

11.3 水路系および発電所

11.3.1 位置および概要

(1) 取水口の設計

取水口はダムより上流約 400 m の右岸側に建設する。環境上の配慮から常時満水位を極力下げられるように低水位を計画堆砂位に余裕高 1m を加えたものとしている。また、導水路は圧力式水路であることから空気の混入等がないようなかぶり水深を考慮して取水口の敷高を決める必要がある。現段階では、未だ堆砂がない状況であるが、将来の堆砂を見越した上で、低水位以上の水位で取水する必要があることから、取水口の構造は多段式ゲートのない表面取水設備の型式とし、水位が最低水位より高い場合に取水可能となるようにした。わが国における既設の表面取水設備においてはかぶり水深は水路敷より（水路径×2＋余裕高 1～2 m）程度となっている。また呑み口の構造等については、水理模型実験による検討がなされた事例が多いので、D/D の段階で、これらについては詳細な検討が必要である。

取水口の構造としては取水塔あるいは地山の斜面に乗った傾斜構造が考えられるが、取水塔とした場合、50 m 近い高さとなり、しかも、本地点では設計震度 0.15 としていることから屈強な構造とする必要があるため、傾斜構造とした。

傾斜構造は、最大使用水量取水時に 0.6 m/s 程度の流速で流水が通過できる半円筒形状とし、内径 12 m、コンクリート厚 1 m の構造物とした。呑口部にはスクリーンを設置する。また、導水路の排水あるいは緊急時における取水停止のための制水ゲート（ローラーゲート）はゲート立坑に設置する。

(2) 導水路トンネル

導水路トンネルは 1 条の圧力トンネルとして設計されており、全長 970 m の円形断面トンネルをセティ川の右岸に配置する。トンネル支保は、地質調査より推定された RMR および、同規模のトンネルの掘削事例から支保パターンを決定した。

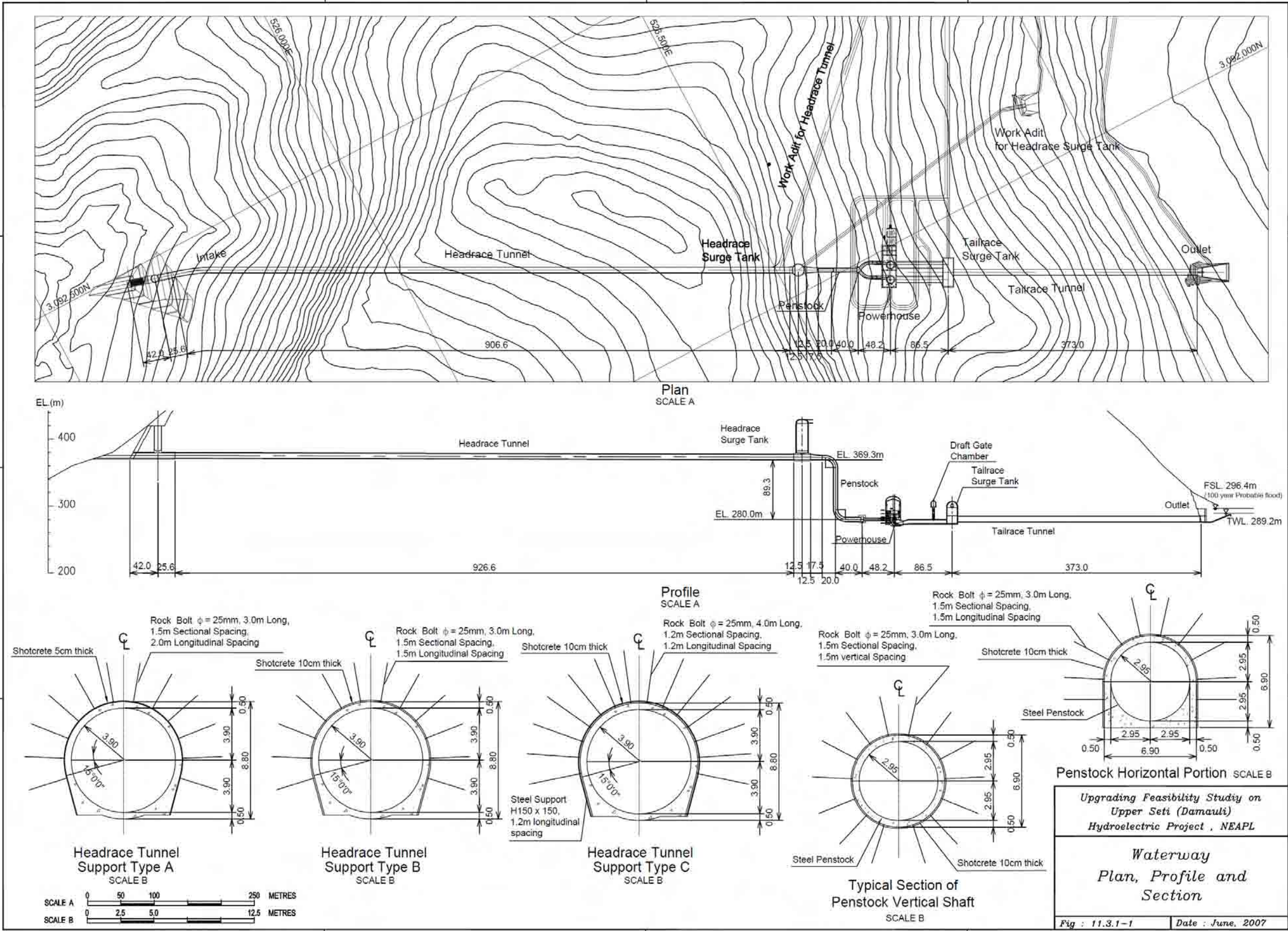
導水路トンネルの最適内径を決定するために 7.4 m から 8.2 m まで内径を変化させ経済比較を行った。最適内径は年間経費と損失電力費の和が最小となる内径として定めている。比較検討した結果、Table 11.3.1-1 に示す通り 7.8 m が経済的に最適な内径として選択された。

Table 11.3.1-1 Comparison of the Headrace Tunnel Diameter

Item	Unit	Alternative Diameter				
Tunnel Diameter	(m)	7.4	7.6	7.8	8.0	8.2
(1) Annual construction cost	10 ³ US\$	558.1	576.7	594.0	617.0	636.4
(2) Power revenue loss	10 ³ US\$	234.0	203.0	176.8	154.5	135.4
Total Annual Cost (1)+(2)	10 ³ US\$	792.1	779.7	770.8	771.5	771.8

作用する水圧は静水圧で 4.5MPa、サージング時に 5.4MPa 程度である。ライニングは内圧に抵抗するために鉄筋コンクリートライニングとした。圧力トンネルのライニング厚は、一般的に 30 cm から 70 cm の範囲にある。本計画では、過去の同規模の導水路トンネルを参照し、ライニング厚を 50 cm とした。

導水路トンネルの一般断面は、**Fig. 11.3.1-1**に示す通りである。



(3) 水圧鉄管路

水圧鉄管路は、長さ 195 m の埋設型である。水圧鉄管路は鉛直シャフト、水平部とも 1 条とし、発電所近くの上流部で 2 条に分岐する。鉄管を敷設するトンネル断面は円形とし、水平部については施工性を考慮しインバートを水平とした。

水圧鉄管路の最適内径は、導水路トンネルと同様に内径を 5.7 m から 6.1 m に変化させ、経済比較により定めた。その結果、Table 11.3.1-2 に示したように 5.9 m が経済的に最適な内径として選択された。

Table 11.3.1-2 Comparison of the Penstock Tunnel Diameter

Item	Unit	Alternative Diameter				
Tunnel Diameter	(m)	5.7	5.8	5.9	6.0	6.1
(1) Annual construction cost	10 ³ US\$	388.8	401.4	413.8	427.0	444.1
(2) Power revenue loss	10 ³ US\$	313.7	298.7	285.1	273.1	262.2
Total Annual Cost (1)+(2)	10 ³ US\$	702.5	700.1	699.0	700.1	706.3

鉄管外壁面とトンネル掘削面との空間は鉄管設置作業を考慮して 50 cm とした。この空間は鉄管設置後、コンクリートで埋め戻される。さらに、トンネル天端の裏込めグラウトと鉄管周囲のコンタクトグラウトが施される。

水圧鉄管路の一般断面は、Fig. 11.3.1-1 に示す通りである。

(4) 導水路調圧水槽

調圧水槽は一般的に最も経済的となる制水口型により設計した。サージング計算の結果による調圧水槽の主要諸元以下の通りである。

制水口径	: 3.7 m
水槽径	: 17.0 m
サージング最高上昇水位	: EL.423.3 m (FSL 時)
サージング最低下降水位	: EL.382.5 m (MOL 時)

調圧水槽天端への作業抗、導水路トンネル作業抗の合計が 1000m 程度になるために、代替案として導水路トンネル作業抗にライニングを施すことにより、調圧水槽として利用することが考えられる。トンネル勾配を 1:10 とした場合、水槽区間は 585 m 必要となり、トンネルライニングの費用がかさむことになる。比較検討の結果、Table 11.3.1-3 に示すように制水口型サージタンク案が安くなる。また、後者は鉄管設置後にライニング工事を行うために工期が長くなる。

Table 11.3.1-3 Comparison of the Surge Tank

Alternative	Restricted orifice type surge tank	Modification of Work Adit
Construction cost (US\$)	4,946,000	4,989,000

(5) 作業坑

導水路、水圧鉄管路工事のために導水路作業坑を建設する。導水路作業坑は発電所アクセストンネル 330 m 地点より分岐し、導水路調圧水槽上流に接続する。作業坑断面は鉄管搬入を考慮して、幅 7.0 m、高さ 7.0 m とした。作業坑の延長はアクセストンネルからの分岐点より 640 m である。

また、調圧水槽掘削工事のために水槽天端への作業坑を設ける。トンネル断面は建設機械の走行を考慮して幅 4.4 m、高さ 4.5 m とした。坑口は EL.420m に設けられ、作業坑延長は 440m となる。この作業坑は建設完了後、調圧水槽空気坑として用いられる。

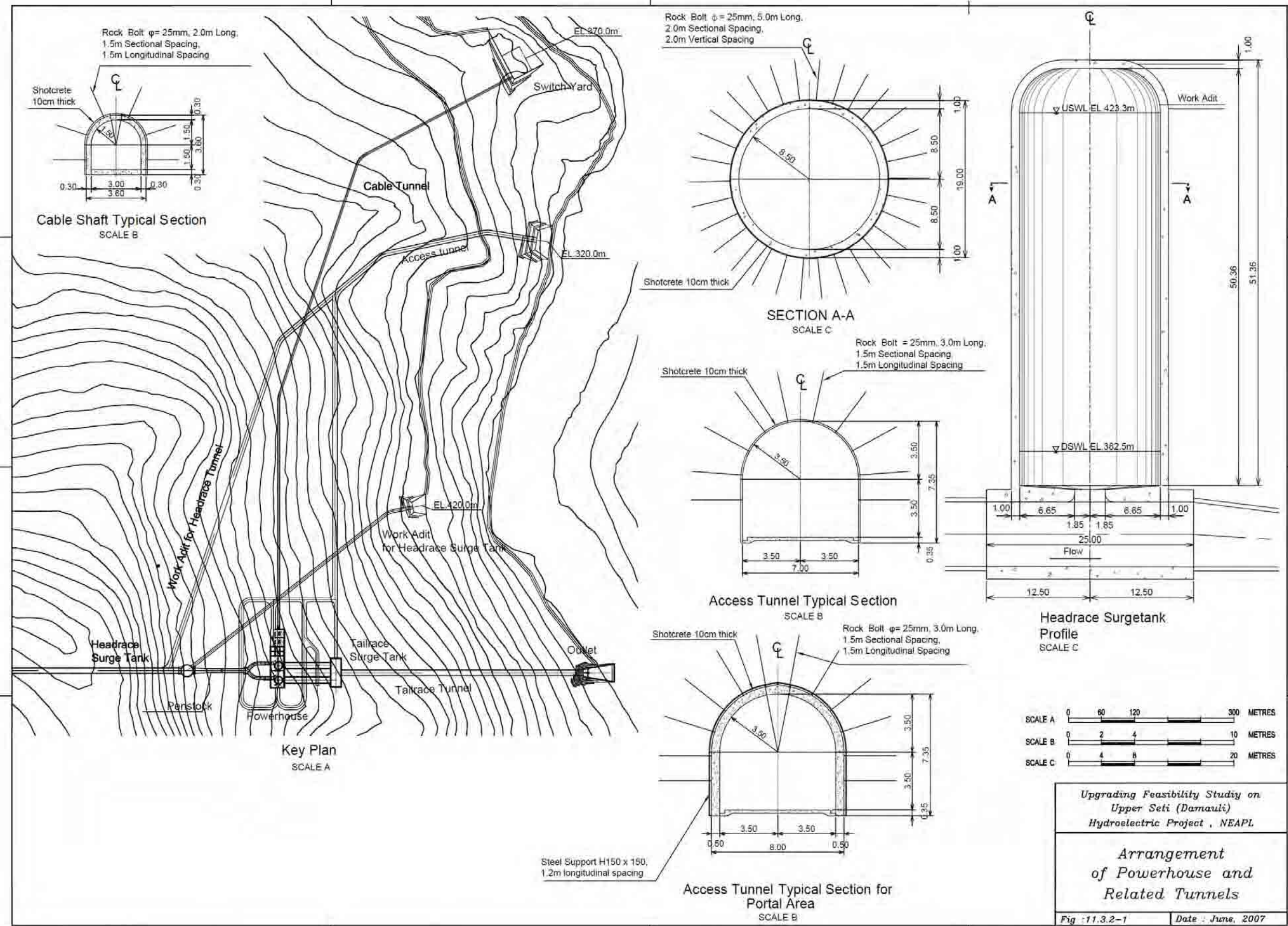
11.3.2 発電所

(1) 発電所レイアウト

前章で述べた代替案の比較検討の結果、Option IIIb 地下発電所案が技術面、経済面からみて最も有利であることが明らかとなった。地下発電所は大規模な空洞掘削が必要となることから、掘削時の地山の安定を確保するために、地質的に良好なドロマイト層に配置するように計画した。

水車中心標高は十分な吸出し高を確保できるように、EL.280.0 m とした。また、空洞の大きさは 2 基の発電機および変圧器の配置を考慮して幅 22 m、高さ 42 m、長さ 90 m とした。地下発空洞断面は施工の容易さから弾頭型とし、FEM 解析により空洞の安定性について確認を行った。

工事用道路から地下発電所に向かうアクセストンネルは坑口を EL.320 に設け、組立て室の高さで発電所に繋がる。発電された電力はケーブルトンネルを通じて、EL.370 に設けた開閉所ヤードへと送られる。地下発電所、アクセストンネル、ケーブルトンネルおよび開閉所ヤードのレイアウトは Fig. 11.3.2-1 に示す通りである。



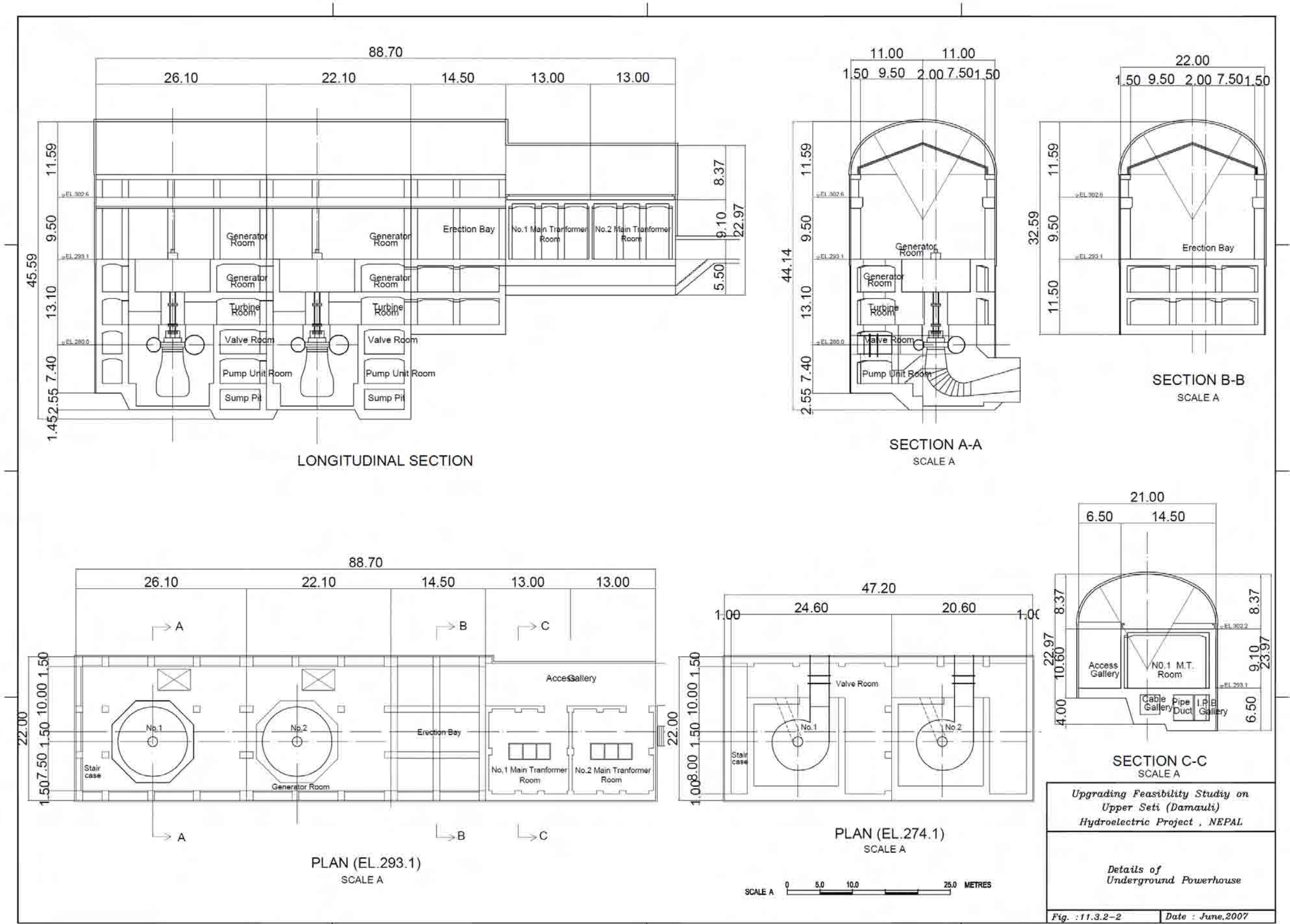
(2) 地下発電所

地下発電所は、大きく発電機室棟、組立て室棟、主変圧器室棟の3つの区間に分けられる。地下発電所空洞の規模は、発電機、水車、発電機基礎、主変圧器、付属機器および作業に必要な空間を考慮して下記のように決めた。

- 1) 発電機中心間隔は、水車ケーシング、ケーシング周り1次コンクリートおよび2次コンクリートの寸法から22.1mとした。
- 2) 組立て室寸法は、固定子と回転子の組立て作業を同時に行うものとし、天井走行クレーン操作範囲外も含めて幅19.0m、長さ14.5mとした。
- 3) 主変圧器室の寸法は、主変圧器の寸法、検査通路の幅、仕切り壁の厚さ等を考慮して定めた。幅12.0m、長さ11.5mの二つの主変圧器室が縦断方向に平行に配置されている。

球分岐で枝分かれした2条の水圧鉄管路は、水車中心の高さで発電所内に引き込まれ、入り口弁を介して水車ケーシングと接続される。

発電機室と主変圧器室および組立て室は、EL. 293.1 mに設けられる。組立て室は機器の搬入、搬出が容易なように発電機室と主変圧器室の間に配置した。発電所内の各部屋の配置をFig. 11.3.2-2に示す。



(3) 地下発電所空洞安定解析

地下発電所空洞の安定化のために下記の支保システムを考えた。

- ショットクリート：掘削面をショットクリートで覆うことにより保護し、発破による岩盤の部分的な緩みの発達を防ぐ
- ロックボルト：岩盤をロックボルトで縫い付け固定することにより、部分的な緩みの発達を防ぐ
- PS アンカー：PS アンカーに加えられる張力により岩盤に拘束力を与え緩み領域の発達を防ぐ

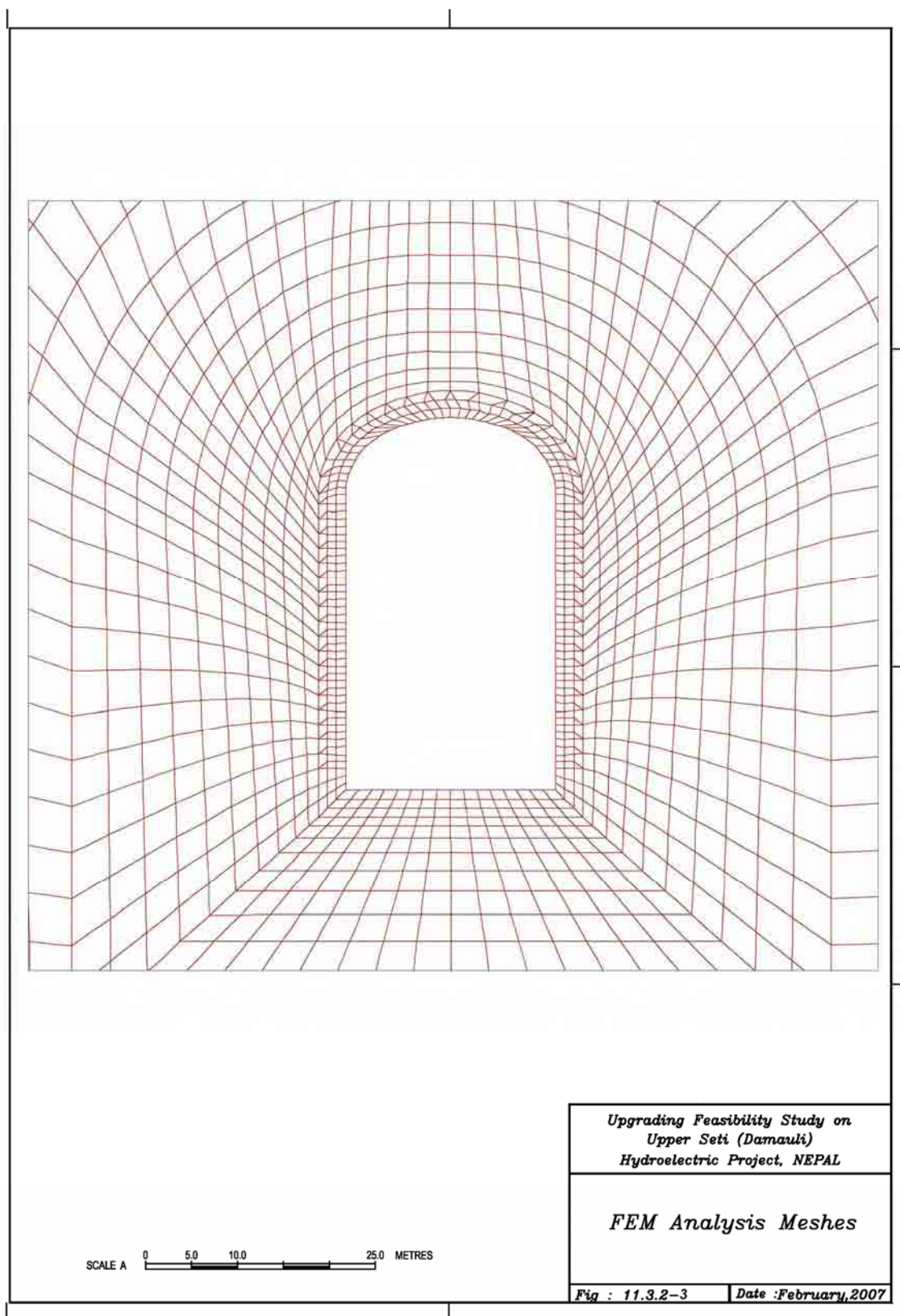
地下発電所空洞安定解析は、弾頭型断面を対象とし、掘削段階を考慮して 2 次元有限要素法（FEM）により実施した。更に、FEM 解析の結果を用い、空洞側壁に広がる緩み領域を安定させるために必要な PS アンカーの配置について検討した。

解析実施時点では、地下発電所周辺の地質条件は地質踏査の結果より想定した。FEM 解析に用いたメッシュモデルを Fig. 11.3.2-3 に示す。

また、解析に用いる設計値を Table 11.3.2-3 に纏める。

Table 11.3.2-1 Design Values

Item	Dolomite	Phyllite / Slate	Disturbed Zone I	Disturbed Zone II
Modulus of Elasticity (MPa)	6,000	4,300	2,400	4,200
Poisson's Ratio	0.25	0.25	0.30	0.25
Shear strength (MPa)	3.0	2.2	3.0	3.0
Internal friction angle (deg)	47.5	43.0	47.5	47.5
Unit weight (kN/m ³)	27.2	27.1	27.2	27.2



発電所周辺の初期応力はかぶりの大きさから下式により求めた。

$$\sigma_y = \gamma \cdot H$$

$$\sigma_x = \nu / (1 - \nu) \cdot \sigma_y$$

$$\tau_{xy} = 0$$

σ_x : 水平応力 (MPa)

σ_y : 鉛直応力 (MPa)

τ_{xy} : せん断応力 (MPa)

ν : 岩のポアソン比

γ : 岩の単位体積重量 (kN/m³)

岩盤は掘削中の発破により劣化する。解析において変形係数等の岩盤の設計定数に関し、発破の影響を考慮している。発破の影響の度合いは掘削面からの距離により異なる。従って発破による影響は、経験的に掘削面から深さ 1.0 m までの範囲 (Zone-I) と深さ 1.0 m から 3.0 m の範囲 (Zone-II) に分類した。Zone-I および II の岩盤の設計定数を **Table 11.3.2-1** に示す。

FEM 解析により得られた応力分布を **Fig. 11.3.2-4** に示す。最せん断応力によって生じる緩み領域については次式により求められる局所安全率が 1.2 以下の範囲と定義した。

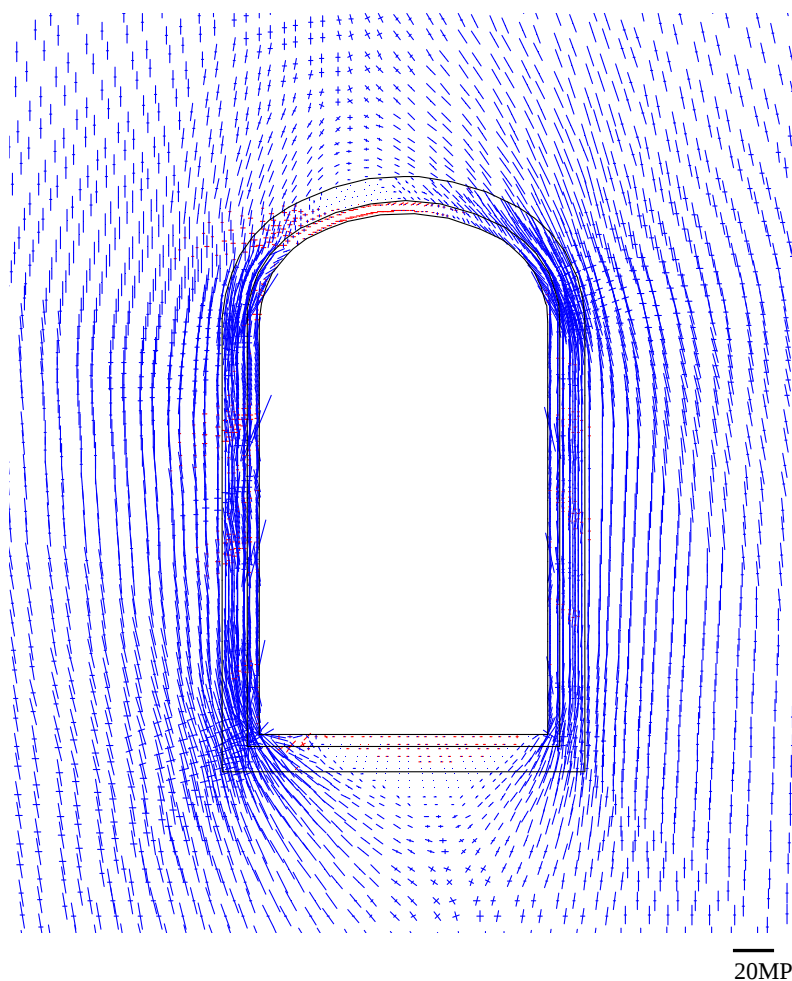


Fig. 11.3.2-4 Stress Distribution

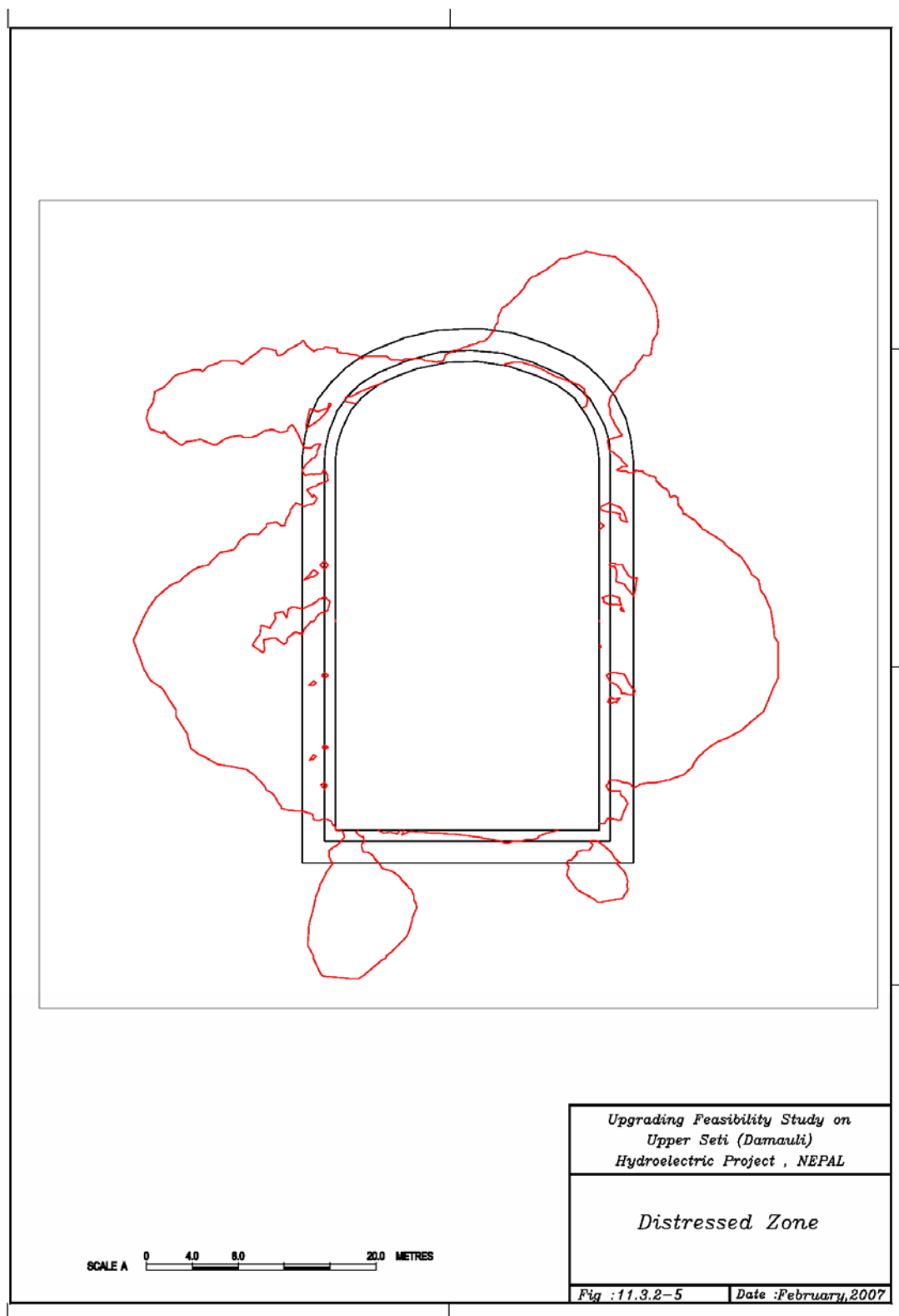
$$S.F. = (r + d_{\min}) / r$$

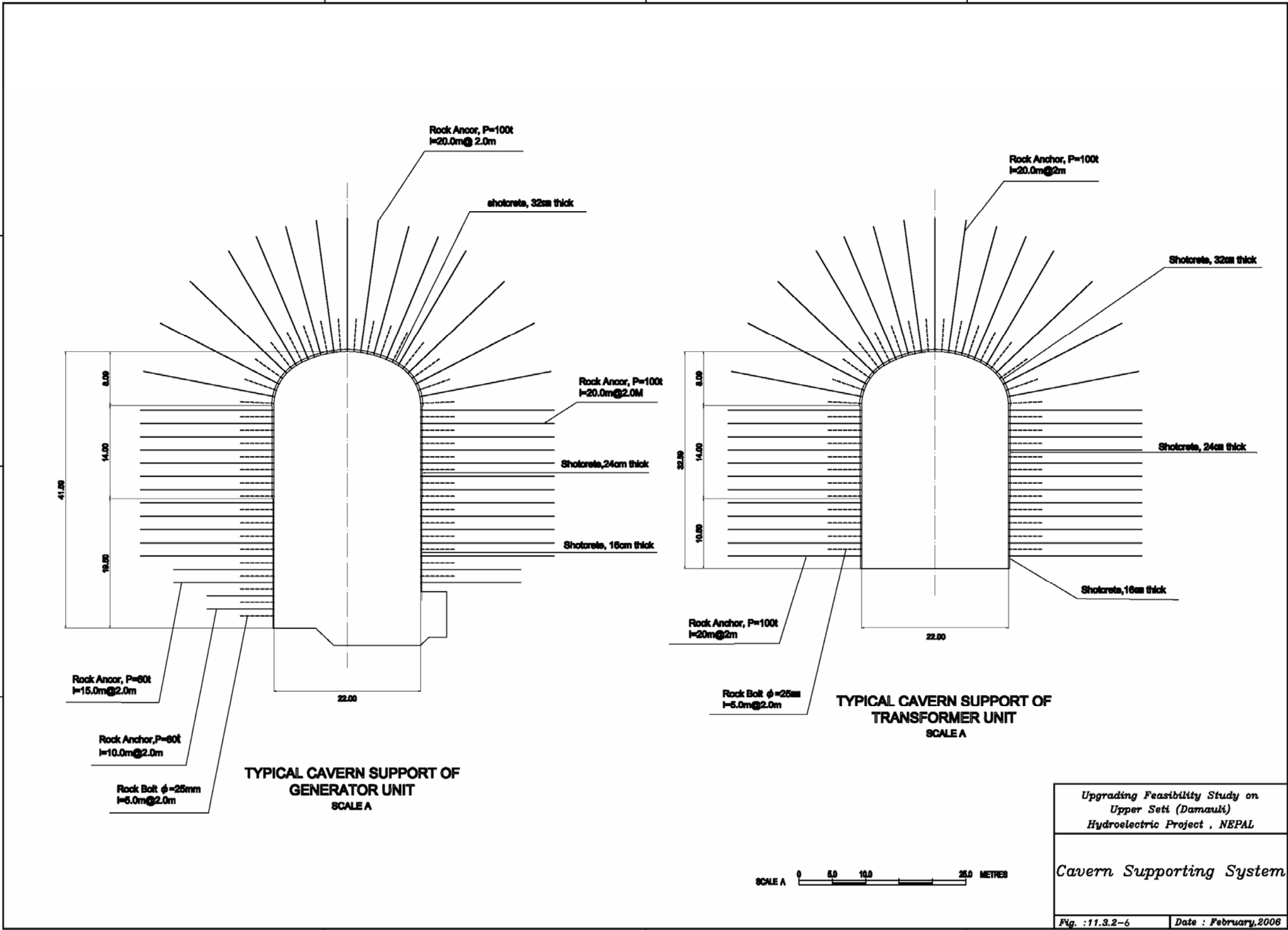
“r”はモール応力円の半径、“d_{min}”は破壊包絡線とモール応力円との最小距離を意味する。解析の結果、**Fig. 11.3.2-5**に示されたように緩み領域は最大で掘削面より 17.5mの範囲まで広がった。

この緩みに対し、PS アンカーは空洞の崩壊および掘削面の滑りを防ぐために必要不可欠な支保工である。PS アンカーを適切に配置することにより、岩盤内に拘束力を導入し緩み領域の拡大を防ぐことが可能となる。

FEM の解析結果に基づいて PS アンカーの設計計算を行った。その結果、EL.283.0 m より上部の側壁には長さ 20 m、設計緊張力 100 t の PS アンカーを横断および長手方向に 2.0 m 間隔、アーチ部にも同様に長さ 20 m、設計緊張力 100 t の PS アンカーを横断および長手方向 2.0 m 間隔で配置する。側壁下部については長さ 15 m、設計緊張力 60 t および長さ 10 m、設計緊張力の 60 t の PS アンカーを横断および長手方向に 2.0 m 間隔で配置する。さらに PS アンカーの間には長さ 5 m のロックボルトを配置する。ショットクリートの厚さは類似案件を参照して最大で 32 cm とした。

地下発電所空洞用の支保工の詳細は、**Fig. 11.3.2-6**に示す通りである。





(4) アクセストンネル

アクセストンネルは発電機器、主変圧器、水圧鉄管の一部、建設材料の搬入および掘削ずりの搬出のために設けられる。建設終了後は発電所の操作および維持管理のための地下発電所への通路となる。また、アクセストンネル地下発電所への給気口の役割を果たす。坑口の高さは EL.320 m とし、EL.293.1 m で発電所組立て室に取り付く。トンネル全長は 940 m で平均勾配は 8%以下となり、大型車両の通行に支障はない。断面については幌形とし、発電機器の搬入および建設機械の通行を考慮して幅 7.0 m、高さ 7.0 m とした。

アクセストンネルに対し、厚さ 50 cm のコンクリートライニングと 10 cm のショットクリートライニングの 2 種類を適用する。コンクリートライニングは坑口部に敷設される。トンネルインバートには車両通行を容易にするために 20 cm のコンクリート舗装を施すものとした。

アクセストンネルの詳細は、**Fig. 11.3.2-1**に示す通りである。

(5) 開閉所ヤード

開閉所ヤードは EL. 370 m に設ける。急峻な地形に設けられることから、掘削量を抑えるために GIS（ガス絶縁開閉器）を採用している。また、ヤードには制御棟があわせて建設される。電気設備の条件より、これら施設に対し下記のエリアが必要とされる。

GIS および送電線鉄塔 : 22 m × 10.5 m

制御棟 : 16 m × 10.5 m

発電所一開閉所を結ぶケーブルを設置するためにケーブルトンネルが建設される。トンネル断面はケーブル設置と、検査通路のエリアを考慮し幅 3 m、高さ 3 m とした。

トンネル延長は斜坑部分 155 m、水平部分 860 m であり、全線にわたりコンクリートライニング施す。また、ケーブルトンネルは地下発電所の排気口として機能する。

(6) 排水工

発電所構造物に作用する水圧を緩和するために、発電所周りの地下水を排水する必要がある。よって発電所側壁およびアーチ部に排水孔を設けるものとした。排水孔は PS アンカーとロックボルトの中間に設けられる。さらにアクセストンネル建設中にかなりの漏水が確認される場合には、発電所周りの作業坑より長尺の排水孔が必要となる。

11.3.3 放水路・放水口

(1) 放水路水槽

発電に用いられた水は、圧力トンネルを通じてセティ川に放流される。負荷遮断時に放水路トンネル内の負圧発生を防ぐために、放水路水槽が放水路トンネルとドラフトトンネルの間に設けられる。水理計算の結果、上記の機能を果たすために幅 15 m、高さ 32.5 m、長さ 40 m の空洞が必要となる。

また水槽の上流にはドラフトチューブゲートを操作するためのゲート室が設けられる。ゲート室空洞の大きさはゲートの操作性を考慮して幅 6.5 m、高さ 8.5 m、長さ 30 mとした。

(2) 放水路

トンネル全長は 365mで円形断面とした。損失水頭を少なくするために全線に渡りコンクリートライニングを施す。

放水路トンネルの最適内径は、内径を 7.8 mから 8.6 mに変化させ、年間経費と損失水頭による損失電力費の和が最小となる内径として定めた。比較検討した結果、Table 11.3.3-1に示すように放水路トンネルの最適内径は 8.2 mとなった。

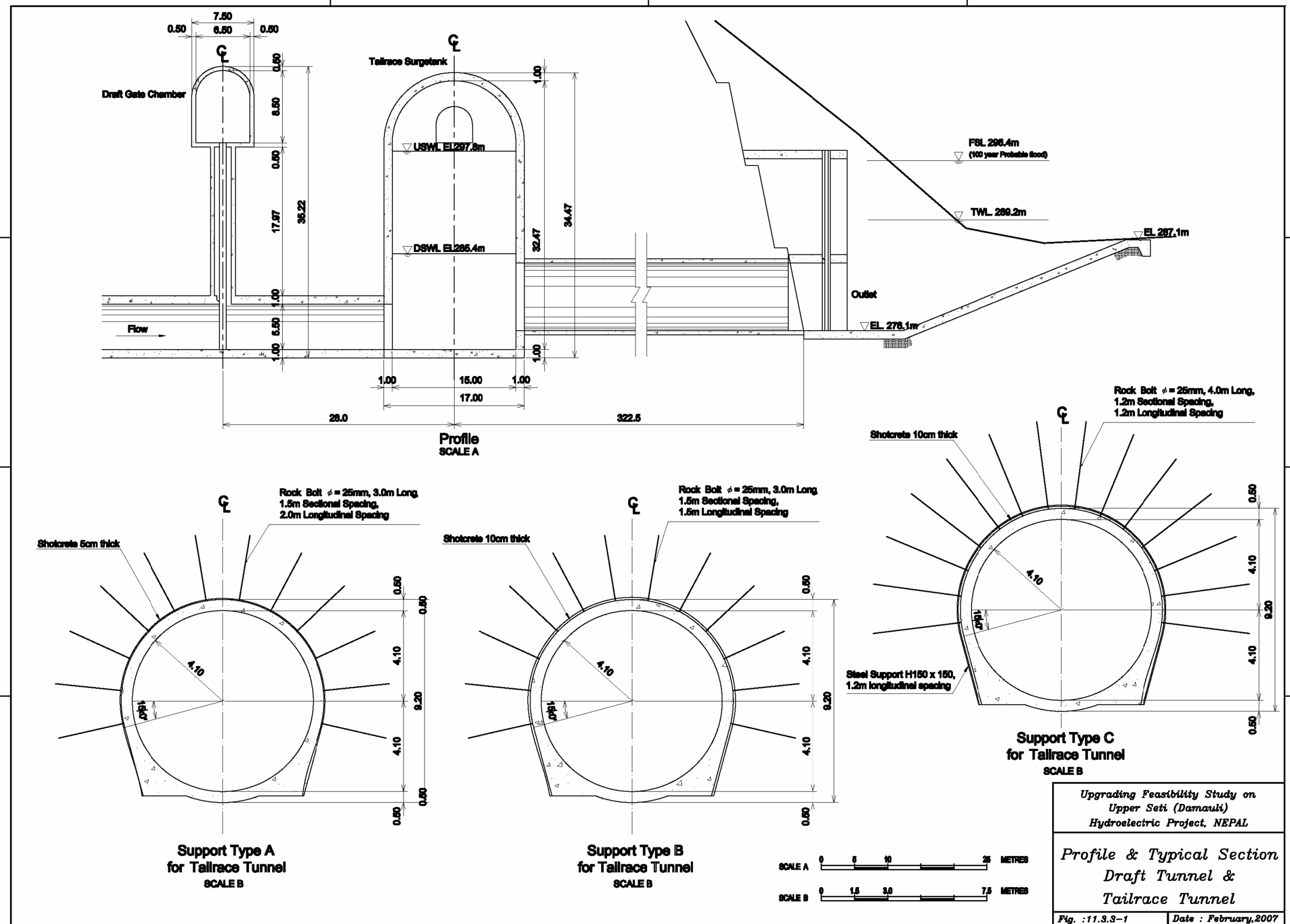
Table 11.3.3-1 Comparison of Tailrace Tunnel Diameter

Item	Unit	Alternative Diameter				
Tunnel Diameter	(m)	7.8	8.0	8.2	8.4	8.6
(1) Annual construction cost	10 ³ US\$	178.0	185.1	190.8	196.3	203.5
(2) Power revenue loss	10 ³ US\$	56.2	49.1	43.1	37.9	33.4
Total Annual Cost (1)+(2)	10 ³ US\$	234.2	234.2	233.9	234.2	236.9

トンネル区間は厚さ 50 cmのコンクリートライニングとした。放水路トンネルの一般断面はFig. 11.3.3-1に示す通りである。

(3) 放水口

放水口は Seti 川と Madi 川の合流点から 3 km 下流に位置する。機電設備の条件から最大使用水量時に放水口水位 289.2 m を確保するために水路出口幅を 25 m とした。また、放水口への土砂流入を防ぐために水路線形を河川に平行にする。



11.3.4 水路鋼構造物（水門・鉄管）

(1) 水圧鉄管

単機出力 65.4 MWの水車 2 台に最大流量 $127.4 \text{ m}^3/\text{sec}$ を導水するため、水圧鉄管 1 条および分岐管を設置する。始点管径は、5.9 m、分岐後は 4.0 mで、総延長は 195 mの水圧鉄管路である。水圧鉄管の線形は、垂直部、底部水平部、分岐部を経て水車へ接続される。水圧鉄管は、発電所内の水車入口弁上流の短管と溶接で接合される。

(2) 放水口ゲートおよびモノレールホイスト

本設備は、発電所ドラフトトンネルに設置され、2 基の水車の保守・点検、修理時に使用する。水車の維持管理は、交互に行うものとしゲートは 1 門のみ設置することとする。ゲートの開閉装置は、電動のモノレールホイストを採用する。