

DESIGN OF ACCELERATOR TUNNEL

Takashi Kato^{1,A)}, Akinori Tamura^{B)}, Shigeru Takeda^{C)}, Masakazu Yoshioka^{C)}

A) Nikken Sekkei Ltd

4-6-2 Koraibashi, Chuo-ku, Osaka 541-8528

B) Nikken Sekkei Civil Ltd

2-23 Shimomiyahi-cho, Shinjuku-ku, Tokyo 162-0822

C) High Energy Accelerator Research Organization

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801

Abstract

There are several key points in designing the underground tunnel where a large-sized accelerator is installed in. The following two points are very important. (1) A transformation of the tunnel is smaller. (2) Integrity and durability of the tunnel structure is higher. In order to accomplish a smaller transformation of the tunnel and a stable operation of the accelerator, we recommend not to provide the expansion joints to the tunnel. We performed the structural analysis on temperature change inside the tunnel without expansion joints. As a result, no problem was confirmed about crack and transformation of the tunnel.

加速器トンネルの設計

1. はじめに

現在J-PARCの建設が佳境にあり、播磨のX-FELや群馬大の小型重粒子線なども建設に向けて設計が本格化している。また、ILC計画もR&Dや設計がすでに始まっている。このように加速器施設は建築・土木分野においても重要なプロジェクトとなってきた。また、加速器の大型化に伴い、KEKトリスタン（現KEK-B）やJ-PARCに代表されるように、加速器装置本体が地上建屋とは切り離され、地下トンネルに収納されるようになり、土木技術との関わりがますます大きくなっている。本稿では、J-PARCに代表されるような地下トンネル形式の大型加速器施設（図1，図2）の設計上の留意点にふれるとともに、構造計画上重要な伸縮継手の要否とトンネル内部温度変化に関する構造解析の概要を紹介する。



図2 J-PARC 50GeVシンクロトロン鳥瞰図

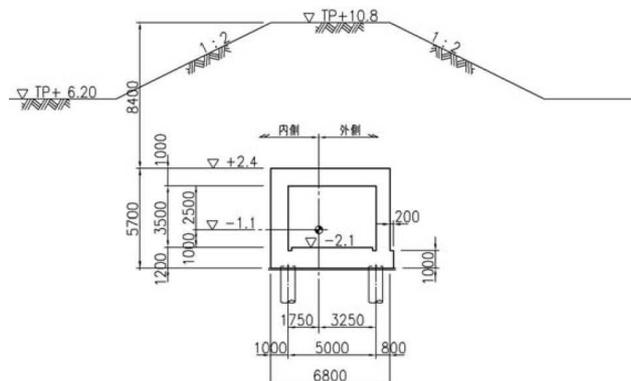


図1 J-PARC 50GeVシンクロトロントンネルの断面

2. 加速器トンネル設計上の留意点

加速器トンネルの設計上の留意点は、調査・設計項目の切り口では、地盤・地下水の調査、掘削・仮設計画、防水計画、構造計画、基礎計画、放射線安全計画などが挙げられる。一方、鉄道・道路トンネルなど一般的な土木施設との比較という切り口では、設計上の留意点をつぎのようにまとめることができる。ひとつは、加速器の性能保持のために、トンネルの変形をきびしい制限値以内に小さくしたいということ、もうひとつは、トンネル躯体（コンクリート）の健全性、耐久性をできるだけ向上させたいという点である。後者については、財産保護、安全性確保が最重要であると言う点では一般土木施設と変わりはないが、トンネル内部への漏水を可能な限り少なくし、中性子による放射化（すなわちトンネル

¹ E-mail: katou@nikken.co.jp

内部の放射性廃液の増大、トンネル外部の地下水の放射化)を抑制したいという観点では大きく異なるものである。道路・鉄道トンネルの場合は、ある程度の湧水がトンネル内に入る前提のうえで排水設備を計画するという考え方に立っているからである。

2.1 トンネルの変形について

トンネルの変形は、地盤や地下水の状況、トンネル内部の温度変化、トンネルにかかる荷重の変動、トンネル本体の構造などさまざまな要因に左右される。地下水位の季節変動については、トンネルが直接基礎のとき、加速器側で制御できないような短期間での浮き沈みを生じる場合があり、そのときはトンネルを堅固な地層に杭で支持させる必要がある。また、遮蔽盛土を施工したり、重量装置をインストールするときなどトンネルにかかる荷重が大きく変動するときは、杭基礎といえども弾性沈下量も変動するので、荷重変動の大きい時期がインストールやアライメントの時期と重複するような場合にはインストールやアライメントに支障が及ぶ場合がある。また、トンネルに伸縮継手を設けることについては、運転時のトンネル内の温度変化、地震等による変形などにより、伸縮継手部に大きな変形が生じ、そこが構造上の弱点となり易く、漏水も多くなることの認識が必要である。

2.2 トンネルの健全性、耐久性について

トンネルの健全性、耐久性は、ひびわれのきわめて少ない良質な遮蔽コンクリートであるか否かという表現に言い換えることができる。つまり、設計上、密実なマスコンクリートであるか、耐震上も含めて鉄筋は適正に入っているか、躯体コンクリートを保護する防水の品質は良いか、コンクリートの打設ブロックは適正かなどが重要となる。また、掘削時の山留計画も支保工の採用形式によってはトンネルの本体構造に影響がある。とくに重要なことは、ひびわれ抑制の観点からコンクリートの乾燥収縮対策と伸縮継手の要否である。乾燥収縮対策についてはJ-PARC50GeVトンネルでは低発熱セメントを採用して効果を上げている。一方、伸縮継手については、それを設けることによってひび割れ制御およびトンネル軸方向の構造負荷低減の効果があるが、変形と健全性・耐久性という観点から相反する問題を抱えており、慎重な検討が必要である。J-PARC50GeVの全周約1.6kmのリングトンネルでは、変形抑制を最優先として伸縮継手のない一体構造を採用することとしたが、健全性、耐久性の観点から問題ないかどうか(伸縮継手が受け持っていたひび割れ制御、トンネル軸方向の構造負荷低減の役割を担保できているか)を耐震設計やトンネル内温度変化に対する構造解析などで確認している。次章ではその後者について紹介する。

3. トンネルの伸縮継手とトンネル内部温度変化の影響

コンクリート躯体は、トンネル完成時(コンクリートが固まってトンネル全周がつながり、遮蔽盛土が完了した時)に初期応力状態にあり、そのとき土壌温度、室内温度とも15程度であるので、躯体の温度もほぼ15と考えられる。一方、加速器運転時の室内温度は30以下に制御する。TRISTAN、KEKBの経験でトンネル室内温度の変動幅を小さくすることは躯体コンクリートの有害クラック抑制のために重要であることがわかっており、J-PARCでも、冬季長期停止時には空調設備の持つ450kW容量の暖房を用い、また最も冷却効率の低下する夏季(7~9月)は運転を停止するなどして、できるだけ通年で一定の25程度に保つ計画である。従って躯体の温度変形解析上厳しい条件は建設初期の躯体温度(15)から加速器運転時の躯体温度(室内最大温度は30)まで温度が上昇するケースを検討すれば良いことになる。本検討では、コンクリートの躯体温度が1変化した場合についてトンネル躯体の軸方向解析を実施し、初期状態に対してトンネルの応力、変位、ひびわれなどの影響を把握する。

(1) 検討条件

- ・50GeVシンクロトロン全体を曲線部と直線部に分けてそれぞれの代表断面を設定し、モデル化を行う。
- ・部材は軸方向と直角方向のパネをもち、それぞれのパネ値は道路橋示方書の考え方に準じる。
- ・コンクリートの線膨張係数： 1.0×10^{-5} (1/)

(2) 解析ソフト

3次元地盤・構造物連成地震応答解析システム DINAS^[1]

(3) 検討結果

トンネル内温度が最大30となりうる加速器運転時には、図3に示すように躯体コンクリートの平均温度は27となり、冬期をはさむ数ヶ月程度の長期保守時の15との温度差は最大12と推定される。対流熱伝達率が1のとき、躯体温度がほぼ15に収束するまで1ヶ月以上の期間を要する。

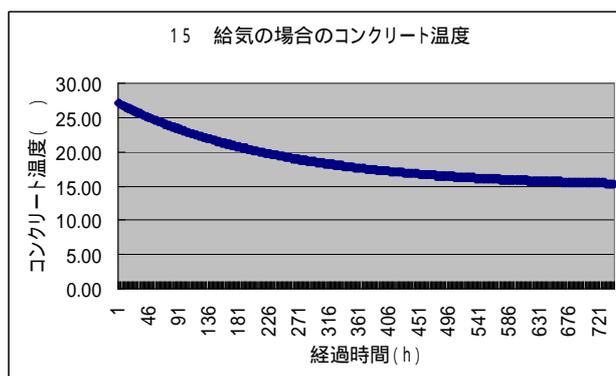


図3 長期保守時のトンネル躯体温度

温度変動にともない曲げモーメントが発生するが、躯体の最大温度上昇が 12 の場合でも、表 1 に示すとおり、発生曲げモーメントはコンクリート断面のひびわれ発生モーメントより十分に小さい。したがって加速器運転～停止における室内温度変動に起因するひびわれは発生しないと考えられる。

表 1 ひびわれモーメントと発生モーメント

Moment (KN・m)	曲線部	直線部
ひび割れ発生モーメント	6.16E+04	4.94E+05
発生モーメント	5.14E+03	1.46E+04

変位については、図 4 に示すように、主として曲線部でリング外側にはらむ方向に発生し、解析結果では最大で 4mm 程度である。また、リングの周長は 3mm 程度伸びる。全周にわたる平均伸縮率は $+1.6 \times 10^{-7}$ ($1/\%$) でコンクリートの線膨張係数 1.0×10^{-5} ($1/\%$) より十分小さい。このことから、伸縮継手を設けて躯体伸縮をフリーに近い形にした場合より、リング全周を一体構造としたほうがリング方向の変形が小さくなるので、温度変形の観点からも伸縮継手を設けないほうが望ましいといえる。局所的に大きく伸び縮みするところは直線部（伸びる）および直線部に近接する曲線部（縮む）で、 $5 \sim 6 \times 10^{-6}$ ($1/\%$) の伸縮率を示す。 12 変動した場合のリング方向局所伸縮は 1m あたり最大 $0.07 \sim 0.08\text{mm}$ 程度である。ただし、この局所伸縮量は、断面性能（パネ値）を直線部と曲線部の 2 パターンに単純モデル化した解析にもとづく結果であり、実際には開口が存在したり、断面も種々変化しているのであくまで目安と考えておくのが妥当である。

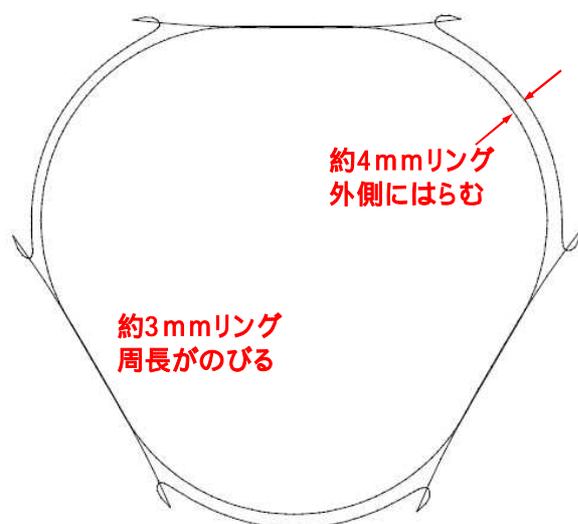


図 4 トンネル変位

4. おわりに

地下トンネル形式の大型加速器施設の設計上の留意点について概観した。重要なポイントは、トンネルの変形を小さくしたいということ、トンネル躯体（コンクリート）の健全性、耐久性をできるだけ向上させたいという点であり、両者に共通する問題として、トンネルの伸縮継手の要否に関して、トンネル内部温度変動に着目した解析をおこなった。結果としては、伸縮継手を設けなくてもトンネル躯体の変位、ひびわれ等について問題ないことが確認された。本稿のまとめとしては以上であるが、設計上の留意点として重要な事項はまだ数多くある。とくにコスト、工事のスケジュールにインパクトのあることとしては、

- ・地質地盤・地下水等の調査計画について、各計画個々に立地選定、設計、施工の各フェーズのどの段階でどの程度までの仕様の調査をすべきかを予算措置以前のできるだけ早い段階から総合的に検討する必要がある。

- ・設計は、加速器の運転開始後のみならず、施工時、加速器のインストール時の諸条件をふまえて行なわなければならないことは周知であるが、年次予算上の制約などから、工区分割、施工順序などについて必ずしも最良の選択ができないこともあり、設計段階からそれもふまえた検討が必要となる。もちろん、予算措置の段階から踏み込んだ計画立案が望まれることはいうまでもない。

J-PARCプロジェクトでは、調査、設計、施工、インストールを通して数多くの貴重な知見が得られつつあり^[2]、ここにご紹介したのはさわりにすぎないが、機会あるごとに順次紹介され、今後の大型加速器計画に活かされるであろう。究極のミクロの世界、素粒子を追って加速器の大型化、高エネルギー化が進めば進むほど、施設建設はマクロな世界、自然や地球の懐深く飛び込んでいくこととなり、設計が新たに挑戦すべきことがますます増えてくる。設計段階ですべて解決できるような単純なものではなく調査、設計、施工、インストール、コミッションのあらゆる段階で挑戦は続く。だからこそ発注者、研究者、設計者、施工者、メーカー等の間で十分なコミュニケーションが必須である。

参考文献

[1] <http://www.civil-eye.com/software/taishin/Dinas/>.

[2] 文教施設 2006年第21号.