

東京電力(株) 正員 米田 治  
神田 忠孝  
清水建設(株) 武田 賢治

### 1.はじめに

都心部におけるトンネル工事は従来シールド工法を中心とする施工がなされてきたが、東京電力は今回東京都世田谷区内において延長770mの地中送電線路用トンネルをNATMによって実施した。本工事は住宅密集地域の道路下での施工であることから、周辺環境へ与える影響の抑制に十分注意を払うと共に、図-1に示すような掘削断面積約8.3m<sup>2</sup>の小断面トンネルであることから効率的な施工の推進と安全性の確保に万全を期した。施工に当たっては、安全性・施工性の確保と実績データの蓄積等を目的として各種の計測を実施した。

本報告は、こうち仮1号人孔から世田谷変電所まで約520mの区間で切羽の安定管理及び内空変位量把握のために実施した現場計測・針貫入試験の結果と、多段階設計による掘削に伴う地山変位挙動の計測結果について述べるものである。

### 2.地形、地質

地質断面図を図-2に示す。施工区間は台地部であり、地層構成は上から立川・武蔵野ローム層、下末吉ローム層、東京層(砂層)、上総層群(固結シルト層)の順となる。トンネルの通過ルートとなる固結シルト層の物性値を表-1に、また固結シルト層より上部の各層の物性値を表-2に示す。固結シルト層は所々に介在砂層が分布しているものの全体でかたくかつ均質である。

なお、事前に行なったトンネルの安定解析結果によると、地山は弾性挙動を示し、トンネル内空変位量は2~3mm、地表面沈下量は0.5mm程度である。

### 3.計測結果と考察

施工管理計測は内空変位計測、地表面沈下計測等があるが、ここでは各種計測データのうち特徴的な2・3のデータについて検討を加える。

#### (1)針貫入試験結果について

まず計測Aを行なった内空変位計測と針貫入試験結果の関係について見る。土質試験に用いる静的貫入試験器(コンペネトロメータ)を軟岩用に改良した針貫入試験器(軟岩用ポケットペネトロメータ、S45AN-R)を用いて切羽における地山の一軸圧縮強度を測定した。また同一断面でブロックサンプリングした試料の一軸圧縮試験を行なった。図-3に針貫入試験から換算した一軸圧縮強度と一軸圧縮試験による一軸圧縮強度の関係を示すが、比較的相関は高く、針貫入試験で地山の一軸圧縮強度を定量的に把握すること

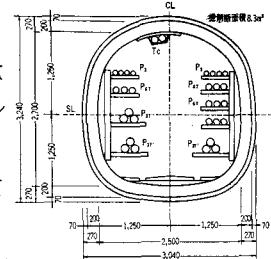


図-1 トンネル断面形状

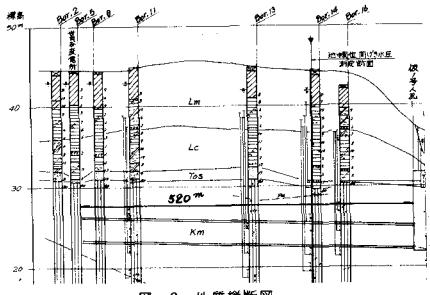


図-2 地質縦断図

表-1 第三紀層(固結シルト層)

用		1号人孔部地盤変位量	
N	塑	載 (kg/cm <sup>2</sup> )	500以上
地	持	压 (kg/cm <sup>2</sup> )	1,600以上~2,400
持	破	压 (kg/cm <sup>2</sup> )	40,312.9~51.0
持	持	持 (kg/cm <sup>2</sup> )	(2.2×10 <sup>-3</sup> )~(9.7×10 <sup>-3</sup> )
持	持	持 (kg/cm <sup>2</sup> )	20~30
持	持	持 (kg/cm <sup>2</sup> )	1.600~1.600
R	Q	D (cm)	(819)~(100)
持	持	持 (kg/cm <sup>2</sup> )	(2.40×10 <sup>-3</sup> )~(3.71)
持	持	持 (%)	(1) 6~15
持	持	持 (%)	(2) 64~76
持	持	持 (%)	(3) 19~35
持	持	持 (%)	(4) 39~56
持	持	持 (%)	(5) 10~35
持	持	持 (%)	(6) 10~35
持	持	持 (%)	(7) 10~35
持	持	持 (%)	(8) 10~35
持	持	持 (%)	(9) 10~35
持	持	持 (%)	(10) 10~35
持	持	持 (%)	(11) 10~35
持	持	持 (%)	(12) 10~35
持	持	持 (%)	(13) 10~35
持	持	持 (%)	(14) 10~35
持	持	持 (%)	(15) 10~35
持	持	持 (%)	(16) 10~35
持	持	持 (%)	(17) 10~35
持	持	持 (%)	(18) 10~35
持	持	持 (%)	(19) 10~35
持	持	持 (%)	(20) 10~35
持	持	持 (%)	(21) 10~35
持	持	持 (%)	(22) 10~35
持	持	持 (%)	(23) 10~35
持	持	持 (%)	(24) 10~35
持	持	持 (%)	(25) 10~35
持	持	持 (%)	(26) 10~35
持	持	持 (%)	(27) 10~35
持	持	持 (%)	(28) 10~35
持	持	持 (%)	(29) 10~35
持	持	持 (%)	(30) 10~35
持	持	持 (%)	(31) 10~35
持	持	持 (%)	(32) 10~35
持	持	持 (%)	(33) 10~35
持	持	持 (%)	(34) 10~35
持	持	持 (%)	(35) 10~35
持	持	持 (%)	(36) 10~35
持	持	持 (%)	(37) 10~35
持	持	持 (%)	(38) 10~35
持	持	持 (%)	(39) 10~35
持	持	持 (%)	(40) 10~35
持	持	持 (%)	(41) 10~35
持	持	持 (%)	(42) 10~35
持	持	持 (%)	(43) 10~35
持	持	持 (%)	(44) 10~35
持	持	持 (%)	(45) 10~35
持	持	持 (%)	(46) 10~35
持	持	持 (%)	(47) 10~35
持	持	持 (%)	(48) 10~35
持	持	持 (%)	(49) 10~35
持	持	持 (%)	(50) 10~35
持	持	持 (%)	(51) 10~35
持	持	持 (%)	(52) 10~35
持	持	持 (%)	(53) 10~35
持	持	持 (%)	(54) 10~35
持	持	持 (%)	(55) 10~35
持	持	持 (%)	(56) 10~35
持	持	持 (%)	(57) 10~35
持	持	持 (%)	(58) 10~35
持	持	持 (%)	(59) 10~35
持	持	持 (%)	(60) 10~35
持	持	持 (%)	(61) 10~35
持	持	持 (%)	(62) 10~35
持	持	持 (%)	(63) 10~35
持	持	持 (%)	(64) 10~35
持	持	持 (%)	(65) 10~35
持	持	持 (%)	(66) 10~35
持	持	持 (%)	(67) 10~35
持	持	持 (%)	(68) 10~35
持	持	持 (%)	(69) 10~35
持	持	持 (%)	(70) 10~35
持	持	持 (%)	(71) 10~35
持	持	持 (%)	(72) 10~35
持	持	持 (%)	(73) 10~35
持	持	持 (%)	(74) 10~35
持	持	持 (%)	(75) 10~35
持	持	持 (%)	(76) 10~35
持	持	持 (%)	(77) 10~35
持	持	持 (%)	(78) 10~35
持	持	持 (%)	(79) 10~35
持	持	持 (%)	(80) 10~35
持	持	持 (%)	(81) 10~35
持	持	持 (%)	(82) 10~35
持	持	持 (%)	(83) 10~35
持	持	持 (%)	(84) 10~35
持	持	持 (%)	(85) 10~35
持	持	持 (%)	(86) 10~35
持	持	持 (%)	(87) 10~35
持	持	持 (%)	(88) 10~35
持	持	持 (%)	(89) 10~35
持	持	持 (%)	(90) 10~35
持	持	持 (%)	(91) 10~35
持	持	持 (%)	(92) 10~35
持	持	持 (%)	(93) 10~35
持	持	持 (%)	(94) 10~35
持	持	持 (%)	(95) 10~35
持	持	持 (%)	(96) 10~35
持	持	持 (%)	(97) 10~35
持	持	持 (%)	(98) 10~35
持	持	持 (%)	(99) 10~35
持	持	持 (%)	(100) 10~35
持	持	持 (%)	(101) 10~35
持	持	持 (%)	(102) 10~35
持	持	持 (%)	(103) 10~35
持	持	持 (%)	(104) 10~35
持	持	持 (%)	(105) 10~35
持	持	持 (%)	(106) 10~35
持	持	持 (%)	(107) 10~35
持	持	持 (%)	(108) 10~35
持	持	持 (%)	(109) 10~35
持	持	持 (%)	(110) 10~35
持	持	持 (%)	(111) 10~35
持	持	持 (%)	(112) 10~35
持	持	持 (%)	(113) 10~35
持	持	持 (%)	(114) 10~35
持	持	持 (%)	(115) 10~35
持	持	持 (%)	(116) 10~35
持	持	持 (%)	(117) 10~35
持	持	持 (%)	(118) 10~35
持	持	持 (%)	(119) 10~35
持	持	持 (%)	(120) 10~35
持	持	持 (%)	(121) 10~35
持	持	持 (%)	(122) 10~35
持	持	持 (%)	(123) 10~35
持	持	持 (%)	(124) 10~35
持	持	持 (%)	(125) 10~35
持	持	持 (%)	(126) 10~35
持	持	持 (%)	(127) 10~35
持	持	持 (%)	(128) 10~35
持	持	持 (%)	(129) 10~35
持	持	持 (%)	(130) 10~35
持	持	持 (%)	(131) 10~35
持	持	持 (%)	(132) 10~35
持	持	持 (%)	(133) 10~35
持	持	持 (%)	(134) 10~35
持	持	持 (%)	(135) 10~35
持	持	持 (%)	(136) 10~35
持	持	持 (%)	(137) 10~35
持	持	持 (%)	(138) 10~35
持	持	持 (%)	(139) 10~35
持	持	持 (%)	(140) 10~35
持	持	持 (%)	(141) 10~35
持	持	持 (%)	(142) 10~35
持	持	持 (%)	(143) 10~35
持	持	持 (%)	(144) 10~35
持	持	持 (%)	(145) 10~35
持	持	持 (%)	(146) 10~35
持	持	持 (%)	(147) 10~35
持	持	持 (%)	(148) 10~35
持	持	持 (%)	(149) 10~35
持	持	持 (%)	(150) 10~35
持	持	持 (%)	(151) 10~35
持	持	持 (%)	(152) 10~35
持	持	持 (%)	(153) 10~35
持	持	持 (%)	(154) 10~35
持	持	持 (%)	(155) 10~35
持	持	持 (%)	(156) 10~35
持	持	持 (%)	(157) 10~35
持	持	持 (%)	(158) 10~35
持	持	持 (%)	(159) 10~35
持	持	持 (%)	(160) 10~35
持	持	持 (%)	(161) 10~35
持	持	持 (%)	(162) 10~35
持	持	持 (%)	(163) 10~35
持	持	持 (%)	(164) 10~35
持	持	持 (%)	(165) 10~35
持	持	持 (%)	(166) 10~35
持	持	持 (%)	(167) 10~35
持	持	持 (%)	(168) 10~35
持	持	持 (%)	(169) 10~35
持	持	持 (%)	(170) 10~35
持	持	持 (%)	(171) 10~35
持	持	持 (%)	(172) 10~35
持	持	持 (%)	(173) 10~35
持	持	持 (%)	(174) 10~35
持	持	持 (%)	(175) 10~35
持	持	持 (%)	(176) 10~35
持	持	持 (%)	(177) 10~35
持	持	持 (%)	(178) 10~35
持	持	持 (%)	(179) 10~35
持	持	持 (%)	(180) 10~35
持	持	持 (%)	(181) 10~35
持	持	持 (%)	(182) 10~35
持	持	持 (%)	(183) 10~35
持	持	持 (%)	(184) 10~35
持	持	持 (%)	(185) 10~35
持	持	持 (%)	(186) 10~35
持	持	持 (%)	(187) 10~35
持	持	持 (%)	(188) 10~35
持	持	持 (%)	(189) 10~35
持	持	持 (%)	(190) 10~35
持	持	持 (%)	(191) 10~35
持	持	持 (%)	(192) 10~35
持	持	持 (%)	(193) 10~35
持	持	持 (%)	(194) 10~35
持	持	持 (%)	(195) 10~35
持	持	持 (%)	(196) 10~35
持	持	持 (%)	(197) 10~35
持	持	持 (%)	(198) 10~35
持	持	持 (%)	(199) 10~35
持	持	持 (%)	(200) 10~35
持	持	持 (%)	(201) 10~35
持	持	持 (%)	(202) 10~35
持	持	持 (%)	(203) 10~35
持	持	持 (%)	(204) 10~35
持	持	持 (%)	(205) 10~35
持	持	持 (%)	(206) 10~35
持	持	持 (%)	(207) 10~35
持	持	持 (%)	(208) 10~35
持	持	持 (%)	(209) 10~35
持	持	持 (%)	(210) 10~35
持	持	持 (%)	(211) 10~35
持	持	持 (%)	(212) 10~35
持	持	持 (%)	(213) 10~35
持	持	持 (%)	(214) 10~35
持	持	持 (%)	(215) 10~35
持	持	持 (%)	(216) 10~35
持	持	持 (%)	(217) 10~35
持	持	持 (%)	(218) 10~35
持	持	持 (%)	(219) 10~35
持	持	持 (%)	(220) 10~35
持	持	持 (%)	(221) 10~35
持	持	持 (%)	(222) 10~35
持	持	持 (%)	(223) 10~35
持	持	持 (%)	(224) 10~35
持	持	持 (%)	(225) 10~35
持	持	持 (%)	(226) 10~35
持	持	持 (%)	(227) 10~35
持	持	持 (%)	(228) 10~35
持	持	持 (%)	(229) 10~35
持	持	持 (%)	(230) 10~35
持	持	持 (%)	(231) 10~35
持	持	持 (%)	(232) 10~35
持	持	持 (%)	(233) 10~35
持	持	持 (%)	(234) 10~35
持	持	持 (%)	(235) 10~35
持	持	持 (%)	(236) 10~35
持	持	持 (%)	(237) 10~35
持	持	持 (%)	(238) 10~35
持	持	持 (%)	(239) 10~35
持	持	持 (%)	(240) 10~35
持	持	持 (%)	(241) 10~35
持	持	持 (%)	(242) 10~35
持	持	持 (%)	(243) 10~35
持	持	持 (%)	(244) 10~35
持	持	持 (%)	(245) 10~35
持	持	持 (%)	(246) 10~35
持	持	持 (%)	(247) 10~35
持	持	持 (%)	(248) 10~35
持	持	持 (%)	(249) 10~35
持	持	持 (%)	(250) 10~35
持	持	持 (%)	(251) 10~35
持	持	持 (%)	(252) 10~35
持	持	持 (%)	(253) 10~35
持	持	持 (%)	(254) 10~35
持	持	持 (%)	(255) 10~35
持	持	持 (%)	(256) 10~35
持	持	持 (%)	(257) 10~35
持	持	持 (%)	(258) 10~35
持	持	持 (%)	(259) 10~35
持	持	持 (%)	(260) 10~35
持	持	持 (%)	(261) 10~35
持	持	持 (%)	(262) 10~35
持	持	持 (%)	(263) 10~35
持	持	持 (%)	(264) 10~35
持	持	持 (%)	(265) 10~35
持	持	持 (%)	(266) 10~35
持	持	持 (%)	(267) 10~35
持	持	持 (%)	(268) 10~35
持	持	持 (%)	(269) 10~35</td

がでると考えられる。次に内空変位量と針貫入試験から得られた一軸圧縮強度の関係について見ると、図-4のようになる。実測した内空変位量は事前の解析値や弾性理論で得られる値より全般に小さいが、土の強度が大きければ変位量が小さくなるという傾向は十分つかえる。

以上より、切羽における針貫入試験によって地山の強度を推定すると同時に、掘削後の内空変位量の最終値を予測する事ができると考えられる。

## (2) 地表・地中変位計測結果について

次いで計測Bを行った地表地中内空変位計測と間隙水圧計測の結果について考察する。

掘削に伴う地山変位挙動を測定する目的で地表よりタ式変位量および間隙水圧計を固結シルト層内に設置した。

その結果、地盤の絶対変位量は間隙水圧の減少量と良い相関が見られ、最大変位量は地表面で出ており  $2.3\text{ mm}$  であった。固結シルト層内は  $1.1\text{~}1.6\text{ mm}$  の変位で地表面に比べ小さかった。切羽進行に伴うトンネル壁面近傍  $0.5\text{~}1.0\text{ m}$  間の区間変位量と間隙水圧の変化量を図-5に示す。

間隙水圧は切羽が近づくと共に直線的に減少しており切羽が  $1\text{ D}$  過ぎると安定し、圧力を解除すると急変して、その後収束している。区間変位は  $-3\text{ D}$  までは直線的に増加し間隙水圧の変化と良い相関を示しているが、 $-3\text{ D}$  を過ぎると異なった動きを示し、切羽到達直前で減少した後急激に増加し  $1\text{ D}$  を過ぎると収束している。なお切羽進行を考慮した軸対称モデルによる弾性解析結果では  $-2\text{ D}$  より応力解放による影響が出て、 $1\text{ D}$  を過ぎると収束する結果が得られている。

一方、図-6に示す観測孔の水位変化を見ると、切羽が約  $1.50\text{ m}$  付近になると固結シルト層直上の砂質土層の水位が減少はじめ、切羽が到達するまで水位低下が続いた。竣工完了後回復傾向にある。これは切羽に出てくる介在砂層を通して排水される事によるものと思われる。これらの事より掘削による地山挙動は間隙水圧の減少による圧密变形と应力解放による变形が組合わったものと見ていいと考えられる。

## 4. おわりに

都市部における小断面NATMトンネルにおける計測結果の一部について述べてきたが、以上をまとめると、①内空変位を一軸圧縮強度の上で関係づけることはできないが、今回の結果からみると切羽安定管理の一手段として、切羽における針貫入試験は有効なものであると考えられる。②設計においては応力解放によるトンネルの安定解析に加え、漏水に伴うトンネルの安全及び圧密による地上構造物への影響の検討なども必要である。

今後は他の計測結果をも総合的に評価し、より安全かつ効率的な設計・施工にとりくめたいと考えている。

最後に、今回の工事にあたって終始ご指導いただいた都立大学山本穂教授へ謝意を表します。

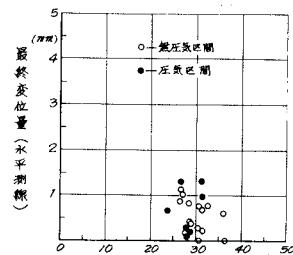


図-4 一軸圧縮強度と最終変位置量の関係

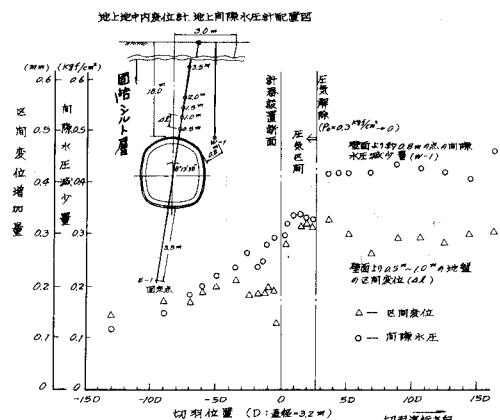


図-5 切羽進行と地中ならびに間隙水圧の変位との関係

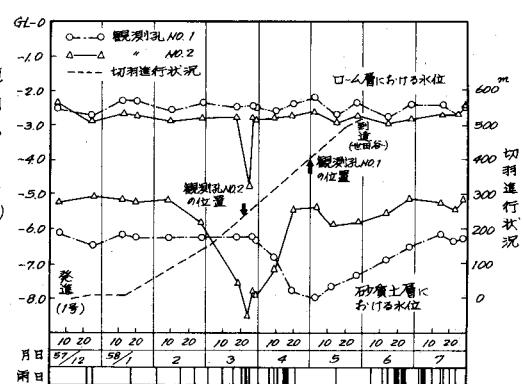


図-6 切羽進行による観測孔水位の変化(世田谷変電所～1号立坑)