

新幹線高速化に向けた 地上設備の研究開発

東日本旅客鉄道株式会社

JR東日本研究開発センター
テクニカルセンター 所長

高木 言芳

1. はじめに

私どもの小笠原から、新幹線高速化の狙いやその背景、そして具体的なFASTECH車両の紹介をしましたが、私からは、新幹線高速化に伴う地上設備の確認事項、あるいは今後の課題等について紹介します。私の話のストーリーは、地上部門全体の取り組みの概要、具体的な地上設備の課題と方策として、「走行速度の向上」、安全性を含めた「信頼性の確保」、騒音微気圧波等の「環境への適合」問題、乗り心地等の「快適性の向上」、最後に今後の進め方等について話を進めたいと考えています。

2. 高速化に向けた取り組みの概要

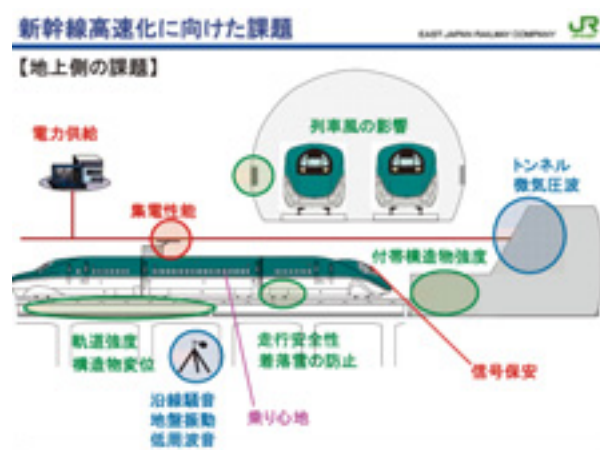
縦軸に先ほどの4項目を設けていますが、車両部門、地上部門、それぞれいろいろな課題があります。また、車両と地上の両方に関係する課題もありますが、私からは特に地上部門の課題についての試験状況、途中経過を報告します。

	車上側	共通	地上側
走行速度の向上	・駆動システム ・ブレーキ制御システム ・デジタル列車無線伝送特性 ・電磁環境適合性・粘着性能	・集電性能 ・信号保安	・電力供給
信頼性の確保	・台車枠強度 ・構体気密強度 ・基礎ブレーキ ・非常停止距離短縮 ・積雪走行性能	・走行安全性 ・着落雪	・軌道強度 ・構造物変位 ・付帯構造物強度 ・列車風の影響
トンネルへの適合		・トンネル微気圧波 ・沿線騒音・低周波音 ・地盤振動	
快適性の向上	・車体気密性 ・車内静粛性	・乗り心地	

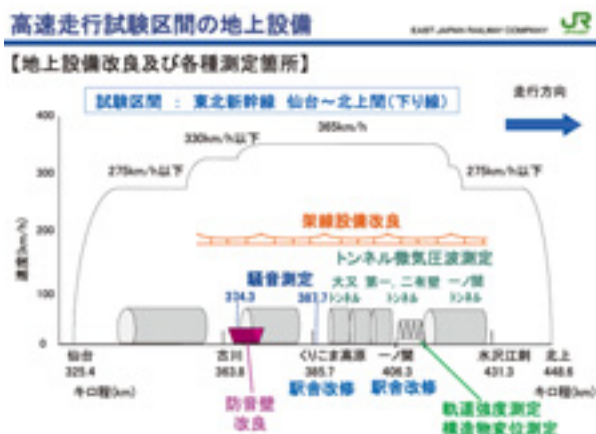
まず、スピードを上げるには、集電性能を確保することが非常に大きな課題になります。次に走行安全性ですが、列車が安全に走れることを確認するために、輪重・横圧といった走行安全性はもちろんのこと、軌道強度、



構造物変位、付帯構造物の問題、列車によって発生する風の問題等について紹介します。三つ目は環境問題で、沿線の騒音問題、トンネル微気圧波に対する取り組みを紹介します。四つ目の快適性という課題では、乗り心地について地上側からの取り組みを紹介します。



このスライドは試験箇所の図です。列車は、主に仙台から北上まで下り線を使って試験をしています。実際に360km/h以上の速度が出るのは古川から水沢江刺間です。その中で、特に私ども地上部門としては、上下合わせて約90kmの架線の設備改良をしています。また、防音壁や駅舎の改良、さらにそれらに対する各種の計測を行っています。また、トンネル微気圧波や軌道強度などの測定も合わせて行っています。



走行試験のスケジュールは、現在このスライドのようになっています。4年前に所内にプロジェクトを発足させ、現行の「はやて」「こまち」の車両を用いて事前試験を行いました。この段階で例えば架線の状況を見ますと、ひずみが非常に大きくなるという現象が確認できましたので、その架線を吊っている曲引き金具の軽量化や、トンネルの微気圧波に対する事前の各種要素開発等を行っています。



3. 地上設備の課題と方策

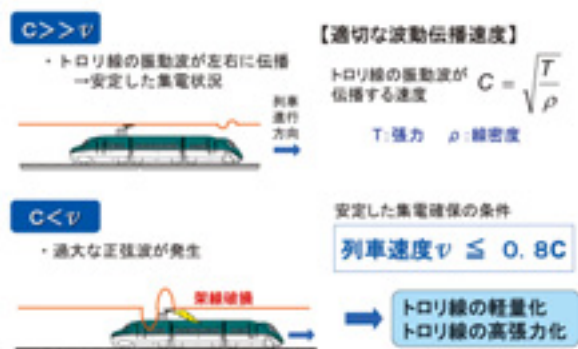
3.1 走行速度の向上

地上設備の各取り組みの具体的な事例を紹介します。最初は集電性能の向上です。

スライドの左上の図は架線にパンタグラフが接している状態ですが、パンタグラフが押し上げることにより架線が波を打つことになります。この波が前に動き、いろいろな問題が発生します。波が伝わる速度を「波動伝播速度」と言いますが、これが列車の速度より速い場合は

安定した集電状況が保たれます。逆に列車のほうが波動伝播速度より速い場合は、パンタグラフと架線がぶつかってしまいますので、大離線が発生させたり、パンタグラフと架線が壊れてしまうといったことが発生しますので、架線の波動伝播速度をいかに速めるかということが集電性能を安定させるために、非常に重要となります。スライドの右に式を示していますが、波動伝播速度はトロリ線の張力、引っ張っている力が強ければ強いほど速くなります。またトロリ線の重量、重さが軽くなれば軽くなるほど速くなります。よって、トロリ線を軽量化する、あるいは高張力化することが、速度向上には大事な条件となります。今までの研究では、列車の走行速度が波動伝播速度の7～8割以外ならば安定した集電性能が得られると言われています。

集電性能の向上



次のスライドはこれまでの架線構造の推移です。架線はちょう架線、補助ちょう架線、トロリ線という3本のケーブルで構成されていますが、パンタグラフと直にあたるトロリ線をいかに設定するかが重要です。東海道新幹線が開業した当時は110mm²という非常に細いケーブルを、約1tonの張力で張っていましたが、その後、メンテナンス性を向上するために山陽新幹線ではケーブルを太くして張力もふやしたのですが、結果的には約280km/h程度までしか走れません。東北上越新幹線もこの方式が用いられており、さらにこの張力をふやすことで対応していますが、これでは360km/hに対応できませんので、今回PHCコンパウンド架線というものを開発しています。断面積を小さくして、つまり軽くして、東海道新幹線の倍の張力約2tonで引っ張っています。約400km/h以上の走行が可能であり、当然360km/hに対応可能ですので、

試験区間の一部をこの架線構造に改造しています。



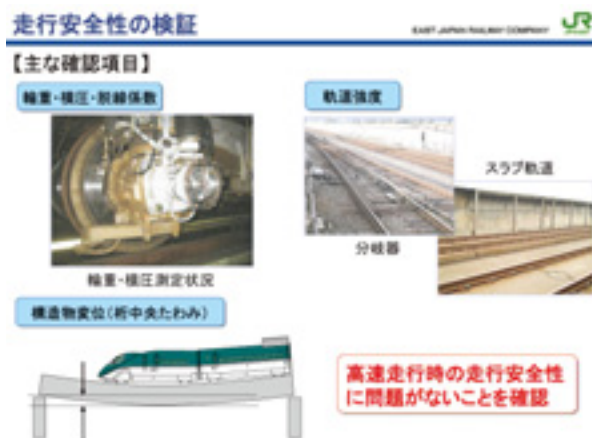
走行試験では、トロリ線を押し上げる量、トロリ線のひずみ、トロリ線とパンタグラフの離線率、といった項目について集電性能を確認し、安全性に問題がないことを確認しています。



3.2 信頼性の確保

次は信頼性の問題です。三つテーマを紹介します。

まず、走行安全性の問題です。スライドの左上の写真は、レールにかかる輪重、横方向の横圧といった力が安全を確保できる範囲に入っているかという内容です。また、輪重と横圧の比を脱線係数と呼びますが、安全上非常に重要な指数ですので、これを確認しています。右上の写真は、軌道の部材です。分岐器はレールが非常に入り組んでおり、弱点箇所もありますので、その応力状態、あるいはスラブ軌道そのものの応力状態なども確認しています。構造物の変位、橋の桁の中央のたわみ量なども検測していき、これらはすべて高速走行時の安全性に問題がないことを確認しています。



次は風の問題です。列車のスピードが速くなることで、風の速度、あるいはそれによる圧力等が大きくなるのは容易に想像できると思います。駅舎のホーム上のお客さまにどのような影響を与えるか、あるいは駅舎の内装材などへの影響、かさ上げした防音壁等の土木構造物の強度の問題、バラスト区間で作業をするときのバラストの飛散の問題等について確認しています。

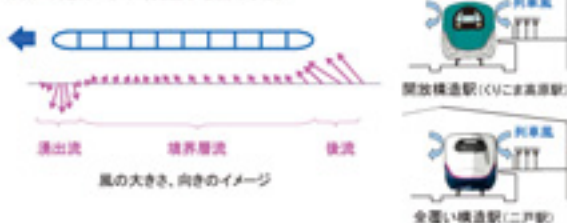


まずはホーム上の列車の風です。くりこま高原のような屋根のない駅を開放構造の駅と言いますが、FASTECHが360km/hで走行した場合と、現行の「はやて」が275km/hで走行した場合では、どちらも約5～10m/sであり同程度の風速なので、問題ないことを確認しています。右下の図のように線路の上が屋根で覆われている構造の二戸では、どのような状況になるかを確認したいと思っています。盛岡より先になりますので、今後試験を予定しています。

列車風の影響

【ホーム上の列車風】

列車の走行によって発生する風の状況

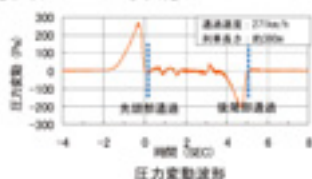


開放構造駅の列車風は、360km/h走行時において
現行車両(275km/h)と同程度であることを確認
(全覆い構造駅は今後検証予定)

続いて駅舎内の圧力変動です。ホームの駅舎では、列車が通ることによって圧力が生じますので、内装材等が不具合を起こす等、メンテナンス上非常に問題が残っています。グラフにあるように、列車が入る時と出て行く時に圧力変動が生じます。圧力変動は列車のスピードに依存し、開口率、蓋が開いているところ、窓が開いているところが多いほうが変動率は少なくなります。実際に列車を走行させて確認した結果、FASTECHのほうが「はやて」より小さいことが確認できましたので、今後は内装材の耐久性を確認する上で、この圧力変動の幅をどの程度に設定すべきかということを勉強していきます。

列車風の影響

【駅舎内の圧力変動】



一ノ関駅改修状況

圧力変動は

- ・列車速度に依存
- ・開口率が大きい方が小さい
※開口率＝開口長さ／断面周長
- ・E2よりFASTECH360の方が小さい

今後の課題

駅舎部材の耐久性
(圧力変動許容値)の検討

次は付帯構造物の強度です。建設当時の土木構造物の上に防音壁を建てたり、トンネルに樫をかけることがあります。これらは、アンカーボルト等でとめていますが、それが風圧の影響によってどのように変わるかといったことについても確認しています。アンカーボルト等の強度を確認した結果、営業運転を行う場合は、部分的に補強する等、それなりの処置が必要ということを確認しています。

列車風の影響

【付帯構造物強度】

高速走行による安全性の検討

高速化により列車からの風圧や風速が増加

高架橋

防音壁(かき上げ部)に作用する風圧等が増加

トンネル

付帯構造物
トンネル内に作用する風圧等が増加



付帯構造物を固定する部材や
アンカーボルト等の強度を確認



トンネル導水橋

一部は部分的
補強が必要

道床作業前後のバラストへの影響です。事前の「はやて」での走行試験の時に、320km/hを上回りますと、小さいバラストが転がるという事象を確認しました。跳ねてしまった場合は、車両へ当たることも懸念されますので、その対策として実施した内容です。実際には、全てバラストスクリーンという非常に厚いゴム製のものが線路の上に敷かれているので、砂利が飛ぶようなことは起きませんが、バラスト区間の軌道整備等、線路の保守作業をする際に、どうしてもバラストスクリーンは一旦外すことになります。そのような時は一旦バラストがむき出しになるので、簡易的なバラスト巻き上げ防止ネットを開発し、これがどのように挙動するか、問題ないかを検証しました。その結果、走行安全性に全く問題ないことを確認しています。

列車風の影響

【道床作業前後のバラストへの影響】

高速走行では道床表面の風速が増大→車両との衝突の可能性

転がる

列車風

ばつかる・跳ね上がる

バラストスクリーン敷設で対応

MTT作業等に支障

着脱が容易なバラスト
巻き上げ防止ネットの開発

バラスト巻き上げ防止ネット

高速走行時の走行安全性に問題がないことを確認

バラストスクリーン敷設で対応

MTT作業等に支障

着脱が容易なバラスト
巻き上げ防止ネットの開発

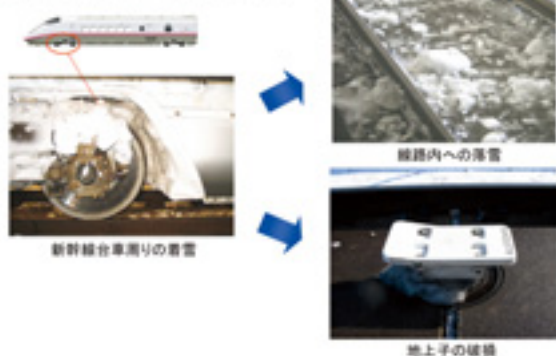
バラスト巻き上げ防止ネット

高速走行時の走行安全性に問題がないことを確認

次は着落雪の問題で、雪が線路に落ちるとバラストが飛んでしまうという事象があります。3年ほど前、このバラストが民家に飛び込み、沿線の方に非常にご迷惑をおかけしたという事象もありました。バラストがないスラブ区間でも、線路の中に設置された地上設備を壊してしまう事象が発生しています。写真は、地上子に雪がぶつかって曲がってしまった事例です。今後八戸以遠に新幹線が延伸されれば雪もさらに深くなりますし、速度が向上すれば落雪のエネルギーも増え、最悪の場合は運転そのものにも影響しますので、重要な問題として研究開発を進めています。

車両の着落雪の影響

【落雪の実態と地上設備の被害】



先ほど紹介したように、バラストスクリーンが全線を覆っていますのでバラストは飛ばなくなっていますが、地上に設置した設備を壊さないために、右の写真のような防護設備の試験を行い、徐々に設置を始めています。これは、たまたま防弾チョッキの生地を使い、中に砂利を入れて、後ろにある地上子等の設備を防護しようという発想で試験をした例です。約1.4kgの雪の塊を、300km/hで衝突させたところ、残念ながら防弾チョッキの布の縫い目から破れ、使い物になりませんでした。実際にはスチール製のものを現場につけるようにしていますが、これだけ大きなエネルギーで雪が落ちますと、いろいろなところに支障しますので、車両側も含めて対策を練っています。

車両の着落雪の影響

【落雪によるバラスト飛散対策】



車両の着落雪の影響

【床下着雪防止対策】



FASTECH360の吸音用フサギ板で効果を検証中

今後の課題 車両・地上設備両面からの対策検討

この写真は、「こまち」の床下フサギ板の内側に半導体のヒーターをつけて、着雪がなくなるかを試験したものです。右側の写真は、ヒーターで着雪がなくなっている状態であり、中央の写真はヒーターがない状態です。FASTECHでも同じような効果の検証を行っており、今後は取り付け困難な台車の中にヒーターをどのように設置するか、あるいは短時間の停車時間の中でのどのように雪を溶かすかといったことについて検討を行っています。

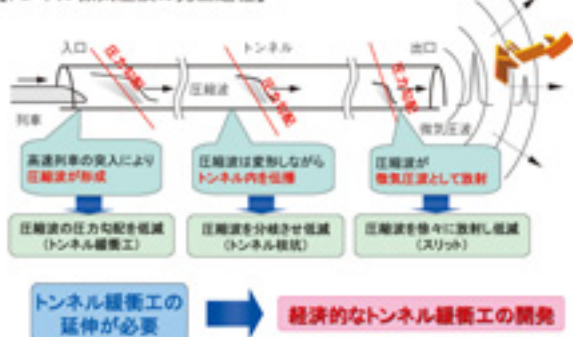
3.3 環境への適合

次は環境への適合で、トンネル微気圧波と騒音の話をしていきます。

高速列車のトンネル通過に伴うトンネル微気圧波の低減対策は、入口の段階、トンネルの中で伝播する段階、出る段階で異なる方法を実施しています。具体的には、トンネル緩衝工を入口につける、中間部では建設時に使った斜坑や立坑を利用して圧力を低減する、出口では緩衝工の窓を開けて圧力を低減する、といったことを行っています。ここではトンネル緩衝工について詳しく紹介していきます。

トンネル微気圧波

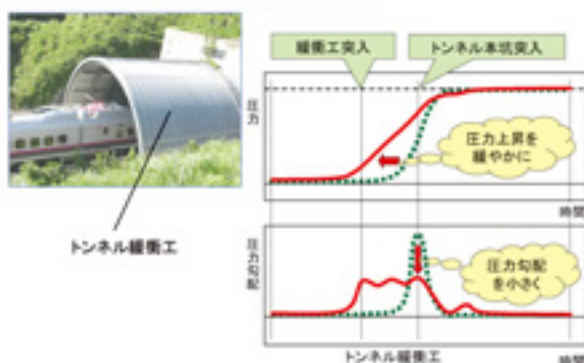
【トンネル微気圧波の発生過程】



左の写真がトンネル緩衝工です。トンネルの本坑の断面積より約1.5倍の断面積を有しています。右側のグラフは、横軸が時間で縦軸が圧力、圧力勾配ですが、トンネルの入口では高速列車が急に突入しますので、圧力が急に上昇し、圧力勾配はピークになります。緩衝工で余裕をもたせた場合、その間で圧力が増えることになるので、圧力上昇が緩やかになると共に、圧力勾配も緩やかになります。微気圧波を低減するには圧力勾配を小さくすることが大きな課題でありトンネル緩衝工が必要となります。現在、当社の東北新幹線盛岡まで、46カ所のトンネル緩衝工を設けていますが、スピードが速くなると、さらに緩衝工を伸ばさないと、トンネル微気圧波に対応できません。46カ所もの緩衝工の延伸は施工等の技術的な面でも費用の面でも大変です。そこで、何とかこれを経済的に開発できないかといったことに取り組んでいます。

トンネル微気圧波

【トンネル微気圧波の地上設備による対策】



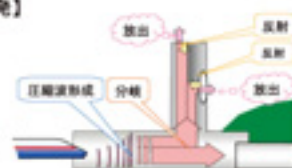
これはパイプ付きトンネル緩衝工と言いまして、従来の緩衝工に煙突のようなパイプを立てまして、緩衝工の延伸を行わないようにしています。下の絵は、鉄道総合技術研究所で開発、研究して頂いております模型装置で

す。約60分の1の縮尺の模型ですが、パイプをつけて実験したところ、トンネル微気圧波のいろいろなメカニズムが分かってきました。今回、実際に敷設し、列車が入ってくるときに発生する圧縮波を、パイプの接続部分で分岐する、開口部から放出する、閉鎖部に到達したものを反射させるなどということを行い、圧縮波そのものを低減しようと考えています。

トンネル微気圧波

【パイプ付きトンネル緩衝工の開発】

- ・圧縮波をパイプ側に分岐させ低減
- ・圧縮波の伝播を遅らせ低減
- ・パイプ内の圧縮波を放出させ低減
- ・反射した衝撃波との干渉により低減



【新】鉄道総研の微気圧波模型実験装置



写真は一ノ関トンネルの起点方に敷設したパイプです。一ノ関トンネルは延長が約9.7kmで、従来ついていた緩衝工は25mです。理論的には、これをさらに7m延伸しなければなりません、それをこのようなパイプで対応できないかということで効果の確認を行っています。足場がありますが、窓の開閉等、試験のためにつけています。先ほど小笠原からも話がありましたように、車両の対策と合わせて最適な形状、あるいは効果等を確認すると共に、46カ所もある緩衝工ですので、どのようにコストダウンをしていくかが今後の課題と考えています。

トンネル微気圧波

【パイプ付きトンネル緩衝工の現地試験】



今後の課題

- ・地上設備と車両対策の最適化
- ・長大トンネルにおける微気圧波のメカニズムの解明
- ・地上設備による対策の費用低減

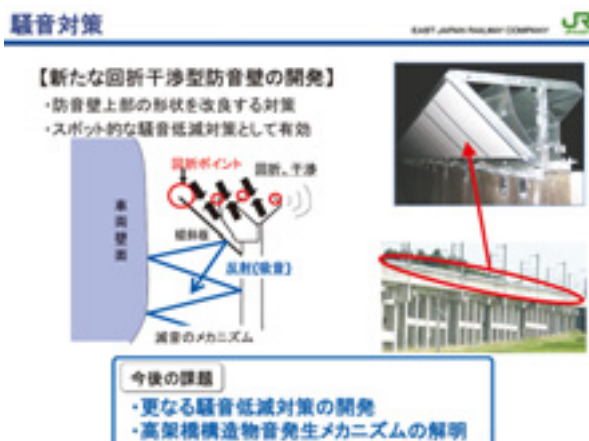
次は騒音の問題です。騒音はいろいろなパターンがあります。発生源としては、集電系から出る音、車体の空力音、車両の機器音、車輪がレールを転がることによって発生する転動音、構造物そのものの構造物音に分かれます。主な騒音対策としては、車両側ではパンタカバーなどを行っていますが、地上側ではレールそのものを削るという音源対策、防音壁に代表されるような伝搬対策、低バネ軌道パット等、転動音、構造物の伝播を低減するためのいろいろな対策が行われています。



これは新幹線の歴史と騒音防止に対する取り組みの年表です。今では信じられませんが、昭和39年に東海道新幹線が開業した当時は、防音壁がほとんどなかったようです。その後、社会問題となり、直防音壁の建設、軌道側で騒音を低減するバラストマット等の対策が始まっています。これに対して環境庁等の環境基準等も制定され、逆L型防音壁や、繊維質のものを張ることによって音を吸収する側壁吸音工が開発、施工されています。さらに、防音壁をかさ上げるなどして、東北・上越新幹線ともに約10年前に暫定的な環境基準をクリアしています。これまでは、騒音を押さえ込む対策でしたが、最近では、音と音の波を干渉させて消し合う、といった対策が開発され、干渉型防音工のカームゾンや山型防音工があります。これは、山の三角の両脇から出てきた波をその先で干渉させて低減させるものです。



特に今回、私どもは新しい回折干渉型防音壁を開発しました。防音壁の上に図のような構造のものを載せ、車体や線路から出る音を回折ポイントで回り込ませて、前に出た音と干渉させて相殺します。これにより線路から25m離れた地点で約2dBの低減効果を確認しています。環境基準をクリアできるスポット的な対策として有効ではないかと考えており、雪や風の影響等も含めた確認を行っています。今後は構造物騒音の発生メカニズム、その低減対策等の開発が課題です。



3.4 快適性の向上

次は快適性の向上です。乗り心地の話をしてします。

乗り心地もいろいろな乗り心地がありますが、ここでは、いわゆる遠心力に関わるものと、線路のでこぼこに起因する車両の揺れについて紹介します。皆さま列車に乗られて、カーブで外側に引かれる感覚があるかと思いますが、それがいわゆる遠心力です。「超過遠心加速度」などと言いますが、地上側では、それに対しては曲線半径を大きくしたり、カントと呼ばれる線路の傾きを強く



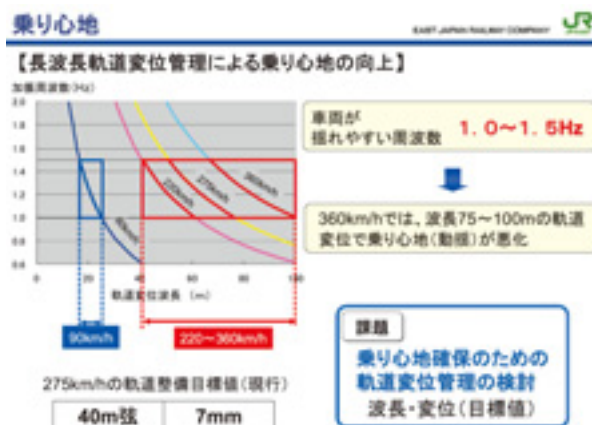
するといったことを行います。当社の新幹線の場合はスラブ軌道ですので、そのようなことをするのは技術的にも大変で、費用も膨大になるので、今回は車両側の車体傾斜制御装置でこの対応をしています。もう一つ大きな課題は軌道変位、すなわち線路の変位と車両の振動特性に関わって生じる車両の動揺をどのように管理していくか、あるいはどのように抑えていくかです。

車両側では、アクティブサスペンションで対応していますが、地上側では線路のでこぼこを長波長で管理する取り組みを行っています。図は線路のでこぼこの状況です。本当は目に見えるほどでこぼこしておりません。縮尺が非常に短いのでこぼこしておりますが、これを10mの弦で見ても何mmぐらい、40mで見ても何mmぐらいといったものを管理しています。新幹線の場合は、40mで7mmを超えたら軌道整備を行うことにしていますので、4万mm分の7mmですから、1万分の1ぐらいの精度で新幹線の線路は管理されています。図は実際に、軌道検測車イースト・アイで検測されましたチャートです。上から10m弦、40m弦の高低変位、下が乗り心地の車体振動加速度です。40mで7mmを超えているところがありますので、そこを直

しますと、40mで2～3mmぐらいの範囲に収まり、振動加速度も収まります。重力加速度にしますと0.06Gが0.03Gになったというレベルです。0.06G自体は本当にわずかな揺れですが、このような長波長管理を実際に行っています。



これを、360km/h運転ではどのようにするのが今後の大きな課題です。左のグラフは縦軸が車両の揺れを表す加振周波数、横軸が軌道変位の波長の長さで、速度毎にこれらの関係を示しています。一般的に車両は1.0～1.5Hz程度、波長にすると約75～100mのところでは乗り心地が悪化するとされています。ただ、最近は車両の性能そのものもよくなっていますので、もう少し高周波数の領域の管理も行うのか、あるいは360km/hで全線走るわけではありませので、200km/hで走っているところはどうするのか、といった議論もあります。要は、今現在40mで管理をしているものを何mで管理をすべきか、40mにした場合に7mmをさらに小さくして5mmにするのか等、これらの選択肢の中からどの項目を選んで360km/hに対応する軌道管理を行うかということが、非常に重要な課題と考えており、検討しているところです。



4. 今後の進め方

具体的な地上設備部門での取り組みについて紹介しましたが、昨年の6月からの試験の中で、走行安定性、集電性能については、大筋の部分で成果が確認できています。もちろん騒音の問題、微気圧波の問題等、まだまだ開発・改良することはありますが、今後の新在直通車両のFASTECHの試験等において、それらの確認も合わせて行う計画です。今後のもう一つの大きな課題は、営業運転の際のメンテナンス方法の確立です。マレー・ヒューズ氏が「最高速度で走ることはそんなに難しいことではない、営業運転することが難しい」と言われていましたが、まさにその通りです。スライドの右下にあります高速新幹線用の無交差わたり線がこれから入りますが、このような新しい設備をどう保守するか、従来の部材で発生するひずみや疲労の問題等々に対してどのような検査をするか、どのような検査周期で検査をするか、といったものが大きな課題です。また、トロリ線については、今後高速運転区間ではパンタグラフとトロリ線の接触力で管理するほうが有効であるという研究結果もありますので、そのような装置をイースト・アイにどのようにつけていくか、そのときの管理基準をどうするか、取替基準や作業方法をどうするか、といったことも今後の大きな課題と考えています。さらに、それらをトータルしたメンテナンスコストをどのように把握していくか、事前の設備投資をどのようにすべきか等、非常にたくさんの課題が残っているという状況です。

今後の課題

JR EAST Technical Review 15

新幹線高速化に伴うメンテナンス手法の確立が重要な課題

高速営業運転時に必要な設備保守手法の確立

- ・検査手法・検査周期の検討
- ・East iの高速化、測定項目の検討
- ・整備基準値、取替基準、作業方法の検討

高速営業運転時に必要なメンテナンスコストの把握

高速営業運転時に必要な事前の設備投資の検討



5. おわりに

新幹線高速化に向けた地上設備の取り組みを紹介しましたが、皆さまもご承知のとおり、鉄道は他の交通機関と比較しても非常に環境にすぐれており、地球にやさしい乗り物です。今回の試験を通じて得られた成果により鉄道システムをさらに発展させ「持続可能な社会」の実現に貢献してまいりたいと思っています。

今回、鉄道総合技術研究所を始め、各メーカー、あるいはパートナー、グループ会社の皆さま方、また現場第一線の当社社員の方には、事前の準備や連日の夜間試験で大変お世話になったことに対して改めて御礼を申し上げます。また、引き続き2年間に渡って試験が継続されますので、今後のご支援もよろしくお願いしたいと思います。