS/\sqrt{H}$、但し、sはモデル比）の大きいところは、不安定領域であり、ランナ出口には大きな旋回速度が残っており、吸出し管にホワールが発生し、ガイドベーン～ランナベンーン間の流水方向がランナベーンあるいはガイドベーンの姿勢と大きく食い違うため流水が剥離し、各所で渦が発生し水圧脈動が大きくなる。従って、発電定格運転時にはQ、Hは大きいものの効率が良いので脈動は少ないが、Qは少なくてもdq／dn大、即ち部分負荷運転の方が効率の悪い分だけ脈動が大きく（無拘束速度近傍の運転となる）、また、高落差ほどこの傾向は大きい。

一方、揚水定常運転時にはdq／dnは定常運転時においても発電時に比べ非常に大きく、ガイドベーン適正開度運転よりわずかにずれてもQ,Hが大きいので脈動は大きくなる。さらに水圧脈動は揚水時のキャビテーション係数にも左右され、この係数が小さくなる運転状態では脈動値が大きくなる。以上のことからケーシング水圧脈動値（両振幅、ΔH／H）は経験的に発電定格運転時２％、発電部分負荷運転時５％、揚水定格運転時２％程度である。また、揚水定格運転時のガイトベーンとランナ間の脈動は経験的に20％程度である。

但し、これらの脈動値はコンクリート等、建屋構造物に大きく影響されるので、保証値扱いではなく参考値扱いとすべきである。

(7) 振　動

日本においては各電力会社毎に軸受振動の目標値や判定基準を持っているが、定常運転時には概ね両振幅で５／100㎜以下で良、10/100㎜以下で可としている。

ただし、ＩＥＣのソ連案によると発電電動機軸受、ホンプ水車軸受の水平及び垂直方向の振動に対して、4.5/100㎜以下良、8/100㎜以下で可となっているが、実用上は10/100㎜以下であれば問題ない。

また、上カバーの垂直振動は上記より通常小さいので3/100mm以下が適当である。軸振れについては、日本における電力会社では概ね両振幅で5/100mm以下（振れ見）、また軸振動については定格運転時、両振幅で10/100mm以下を目標としている。ただし、部分負荷運転、プライミング水圧確立時等は、当然ポンプ水車は脈動、振動が大きくなるので、これらの特殊運転時は振動値は特に規制しない方が経済的にも好ましい。

(8) 軸受温度

中国案の冷却水温28℃以下で軸受温度65℃以下、冷却水断水後、定格回転速度で15分間運転可能とする仕様については問題ない。

(9) 無拘束速度

ポンプ水車の場合、一般水車に比べ比速度が小さくランナは偏平となり、摩擦損が大きいのであまり無拘束速度（N_r）は上昇しない。十三陵の場合、最高有効落差時におけるN_rは715rpm程度となる。また負荷遮断時には4.3.2(3)(b)に述べたように過渡最大回転速度（約700rpm）となる。

N_r継続時間に関する国際規格によると、日本、IEC、BS、VDE、ソ連等では2分間設計としており、ANSIの5分間は例外である。

定常運転からN_rに移行後の軸受温度上昇については、軸受温度が飽和するまで数十分かかるので、N_r継続時間が2分でも5分でも差異はない。但し、N_r状態では水圧脈動が大きくなり（定常時の20倍程度）、また横スラスト荷重も大きくなるので、N_r運転の頻度による疲労強度、各部締付・締代、メタルギャップクリアランス、主軸・軸受廻りの剛性、キャビテーション等の検討が必要であり、長時間のN_r運転は避けるべきである。本プロジェクトでは入口弁を有しており、故障によりガイドベーン不動作となっても短時間にポンプ水車を停止することができるので、2分間のN_r継続時間とし過度な要求をポンプ水車設計に与えない方が好ましい。

4.3.3 入 口 弁

球形弁、操作油圧7MPa級の計画は妥当であるが、開閉時間20～120秒可調整についてはあまり開閉時間が早いと単位時間当たりの送油量を大きくする必要があり、配圧弁及び圧油配管の口径が大きくなる。さらに流水遮断時の鉄管水圧上昇を考えると閉鎖時間はあまり小さく出来ない。日本においては通常バイパス弁の動作時間も含め開閉時間は60秒程度としている。

したがって、バイパス弁を含め20秒の開閉時間とすることは技術的に可能であるが前述の問題があり、40秒程度を推しょうする。また、70～75%程度のバイパス弁による圧力平衡で、主弁を開とする考えを中国側より提示されたが、圧力検出装置の追加、設定圧力及び圧力検出方法等問題が多いのでこの考えはやめるべきである。

4.3.4 発電電動機

(1) 形式・構造

500rpm機の場合、普通形でも半傘形でもいずれも適用可能であり、双方比較すると以下の通りである。

普 通 形 ……○高い軸剛性を確保するため、軸中央部の軸直径は大きくなる。半傘形ではこの部分にスラスト軸受を配するため軸受周速、軸受損失が大きくなるが、普通形は軸直径の小さい上部にスラスト軸受を配置できるので、軸受損失が軽減できる。

半 傘 形 ……○普通形では軸受支持間隔が長くなり、軸系の危険速度が小さくなる傾向にある。

○普通形では、スラスト軸受を回転子上部に配置するため、ポンプ水車側スラスト荷重及び回転子重量が回転子スパイダボス部のボルトに加わり構造的に問題が増大する。また、これらの荷重はステータフレームで支持することになるので、ステータフレームが半傘形に比べ重構造となる。

○半傘形ではスラスト軸受を支持するブラケット位置が普通形に比べ内周側となり軽量化が図れるとともに、

ブラケットを剛性の強いコンクリートで支持できる。

○メンテナンスが容易な構造である。

また、メーカによって得手、不得手があるのでこれらを総合的に考え決定する、必要があるが、上記から半傘形の方が多少メリットがあると思われる。

(2) 力率・出力・効率

力　　率　；0.9遅（発電）　1.0（揚水）

発電機出力；222MVA（200MW ×1/0.9）

電動機出力；217MW

発電電動機効率は同一出力に対し回転速度が大きくなると鉄損が増える。また、(MVA) ×（rpm)が大きい（5 ×10^4 以上）と機械損が大きくなる。鉄損、電機子抵抗損に比べ機械損は非常に大きいので、十三陵のような高速機は効率があまり良くならない。また、力率が悪くなるにつれ効率も悪くなるので、十三陵の場合、定格力率0.9にてη_G =0.975 、定格力率1.0にてη_M =0.978 となる。

(3) 冷却通風方式

高速機であるため、立軸方向に長い発電電動機構造となるがリムダクト方式の採用は可能である。しかしながら、この方式にした場合、リム内周側の通風面積確保のため径方向寸法を大きくする必要があり、また通風ダクト確保のため立方向にさらに長くなり機械寸法が大きくなるとともに機械損も増え効率が低下する傾向となるので別置の強制ファンを設ける方が好ましい。

(4) 電　圧

本プロジェクトの発電電動機容量では、定格電圧は13.8kV、15.75kVのいずれも採用可能である。極数は12ポールとなるので、固定子巻線の並列回路数は2,3,4,6が考えられるが、1コイル当りの電流容量は通常2,000～3,000Aに選定される。

定格電流は13.8kVの場合9,288A、 15.75kVの場合8,138Aとなり、前述の1コイルの電流制限及び経済性から

13.8kV　⟶　並列回路数　　4（2,300A）

15.75KV ——→ 〃 4（2,030A）又は3（2,700A）

となる。したがって15.75kVの場合には並列回路数の選定及びスロット数の選定に自由度があり、かつ13.8kVと比べ4Ｙの場合は電機子抵抗損が減る傾向になること及び主回路、始動回路の事故電流を抑制できることから、15.75kVを選定する方が好ましい。また、15.75kV の場合の3Ｙは4Ｙに比べスロット数が減り、鉄損、励磁損が減るとともに渡り線数が少なくなり経済的となることから3Ｙを採用するのが好ましい。但し、3Ｙは電機子抵抗損が4Ｙに比べ増えるが、これは鉄損に比べ小さいので問題とならない。

(5) 短 絡 比　　0.9 以上

4.3.5　主要変圧器

(1) 形　式

三相送油水冷式

(2) 電　圧

15.75KV 又は 13.8/230KV

前述の理由から15.75KVを1次電圧に選定する方が良い。

(3) 容　量

240MVA

222MVAで良いが、中国製標準容量の240MVA採用。

(4) 電 圧 調 整

中国案では負荷時タップ切替装置（ＯＬＴＣ）は設けず、無電圧切換タップ（230kV±2.5％×2）を採用し、運転時には発電電動機で電圧調整（±7.5％）を行うことになっている。

揚水機ではＯＬＴＣを設け電圧値を変えるのが通常であり、設けない場合は揚水時、次のような不具合を生ずる可能性がある。

(a) タップ位置が高い場合（235.75kV、241.5kV）

揚水時はプライミング水圧を確立する迄最大入力の15～20%程度の入力を要するが、その後ガイドベーンが開いて揚水を開始するとともに入力が増大し、適正開度に達すると最大入力となる。入力増加とともに系統電圧が低下して行き、タップが高めの位置にあるため、発電電動機電圧が低くなり、所要入力を確保するため過電流状態となる。

発電電動機電圧を維持するため自動電圧調整装置（ＡＶＲ）の機能は有しているものの、揚水時は力率1.0運転とするため、自動力率調整装置（ＡＰＦＲ）運転となり、ＡＶＲは除外されるので発電電動機電圧の低下は防止できない。したがって、不安定な運転となり易く系統電圧が低い時に揚水運転をすると、しばしば電力動揺を起こし、系統に悪影響を与えることとなる。

(b) タップ位置が低い場合（218.5kV, 224.25kV）

系統電圧が高い場合には主変が過励磁状態になり好ましくないし、系統電圧が低い場合には揚水運転によりさらに系統電圧が低くなり、揚水運転継続が困難な場合もある。

また、タップ位置がニュートラル（230kV）の場合でも系統電圧の状態によっては上記と同じことがいえるので、将来の系統構成あるいは負荷等需要の変遷を考慮し、揚水機においてはＯＬＴＣを備えることを強調しておきたい。

4.3.6 給排水システム

中国案の給排水システム概要は、

- 吸出し管から給水ポンプにより給水し、ドラフトへ排水する。
- 給水ポンプは吸出し管抜水にも利用する。
- 給水系は1,2号用と3,4号用に分かれ給水ポンプは各ユニットに対し常用１台、予備は各グループに対して１台である。また＃１～４号の給排水母管はバルブで連系され、調相運転機用給水は自らの給水ポンプにより給水し、排水母管を連系することにより排水は停止機あるいは発電運転機の吸出し管へ排水される。
- 排水ピットは２ヵ所あり、各々のピットに対し排水ポンプセットは常用２台、予備１台である。排水位置は2,3号機のドラフトゲート下池側である。
- 発電電動機及び主変圧器の消火には水消火装置を採用している。

であり、基本的には問題がないが吸出し水頭が高いので主軸封水装置給水用として加圧ポンプを設けることが好ましい。

4.3.7　主回路単線結線図

中国案を基に作成した単線結線図を図-Ⅱ.4.3-7に示すが、これに対するコメントは以下の通り。

(1)　発電電動機中性点接地方式

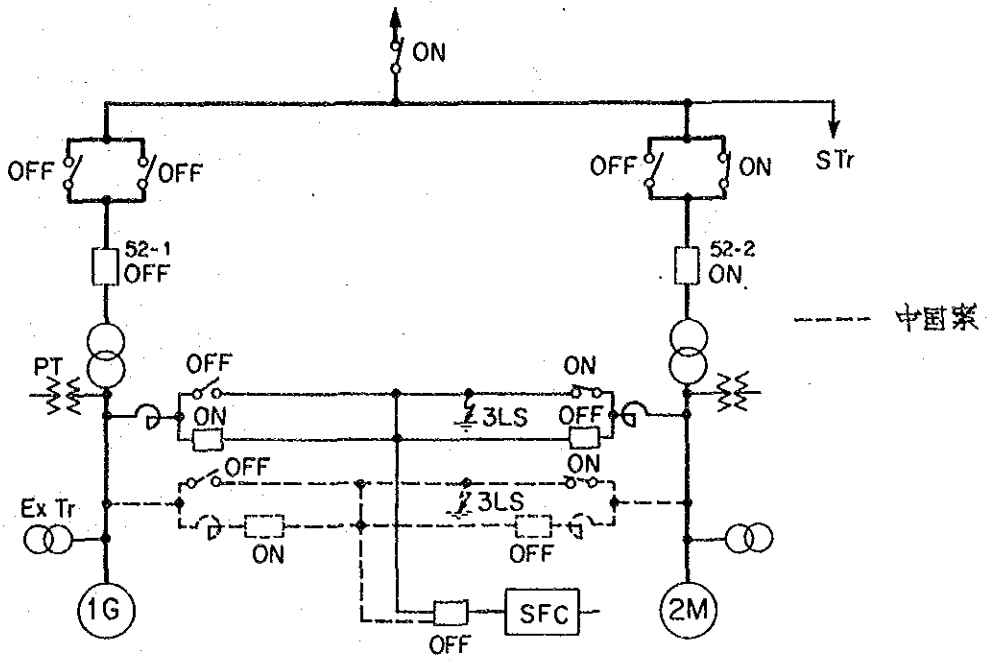
中国案では消弧リアクトル接地となっているが、この方式では発電電動機、主変圧器等の静電容量（C)が明確には判明できないので、LC並列共振点を見出すのが困難であり、リアクトル（L)のタップ値を設ける等精度が要求され信頼度にも問題があること、事故後も低電流（５Ａ程度）とはいえ継続して電流を流すのは発電発動機にとって好ましくないこと、送電系統に比べＣ分が小さいのでＬ分が大きくなり不経済であること等から、ＮＧＲ（中性点抵抗接地方式）あるいはＧＰＴ接地方式を推賞する。両方式の一長一短はあるが、日本においては事故検出感度が優れるＮＧＲ方式が一般的である。

(2)　発電電動機

中国案では番号34の変流器（3,000/5A）を１個設けることになっているが、これは固定子巻線並列回路数４を前提として１並列回路当りの過電流を検出し、並列回路間の不平衡電流を検出しようというこ考えであるものと推測するが、最近の技術水準から判断すると、不平衡電流の発生は考えられずこのＣＴは不要と思われる。また、並列回路数は前述の通り４に限定すべきでなく、むしろ３の方が好ましい点もある。

(3)　同期始動回路

いかなるユニットも同期始動時に発電機として機能させるために、同期始動回路には遮断器、断路器を並置する必要があり、回路が複雑となる。また、同期始動回路（あるいはサイリスタ始動回路）の短絡時の故障に関しては以下の通り限流リアクトルを設置する方が好ましいと思われる。



上記に示す始動回路事故を想定する。（サイリスタ始動も同じであるので同期始動について図示）

この場合、１号機発電、２号機揚水であるが、１号機により２号機を加速後52－２並列直後に三相短絡事故があると２号機からと52－２を通し系統からとの両方から事故電流が始動母線に流入をすることになる。さらに所内変圧器からの流入分を考慮すると事故電流は120～130KAと非常に大きな電流となる。従って、図示の如く限流リアクトルにより電流を抑制し通常の遮断器により遮断できる。（ただし、リアクトルの位置は中国案より本案の実線で示す場所が良い）

一方、

① このような系統及び発電機側からの事故電流の流入があり得るのは、図示の如くＰＴ回路、ExTr回路の分岐回路についても同様である。

② 揚水並列時と同時に三相短絡故障が発生する可能性は極めて少ない。

③ 限流リアクトルを変圧器室に置くのであれば限流効果に供しえない始動回路が長くなる。

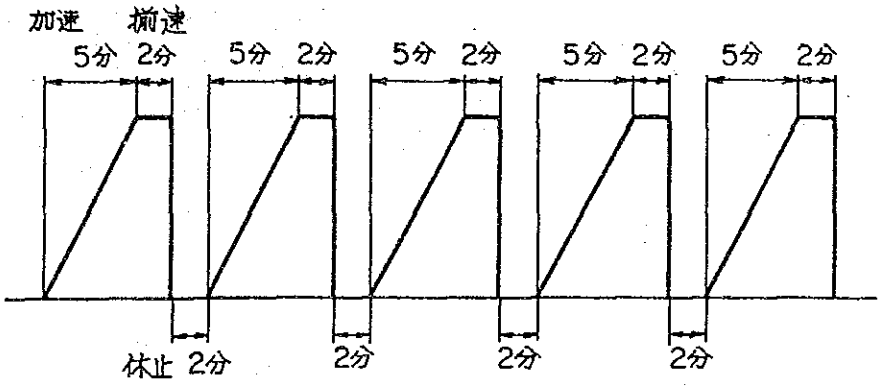
ことから、リアクトルの設置はやめる考えもある。しかしながら、この様な特殊な事故にも対応する必要があるならばＰＴ回路、ExTrの分岐母線と同様の短絡強度を持たせるような始動母線の設計をする方法もあるが、中国案によると母線が長いのでリアクトル設置の場合に比べ経済的でないと思われ、リアクトル設置が好ましい。但しリアクトルの設置位置等機器配置も十分考慮する必要がある。

(4) 220kV ＧＩＳ用避電器（ＳＡ）

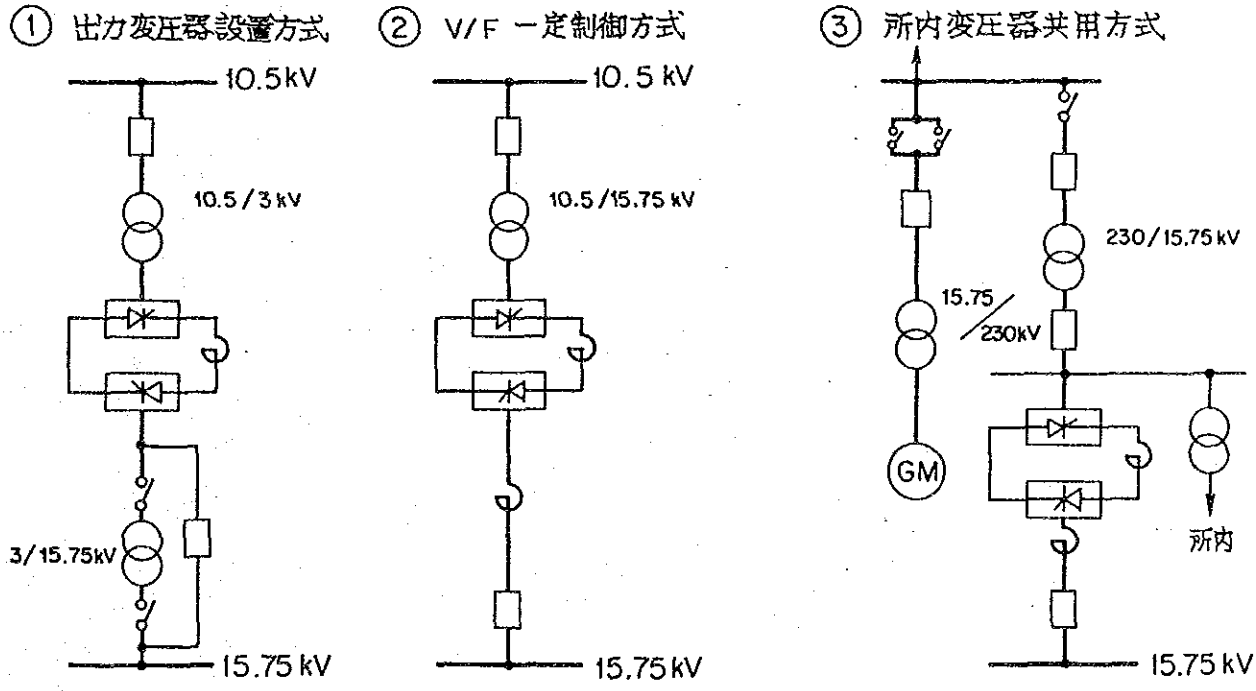
中国案によると220kV母線用ＰＴ、ＳＡは1,2号（3,4号）用及び所内回路用共通母線に設けており、またこのＰＴ、ＳＡのメンテナンス用として断路器を設けている。しかしながら、ＳＡの位置はできる限りＸＬＰＥケーブル端に近い方が望ましく、またＳＡ、ＰＴの点検時は主機を停止し、かつ送電線用断路器を開状態にして行えば良いので、これら点検用断路器は設けなくても良い。

4.3.8 サイリスタ始動

サイリスタ始動装置の時間定格は以下の通りとし、始動回数は５回とする。



サイリスタ始動回路については、以下の様な方式がある。



①については、起動時（断続始動）に変圧器をバイパスし、電流を流し一定の速度（10%程度）に達すると変圧器回路に切換え、定電流加速制御、揃速揃圧制御を行い系統並列する。

この方式ではサイリスタ素子は低圧・大電流となり、部品点数も多く回路切替等制御が複雑となり信頼度が若干劣る。

②については、日本で通常使用される回路であるが、回路の切り換え無しで断続始動から定電流加速制御ができ部品点数が少なく制御が①に比べ単純であり、信頼度は高い。

③については、原理的に②と同様であるが、所内回路と始動回路が共用である。したがって、この場合サイリスタより発生する高調波が所内機器に与える影響が懸念されるが、所内低圧回路用変圧器のインピーダンスは、高圧所内変圧器よりもはるかに大きく、所内機器に流入する高調波は少ないので特に問題とならない。

以上から②の方式が最良と考えるが、③の方式でも所内用変圧器とサイリスタ始動装置の間に変圧器あるいはリアクトルを置いて所内機器への高調周波逓減を行うか、あるいはサイリスタ始動装置使用時にはもう一方の所内変圧器から所内電力を供給し、サイリスタ始動回路と所内回路を分離する運用にすれば問題ない。これらを考慮し作成したサイリスタ始動回路を図-Ⅱ.4.3-7の単線結線図に示す。所内回路変圧器(STr) の２次電圧として10.5KV を採用しサイリスタ始動用変圧器を設ける。この変圧器の２次電圧はサイリスタ始動回路の電圧降下分を考慮し16.5KVとした。

4.3.9　運転制御方式

中国案をもとに作成した計算機を採用したＬＡＮ（Local Area Network）運転制御システム概要を図-Ⅱ.4.3-8に示す。尚、計算機故障時を考慮し、バックアップ用として通常の運転制御機能を付加した。

4.3.１０　発電所機器配置

機器配置に関しては中国側で見直し、変更中であるが、計画中のレイアウト概要の特徴は以下の通りである。

(1) 建屋構造物構成

- 地下発電所本館及び付属建屋（配電盤室、電気品は本館隣接の付属建屋に設置）
- 地下主変圧器室（主変圧器、所内変圧器の上階に220kVGIS,サイリスタ始動及び同期始動装置設置）
- 密閉母線トンネル（ユニット毎に１本、計４本）
- ドラフトゲート室
- 進入路トンネル
- 220kVケーブルトンネル
- 屋外開閉所（Conventional type）

(2) 水圧鉄管、ポンプ水車、放水路と発電所本館とのレイアウト

水圧鉄管－ポンプ水車－放水路は建屋に対し斜めに配置されるので、主機間隔が24mと大きめになっていてる。また、本館建屋幅は19.5mである。

(3) 主機据付様式

コンクリートバレル式

(4) 220kV,XLPEケーブル

ケーブル布設亘長は１条当り約500mであるが、このうち垂直立坑部の布設が160m程度あり、この部分の布設方式は十分留意する必要がある。

(5) 天井クレーン

中国案によると主巻（200ton）２個のクレーンを１台及び30／５ｔ１台を設置することになっているが、据付工程の短縮のためには200ｔ（主巻）、30ｔ（補巻）、５ｔ（ホイスト）付クレーン２台の設置が好ましい。

4.3.11 運転モード切替

運転モード切替の種類については4.1.1(2)(a)で述べた通りであるが、ここでは揚水 ⟶ 発電の直接切替について述べる。

もし、この直接切替をすると、シーケンス的には下記のようになる。

揚水運転 ——↑——→ガイドベーン閉指令 ——→並列ＣＢ開指令

発電指令

——→回転速度減、ガイドベーン小開（５％程度）

——→ポンプ正転逆流（制動領域）——→ポンプ方向小回転

——→ガイドベーン起動開度指令 ——→相反転ＤＳ切換（揚水 —→発電）指令

——→発電正転領域 ——→並列ＣＢ閉指令 ——→発電運転

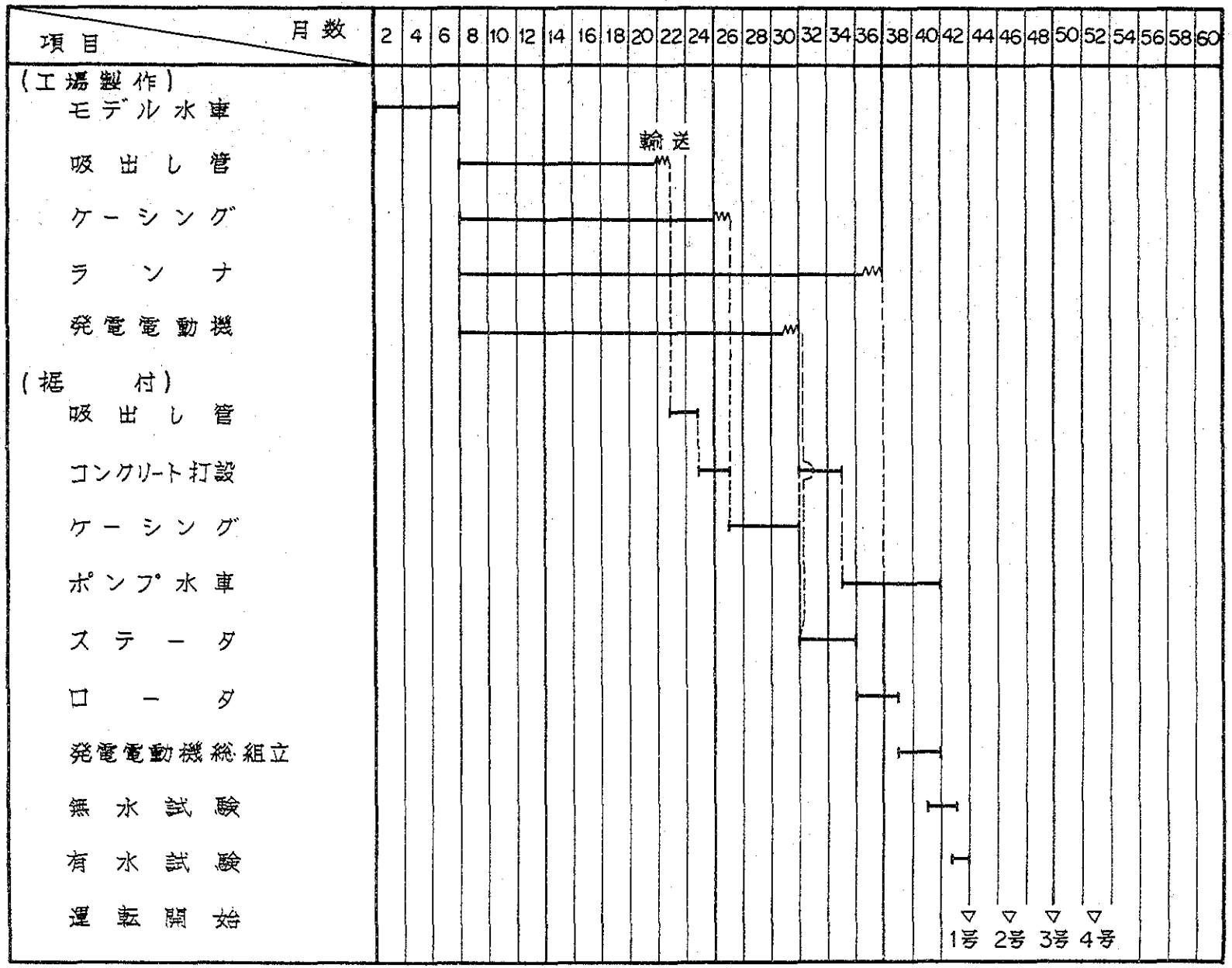
即ち、ガイドベーンを全閉し、ポンプ水車を停止することなく逆流現象により揚水から発電に短時間に切替える方式である。しかしながら、この方式は正転正流ポンプ領域から強制的にポンプ正転逆流（制動）領域を経て水車正転正流領域へ移行させるもので、振動、騒音を伴いポンプ水車のみならず発電発動機スラスト軸受等機械にとっては非常に過酷な運転であること（ポンプ制動領域はポンプ水車にとって一番脈動、振動が多い）またポンプ運転から急速に発電運転へ移行する系統からの要求もまず考えられないことから、この方式はやめるべきである。

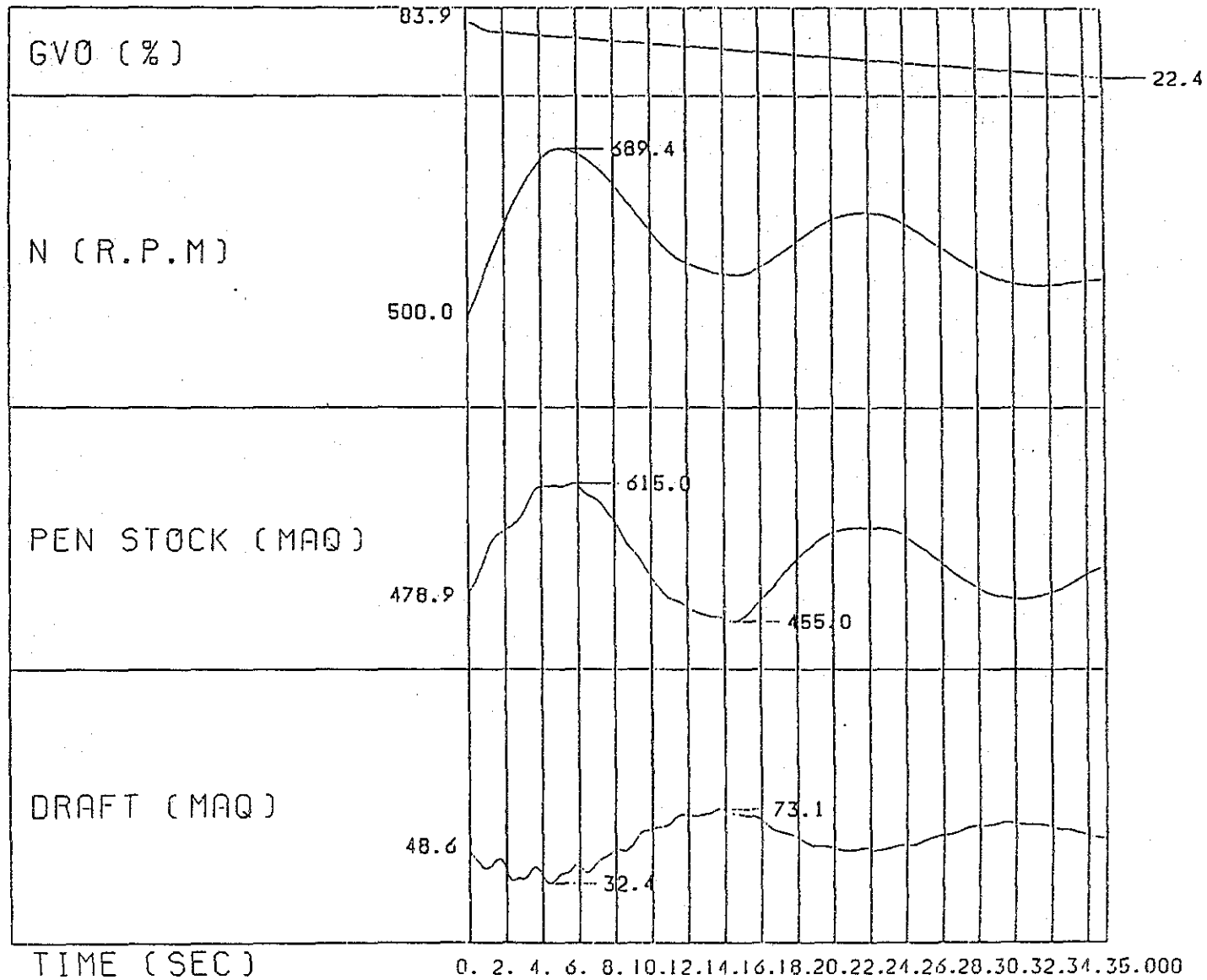
4.3.１２　製作・据付工程

参考として日本において短期間で据付する場合の工程の一例を表-Ⅱ.4.3-1に示す。　この中でコンクリート打設工事は吸出し管廻りに２ヶ月、ケーシング～発電電動機バレル廻りに３ヶ月想定しているが、詳細なチェックが必要である。日本においては通常コンクリート打設速度は300mm/h、また打設リフトは2.5m/回程度である。また、工場製作工程では鋳造過程が一つのポイントであり、ランナの製作がクリティカルとなる。

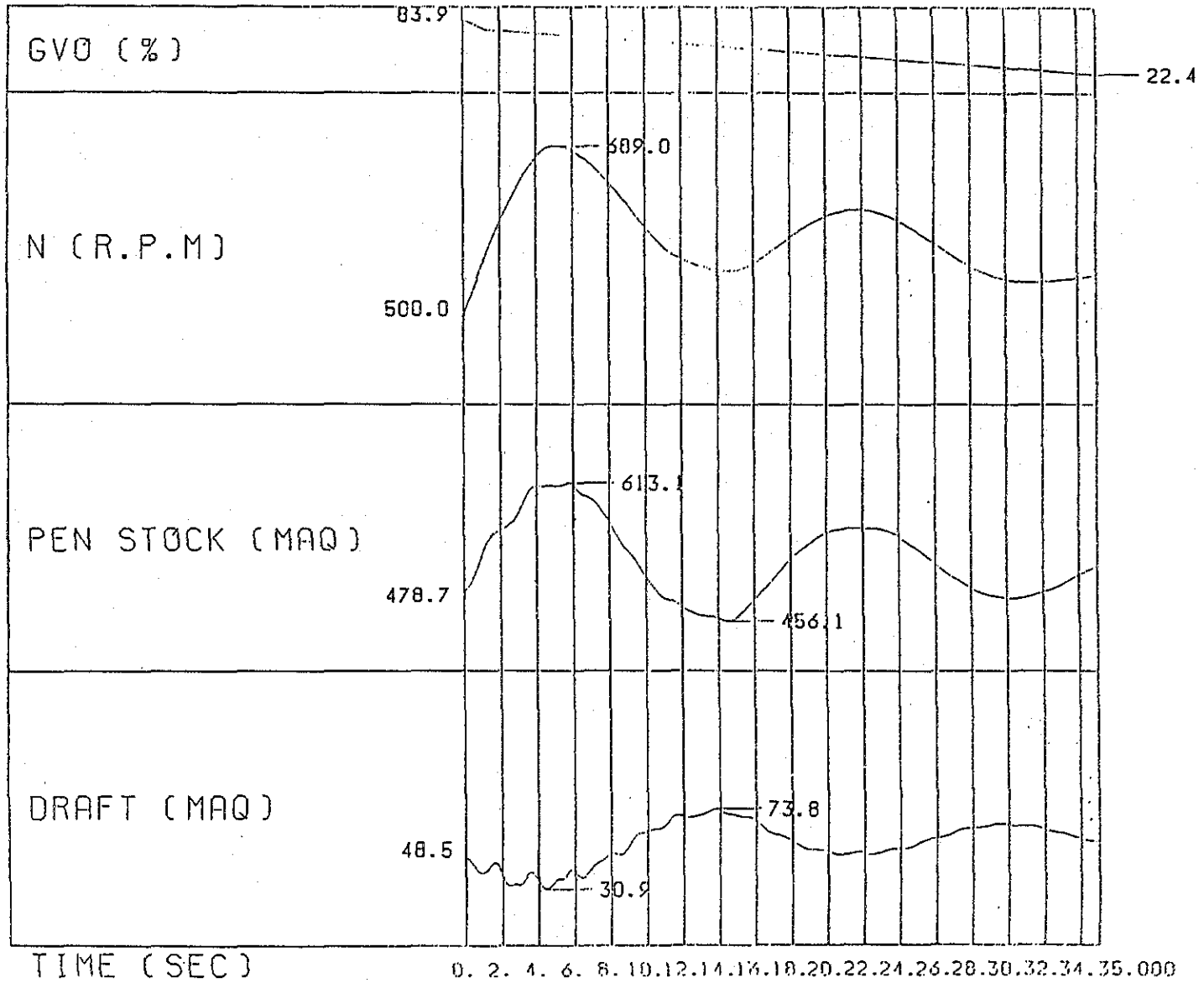
また、実揚程・実落差試験を行うとすればモデルポンプ水車の製作・試験工程も図示よりも２ヵ月程更に長くなる。

表-Ⅱ.4.3-1　機器製作・据付スケジュール（契約後）

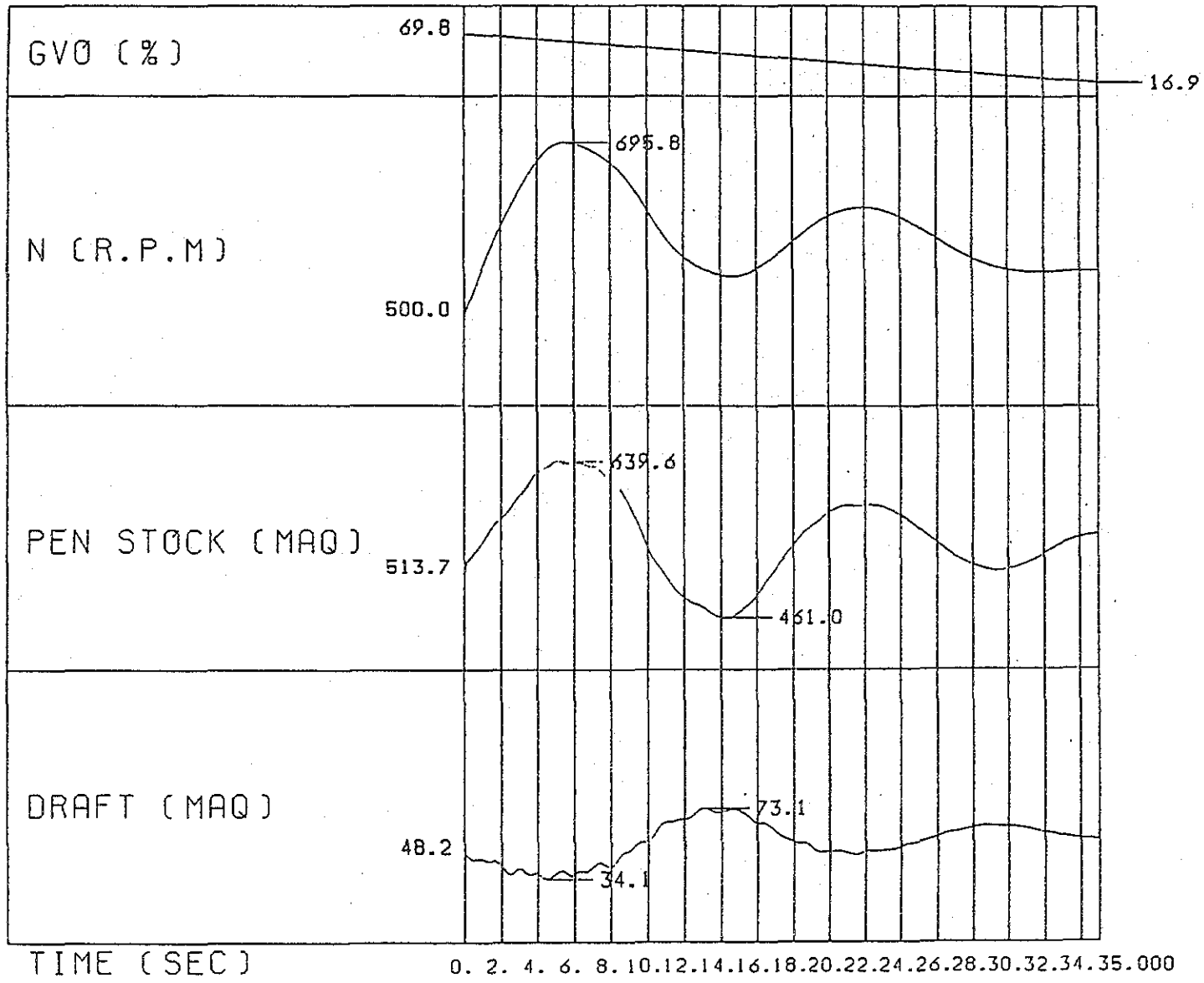




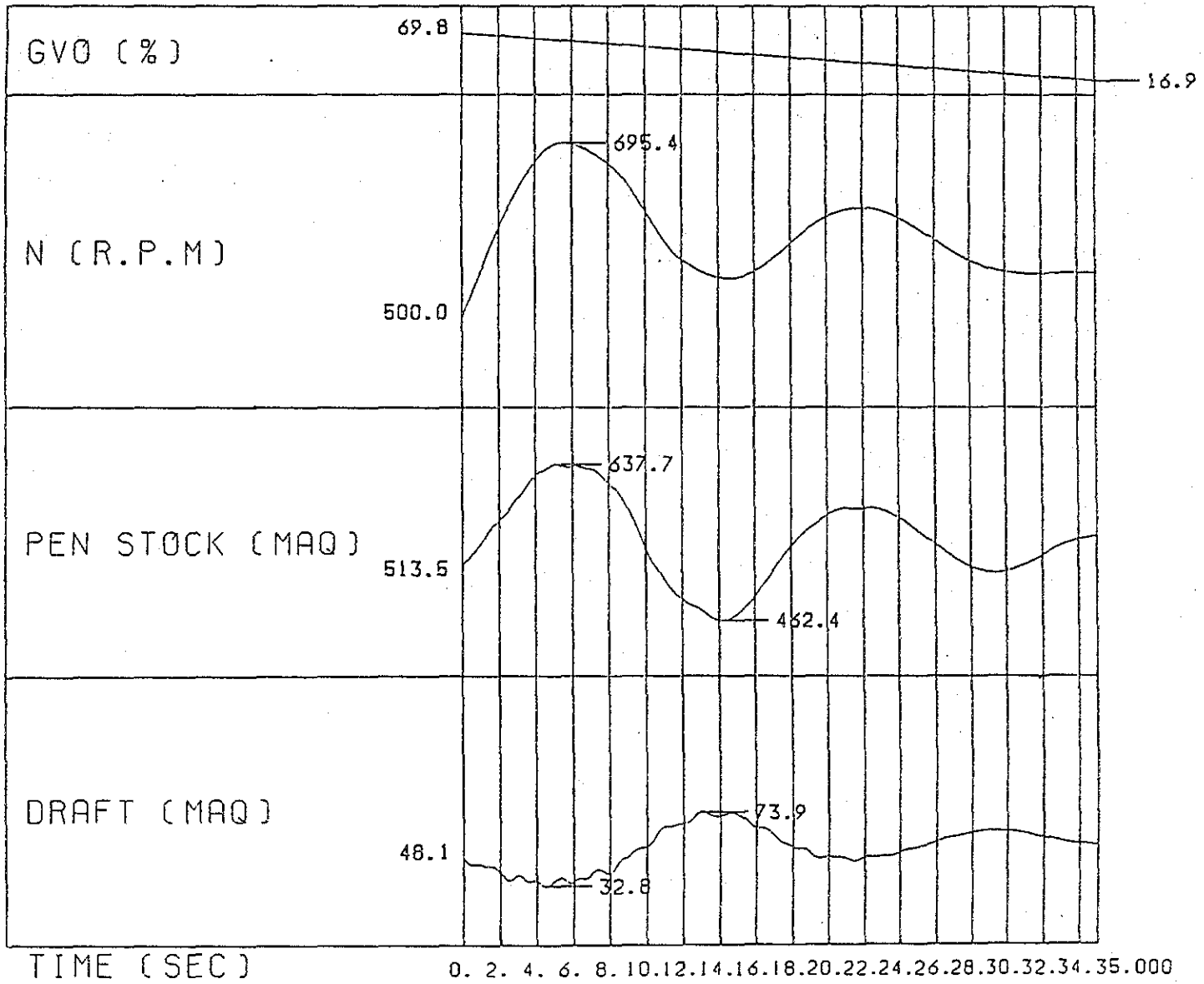
図－Ⅱ・4・3－1　負荷遮断　CASE 1（1号機）



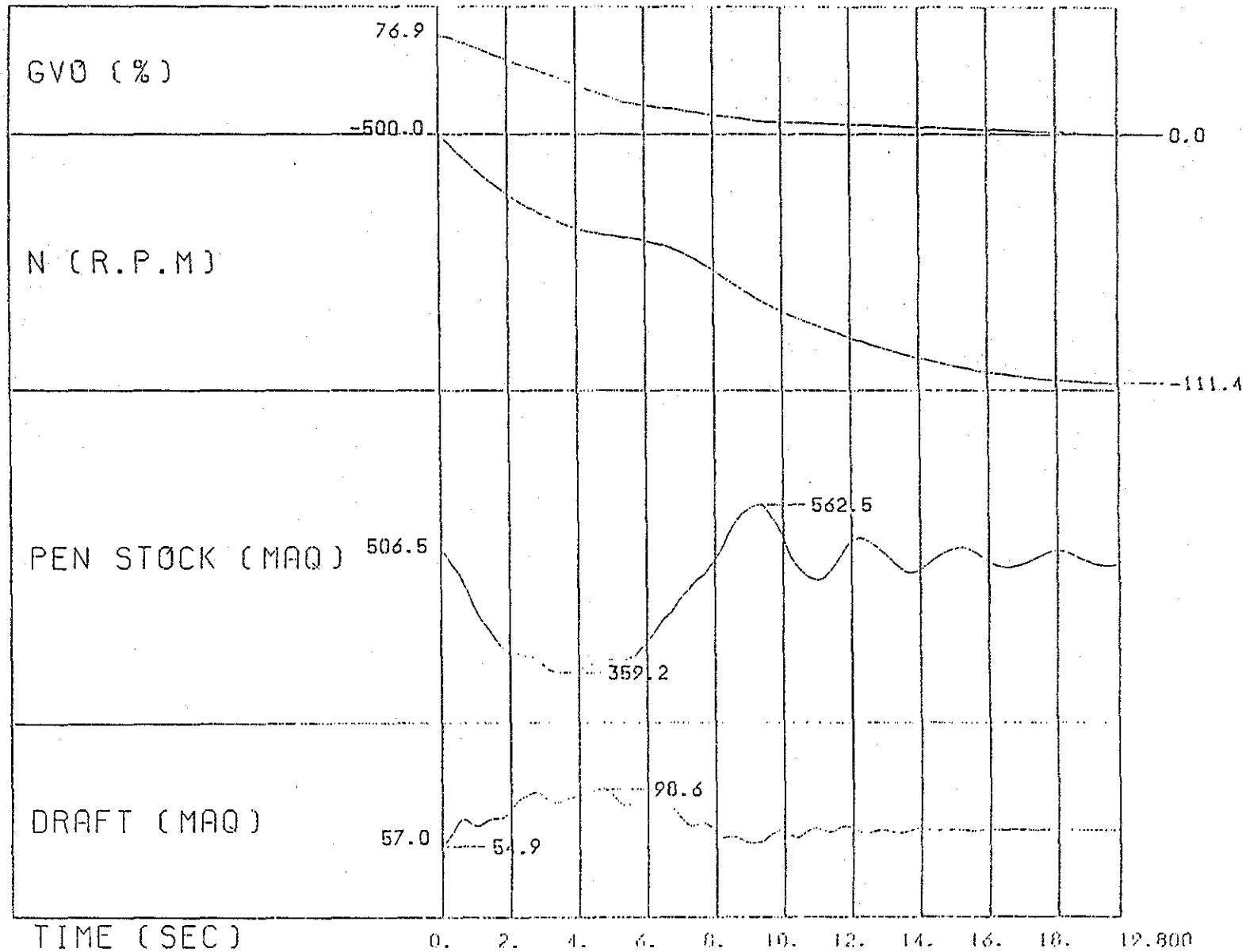
図－Ⅱ・4・3－2　負荷遮断　CASE 1（2号機）



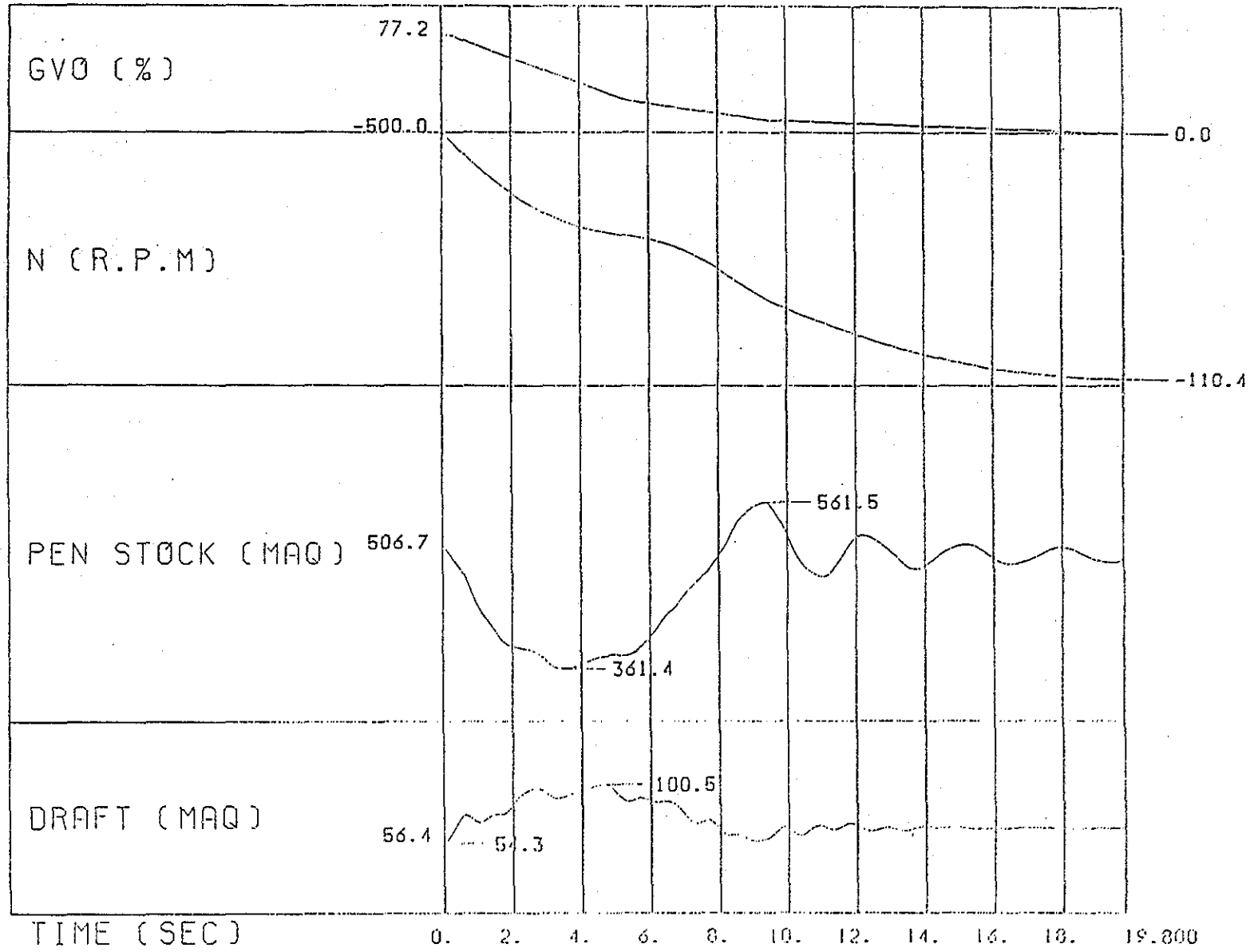
図－Ⅱ・4・3－3　負荷遮断　CASE 2（1号機）



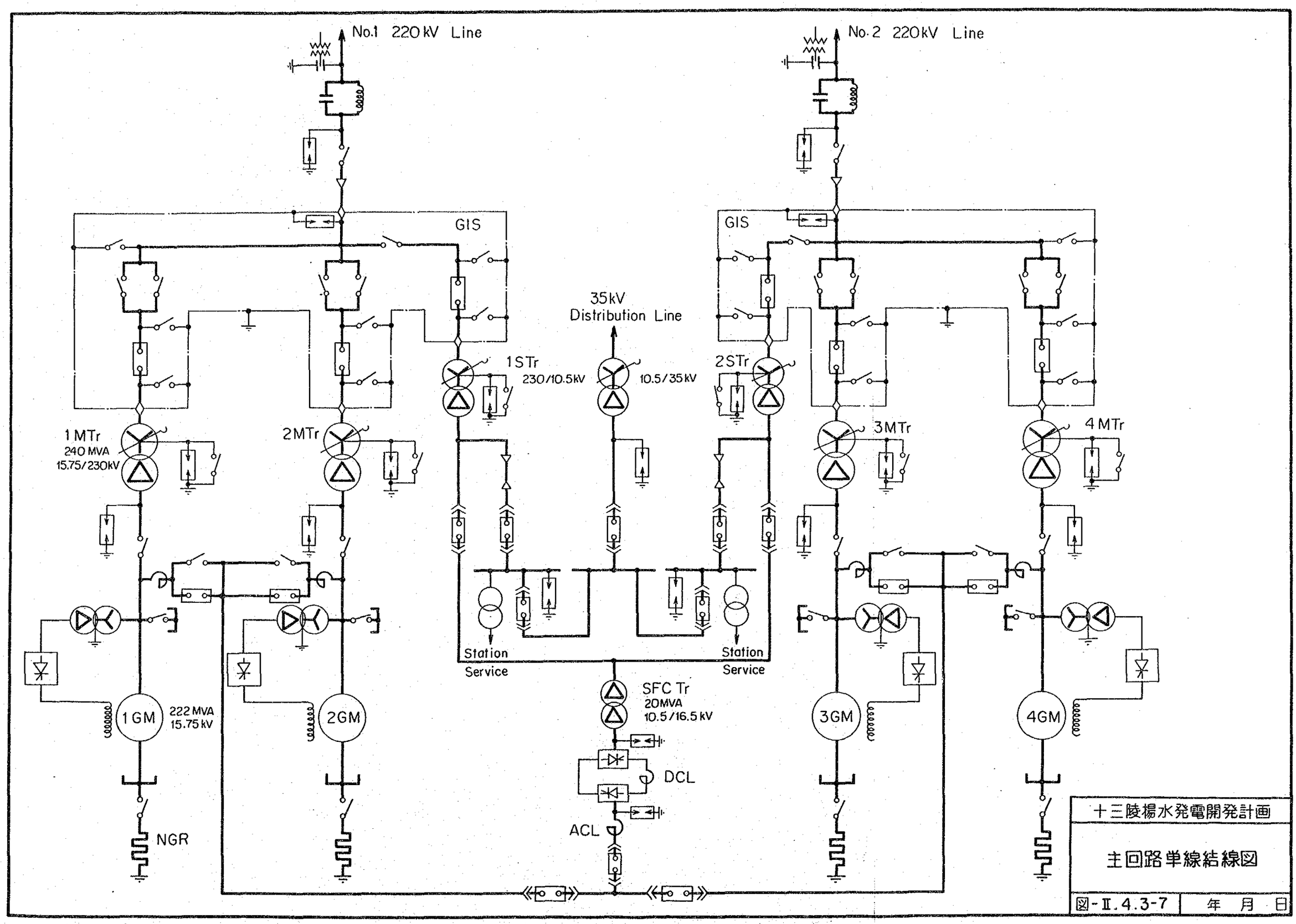
図－Ⅱ・4・3－4　負荷遮断　CASE 2（2号機）

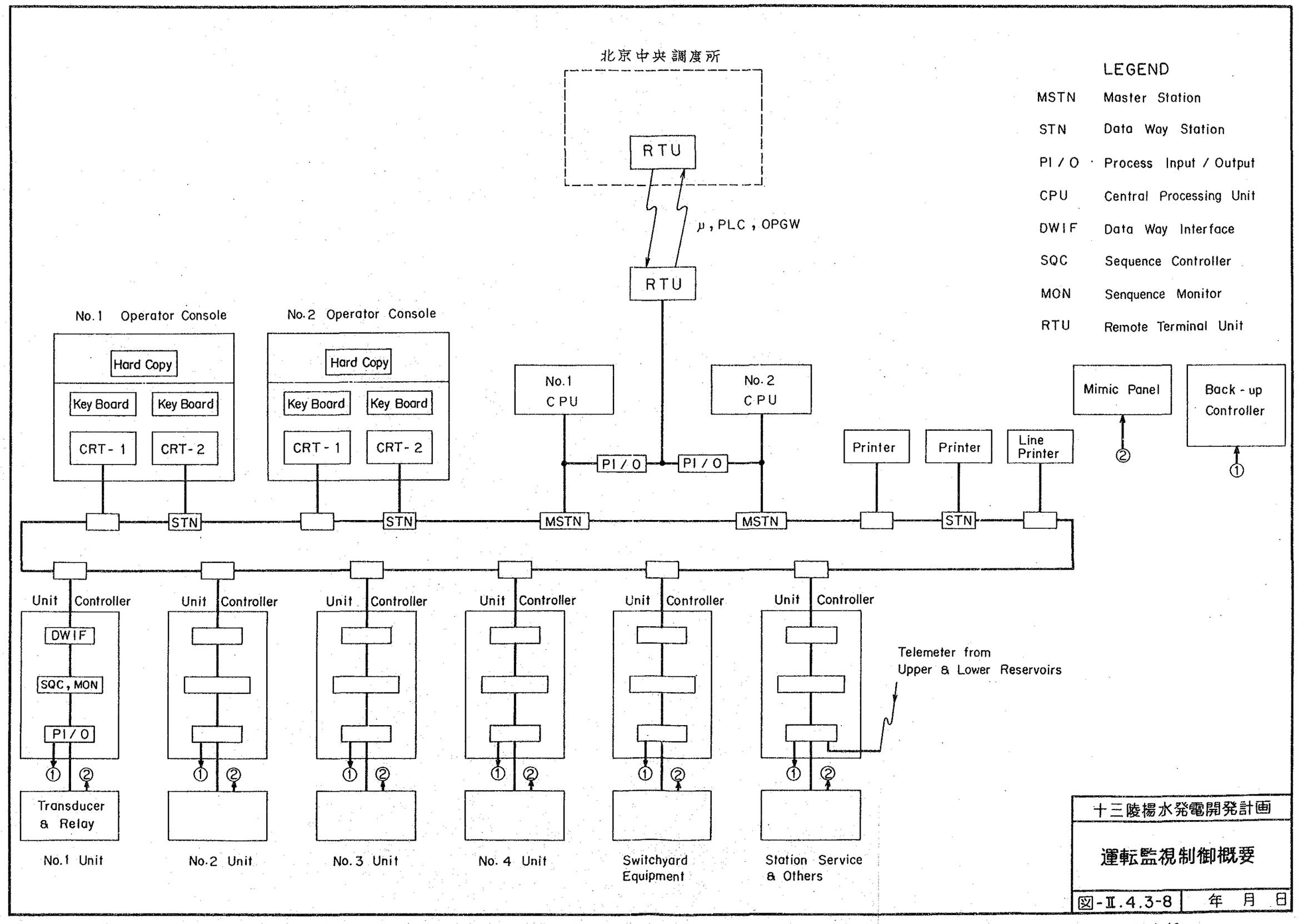


図－Ⅱ・4・3－5　入力遮断　（1号機）



図－Ⅱ・4・3－6　入力遮断　（2号機）


No.1 220kV Line
No.2 220kV Line
GIS
GIS
35kV
Distribution Line
1STr
230/10.5kV
10.5/35kV
2STr
1MTr
240 MVA
15.75/230kV
2MTr
3MTr
4MTr
Station
Service
Station
Service
SFC Tr
20MVA
10.5/16.5kV
1GM
222 MVA
15.75kV
2GM
3GM
4GM
DCL
ACL
NGR
十三陵揚水発電開発計画
主回路単線結線図
図-Ⅱ.4.3-7
年 月 日



十三陵揚水発電開発計画

運転監視制御概要

図-II.4.3-8 年 月 日

4.4 まとめ

本計画について中国側で考えられていた基本諸元、基本仕様に沿って技術的検討を行った結果、概ね計画に問題がないと考えられるが、以下の項目について検討を深めることを勧告する。

① 機器の購入に当り、国際入札を前提とした国際レベルでの規格等の適用を仕様する（例えば、キャビテーション保証、振動に対する保証、効率、運転仕様等）。

② 商業運転開始後の運転信頼度を高めるため、ポンプ水車の実落差・実揚程試験を実施する。

③ 負荷遮断時の水圧鉄管側最大水圧値について計算した結果、690mをもって計画する事が必要であると考えられるので、現計画値670mの再検討を行う。

④ 揚水時の系統の安定、過励磁の防止等のため、主変圧器には負荷時タップ切替装置を付属させる。

⑤ 吸出し高さが高いことを考慮し、主軸封水装置給水用の加圧ポンプを設置する。

⑥ 据付工程の円滑な進捗を考慮すると、天井走行クレーンとして「200ｔ（主巻）、30ｔ（補巻）、５ｔ（ホイスト）付」程度のものを２台設置することが好ましい。

なお、設置される機器が高落差大容量であり、未だ一般的機器となっていないことから、製作者の選択に当っては十分な経験と技術を有する者から選ぶこと、また据付に当たっては据付精度を確保するに充分な力量が要求されることを付言する。