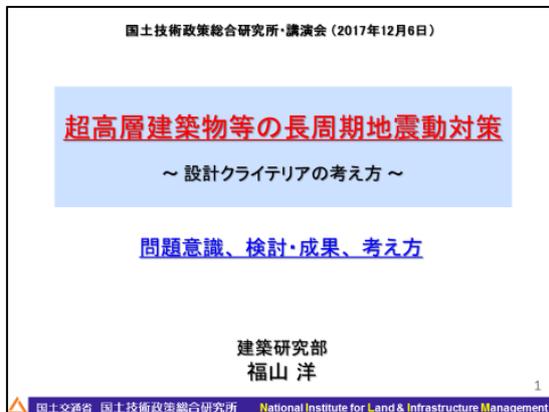
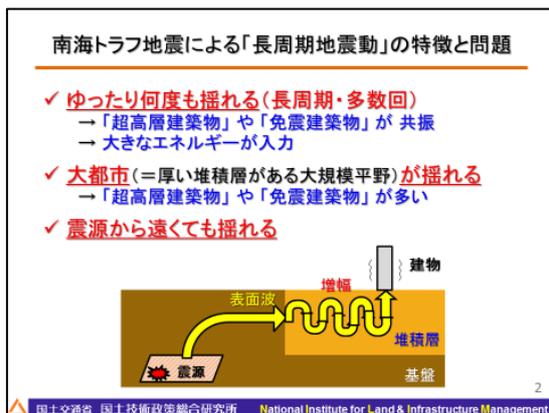


3.5 超高層建築物等の長周期地震動対策 — 設計クライテリアの考え方 —

(建築研究部長 福山 洋)



うことについてご紹介させていただきたいと思います。



もう1つ、「多数回」は何度も揺れることで、非常に大きな累積エネルギーが入力します。例えば鉄骨造の柱と梁の接合部は溶接をされておりませんが、そこが何度も変形し累積の変形がある一定値に達すると、溶接部が破断するという問題があります。

それから2つ目は、超高層や免震の建築物が多い大都市が揺れるということです。大都市はもともと大規模な平野で、それは非常に厚い堆積層でできていて、これがやわらかいものですから、地震動の長周期成分が特に増幅し、よく揺れるということです。

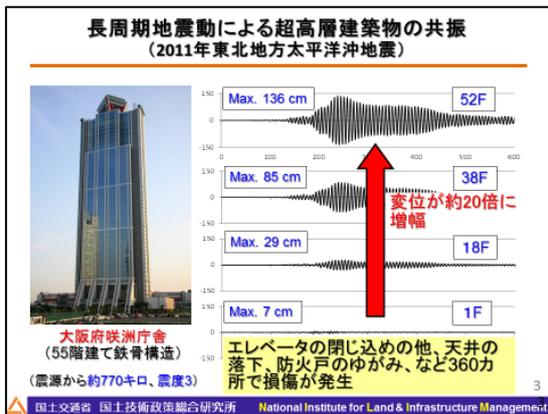
3つ目は、長周期の成分というのは、表面波で伝わりますが、表面波はなかなか減衰しないという特徴がありますので、震源から非常に遠くまで伝わり、遠いところでも揺れるという問題です。

建築研究部の福山でございます。どうぞよろしくお願いたします。

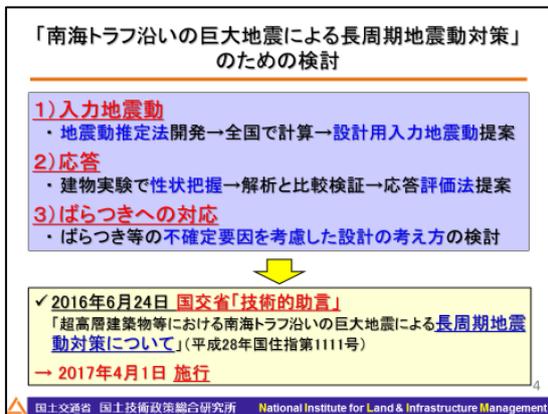
ことしの4月1日に、超高層建築物と免震建築物を対象とした、長周期地震動対策が施行されました。国総研は、本省住宅局と一緒にこの対策について検討してまいったわけですが、きょうは、私たちがもった問題意識と、どういう検討を行いどのような成果を導き出したか、またその過程においてどういうことを考えてきたかとい

今回の対策は、南海トラフ地震による長周期地震動を対象としております。その特徴と問題についてまとめてみました。

まず1つ目は、ゆったりと何度も揺れることです。言葉では長周期・多数回という言い方をしております。「長周期」については、長い周期が超高層や免震建築物の周期と合って共振をすることで、想定していないような大きな変形が出てしまうという問題があります。



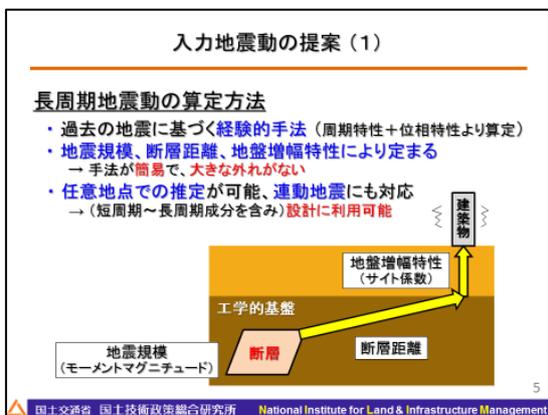
ど、360カ所で損傷が発生したと報告されています。



ころです。

これらを通して、昨年の6月に長周期地震動対策についての技術的助言が出され、今年の4月から施行されたという流れです。

では、ここから1)、2)、3)それぞれについて少し詳しくお話をさせていただきます。



う非常に簡易なものですが、これまでの経験に基づいていますので、恐らくそれほど大きな外れはないのではないかと考えております。

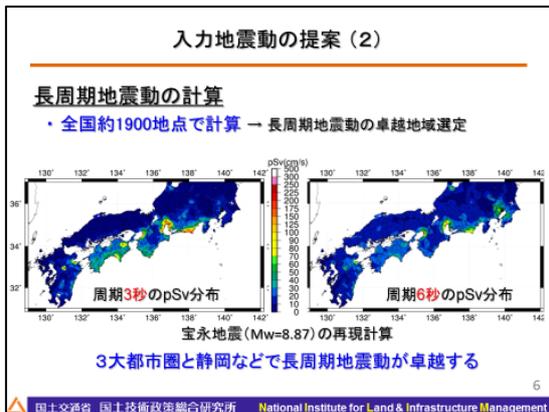
その1つの事例ですが、2011年東北地方太平洋沖地震のときに、大阪の咲洲庁舎、55階建ての鉄骨構造なのですが、これが非常に揺れました。震源から770キロ離れており、この地域は震度3でした。この建物の1階の変形はわずか7センチでしたが、共振によって52階では約20倍に増幅され、片側136センチ、両側の振幅で約2.7メートル揺れたのです。これにより、エレベーターの閉じ込めや天井の落下、それから防火戸のゆがみなど、

こういうことを踏まえまして、地震動の対策のための検討を行ってまいりましたが、大きく3つの観点で行いました。1つ目は、設計用の入力地震動をどのようにするか。2つ目は、地震動に対して建築物側の応答をどう評価するか。3つ目は、この両方に関係するのですが、入力地震動も応答評価も両方ばらつきがあります。こういった不確定要因がある中で、どのように設計の考え方に落とし込んでいくか、そこが一番難しかったと

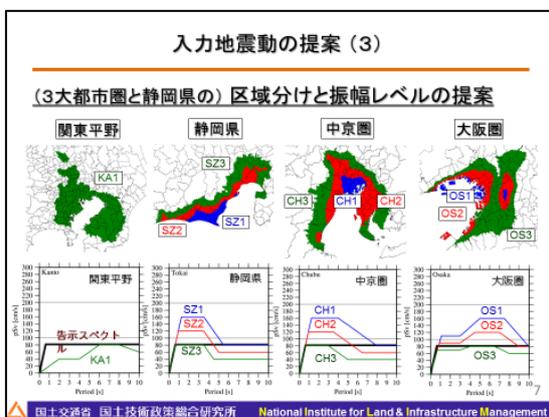
まず1つ目、入力地震動に関しては、最初に建築物の足元でどういう揺れになるかという長周期地震動の算定方法を開発し、提案いたしました。ここで行った検討方法は、過去の地震のデータがたくさん蓄積されておりますので、それらを有効に活用する方法です。手法としては地震の規模、これはマグニチュードです、それから、震源からの距離、さらに建物下の地盤の増幅特性、これらが定まれば、長周期の地震動が決まるとい

この方法は、任意の地点で推定ができて、南海トラフで想定される、3連動、4連動という連動地震にも対応できます。

それから、設計で一番大事なことですけれども、長周期だけではなくて、短周期から長周期まで全ての成分を含んでいるという特徴がございます。



これを使って、全国約1,900の強震観測をしている地点で地震動を計算し、どこが長周期が卓越するかをみてみました。その結果の一例がこの2つの図になります。左が周期3秒、右が周期6秒の速度応答の分布で描いていますけれども、緑や黄色、赤というところが揺れやすいところです。3大都市圏と静岡、それから幾つかそれ以外のところも色の薄いところがありますが、これを全ての周期帯で調べて、総合的に検討しまして、最終的には3大都市圏と静岡について、次の図のような区域分けと振幅レベルとして取りまとめ提案いたしました。

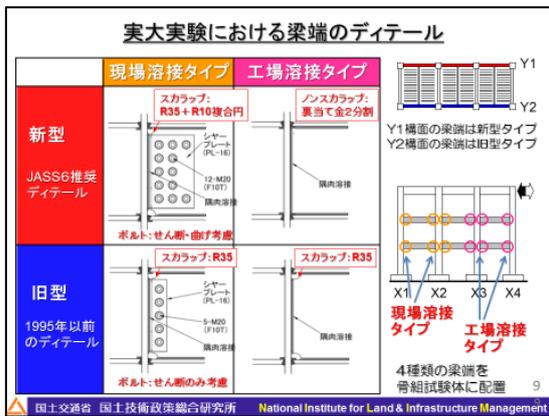


区域分けは、関東地方は1つ、静岡と中京、大阪については色分けをしているようにそれぞれ3区域です。これは、先ほどの方法で各町丁目の長周期地震動を推定し、そのデータを全部集めて、大きく3つのレベルに分けたものです。そのレベルは、下に応答スペクトルの図で描かれています。これは横軸が周期、縦軸が速度応答です。黒く太いラインは、これまでの超高層建築物や免震建築物の設計で用いられるスペクトル、告示スペクトルと呼んでいますが、速度で約80kineのレベルです。これに対して、青いところはその2倍、赤が1.5倍、緑が1倍とレベル分けをして、区域分けを行ったものです。

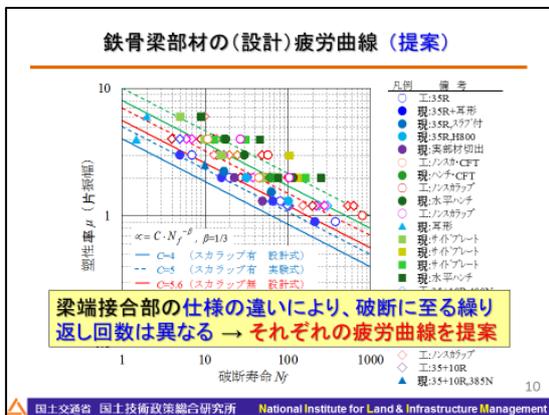
関東が1つだけというのは、南海トラフから少し距離があるので、そこまで増幅しないということなのです。それから、このスペクトルをみますと、応答が卓越する周期がそれぞれで違います。大阪だと6秒あたり、関東は7秒、静岡は2秒あたりなのですが、これはそれぞれの地域の地盤構造によります。大阪や関東は非常に深い、厚い堆積層があって、長周期化するのです。一方、静岡は震源に近いものですから、短周期側の影響が大きいということです。



次に、建築物の応答側の検討です。これは、鉄骨造の実大架構の繰り返し加力実験で、試験体は実際の超高層建築物から、途中の3層部分を取り出してきたようなものですが、これにアクチュエーターで何度も繰り返し加力を行い、梁端接合部の溶接部の破断が、どういうときに起きるかを調べるために、それが起きるまでの挙動を再現した実験です。

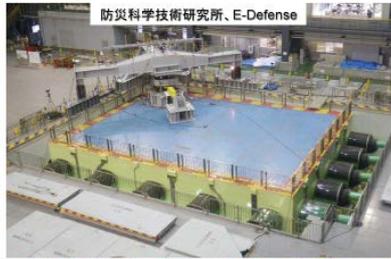


その梁端の詳細を、現場溶接のタイプや工場溶接のタイプ、また、最近の詳細や90年代の詳細などに変えて検討し、またこれとは別に、部材試験もたくさん行って、各仕様ごとに疲労曲線を提案しました。



実験により、梁端接合部の仕様の違いで、破断に至る繰り返し回数が異なるということがわかってきましたので、この図のように、それぞれの疲労曲線を取りまとめ、提案しました。現在、これらを設計で使っていただいているところです。

応答評価法の提案(2)
免震部材の繰り返し加力実験



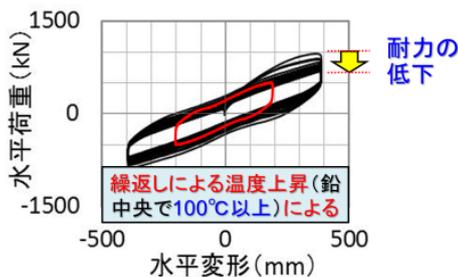
防災科学技術研究所、E-Defense
実大免震部材やダンパー等の多数回繰り返し加力実験
→ 温度上昇や疲労等による特性の変化と限界性能を調査

国土交通省 国土技術政策総合研究所 National Institute for Land & Infrastructure Management

状態で水平に揺らすことで、実際の状況をできるだけ再現しようと試みました。これにより、実大の免震部材やダンパーの多数回繰り返し加力実験を行い、温度上昇や疲労によって特性が変わっていく様子や、その限界性能の調査を行いました。

免震に関しましては、最近是非常に大きな免震装置が使われておりますけれども、そこに実際にかかる大きな軸力をかけて、揺ることができる装置は残念ながら日本にはありません。そこで、防災科学技術研究所のE-Defenseの施設を使わせていただきました。写真のように、振動台の外側にグレーの鉄骨架構を置き、これと振動台の間で免震装置を設置し、青い振動台を持ち上げることで免震装置に大きな軸力をかけ、その状態

実験結果の例(鉛プラグ入り積層ゴム)



温度上昇と降伏荷重の低下を実大レベルで把握

国土交通省 国土技術政策総合研究所 National Institute for Land & Infrastructure Management

これは実験結果の一例です。鉛プラグ入り積層ゴムという、積層ゴムの真ん中に鉛が入っていて、それで地震エネルギーを吸収するものの実験結果ですけれども、繰り返しによって温度がどんどん上がっていきました。鉛の中心で130度まで上昇しましたが、それにしただがって免震装置の耐力が低下していくという特性がみられました。

- 各種免震装置、ダンパーについて、温度依存性などの特性を確認
- 設計におけるそれぞれの評価方法を提案



Video

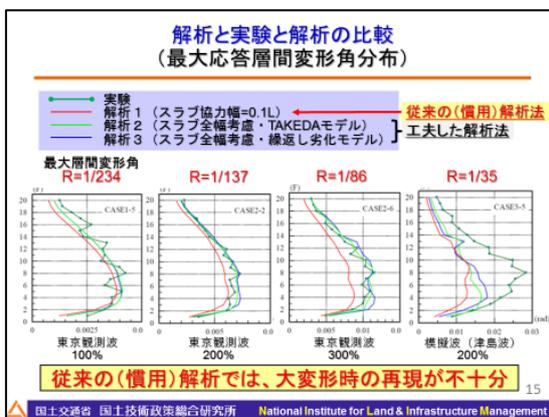
国土交通省 国土技術政策総合研究所 National Institute for Land & Infrastructure Management

そういう特性を実大レベルで把握することと、実大の装置について限界までの加力を行い、最後は破壊させるという実験を行いました。

こういった各種免震装置やダンパーについて、温度依存性などの特性を把握し、それを設計で評価できる方法を提案して、実務においてお使いいただいております。



それから、RCにつきましては、20層の建物試験体を用いE-Defenseで加震実験を行いました。目的は、非常に大きな変形になったときに何が起きるかをまずみてみようということと、通常行っている応答解析と比較して、どのような関係にあるかをみてみようということです。さすがに実大というわけにはいきませんので、4分の1スケールの縮小模型ですが、それでも高さは15メートルあります。



解析と実験の比較をここに示しています。これは、各階ごとの最大層間変形角の分布で、縦軸が階、横軸が層間変形角です。加震は少しずつ大きな波を入れていきましたので、そのときの最大層間変形角が、左の図から1/200程度、1/100程度、この1/100は現在の設計クライテリアで、通常はここを超えてはいけないというところで、さらに、それより大きくしたらどうなるかということで、1/100を超えた1/86と、最後はクライテリア

の約3倍の1/35の状況が描かれています。

緑のぎざぎざした線が実験結果、赤線が通常の設計で行われている解析結果です。最大層間変形角が1/100以前であれば、実験とシミュレーションは、多少のずれはありますが、比較的整合しています。しかし、ここを超える1/86ではそれらの間に乖離がみられてきます。そこで解析に少し工夫をしてみました。建築では梁の上に床スラブがとりつきますが、解析では、スパンの1割の範囲の床スラブを梁と一体化させて考慮するのが一般的です。それを、大変形では全てのスラブが耐力に効くので、全幅の床スラブを考慮すると、うすい緑の線のように実験に合ってくることもわかってきました。

ただし、さらに大きな1/35まで行ってしまうと、工夫した解析でも合わず、実験がシミュレーションの倍程度まで変形してしまいました。以上のことから、今の解析では、クライテリアを超えるような大変形の再現にはまだ検討の余地があるということもわかってきました。

長周期地震動対策

従来の地震動 6波^{※1}に加えて、技術的助言に示す区域内では「長周期地震動1波以上」を用いる
(※1「告示波 or サイト波 3波以上」&「観測地震波 3波以上」)

従来からの倒壊・崩壊の判定クライテリアは踏襲する

イ. 各階の 応答層間変形角 $\leq 1/100$
 ロ. 各階の 層としての 応答塑性率 ≤ 2.0
 ハ. 各部材の 応答塑性率 ≤ 4.0
 ニ. 上記を超える場合は、別途検討を要する

鉄骨造・免震建築物・制震建築物では、多数回繰返し変形の影響により、梁端部の破断が生じる可能性や免震材料・制振部材の特性が変化する可能性を考慮し、安全性の検証を行う

RC造建築物では、特段の運用の変更はない

16

国土交通省 国土技術政策総合研究所 National Institute for Land & Infrastructure Management

なりますけれども、限界値であるクライテリアは変えていませんので、設計は厳しくなります。これについては、従来からこの設計クライテリアを超える場合は、別途、特別に安全性を検討してくださいという規定があります。その内容については、性能評価の場で議論することになっておりますので、必要な場合はここを活用していただくという考えです。

それから、鉄骨と免震と制震については、先ほど実験をご覧いただきましたように、多数回繰返し変形の影響がありますので、それによる梁端の破断が生じる可能性ですとか、免震・制振部材の特性が変化するという可能性を考慮して、安全性の検証を行うということが追加で求められています。

一方、RCについては、このクライテリアの範囲であれば、多数回繰返しの影響は特段みられていないものですから、その点に関する運用の変更は設けておりません。

不確定要因を考慮した設計の考え方

「不確定な要因」への対処

- 工学では、未知や未経験がある中で、ものづくりを行う必要
- 分からないことや不確定の要因への対処として適度な「余裕」を設定

「設計用入力地震動」の位置づけ

= 検討に用いる代表的地震動

- これと性質やレベルが異なる地震動の作用も考えられるが、予測が困難(大きな地震動が数回来襲することもある)
- 構造計算を複雑にしないために、代表の入力に対して検討
- 代表的な事象に一定の余裕を付与することで、他の事象に対しても、ある程度の安全性を確保

17

国土交通省 国土技術政策総合研究所 National Institute for Land & Infrastructure Management

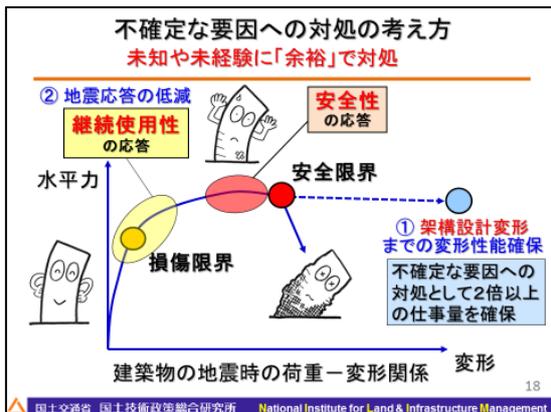
置づけました。恐らく実際には、これを超えるような大きな地震動もあり得ますし、少し様相が違う、思っていなかったような地震動が来ることもないとはいえないのですが、予測が難しいのです。熊本地震のときにも震度7が2回ということがマスコミでも取り上げられましたが、次に何が来て、何回来るという予想は今のところ非常に難しくできません。また、もしわかったとしても、構造計算が非常に煩雑になるということも考え合わせますと、代表的な事象に対して、一定の余裕を設計で設けることで、そのほかのものもカバーする。そこである程度の安全性を確保するというのが当面、合理的ではないかなと思っています。

これらを踏まえて対策ですが、従来から告示波と観測地震波、それぞれ3波以上の6波以上で検討を行っておりますが、それに先ほどお示した区域では、長周期地震動1波以上を用いることになりました。

それから、倒壊、崩壊の判定クライテリアについては、応答層間変形角が1/100、層の応答塑性率が2以下、部材の塑性率が4以下という従来通りで、今回は変えませんでした。地震力は大きく

それから、難しかったのが、不確定な要因にどう対処していくかということところです。もともと工学というのは、わからないことや経験していないことがある中においても、ものづくりが求められる分野だと思います。そして、そういう要因に関しては、昔から適切な余裕を設けることで対処されてきたと思います。それを踏まえて、今回、設計用入力地震動について考えてみました。

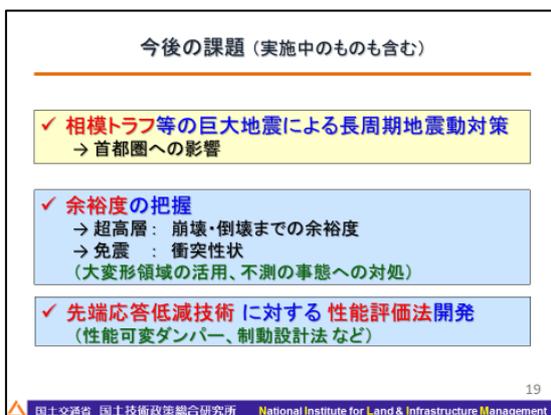
そして、これは検討に用いる代表的地震動と位置



これは、建物の力と変形をポンチ絵で描いています。安全限界を超えなければ、とりあえず設計としては成り立ちますので、応答値がこの赤い「安全性の応答」の範囲にとどまれば良いということになります。しかし、地震動が予想より少し大きくなると、実は安全限界を超えるかもしれない。また、応答評価のばらつきもあるかもしれないということから、この安全限界ではなくて、できればその倍ぐらいのエネルギー吸収ができる

「架構設計変形」まで変形できるように、保証設計にて変形能力をしっかりと確保していくことが必要と考えられます。

一方、超高層建築物は、1つの街のように非常に多くの方が使われておりますので、地震が起きて損傷し使えなくなるということは影響が大きく、避けるべきです。そこで、大地震の応答を黄色い「継続使用性の応答」あたりにとどめ、地震後も継続して使えるようにしておくことが推奨されますが、そうすることで何か想定外の事象があったとしても、まだ安全限界までは十分に余裕があるという安心も持たせられると思います。



今後の課題です。今回は、南海トラフが対象でしたが、関東地方に対して影響の大きな相模トラフの検討も必要で、これについては、既に着手しているところです。また、熊本地震で観測された長周期地震動も話題になっておりますが、今後このようなものにどう対処すべきかの検討も必要になると思われます。

また、設計の余裕度について、実際に、倒壊までどれぐらいの余裕があるかや、免震建築物がクリアランスを超え擁壁などへ衝突するとどのようになるか、などをしっかりみていこうということと、継続使用性のような非常に高い性能をもたせるために、さらになる先端技術が開発されてくると思いますが、それらに対する審査や評価の考え方も開発していく必要があるかと思えます。



これらのことも合わせまして、私たちはさらなる安全・安心に向け、関係する皆さんの力を結集し、オールジャパンでしっかりと対応させていただきたいと考えております。引き続き、皆様のご支援、ご協力をいただきますように、どうぞよろしくお願いいたします。

以上でございます。ご清聴ありがとうございました。

—了—