

東日本大震災の被害と防災の在り方

1. 揺れによる建物被害と防災システムの問題
2. 事業活動への影響と免震・制振の効果

境 有紀

筑波大学 教授

境 茂樹

(株) 間組 技術研究所 主席研究員

2012 年 7 月

文部科学省

科学技術政策研究所

科学技術動向研究センター

本資料は、2012 年 2 月 7 日に科学技術政策研究所で行われた、筑波大学教授 境有紀氏、
(株)間組主席研究員 境茂樹氏の講演内容を当研所所においてとりまとめたものである。

編 集 : 科学技術動向研究センター 市口 恒雄 客員研究官

問合せ先 : 〒100-0013 東京都千代田区霞が関 3-2-2

文部科学省 科学技術政策研究所 科学技術動向研究センター

T E L : 03-3581-0605 F A X : 03-3503-3996

科学技術政策研究所 所内講演会

演題:「東日本大震災の被害と防災の在り方」

日時: 2012 年 2 月 7 日 (火) 14:00～15:30 (受付開始 13:30)

場所: 新霞ヶ関ビル LB 階 201D 号室 科学技術政策研究所会議室

プログラム:

1. 揺れによる建物被害と防災システムの問題(45 分); 境 有紀 (筑波大学)
2. 事業活動への影響と免震・制振の効果 (25 分) ; 境 茂樹 ((株)間組)
3. 質疑応答 (20 分)

司会: 松村正三(科学技術政策研究所 客員研究官)

講演会趣旨: 東日本大震災では、甚大な津波被害に比べて、揺れによる建物被害は必ずしも大きくはなかった。それは、建物の耐震性能が向上したからではなく、最大震度7という大きな震度にも拘わらず、阪神・淡路大震災で観測された周期1～2秒の「キラーパルス」が発生しなかったからである。木造家屋か鉄筋高層建築かによって被害を与える周波数成分は異なるが、今回の大震災で建物被害が少なかったからといって、次の大震災でも被害が少ないであろうと推測することは大きな誤りである。

講演では、阪神・淡路大震災や東日本大震災を含めて地震による建物被害について紹介して頂き、これまでの防災システムの問題点や必要な対応策についてお話を頂く予定である。続いて、設計や建築の立場から、地震による被害軽減にどのような工夫がなされているのかについてもお話を頂く予定である。

加えて、災害からの被害低減や防災に関する従来の研究開発の方向性は正しかったのか、そして、今後新たに重要となる科学技術の要素があるとすれば、どのような点にあるのかについても議論を行う。

講師略歴:

1. 境有紀 氏: 1986 年東京大学工学部建築学科卒。1991 年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了 工学博士。同年東京大学地震研究所助手。その間、1995 年～1996 年カリフォルニア大学バークレー校地震工学研究センター客員研究員。2003 年筑波大学機能工学系助教授。2010 年筑波大学教授。研究テーマは、地震動の性質と建物被害の関係を探求し、それを地震災害軽減に結びつけること。

2. 境茂樹 氏: 1986 年東北大学工学部建築学科卒。1988 年東北大学工学研究科建築学専攻修了。1988 年(株)間組入社。(財)原子力発電技術機構出向を経て、(株)間組技術研究所主席研究員。土木・建築構造物の耐震設計に関する業務に従事。地震情報検索システム(RESER)や地震リスク評価システム(HASEL)の開発を行い、最近では、耐震化の費用対効果の明示など耐震研究の実務への応用を図っている。

東日本大震災の被害と防災の在り方：
「揺れによる建物被害と防災システムの問題」

境 有紀 （筑波大学）

【司会者】 司会を務めさせていただきます科学技術政策研究所の松村と申します。宜しくお願いします。本日の講演会は、「東日本大震災の被害と防災の在り方」というタイトルで、筑波大学の境有紀先生と(株)間組の境茂樹先生にご講演をお願いしております。両先生のご苗字が同じですが、特に御親戚ではないということを伺っております。ご苗字だけではなく、お年も近いですし、職場も筑波で近く、研究領域も大変近いということになります。

東日本大震災の発生からそろそろ1年近くになりますが、まだまだ問題が山積しております。東日本大震災では、甚大な津波被害が出ましたので、津波の方が何かと注視されます。津波に関しても、まだ理解できていない部分が多いと考えていますが、その話はさておき、揺れによる建物被害はどのような具合であったのかということについてご講演を頂きます。それを教訓にして、今後の地震対策・防災にどう役立てていけば良いかというところまで、考えを深めることができればと思っています。

最初は、筑波大学の境有紀先生にご講演を頂きます。境有紀先生の講演題目は、「揺れによる建物被害と防災システムの問題」ということです。私たちは、地震で建物が壊れるということに関心を持ちますが、その関係はそれほど単純なことではありません。色々と考慮しなければならない要素や条件が沢山ありますので、先生のお話は大変意義深いものだと考えております。境有紀先生は、東京大学の工学部を卒業されて大学院に入られた後、東大の地震研究所に在籍されました。その後、カリフォルニア大学バークレー校を経て、現在は筑波大学の教授をしておられます。震度階と建物被害との関係について、大変興味深いお話をして頂けると期待しております。それでは境先生、お願いします。

【境有紀】 ご紹介ありがとうございます。筑波大学の境と申します。宜しくお願いします。東日本大震災は3.11と呼ばれることもありますが、津波の甚大な被害で2万人近い人が亡くなられてからまだ1年経っていません。今日は津波被害ではなく、揺れの建物被害ということでお話をさせていただきます。(スライド1)

東日本大震災の被害と防災の在り方
揺れによる建物被害と
防災システムの問題
境 有紀
(筑波大学システム情報系)

(スライド1)

その中で、防災システムの問題に関しても触れたいと思います。津波警報や緊急地震速報などの防災システムは、人的被害を減らすシステムとして機能すべきものですが、現状では問題もあると考えています。今回も津波警報が上手く機能せずに、多くの方が亡くなられたことが問題点として挙げられています。そういうこともありますので、被害に関しては揺れによる建物被害のお話をさせて頂きますが、防災システムの問題点や改善点に関しては、もう少し広い観点からお話をさせて頂きたいと思っています。(スライド1)

まず初めに、お話をさせて頂く内容をまとめておきます(スライド2)。今回の震災は、震災名は「東日本大震災」ですが、地震の正式名称は、「平成23年東北地方太平洋沖地震」といいます。マグニチュード9.0、最大震度7の超巨大地震でした。3つの断層が動いたと言われており、その断層が時間差をもって動いたことで、非常に継続時間の長い強い揺れが記録されました。

甚大な津波被害が発生したことはご承知のとおりですし、2次災害として、原子力発電所の事故も長期に尾を引く問題となります。地震の揺れの性質上、建物の構造そのものには被害が生じなかったとしても、室内設備や機械などの生産設備に被害が出て、産業にも大きな打撃を与えました。このことについては、後程、境茂樹さんからお話があると思います。また、地震の継続時間が非常に長かったので、地盤の液状化の被害も生じています。そして、実はこれが最も大きいのではないかと思うのですが、あれだけの悲惨な状況を目にして、津波被害に遭われた方は勿論のこと、日本国民や世界中の人々も含めて大きなショックを受けたということです。自分に何かできないかとか、自分はこんなことをやって良いのだろうかなど、多くの人々の人生観を変えたという意味で、大変な地震でした。私も出来る限りのことはさせて頂きましたが、非常に長い1年だと感じました。

首都直下地震の発生確

率は30年間で70%と言われていましたが、最近では4年間で70%という予測が出て、大騒ぎになっています。首都直下地震でも、海の中に震源が無ければ津波は発生しません。関東大震災のように火災被害は心配されていますけれども、最も怖いのは、建

お話しさせていただく内容

- 東北地方太平洋沖地震(東日本大震災)
マグニチュード9.0, 最大震度7という超巨大地震
→ 甚大な津波被害, 原発災害, 室内設備被害,
地盤の液状化, 人々の心に与えたダメージ
- 揺れによる建物被害はどうだったのか?
- その原因は?
- 防災というものを考える上での大きな問題

(スライド2)

物が一瞬にして倒壊し、人がその下敷きになって亡くなるケースです。

東北地方太平洋沖地震は超巨大地震であり、大きな津波被害に比べて、揺れによる建物被害がどうだったのかということは、あまり伝わってきません。伝わってこないということは、大きな被害が少なかったということなのですが、実際にどうだったのかということについてまず紹介させていただきます。それを受けて、揺れによる建物被害だけではなく、広く防災について考えた時に、今のシステムにどのような問題があるか、どのようにすれば良いのかについてもお話をさせて頂きたいと思っています(スライド2)。

揺れによる建物被害に関しては、単純に言えば、揺れが強ければ、建物が強くても被害が出る可能性があるということです。つまり、揺れの強さはどうであったかということが問題になります。揺れの強さを表す指標として、気象庁震度階、ふつうは震度と呼ばれているものがあります。皆さんにも染み深いと思いますが、震度0から、1、2、3、4、5弱、5強、6弱、6強、そして震度7の10段階があります。

震度には大体の目安があって、震度6弱で全壊する木造家屋が出てくると言われています。震度7には、30%以上の木造家屋が全壊するという明確な定義があります。ですから、17年前の阪神・淡路大震災の時は、震度7を判定するのに1週間の時間がかかりました。被害調査をして、30%以上の木造家屋が全壊していることを確かめるのにそれだけの時間がかかったわけです。

そのような反省を受けて、現在は地震計の波形を自動的に解析して震度を算出する計測震度が使われるようになりました。また、震度5および6の地域での被害状況の幅が広がったので、1996年にそれぞれに強弱の震度が新たに設けられました。

それまでは、震度5の揺れは非常に強いが建物が倒壊するようなことはなく、震度6になると建物の倒壊が徐々に出てきて、震度7で建物の全壊率が30%になるというイメージでした。もう少し細かく言うと、震度6弱では建物の倒壊率は0~8%、震度6強では8~30%の木造家屋が全壊するということが想定されていました(スライド3)。

スライド3には、東北地方太平洋沖地震の震度分布も示してあります。色の濃い方から順番に、震度7、震度6強、震度6弱です。計測震度では、6.5以上が震度7、6.0以上6.5未満が震度6強、5.5以上6.0未満が震度6弱となります。この図から、非常に広い地域で震度6弱以上の震度を記録していることがわかります。従って、この広い地域で木造家屋が全壊していてもおかしくはありません。家屋が全壊する程の強い揺れが生じたわけで、実際に揺れを体験された方もこの中には多くおられると思います。私は、ニュージーランドの地震の被害調査に行っていましたが、津波被害の映像なども入ってきて、日本は大変なことになってしまったと思いました。

地震の揺れの大きさ(震度)

- 非常に広範囲で、建物が全壊するとされる震度6弱以上を記録
震度6弱: 全壊率 ~8%
震度6強: 全壊率 8~30%
震度7 : 全壊率 30%~
- 津波では甚大な被害が生じたが、地震の揺れによる被害はどの程度だったのか？



震度分布図

(スライド3)

今回の大震災で、揺れによる建物被害が多かったか少なかったかということに関しては、どのような観点で見るかに依存するので注意が必要です(スライド4)。非常に広い範囲で強い地震動が起きていますから、全体で何棟の建物が被害を受けたかを数えると、結構大きな数になると思います。つまり、被害を受けた建物数は、揺れの強さだけでなく、強い揺れが起きた範囲の広さにも関係します。また、広い砂漠の真中で超巨大地震が起きても被害はゼロですが、都会で起きれば被害を受ける建物数は多くなります。揺れの範囲や建物の多い少ないに関係なく被害の大きさを判定するには、被害率という指標があります。被害を受けた建物だけを調査する方法もありますが、その報告書

被害調査をする際に注意しないといけないこと

被害を受けた建物だけを調査して集めると、まるで全ての建物が被害を受けているかのような印象
被害の有無にかかわらず、全体を万遍なく調査
それは不可能なので、「強震観測点周り」という、地震の揺れの記録があり、かつ、エリアは限定されているが、ある意味「任意」に選ばれた場所を被害の有無にかかわらず万遍なく調査、報告する

(スライド4)

を見ると全ての建物が被害を受けたかのような錯覚に陥ります。もちろん被害を受けなかった建物も多く存在するわけです。では、どの程度の割合で被害にあったのか、つまり被害率を調べるためには、どうすれば良いかということになります。それには、被害の有無にかかわらず全体を万遍なく調査する必要があります(スライド4)。

被害が無かったところを調査することにより、被害があったところと何が違っていたのかということも分かってきます。例えば、建物の耐震性能が違うのか、揺れの強さや種類が違うのかということも分かってきます。建物に被害が起きるか起きないかという境目を見つけるためには、被害の有無に関係なく、全ての建物の調査を行う必要があります。しかも、部分的で細かな調査ではなく、全体的かつ統一的な調査が必要です。

ただ、茨城県、福島県、宮城県、岩手県と広い範囲で、全ての建物を調査するのは不可能です。従って、私達は、信頼できる地震計を中心にして半径何百メートルの範囲、実際には半径200メートルの範囲ですが、その範囲を被害の有無にかかわらず万遍なく調査するという方法をとっています(スライド4)。

日本には、1996 年以降に整備された、合計で約 5,000 の強震観測点があります。(独)防災科学技術研究所の K-NET と KiK-net が 1,381 地点あり、気象庁や各自自治体の観測点もあります(スライド5)。通常は、震度6弱以上を観測した全ての強震観測点の周辺での被害調査をしています、今回は、震度6弱以上の揺れを観測した強震観測点は200地点以上になります。全ての地点で調査



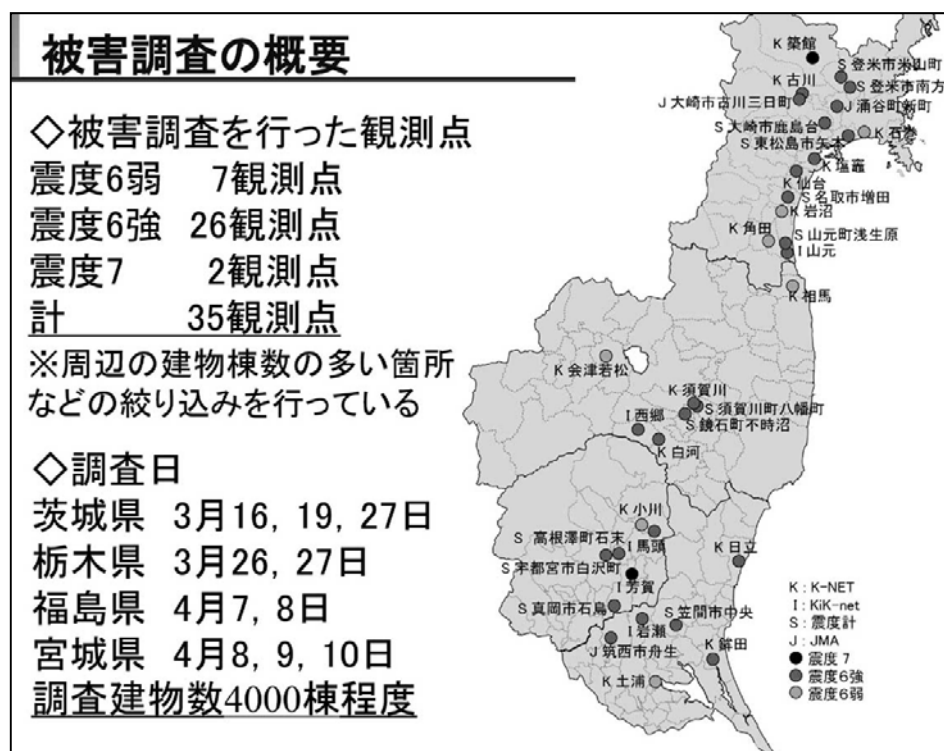
(スライド5)

すると半年ぐらいかかりますので、幾つかの地点に絞り込んで調査を行いました。強震観測点周りの調査では、その地点での地震動の波形など揺れの記録が残っていることが大きなメリットです。ある建物が壊れていた時に、その場所の揺れの記録がなければ、揺れとの関係を議論することは不可能です。従って、どれだけの大きな揺れがあったのか、どのような性質の揺れであったのかという記録があることは、非常に重要です。

そのような揺れの記録があって、その数が多い場合には全体ではなく数を限定せざるを得ないのですが、震度6弱以上で任意に選んだ地点において全棟調査を行えば、統計的な結論を出すことができます。逆に、被害が起きた地域やあるいは起きていない地域を恣意的に選べば、統計的な結論を出すことはできません。このように、震度6弱以上の任意の地点で、被害の有無に関わらず万遍なく調査すれば、建物被害が全体としてどうだったのかが推測できます。

実際に私達が選んだ35の観測地点をスライド6に示してあります。茨城県から宮城県まで4県の調査を、1ヶ月ほどにわたって行いました。観測地点を限定したと言っても、調査した棟数は、合計で4,000棟あり、観測地点も広く散らばっています。震度で言えば、震度7が2観測点、震度6強が26観測点、震度6弱が7観測点になります。また、観測点の周りに建物がなければ調査はできませんので、周囲に建物数が少ない観測点は、調査から除外しています。

調査の方法としては、まず強震観測点の位置を見つけ、その位置をダウンロードした住宅地図上



被害調査の方法

◇観測点を中心に半径200m以内

- ・地震動が同一と見なす
- ・被害率算出に十分な建物数

2つの条件のバランス

◇建物全数を調査

(倉庫や車庫は対象外)

◇外観から全壊、大破を判定

(津波、地盤の被害は対象外)

◇構造種別、階数

屋根瓦被害の有無を記録

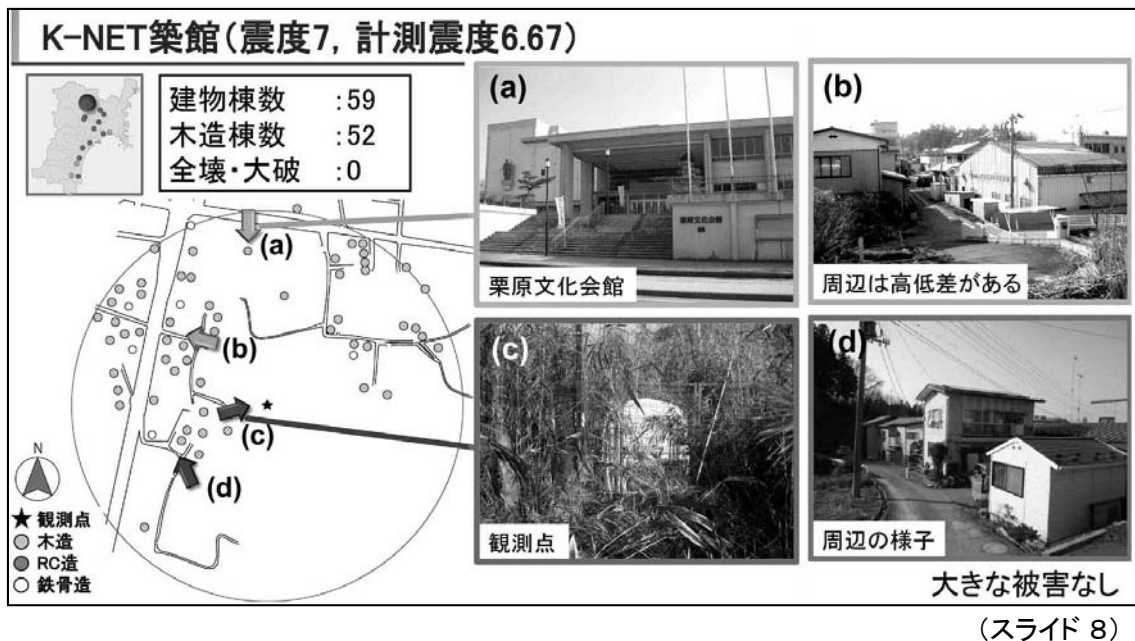
- ★ 観測点
- 全壊木造
- 瓦被害木造
- 木造
- RC造
- 鉄骨造

被害調査結果の例

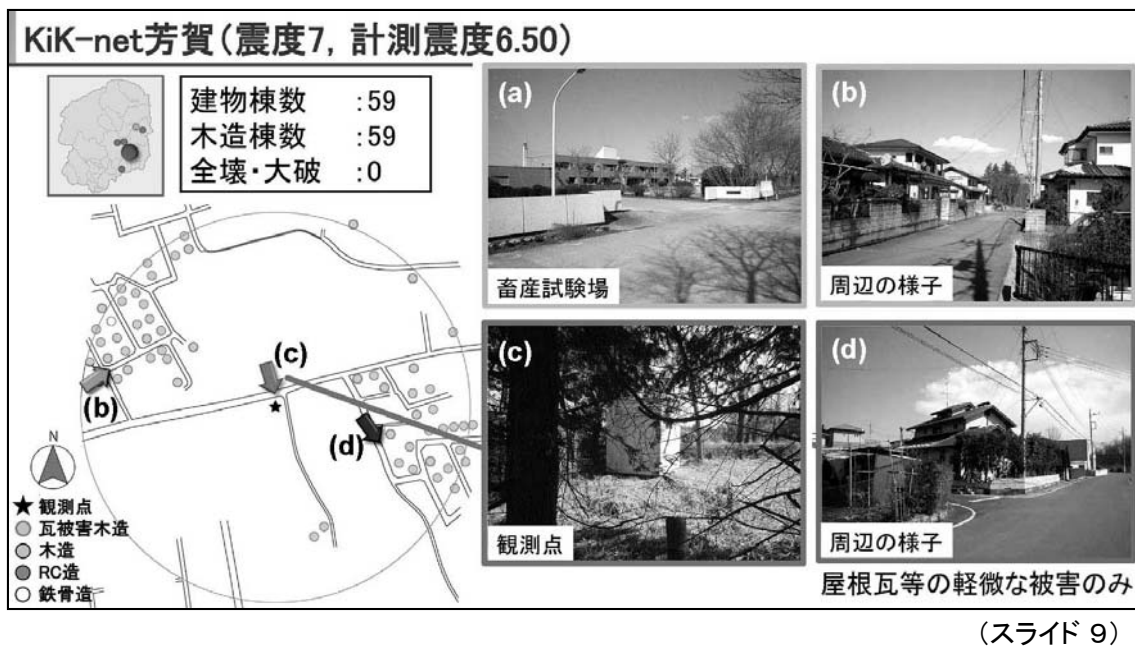
(スライド 7)

に★印を付けて、そこを中心に半径 200mの円を描きます(スライド7)。そして、その範囲内の全ての建物の実地検分を行い、全壊、大破、瓦屋根や壁の被害、無被害というふうに、1つずつ判定していきます。また、木造か鉄筋コンクリート造(RC造)といった建物の構造種別や階数も記録します。但し、倉庫や車庫は、調査の対象外としています。ここで、観測点を中心に半径 200m 以内としている理由は、その範囲内なら、地震動がほぼ同一と見なせるだろうということと、被害率を求めるのに十分な建物が存在するだろうということの2つの理由があります。つまり、この2つの条件のバランスを考慮して、200m と決めているわけです。スライド7の例では、全壊した木造家屋が幾つかあります。家屋に被害がなくても、瓦屋根がずれている場合には印を付けて記録に残します。このような方法で調査しますが、いくつかの調査地点での実例を紹介させていただきます。

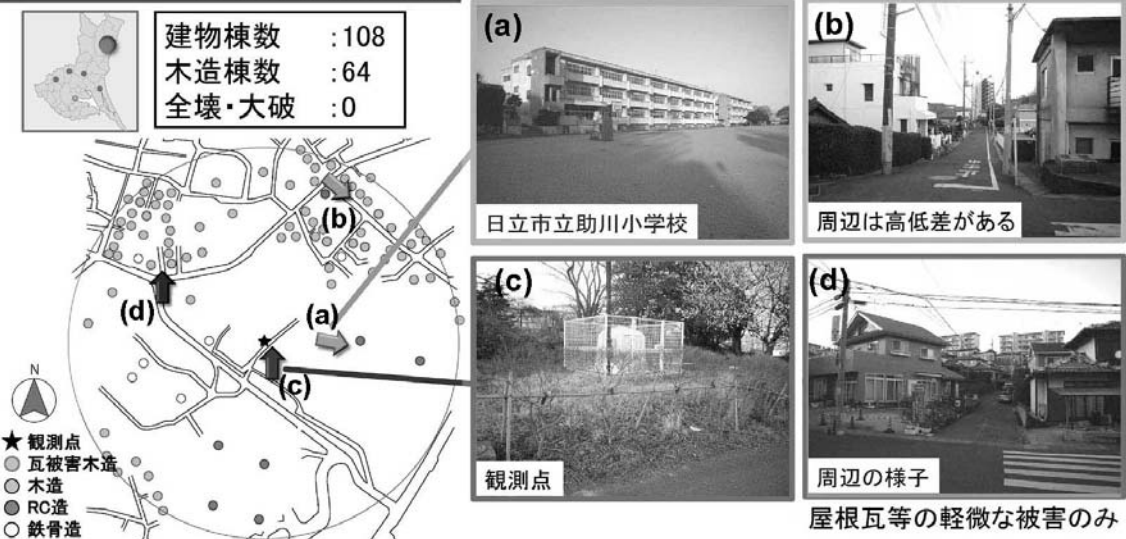
スライド8は、宮城県栗原市にあるK-NET 築館という強震観測点周りの調査です。ここでは、震度7を観測しています。地震計は丘の上の林の中にあり、藪をかき分けて写真に撮っています(スライド8(c))。半径 200m の範囲内には、建物の数はそれほど多くなく、全部で59棟です。震度は7でしたが、全壊や大破の建物は1棟もありませんでした。地震計のすぐ近くに、1階建ての古い木造家屋があるのですが、ほとんど被害がない状態でした。棚や家具も倒れなかったそうです。



スライド9は、栃木県の KiK-net 芳賀という強震観測点での調査です。気象庁の震度算定法に従って計算すると、ここも震度7になります。ここでは、屋根瓦がずれている家屋がありましたが、被害軽微という判定になりました。木造家屋では、全壊、半壊、被害、被害軽微の4段階で判定しています。ここは、全59棟の全てが木造家屋でしたが、全壊・大破の被害はゼロでした。以前には、30%以上の木造家屋が全壊することが震度7の定義でしたが、現状とは大きな開きがあります。現在の震度は、機械で判定して四捨五入で求めるので、計測震度 6.0～6.49 が震度6強、計測震度 6.5 以上が震度7です。



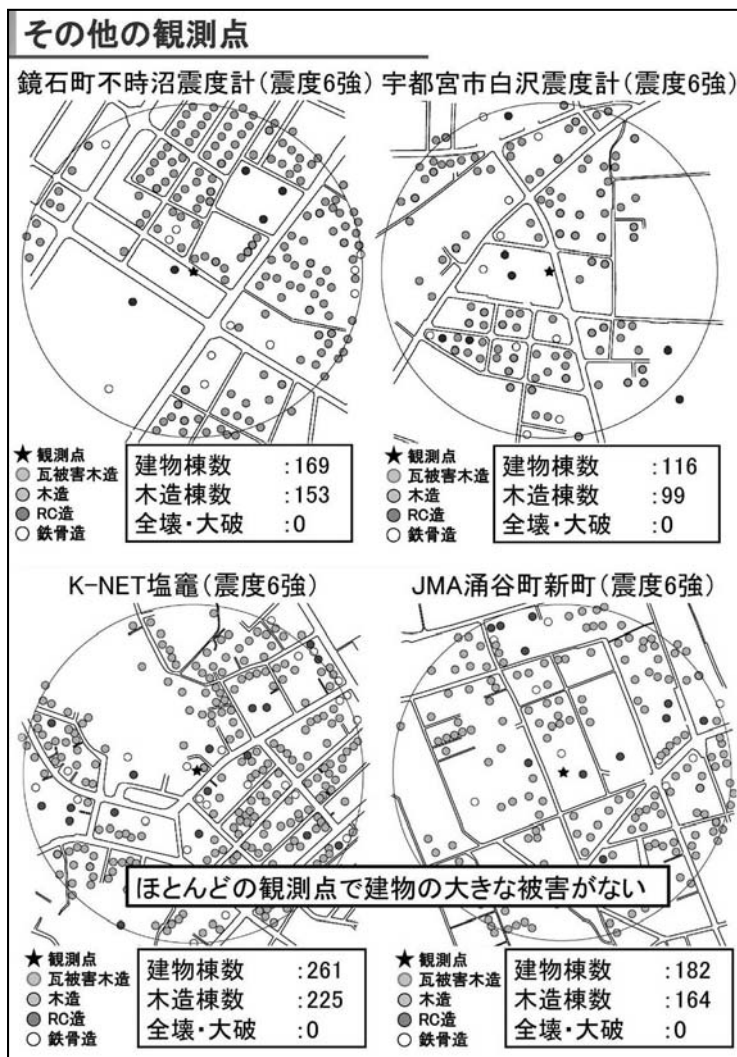
K-NET日立(震度6強, 計測震度6.46)



(スライド 10)

スライド10は、茨城県のK-NET 日立という強震観測点周りの調査です。計測震度が6.46 ですから限りなく震度7に近い震度6強です。観測点は、小学校のすぐ側にあります。ここでも、全壊した木造家屋や大破した鉄筋コンクリート造りの建物は1棟もありません。

スライド11に、栃木県や宮城県の他の強震観測点での調査結果を示していますが、建物の全壊や大破といった大きな被害はほとんどの地点で観測されていません。



(スライド 11)

しかし、被害があった地点もいくつかあります。宮城県の大崎市古川三日町というところで、気象庁(JMA)の地震計では震度6強が出ています(スライド12)。ここでは、古い木造建物や、1階が商店となっていて強度が低い木造建物が全壊しています。全部で7棟が全壊・大破していますから、被害率は約3%です。震度6強ですと、被害率は10~30%のはずですが、それに比べて低い数値になっています。

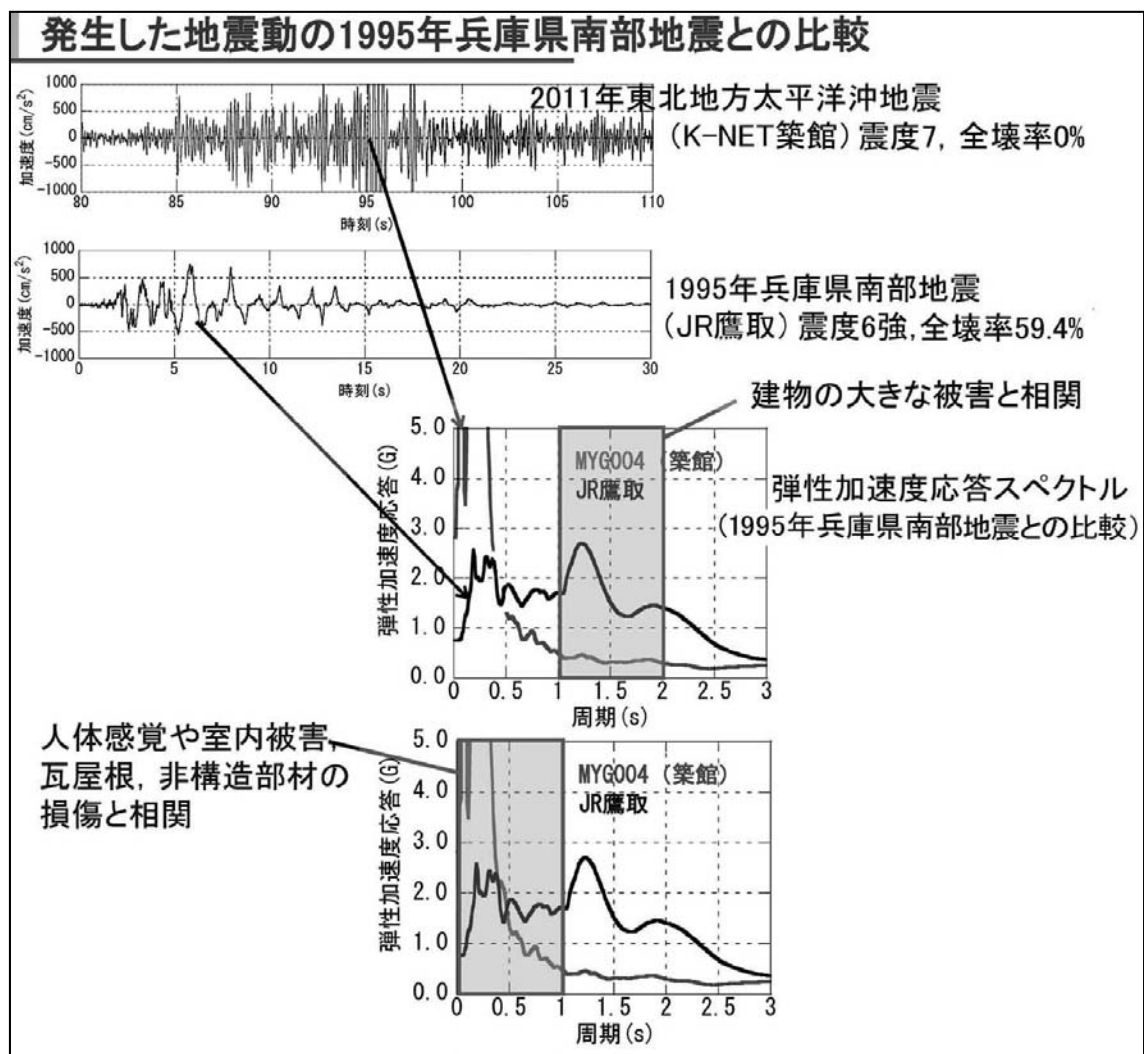


福島県の須賀川市でもやはり同程度の被害がありました。スライド13に調査結果を纏めてあります。3箇所の観測点で、それぞれ1棟の全壊・大破があります。全部で 4,000 棟あまりの建物を調査したのですが、ほぼ震度6強以上の調査地点での建物は全部で約3,000 棟になります。その中で、全壊・大破した建物は14棟ですから、全壊・大破率は 0.47%になります。震度6強の場合の全壊率の目安は8~30%ですから、それに比べて 0.47%という値は極めて小さな値になっています。

被害調査結果									
観測点名	計測震度	棟数	全壊・大破数	全壊・大破率(%)	観測点名	計測震度	棟数	全壊・大破数	全壊・大破率(%)
JMA大崎市古川三日町	6.21	257	7	2.72	K-NET古川	6.16	285	0	0.00
JMA筑西市舟生	6.06	27	0	0.00	K-NET鉾田	6.41	17	0	0.00
JMA涌谷町新町	6.02	182	0	0.00	K-NET土浦	5.63	161	0	0.00
KiK-net岩瀬	6.24	17	0	0.00	k-NET日立	6.46	108	0	0.00
KiK-net西郷	6.00	8	0	0.00	鏡石町不時沼震度計	6強	169	0	0.00
KiK-net馬頭	6.14	14	0	0.00	須賀川市八幡町震度計	6強	229	5	2.18
KiK-net芳賀	6.50	59	0	0.00	宇都宮市白沢町震度計	6強	116	0	0.00
K-NET小川	5.97	146	1	0.68	笠間市中央震度計	6強	101	0	0.00
K-NET会津若松	5.86	199	0	0.00	高根澤町石末震度計	6強	155	1	0.65
K-NET岩沼	5.99	87	0	0.00	山本町浅生原震度計	6強	108	0	0.00
K-NET角田	5.83	159	0	0.00	真岡市石島震度計	6強	76	0	0.00
K-NET塩竈	6.02	261	0	0.00	大崎市鹿島台震度計	6強	123	0	0.00
K-NET白河	6.11	85	0	0.00	登米市南方町震度計	6強	3	0	0.00
K-NET須賀川	6.00	75	0	0.00	登米市米山町震度計	6強	18	0	0.00
K-NET仙台	6.38	21	0	0.00	東松島市矢本震度計	6強	200	0	0.00
K-NET相馬	5.85	159	0	0.00	名取市増田震度計	6強	181	1	0.55
K-NET築館	6.67	59	0	0.00	K-NET石巻	5.93	-	-	-
震度6弱: 全壊率 ~8%					震度6強以上の合計		2954	14	0.47
震度6強: 全壊率 8~30%					震度の大きさに割に建物の被害が少ない				
震度7 : 全壊率 30%~									

(スライド 13)

それでは、何故、震度の大きさの割に建物の被害が少なかったのかという理由が問題となってきました。その理由は地震の波形にあります。スライド14に、建物被害の大きかった阪神・淡路大震災の時の波形と比較してあります。この時の地震名は、1995年兵庫県南部地震と言います。上側の波形は、先程から話に出ている宮城県栗原市にある K-NET 築館で観測された東北地方太平洋沖地震の地震波形です。下側は、JR鷹取駅敷地内に設置された地震計で観測された兵庫県南部地震の地震波形です。東北地方太平洋沖地震では、震幅の大きな細かい地震動が観測されているのに対し、兵庫県南部地震では、周期の長いゆっくりとした地震動が観測されています。また、K-NET 築館強震観測点では震度7で建物全壊率が0%であるのに対し、JR鷹取観測点では震度6強で建物全壊率は 59.4%もあります。つまり、JR鷹取駅周辺では、3棟に2棟が全壊してしまったことになります。地震の波形を見ても違いは分かるのですが、これを周期スペクトルの形で書くと、その違いがより明確になります。地震の揺れには、色々な周期の成分が含まれていますが、どのような周期の



(スライド 14)

成分の揺れが強かったのかということが、スペクトル表示から分かります。

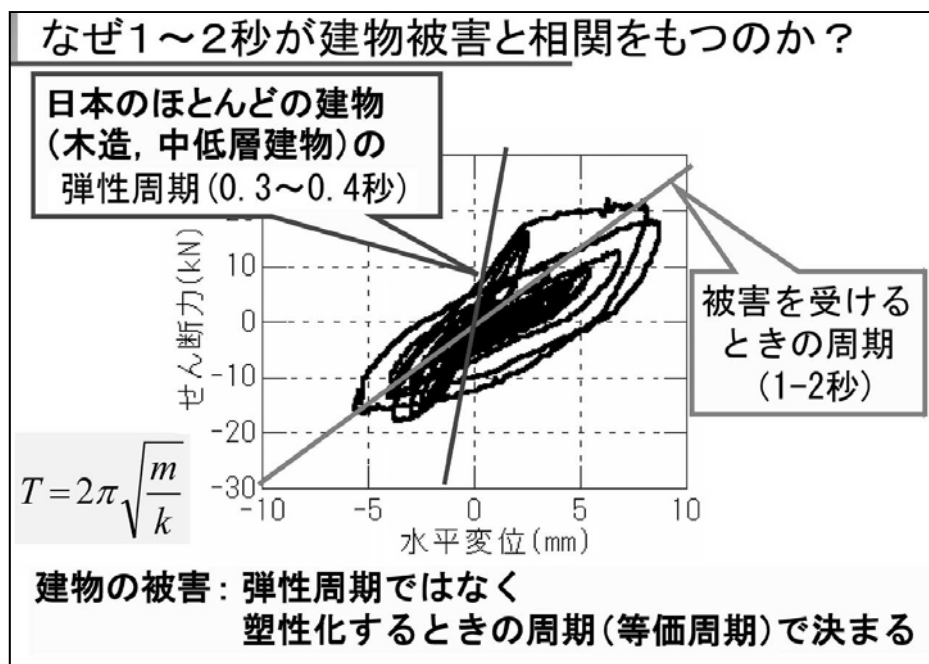
2つの地震波のスペクトルを比較した図をスライド14の下側に示しています。縦軸は、弾性加速度応答という揺れの強さを表す量です。東北地方太平洋沖地震では、周期 0.5 秒以下の速い揺れの強度が大きかったことが分かります。これに対して、兵庫県南部地震では、周期1～2秒のゆっくりした揺れの強度が大きくなっています。実は、建物に大きな被害を与えるのは、この周期 1～2 秒の地震動なのです。周期1～2秒の揺れだけを比較すると、東北地方太平洋沖地震は兵庫県南部地震の大体5分の1程度しかありません。つまり、建物にとっては、東北地方太平洋沖地震よりも兵庫県南部地震の揺れの方が5倍強かったということになります。

一方、震度というのは、どちらかと言えば、周期が1秒以下のところを測っています。だから、周期が1秒以下の揺れが大きかった東北地方太平洋沖地震では、建物の被害に比べて地震の震度が大きくなっています。1秒以下の周期帯の揺れは、人体が感じる揺れの強度に概ね一致しており、室内被害、瓦屋根などの非構造部材に被害をもたらします。後程お話があるかと思いますが、生産設備などに被害が出るのは、1秒以下の周期帯の揺れが強い場合です。

人間の感覚、木造家屋、そして超高層建物を比べますと、人間は、1秒以下の短い周期の揺れを強い揺れと感じます。一方、木造家屋は、周期1秒から2秒の揺れで被害が大きくなります。これに対して超高層建物では、周期が2秒以上のゆっくりとした揺れの時に、建物が大きく揺れるという現象が起こります。周期が5秒以上のさらにゆっくりとした地震動を、「長周期地震動」と呼んでいます。それに対して、周期1～2秒の地震動を「やや短周期地震動」、周期1秒以下の地震動を「短周期地震動」と呼んでいます。

今お見せしているビデオは、地震動に対する建物の応答の模型実験です。---<動画>---。模型実験なので、少し大きめに揺れますが、実際の建物は、これほど揺れる訳ではありません。このように、周期の短い揺れや周期の長い揺れの時には、震度6弱相当の揺れであっても建物は倒れませんが、周期が1～2秒の揺れの時には、建物はすぐに倒れてしまいます。震度が同じでも、揺れの周期が違うだけで、建物への影響は異なります。

以上の話をすると、共振が起きているのですね、と皆さん納得されるのですが、実際はそう単純な話ではありません。この場合の共振とは、地震動の周期と建物の固有周期とが一致した時に、建物が非常に大きく揺れるという現象の事です。木造家屋や10階建て以下の鉄筋コンクリートや鉄骨造など、日本のほとんどの建物の固有周期は 0.3～0.4 秒です(スライド15)。従って、共振による揺れで建物に被害が出るのなら、今回の東日本太平洋沖地震で建物にもっと被害が出ているはずですが、実際にはそうではありません。何故、周期 0.3～0.4 秒の地震動ではなく周期1～2秒の地震動



(スライド 15)

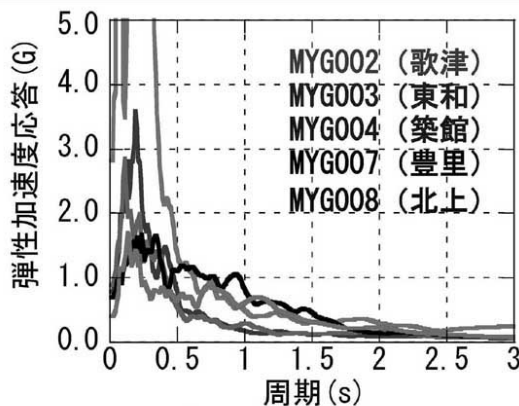
で建物被害が大きくなるのかということは、不思議でかつ分かり難い現象です。

建物には非線形性があって、変形するに従って固有周期が延びていくと考えれば分かりやすいかもしれません。フックの法則に従う弾性限界を超えると、少しヒビが入るとかの塑性変形が起き始めます。そして、全壊する周期は、固有周期の 3～4 倍になります(スライド15)。固有周期の 0.3～0.4 秒に、3～4 をかけると 1～2 秒ぐらいになります。ですから、建物被害は、弾性限界内の固有周期つまり弾性周期ではなく、建物が塑性化する時の等価周期で決まる、ということになります。

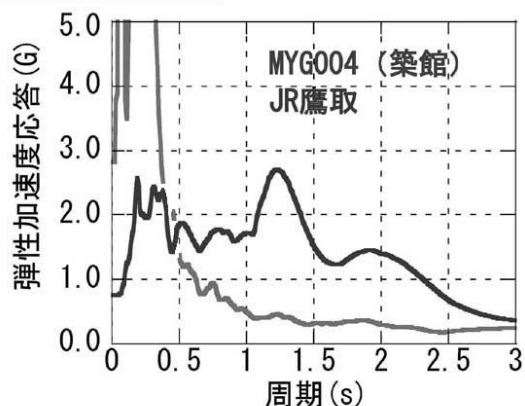
しかし、良く考えると非常に不思議な現象で、周期 0.3～0.4 秒の地震動が全くなくても、周期1～2秒の地震動だけで、家屋は倒壊します。共振しないので、揺れ始めないはずですが、建物があたかも自分が壊れる時の周期を知っているかの如く、周期1～2秒の地震動で壊れます。これは、直感的には理解しにくい現象ですが、非線形微分方程式を解くと、その様な解が得られます。壊れる周期でいきなり共振するという解は、非線形微分方程式から出てきます。数学的にも間違いない現象ですが、感覚的には良く分からない不思議な現象です。このように、アカデミックでミステリアスな部分も結構ある、ということを頭の片隅にでも入れておいて頂ければと思います。

今回の東北地方太平洋沖地震の特徴の1つは、0.5 秒以下の短い周期が卓越した地震動であったということです。K-NET 築館だけではなく、他の観測地点でも「短周期地震動」が観測されています(スライド16)。短周期地震動が卓越しているので震度は大きくなりますが、建物の被害に結びつく周期1～2秒の揺れの強度が小さかったのもこの地震の特徴です。実際に、周期1～2秒の揺れの強度は、兵庫県南部地震の5分の1程度しかありませんでした。従って、震度の大きさの割に建物の

発生した地震動の性質



弾性加速度応答スペクトル
(宮城県の一部)



弾性加速度応答スペクトル
(1995年兵庫県南部地震との比較)

1秒以下の短周期が卓越した地震動であり、
震度は大きくなるものの、
建物の大きな被害に結びつく1-2秒応答が小さい
→建物の大きな被害はさほど生じなかった
→震度6強, 7でこの程度の被害で済んだのだから
建物の耐震性が高い、というわけではない

(スライド 16)

被害はさほど生じなかったということになります。震度の大きかった今回の地震でも住宅は倒壊せずに大丈夫だったから、今後の地震でも大丈夫だと考えることは、非常に危険です。耐震性能が向上したわけではなく、耐震性能が低い建物でも壊れない程度の揺れの強さしか生じなかったということです。

このことは非常にミステリアスです。これだけの巨大地震で震度が大きかったにも拘わらず、建物に対する破壊力のある周期1～2秒の地震動が小さかったということは、地震学の専門家の先生も理由が分からないと仰っています。これが今回の地震において非常に不思議なことだと言えると思います。ですから、少なくとも震度6強や震度7でこの程度の建物被害で済んだのだから、建物の耐震性能は充分なのだろうと考えてはいけないということです。今回、これだけの巨大地震でも何とか乗り切ったので建物は大丈夫だとは決して思わないで欲しいと思います。

東北地方太平洋沖地震の揺れによる 建物被害のまとめ

- 揺れによる建物被害は、非常に小さい
- その理由は、地震の揺れが「弱かった」
(建物被害に結びつく1-2秒が小さかった)から
→建物の耐震性が高いからではない
- 今回の超巨大地震で大丈夫だったからと言って、
これから大地震が来ても大丈夫
とはゆめゆめ思うべからず！
→今回起こったことは、特殊なことなのか？

(スライド 17)

東北地方太平洋沖地震の揺れによる建物被害をスライド17に簡単にまとめておきます。揺れによる建物被害は小さかったことは、調査の結果から明らかです。その理由は、この地震では、建物に対する地震の揺れが弱かったからです。建物被害に結びつく周期 1～2 秒の揺れが小さかったからであり、建物の耐震性が高かったからではありません。

このことは、今回の超巨大地震で建物が大丈夫であったからと言って、今後の大地震でも建物は大丈夫であるとは限らないということです。今回起きた地震は非常に不思議なところが多いのですが、それが特殊なことなのかというと、そうでもありません。津波の高さなど様々なことが想定外と言われているのですが、今回の揺れの周期と建物被害という観点から言えば、全て想定内の関係であり、特殊なことではないのです。これは、兵庫県南部地震の時以降、これまでも起きたことです。

兵庫県南部地震以降、建物被害を起こすとされる震度6弱以上を記録した地震は14回あります(スライド18)。このように沢山ありますが、過去の地震において、揺れの性質と建物被害の関係がどうだったかということを調べる必要があります。

過去の地震ではどうか？

	最大震度
1995年兵庫県南部地震	7
1997年鹿児島県北西部地震	6弱
2000年鳥取県西部地震	6強
2001年芸予地震	6弱
2003年宮城県沖の地震(三陸南地震)	6弱
2003年宮城県北部地震	6強
2003年十勝沖地震	6強
2004年新潟県中越地震	7
2005年福岡県西方沖地震	6弱
2005年宮城県沖の地震	6弱
2007年能登半島地震	6強
2007年新潟県中越沖地震	6強
2008年岩手・宮城内陸地震	6弱
2008年岩手沿岸北部の地震	6弱
2009年駿河湾の地震	6弱

(スライド 18)

2009年駿河湾の地震

被害調査を行なった観測点

- ・震度6弱のすべての観測点 8観測点(震度観測点 JMA観測点 防災科学技術研究所KiK-net観測点)
- ・震度5強を観測した一部のK-NET観測点 4観測点

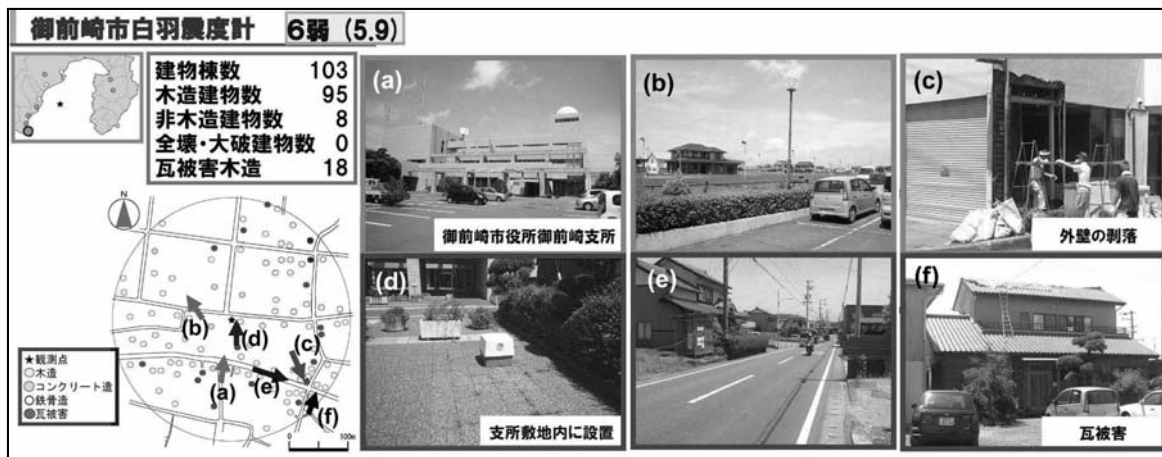
調査日程

2009年8月12・13日(計2日間)

(スライド 19)



2009年には、駿河湾を震源とする地震が起きていて、東名高速道路の盛り土が崩れ落ちました。この時も被害調査をしました、やはり被害は少なかったのです。震度6弱を観測した8観測点と震



(スライド 20)

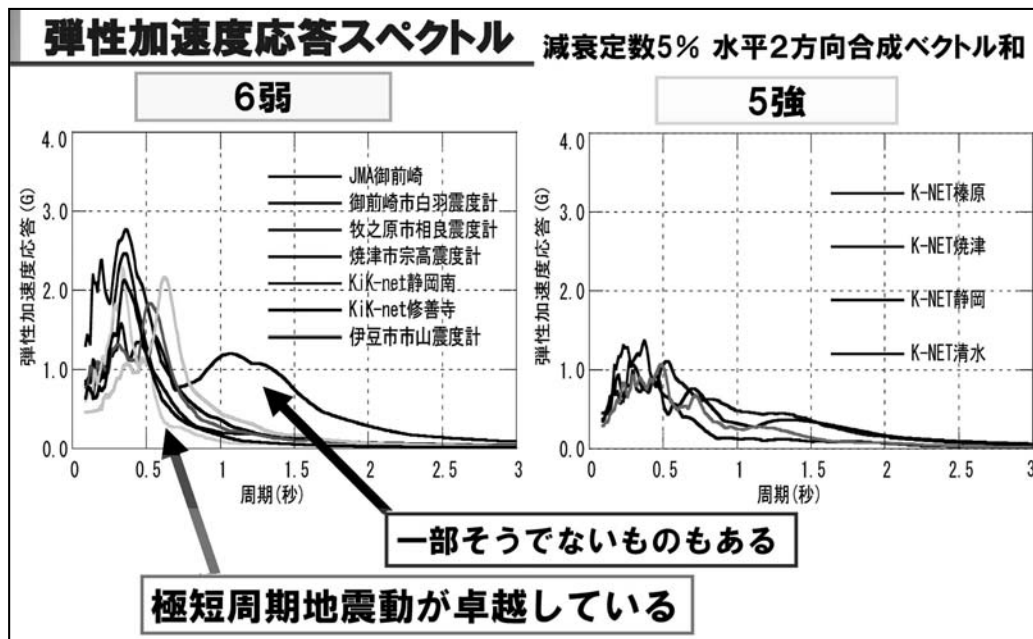
被害調査まとめ(駿河湾を震源とする地震)										
6 弱										
観測点名	計測震度	観測点から半径200mの範囲内での被害状況	建物棟数					瓦被害率 (%)	全壊率 (%)	
			木造	非木造	全壊	半壊	瓦被害			
1 JMA御前崎市御前崎	5.7	屋根瓦被害あり	131	7	0	0	6	4.35	0	
2 御前崎市白羽震度計	5.9	屋根瓦被害多数、外壁被害あり	95	8	0	1	18	17.48	0	
3 牧之原市相良震度計	5.9	屋根瓦被害多数	83	28	0	0	19	17.12	0	
4 牧之原市静波震度計	5.5	屋根瓦被害多数	154	33	0	0	17	9.09	0	
5 焼津市宗高震度計	5.6	屋根瓦破損多数	45	11	0	0	9	16.07	(0)	
6 KiK-net静岡南	5.6	屋根瓦被害あり、公営プールの内装被害	14	8	0	0	1	4.55	(0)	
7 KiK-net修善寺	5.7	被害なし	1	0	0	0	0	0.00	(0)	
8 伊豆市市山震度計	5.5	屋根瓦被害あり	65	19	0	0	2	2.38	(0)	
9 K-NET榛原	5.4	屋根瓦被害多数	87	27	0	0	8	7.02	0	
10 K-NET焼津	5.4	屋根瓦被害あり	229	42	0	0	5	1.85	0	
11 K-NET静岡	5.1	屋根瓦被害あり	334	214	0	0	1	0.18	0	
12 K-NET清水	5.2	被害なし	35	29	0	0	0	0.00	(0)	

5 強 全観測点周辺において、大きな建物被害は見られなかった

(スライド 21)

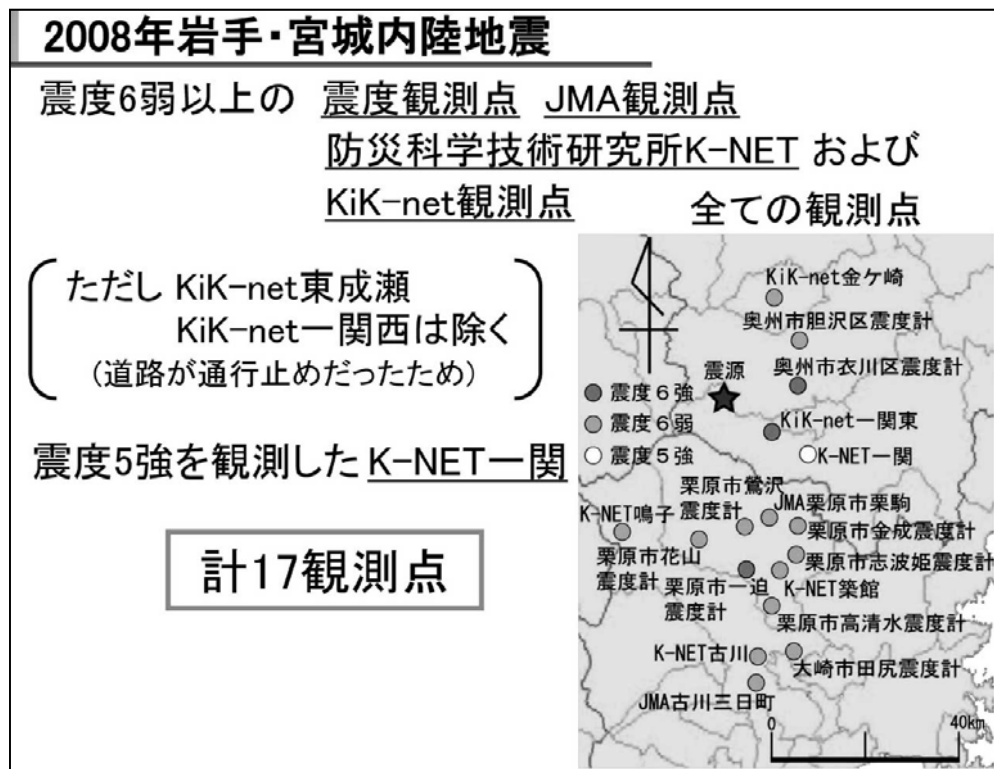
度5を観測した4観測点での調査を行いました(スライド19)。

スライド20は、静岡県御前崎市にある観測点での調査例です。外壁や瓦の被害は少し見られますが、全壊や大破といった大きな被害はありませんでした。他の観測点でもほぼ同様に、震度6弱にも拘わらず、全壊・大破率はゼロでした(スライド21)。この地震のスペクトルを見ると、周期が1秒以下の短周期地震動が卓越していました(スライド22)。ですから、東日本太平洋沖地震の場合とよく似ています。



(スライド 22)

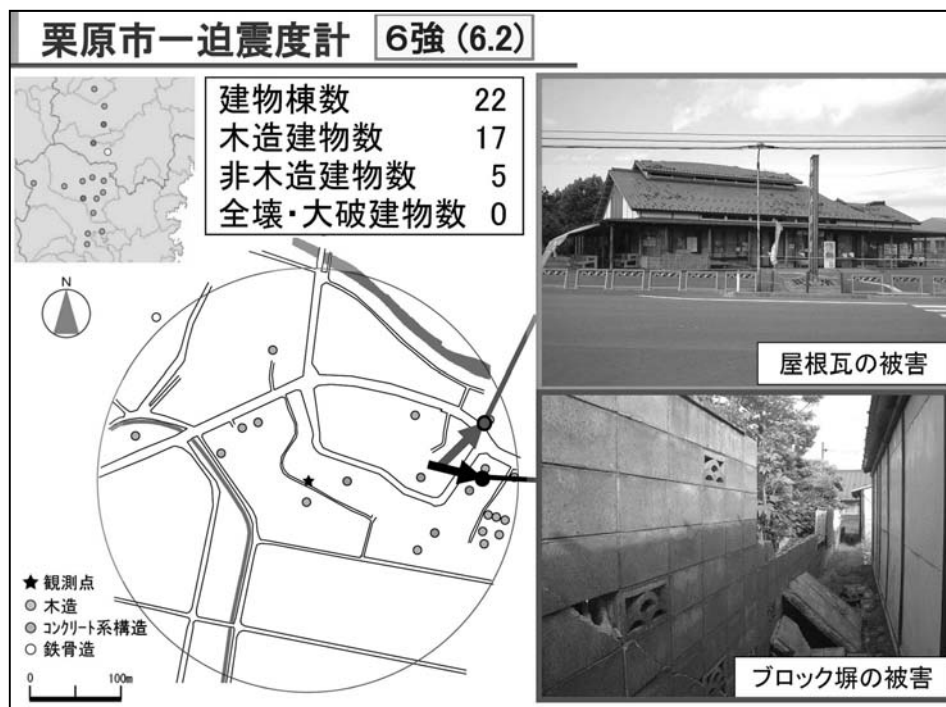
2008年には岩手・宮城内陸地震が起きていて、山の中で崖崩れが起こり、十数人の方が亡くなった地震です。この時も被害調査に行き、震度6弱以上の合計17観測点での調査を行いました(スライド23)。観測点は、今回の東日本太平洋沖地震の観測点とかなり重複しています。



(スライド 23)



(スライド 24)



(スライド 25)

東日本太平洋沖地震の時は震度6強でしたが、岩手・宮城内陸地震の時は震度6弱でした。スライド24および25は、宮城県の大崎市と栗原市の観測点での調査例です。外装材や瓦屋根の被害はありますが、建物の全壊や大破といった被害はありませんでした。

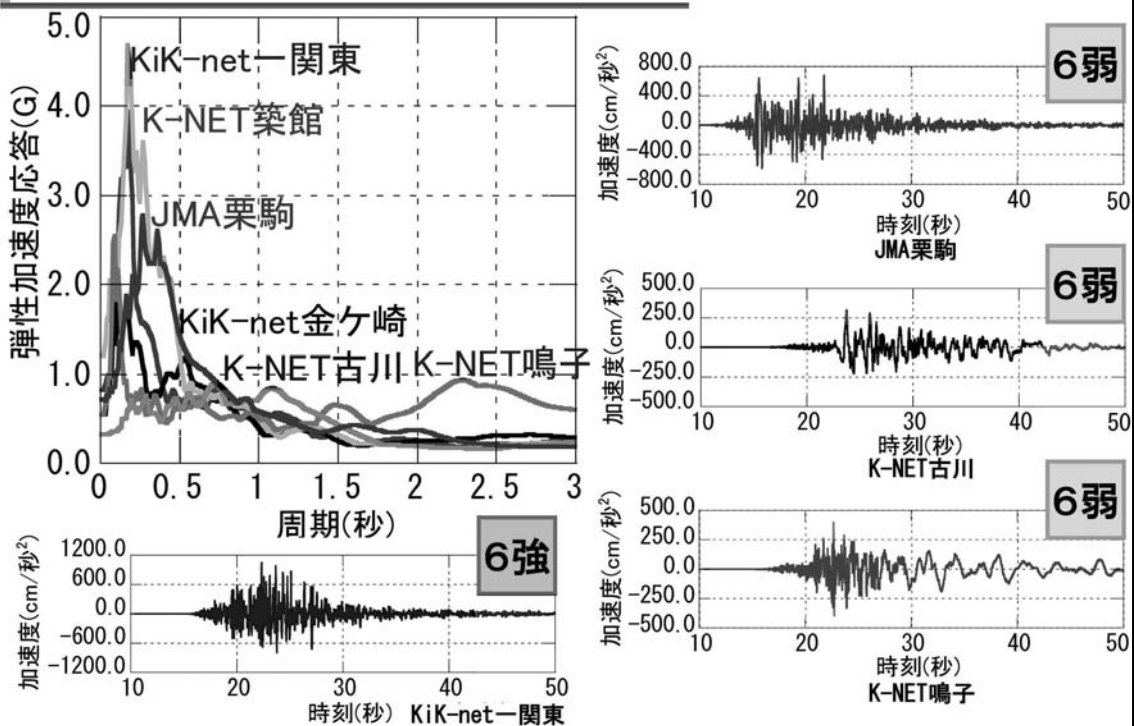
被害調査まとめ

	強震観測点	計測震度	震度計から半径200mの範囲内での被害状況	建物棟数			
				全体	木造	非木造	全壊・大破
6強	栗原市一迫震度計	6.2	外装材の剥落、ブロック塀の倒壊、屋根瓦の損傷など	22	17	5	0
	奥州市衣川区震度計	6.1	RC造建物外壁のひび割れ、屋根瓦の損傷、地盤被害など	38	31	7	0
	KiK-net一関東	6.0	公民館および体育館の外装材の損傷	4	4	0	0
	JMA栗原市栗駒	5.9	外装材の剥落など軽微な建物被害	14	13	1	0
	栗原市鶯沢震度計	5.8	老朽化した倉庫の倒壊、軽微な建物被害	40	32	8	0
6弱	K-NET築館	5.7	特に被害なし	53	47	6	0
	JMA大崎市古川三日町	5.6	外装材の剥落など軽微な建物被害	284	261	23	0
	栗原市金成震度計	5.6	傾いた倉庫、外装材の剥落、地盤被害など	26	14	12	0
	K-NET古川	5.5	外装材の剥落、窓ガラスの破損などの軽微な建物被害	281	255	26	0
	K-NET鳴子	5.5	特に被害なし	15	14	1	0
	KiK-net金ヶ崎	5.5	ブロック塀の被害、地盤被害	12	11	1	0
	大崎市田尻震度計	5.5	外装材の剥落、RC造建物基礎部のひび割れなど	110	99	11	0
	栗原市高清水震度計	5.5	外装材の剥落など軽微な建物被害	111	101	10	0
	栗原市花山震度計	5.5	外装材の損傷、ブロック塀の被害など	38	30	8	0
	栗原市志波姫震度計	5.5	RC造建物外壁のひび割れ、外装材の剥落など	57	43	6	0
5強	奥州市胆沢区震度計	5.5	特に被害なし	19	14	5	0
	K-NET一関	5.0	特に被害なし	164	131	33	0

全観測点周辺において、大きな建物被害は見られなかった

(スライド 26)

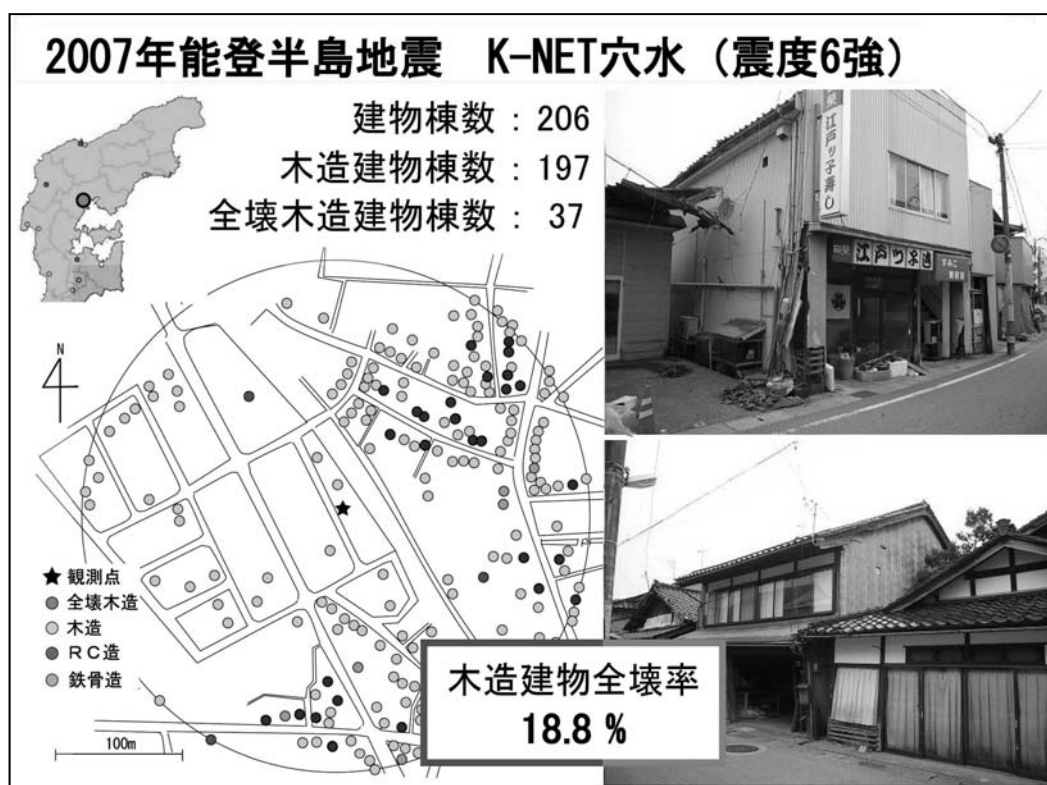
弾性加速度応答スペクトル(減衰定数5%,水平2方向ベクトル合成)



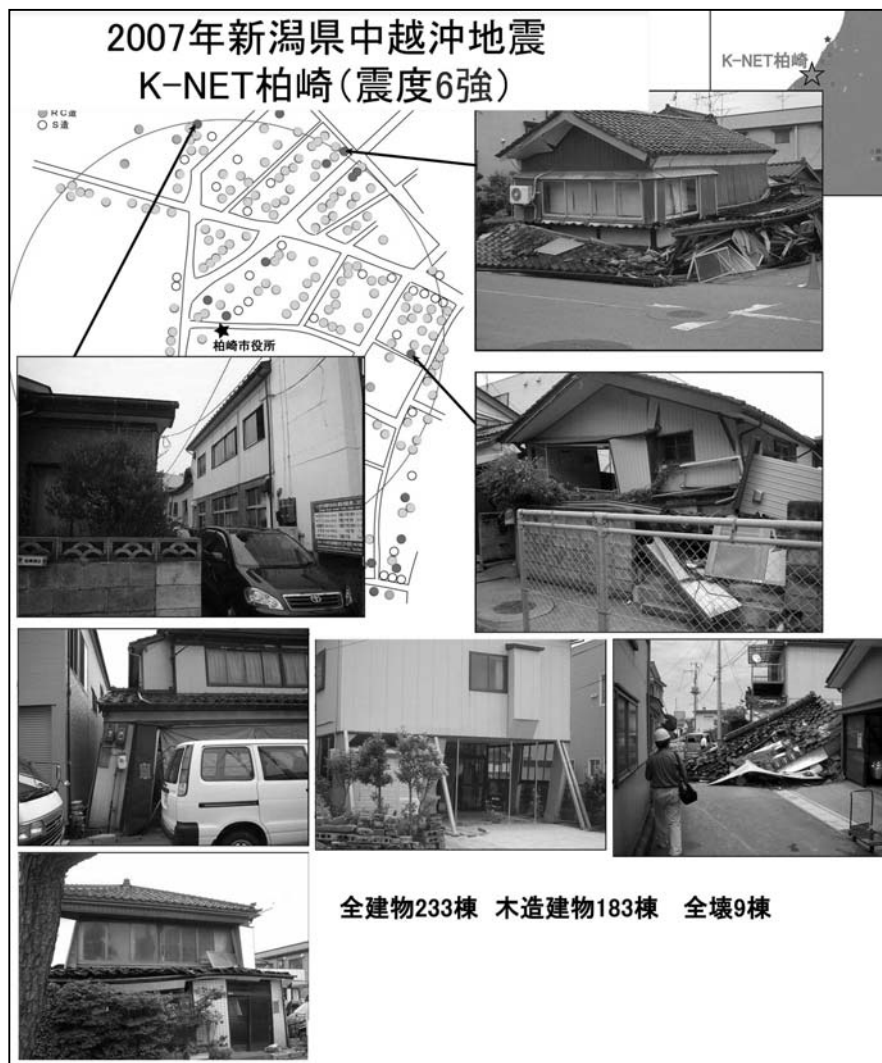
(スライド 27)

他の観測点でも、外装材や屋根瓦の被害は認められましたが、大きな建物被害はなく、全壊・大破率はゼロでした。それらをまとめたのがスライド26です。また、地震動のスペクトルは、K-NET 鳴子で例外的に2秒以上の長周期成分が観測されていますが、それ以外は、周期 0.5 秒以下の成分が卓越しています(スライド27)。

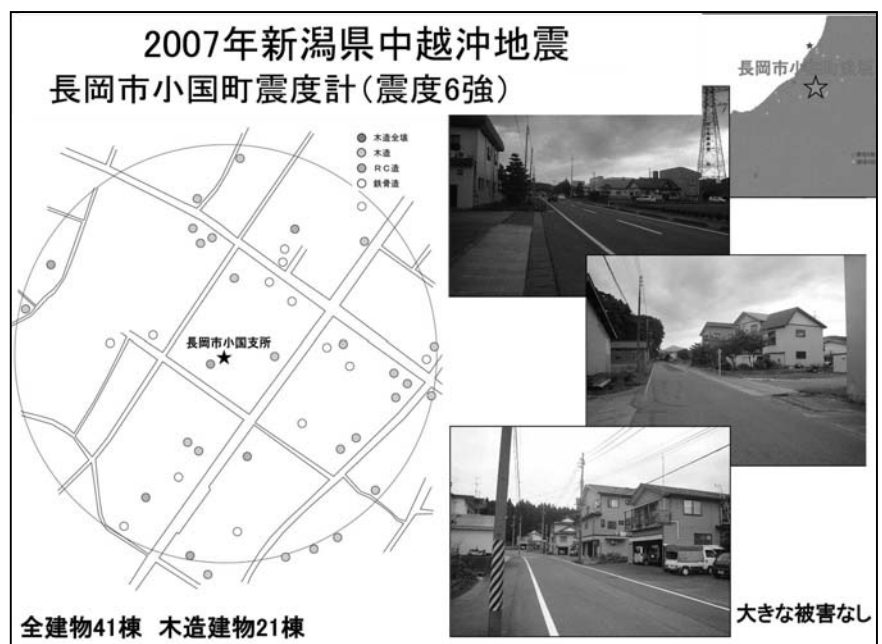
このように、駿河湾を震源とする地震や岩手・宮城内陸地震では、震度6弱や6強にも拘わらず全壊・大破率がゼロです。もし震度が全て大きめに出ているのであれば、震度をワンランク下げれば良いのではないかとと思われるかもしれません。しかし、実はそうではなくて、震6強で、6強なりの被害が出た地震もあるのです。それが 2007 年の能登半島地震です。この時の、K-NET 穴水での調査例がスライド28です。全壊率は 18.8%ですから、震度6強の場合に予想される木造家屋の全壊率 10～30%の範囲内に入っています。ですから、震度なりの被害が出ているところもあるのです。震度が全て大きめに出るのであれば、ワンランク下げれば良いのですが、そうであったりそうでなかったりするので厄介なのです。



(スライド28)

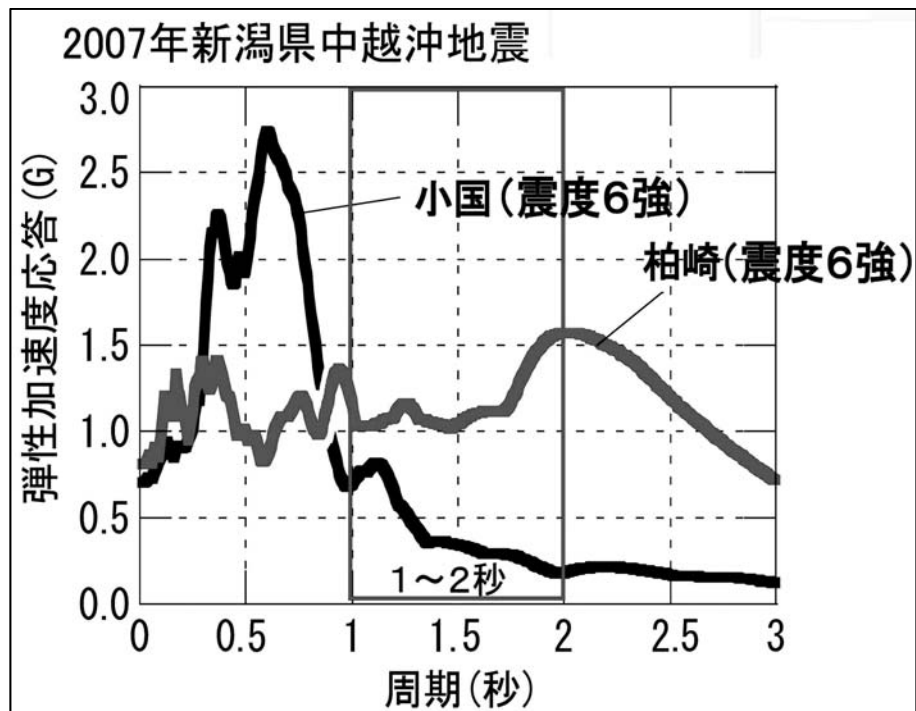


(スライド 29)



(スライド 30)

スライド29と30は、ともに 2007 年新潟県中越沖地震で震度6強を観測した地点での調査例です。柏崎では、震度相当の被害が発生しましたが(スライド29)、長岡市の小国町では大きな被害は出ませんでした(スライド30)。この2つの観測点での地震動のスペクトルを比べたのがスライド31です。小国町では周期1秒以下の地震動が顕著であったのに対して、柏崎では周期 1～2 秒の地震動が顕著になっています。従って、建物被害が大きかったかどうかは、地震動の周期の違いで説明できると思います。



(スライド 31)

スライド32には、17年前の兵庫県南部地震の建物被害の様子を示しています。木造家屋の1階部分の柱が折れて2階が落下し、かなりの人数の人が圧死しました。このように1つの階が潰れてしまふ壊れ方を、「層崩壊」と呼んでいます。層崩壊は木造家屋だけでなく、鉄筋コンクリート造などのビルでも起きました。神戸市役所などの他、いくつかの大きなビルでも層崩壊を起こしています(スライド32)。

1995年兵庫県南部地震



(スライド 32)



(スライド 33)

スライド33は、それぞれ、2001 年芸予地震、2003 年の宮城県沖を震源とする地震、2003 年十勝沖地震、2004 年新潟県中越地震、2005 年福岡県西方沖地震による建物被害の写真です。

過去の地震ではどうか？

○:一部やや短周期地震動（無印:全て短周期地震動）

	周期 1~2秒	最大 震度	全・半壊 棟数
1995年兵庫県南部地震	☆	7	249,180
1997年鹿児島県北西部地震		6弱	35
2000年鳥取県西部地震	○	6強	3,536
2001年芸予地震		6弱	844
2003年宮城県沖の地震(三陸南地震)		6弱	23
2003年宮城県北部地震	?	6強	5,085
2003年十勝沖地震		6強	484
2004年新潟県中越地震	○	7	16,985
2005年福岡県西方沖地震		6弱	497
2005年宮城県沖の地震		6弱	1
2007年能登半島地震	○	6強	2,426
2007年新潟県中越沖地震	○	6強	7,140
2008年岩手・宮城内陸地震		6弱	176
2008年岩手沿岸北部の地震		6弱	1
2009年駿河湾の地震		6弱	6

(スライド 34)

過去の地震で何が起きていたのかをまとめると、スライド34のようになります。丸印は、一部の観測地点で、周期が1~2秒の「やや短周期地震動」が観測された地震です。地震動の波形が失われて、やや短周期地震動が観測されたかどうか分からない地震も1つあります。印のついていない地震は、全て1秒以下の短い周期が卓越していた地震です。印のついていない地震では、震度の割には建物被害が少なかったという地震です。

周期が1~2秒の「やや短周期地震動」は、メディアでは「キラー・パルス」と呼ばれていて、そのような地震動が発生する割合はだいたい10回に1回程度です。ですから、大きな地震でもその90%は、短い周期の波が卓越していて、震度に相当する被害が出ないということが起きています(スライド35)。今回の東北地方太平洋沖地震で建物被害が少なかったことは、何も特別なことではなく、10回のうちの9回だということです。

東北地方太平洋沖地震の揺れによる建物被害で起こった(震度は大きいのに被害小)こと

- 「よくあること」で、発生する地震動の10回中9回は、短周期地震動(震度が大きくても被害小)
→どうしてそういうことになるのか？
→震度とは？

(スライド 35)

震度の割には建物被害が小さくなることが多い理由は、震度の計算方法に関係があります。震度は揺れの強さを表す指標ですが、いろいろな要素が絡み合っていて、昔は機械で計ることはできず、人が判断していました。しかし、1996 年からは機械で計測し、コンピューターで計算して震度を出すことが出来るようになりました(スライド36)。これを計測震度と呼びます。地震計の記録から機械判定するので、ご存じのように地震発生から2分程度で各地の震度がテレビで報道されます。このシステムは、世界でも日本だけが持つ優れた技術で、非常に画期的なシステムと言ってよいと思います。

震度とは

- 地震の揺れ(地震動)の強さを表す
- 1996年に計測震度に
←それまで人が判定していたものを地震計の記録から機械判定
→地震発生から数分で各地の震度がテレビに
世界でも日本だけがもつ技術で画期的
- 算定方法は、それまでの人の判定との連続性から 人体感覚、つまり、人がどれだけ強いと思うかを重視
→人体感覚を機械的に算定することには成功
(今回の東北地方太平洋沖地震)

(スライド 36)

震度と建物被害

- 計測震度は、人体感覚を機械的に算定することに成功したが、建物の大きな被害とは、対応がよくない
- それは、人体感覚が0-1秒、建物の大きな被害が1-2秒と、対応する周期がずれていたから
- ← 計測震度になった1996年当時は、強震観測網が整備される前でデータがなかった
- 現状では、震度を大きめに出すことで対応？している
- ← 震度5で大きな被害が出ることは避ける

(スライド 37)

非常に画期的な技術なのですが、算定方法としては、それまで人が判定していた人体感覚との連続性を重視しています。つまり、計測震度とは、人がどれだけ強いと思うかということを測っていて、それには成功しているわけです。今回の東日本太平洋沖地震の時も、揺れを実際に体験された方は、震度に相当した非常に強い揺れだとお感じになったと思います。

地震の揺れを人体感覚と一致した計測震度として算定することには成功しましたが、その計測震度は建物被害の大きさとの対応はあまり良くありません(スライド37)。その理由は既に申し上げたとおり、人体感覚は周期 1 秒以下の地震動を強く感じるのに対し、建物の大きな被害は周期1～2秒の地震動で発生するということで、対応する周期がずれているからです。

これは、良く考えると仕方の無い話で、1996 年当時は、強震観測点周りの建物被害調査の例はなく、比較しようにもデータがなかったわけです。それで15年前に、人体感覚と合うように計測震度がつくられたのですから、それなりに意義のあることだと思います。しかし、過去の地震では、10回中9回までが周期1秒以下の短周期地震動ですから、ほとんどの地震で建物被害に対する震度は、自然と大きめに出てしまうことになり、発表する側からみての安全率がかかっていることになります。震度5で倒壊家屋が出るのは困るが、震度6弱で倒壊家屋が出なくても非難はされないからです。

震度は大きめに出るからそれでいい？

- ほとんどが短周期地震動で、1-2秒が来るのは10回に1回くらいで、短周期地震動では震度は大きめに
→ほとんどの地震で、震度は大きめに出る
- 津波警報や緊急地震速報も同じ考え方
- 津波警報が出ても実際に津波が来るのは10回に1回
- どうしても狼少年になってしまう
→正常化の偏見

(スライド 38)

建物被害に対する震度の精度の低さを、安全率を見越して震度が大きめに出ているのだから良いという考え方もありますが、果たしてそれは本当でしょうか。これと同じ考え方が、津波警報や緊急地震速報にも表れています(スライド38)。津波警報が出ても必ず津波が来るわけではありません。しかし、津波警報が出ていないにも拘わらず津波が来てしまうことは絶対に避けなければなりません。津波警報も十分な精度ではないので、少しでも津波が来る危険性があるならば警報を出す、ということも 1 つの考え方です。しかし、津波警報が出ても実際に津波が来るのは10回に1回であれば、人々は、今回も恐らく大丈夫だろうと考えてしまいます。これは、良い方に考えるという人間の本能で、「正常化の偏見」と言われているものです(スライド38)。

例えば、今ここで火災報知機が鳴ったとすると、皆さんはどうされますか。出口に向かってすぐに逃げると言う方はいらっしゃると思います。しばらく様子を見る方が多いのではないのでしょうか。しかし、これは非常に危険なのです。誤作動かもしれないとか、すぐに逃げなくても大丈夫だろうか、都合よく解釈してしまうことが人間の本能なのです。日常を気分良く生きていくために、そのような本能が働いてしまうのです。将来、首都直下地震が起きて避難する場合にも、急がなくても大丈夫だろうと思わずに、本能に逆らっても迅速な行動をして頂きたいと思います。

防災システムについて言えば、このような正常化の偏見という人間の本能についてあまり考慮されていないことが問題だと思います(スライド39)。警報の精度の低さを安全率でカバーすると、今

現状の防災システムの問題点

- 正常化の偏見は、人間の本能
 - これが防災システムで考慮されていない
 - 精度の低さを「安全率」でカバーすると逆に被害を拡大させてしまう
- 守っているのは国民ではなく、自分自身？

(スライド 39)

回の津波のケースのように被害を拡大させてしまう危険性があります。予測であれば、安全率を掛けて少し大きめに出すということも1つの考え方ですが、防災システムで同じことをやると、狼少年になって却って危険です。適切な警報ではなく最大限の警報を出すということは、結果的に国民を守っているのではなく、自分の組織を守っていると言われてもしかたがありません。津波が来たけれども、津波警報が出ていなかったということになれば、非難されることは明らかですから。地震で言えば、地震が起きたけれども予知できなかったということ避けたいということになると思います。

ではどうすれば良いかということですが、やはり防災システムの精度を上げるしかないと思います(スライド40)。地震の震度に関して言えば、被害に合うように、震度を計算するというのも1つの方

じゃあどうしたらいいか？

- 震度算定法, 津波警報, 緊急地震速報などの防災システムの精度を上げる
- 現行の震度算定法, 津波警報, 緊急地震速報の精度(の低さ)をしっかり認識(防災教育)
 - 震度とは、人体感覚を測っているものであるということをしっかり認識して正しく利用する(震度で被害を判定してはいけない)
 - 津波警報が出たら(揺れたら), 防災訓練だと思ってとにかく高台に避難.
10回中9回の「無駄足」をしっかりと踏む

(スライド 40)

被害と対応した震度算定法の提案

読売新聞 2003年(平成15年)7月28日 月曜日

宮城北部地震 建物被害 理論値より小

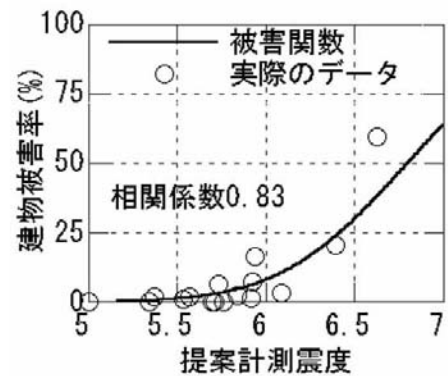
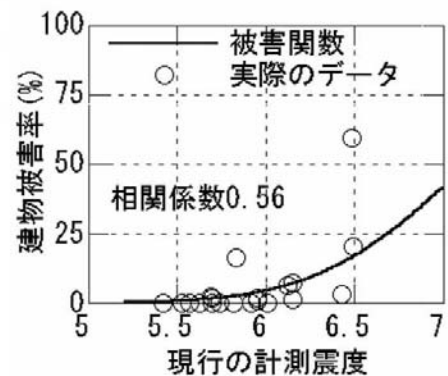
「震度」過大に傾く？

機械導入後「6」続出

宮城北部地震発生後、震度6以上の地域が、理論値より小だったことが、震度調査の結果、明らかになった。震度6以上の地域は、理論値より小だったことが、震度調査の結果、明らかになった。震度6以上の地域は、理論値より小だったことが、震度調査の結果、明らかになった。

余震やまず 震度6以上の地域は、理論値より小だったことが、震度調査の結果、明らかになった。震度6以上の地域は、理論値より小だったことが、震度調査の結果、明らかになった。

インターネットで自動車保険
三井ダイレクト損保
www.312405.com
0120-312405



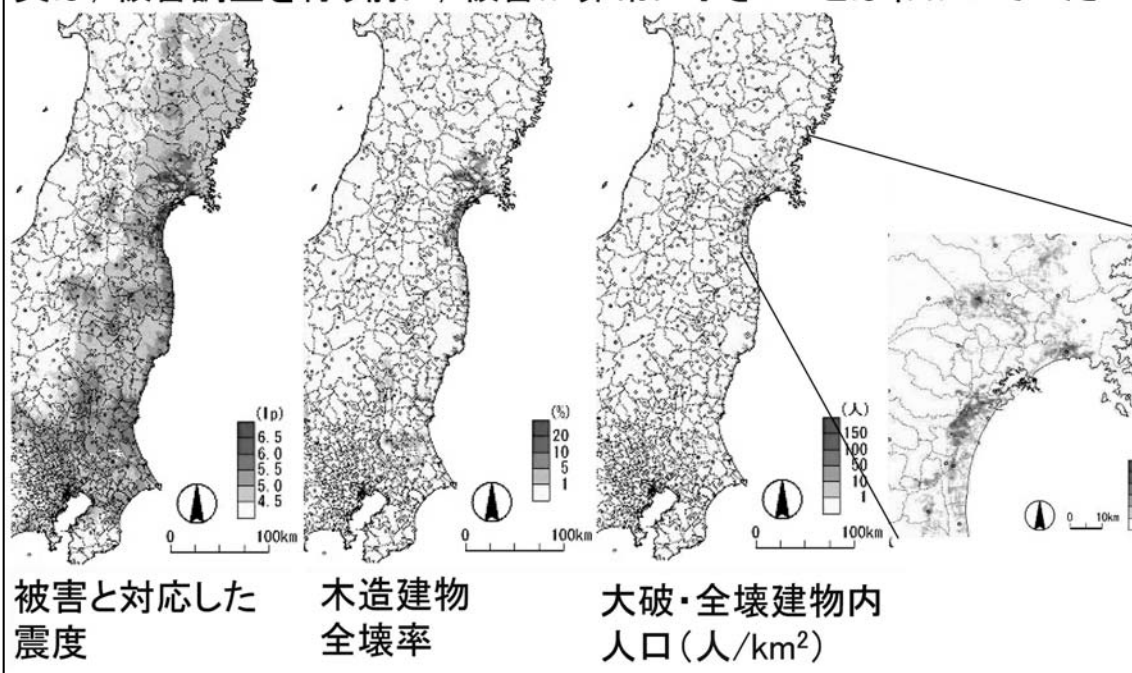
(スライド 41)

法です。 そのような震度算定法は提案させて頂いていて、メディアなどにも取り上げて頂き(スライド 41)、気象庁の検討会議でもお話をさせて頂いたこともあります。しかし、未だに採用には至っておりません。

実は、東日本太平洋沖地震の時も、被害調査に行く前に地震動の波形を分析した時点で、建物被害が少ないということは分かっていました(スライド42)。最近では、被害調査というよりは、事前解析をして被害を推定し、その確認作業という形になってきています。そのように、地震動の波形から被害の推定ができるようになってきております。私たちの研究室では、地震が起きればだいたい30分以内に、地震の揺れによる建物被害を推定するシステムが一応できています。つまり、被害に対応した震度を、30分ぐらいで公表することも可能です。ただ、まだもう少し精度を上げる必要があるとは思っています。

東北地方太平洋沖地震の被害推定

実は、被害調査を行う前に、被害が非常に小さいことはわかっていた



(スライド 42)

スライド40に戻って頂いて、現行の震度算定法、津波警報、緊急地震速報の精度がどのぐらいなのかを、やはりしっかりと認識して頂く必要はあるかと思っています。津波警報に関して言えば、10回の津波警報に対して、実際の津波は1回しか来ないのです。しかし、10回のうち1回は必ず来るので、残りの9回を避難訓練だと思ってしっかりと避難するように啓蒙しなければなりません。そうは言っても、警報の精度が低ければ、なかなか上手いかなと思います。ですから、平凡な結論かもしれませんが、無駄足を少しでも少なくするために、警報の精度の低さを改善する努力は必要です。警報の精度が上がれば、無駄足もしっかり踏んでくれると思うからです。

緊急地震速報(警報)の精度も最近は落ちていて、誰も避難しなくなっています。先日も大学の食堂で警報が鳴りましたが、誰も反応しないことに驚きました。これが、10回に1回という確率ではなく、3回に1回という確率であれば、恐らく避難行動をして頂けると思うのですが。我々も研究者ですから、精度を上げるべく研究をしているのですが、いつ地震や津波が来るかわからないので、不完全であってもとりあえずシステムを運用しなければならないのです。

精度が低くても運用するとすれば、その精度を人々に分かってもらった上で運用していくことが大事だと思います。そして、それを分かってもらった上で、しっかりと避難することの重要性を教育・啓蒙していくことが必要なのではないかと考えています。ですから、現状で出来ることを出来る範囲で、

正確な情報を伝えることが重要だと思っています。

最後に、講演内容をスライド43にまとめて、これで講演を終わりたいと思います。ありがとうございました。

まとめ

- 東北地方太平洋沖地震の揺れによる建物被害は、非常に小さかった
- その原因は、建物に大きな被害を与える1-2秒の成分が小さかったからで、建物の耐震性が高かったからではない
- これは、「よくあること」
←震度は、人体感覚を測っていて、発生する地震動の90%を占める短周期地震動では、大きめに出る
- 震度や津波警報などの防災システムは、精度の低さを安全率でカバーしていて、正常化の偏見という人間の本能によって逆に被害を拡大させている
- 精度を上げる、防災教育の重要性

(スライド 43)

【司会者】 ありがとうございました。時間が短くて申し訳ありませんでしたが、非常に興味深いお話であったと思います。ご質問は、次の境茂樹先生が終わった後にまとめて頂く形にさせていただきますが、どうしても今ここで先生にお伺いしたいということがございましたらどうぞご質問ください。無いようでしたら、後でまたご質問の時間を取らせて頂きますので、その時にご質問をお願いいたします。

東日本大震災の被害と防災の在り方：
「事業活動への影響と免震・制震の効果」

境 茂樹 ((株)間組)

(製本指示：中扉のためページ番号(1,2)は削除のこと)

文部科学省科学技術政策研究所講演会
「東日本大震災の被害と防災の在り方」

東日本大震災の被害による 事業活動への影響と免震・制震の効果

平成24年2月7日
ハザマ 境 茂樹

(スライド 44)

【司会者】 続きまして境茂樹先生をご紹介します。境茂樹先生は、東北大学の工学部を卒業され、大学院に進まれた後、間組に入社されました。その後、原子力発電技術機構を経て、現在は間組技術研究所主席研究員を務めておられます。少し話の雰囲気は変わりまして、実際の建物の耐震技術に関する具体的なお話を伺えることになっております。それからもう1つは、今回の大震災の後、企業の事業所の復興はどのように進められたかということについてもお話して頂ける予定です。それでは境茂樹先生、宜しくお願いいたします。

【境茂樹】 ご紹介をありがとうございました。私は、民間の立場から少しお話ししたいと思います。お客様の依頼で、東日本大震災で被害にあった建物や設備を調査した結果や、設計施工した高層建物で地震計をつけている建物があり、その記録がとれましたので、そのことについてもご紹介したいと思います(スライド44)。

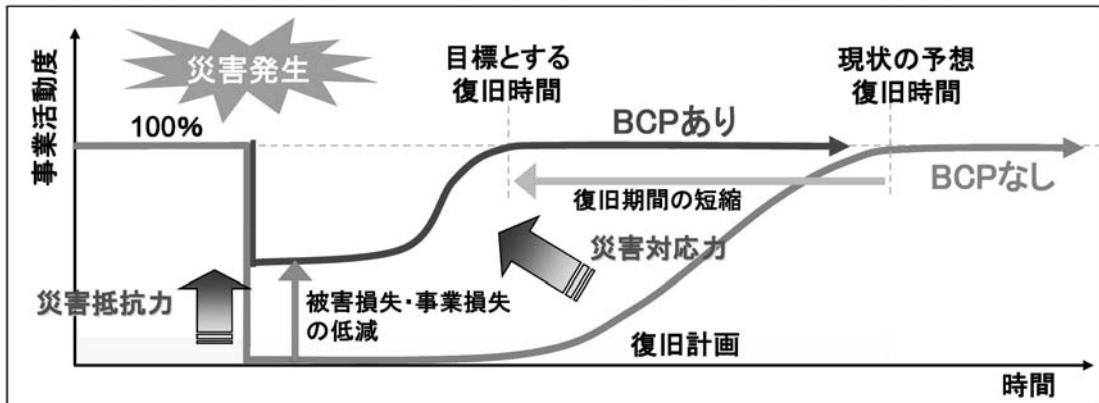
今日の発表は大きく分けて2つあります(スライド45)。1つは、東日本大震災の事業活動への影響ということです。特に今回は、生産施設への影響ということが大きくクローズアップされました。そのことを事業継続計画(BCP; Business Continuity Plan) の観点からお話します。先ほど境有紀先生

発表内容

1. 東日本大震災の事業活動への影響
 - ・民間の生産施設への影響(BCPの観点から)
 - ・非構造部材、生産設備の被害状況など
2. 免震・制震建物の効果と課題
3. まとめ・今後の課題

(スライド 45)

◎事業継続計画(BCP)における復旧曲線の概念図



- ①災害抵抗力：災害発生後も事業を継続させるためのハード面の対策
⇒ 施設の耐震グレードアップ、免震化、情報系統の2重化 等
- ②災害対応力：許容される期間内に事業活動度を復旧させるための方策、体制
⇒ 避難訓練、従業員の安全確保や安否確認システム、災害時の資材調達体制 等

(スライド 46)

から周期1秒以下の短周期の地震動は、非構造部材や設備には影響するというお話があったのですが、その被害状況についてもお話したいと思います。それから2つめに、免震・制震建物も今は大分普及しており、東京の高層ビルなどでも使われていますが、その効果と課題についてお話をさせていただきます。最後に、まとめと今後の課題についてお話したいと思います(スライド45)。

スライド46は、事業継続計画 BCP における復旧曲線を示したものです。内閣府の事業継続計画のガイドラインや経済産業省でも同じようなものが出ています。横軸が時間で縦軸は事業活動度を示しています。何もなければ100%の操業ですが、ある災害、地震だけではなく新型インフルエンザなども含めて、そういう災害が発生した時に、事業活動が低下して時間の経過とともに徐々に復旧していくという復旧曲線と言われるものを表しています。BCP が無い場合には、下の復旧ラインとなって、復旧に非常に時間がかかります。BCP では、最初の落ち込みを少なくして、かつ早期に復旧するというので、落ち込みの面積を最小化することが重要なポイントとなります。

そのためには2つの力が必要です。1つは「災害抵抗力」と言われるもので、災害発生時に事業活動の低下をいかに少なくするかという力です。もう1つは、「災害対応力」で、災害が起きた後にいかに早く復旧するかという力です。この2つの力が BCP にとっては、重要だと考えています。災害抵抗力は、例えば施設の耐震化を図るとか、免震化するとか、情報系統を2重化するということに、どちらかといえばハード的な対策になります。それに対して、災害対応力は、避難訓練を行うとか、従業

員の安否確認のシステムをつくるとか、災害時の協定を結ぶなどのソフト的な対応策になります。この両方が必要なのですが、今はどちらかと言うと、ハード面よりもお金のかからないソフト面に注目して対策を進めようとしています。ただ、一方に偏ることなく、両方の対策が必要だろうと思います。

スライド47は、東日本大震災の1ヶ月経過後の被災企業の状況を、朝日新聞の朝刊を参考に集計から抜粋したものです。掲載された企業の工場の立地場所を北から順番に並べてあります。津波の影響も当然あると思いますが、内陸の工場でも1ヶ月経過しても操業できないという企業があります。先ほどの復旧曲線で言いますと、大体2日ないしは3日で操業を100%に戻す、最長でも1週間程度で戻すというのが普通です。従って、1ヶ月経っても操業できないという状況になるとは想像していなかったと考えられます。大きな企業でもこれが実態です。

私が特に注目したのは、茨城県にある半導体の工場です。自動車メーカー用に半導体やマイコンを製造していて、この工場が生産停止した影響は、日本だけではなく世界の自動車メーカーにも及びました。このように、1つの企業の製品を、世界の多くの会社が使っているという事実が判明しました。新潟県中越地震などの以前の地震でも、やはり同じような問題が指摘されていましたが、そのような状況が未だに続いているということです。

① 事業活動への影響(東日本大震災の企業活動への影響)

◎ 東日本大震災 1ヶ月経過後の主な企業の状況

会社名	場所	主な生産品目	操業状況
東芝グループ	岩手県北上市	半導体	×
新日本製鉄釜石製鉄所	岩手県釜石市	タイヤ用鋼線	×
トヨタ自動車系車体メーカー	岩手県金ケ崎町	車体	×
村田製作所グループ	宮城県登米市	家電部品	○
トヨタ自動車系車体メーカー	宮城県大衡村	車体	×
ソニー子会社	宮城県多賀城市	光学部品	×
麒麟ビール仙台工場	宮城県仙台市	ビール	×
信越化学工業グループ	福島県西郷村	半導体素材	×
日産自動車いわき工場	福島県いわき市	エンジン	×
日立製作所グループ	茨城県日立市	発電タービン	○
ルネサスエレクトロニクス	茨城県ひたちなか市	半導体	×
住友金属工業鹿島製鉄所	茨城県鹿嶋市	船舶用鋼板	○
三菱化学鹿島事業所	茨城県化神栖市	エチレン	×
ホンダ埼玉製作所	埼玉県狭山市	車両	△
コスモ石油千葉製油所	千葉県市原市	ガソリン	×
日産自動車追浜工場	神奈川県横須賀市	車両	○

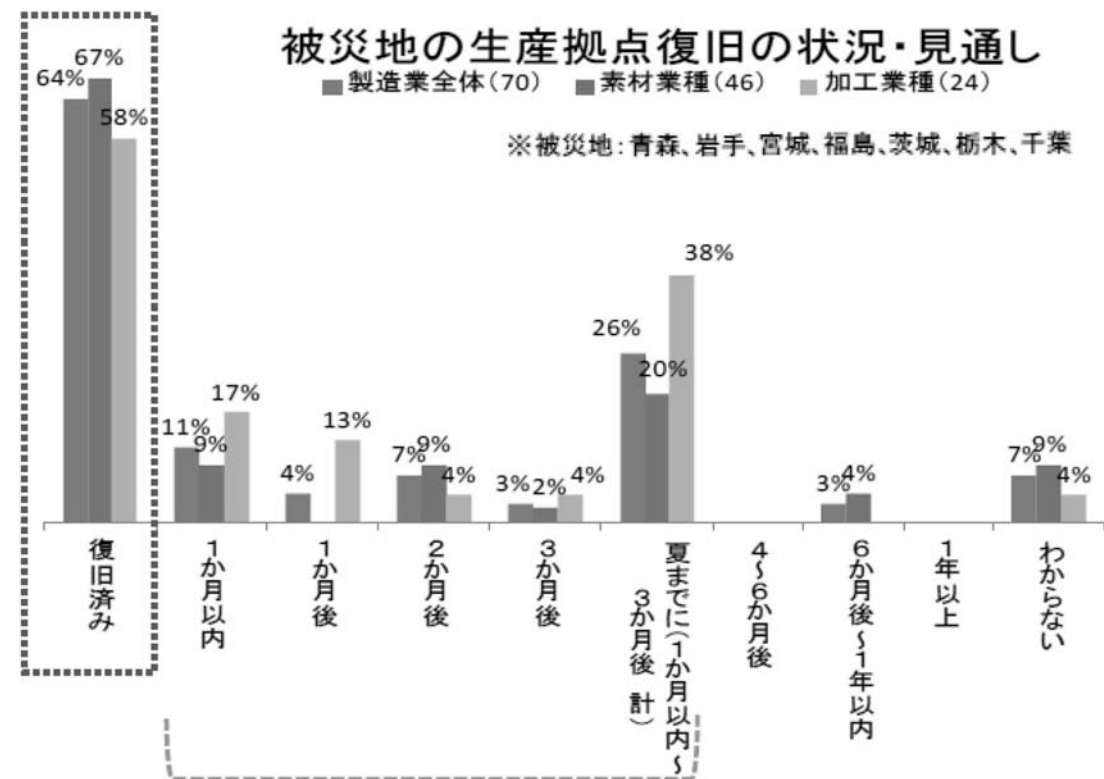
2011.4.12朝日新聞朝刊より集計

(スライド 47)

1. 事業活動への影響(産業実態緊急調査・その1)

Hazama

◎ 震災1ヶ月経過後のアンケート調査結果



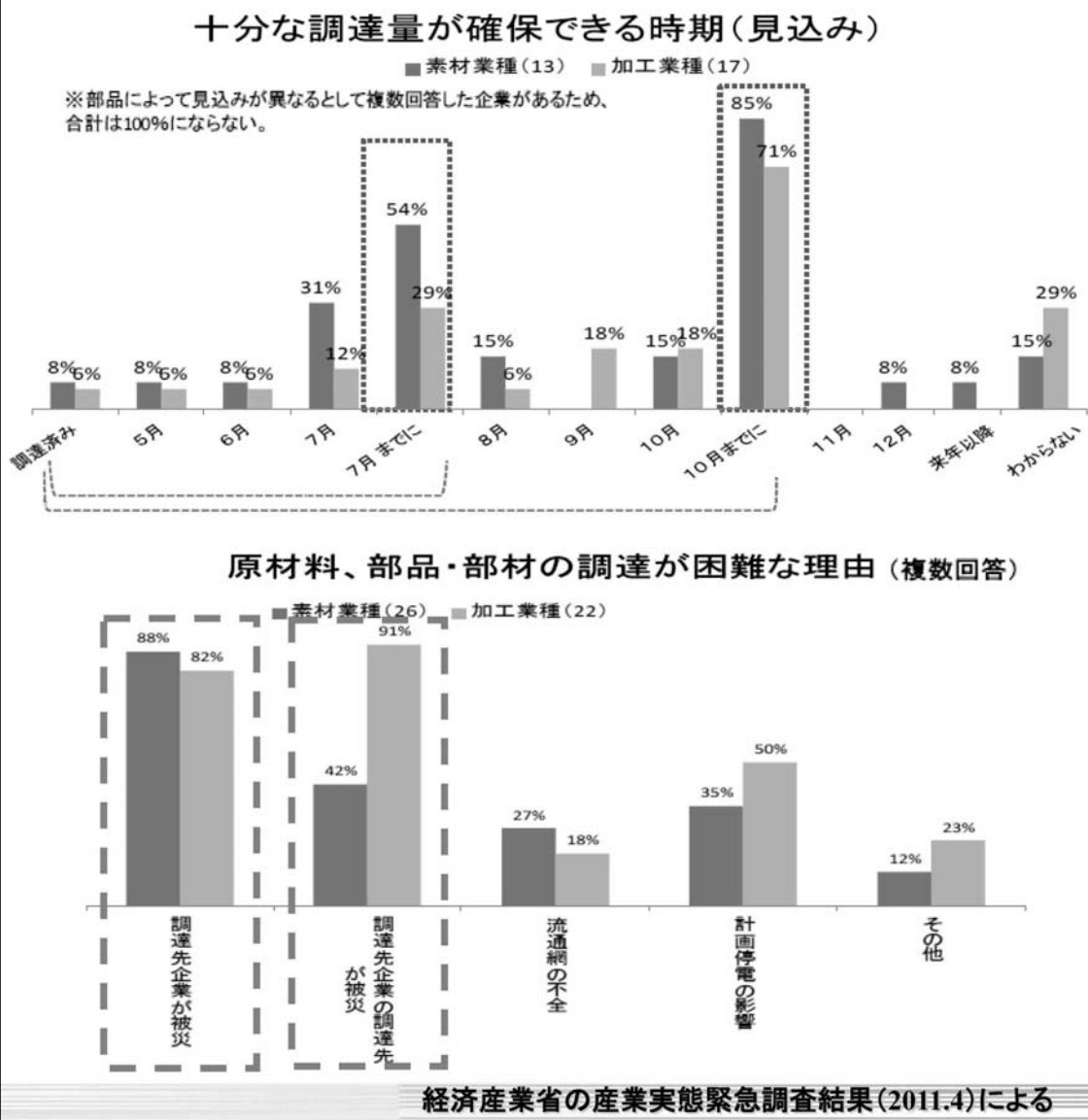
経済産業省の産業実態緊急調査結果(2011.4)による

(スライド 48)

スライド48は、経済産業省が 2011 年4月に行った災害実態緊急調査の結果です。これを見ますと、製造業全体(3つの棒グラフの左側)では64%の企業が1ヶ月以内で復旧していますが、3割を超える企業が復旧できていないと答えています。復旧できないということは、事業所に被害があったという理由も考えられるのですが、それ以上に、原材料が調達できないという理由が大きいと思います。

スライド49は、原材料や部品の十分な調達量が確保できる時期についてのアンケート結果です。7月までに確保できると答えた企業は、素材業種で54%、加工業種で29%です。半年以上経った10月までに確保できると答えたのは、それぞれ85%と71%で、かなり時間がかかっています。調達できない理由の1つとして、関連企業や調達先企業が被災していると答えています。そして、その調達先のさらに調達先が被災しているという答えも多くあります。まさしくサプライチェーンで世の中の事業が成り立っていることを示した結果と言えます。サプライチェーンがつかまらない状況で、事業がなかなか立ち直っていかないという状況を表しています。

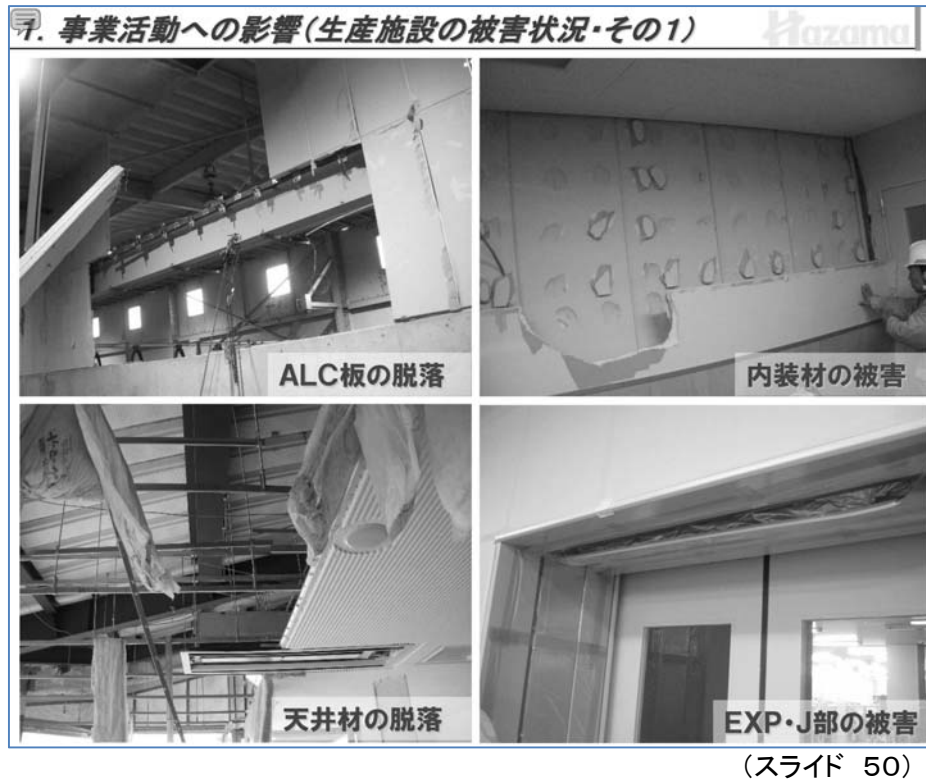
1. 事業活動への影響(産業実態緊急調査・その2)



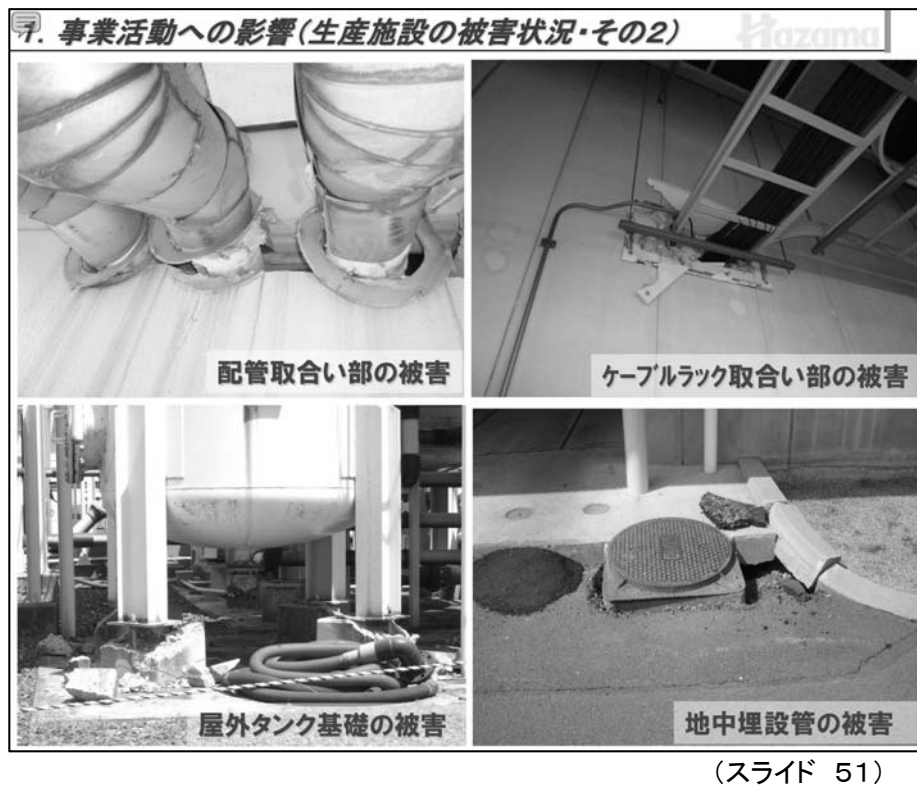
(スライド 49)

では、工場は具体的にどのような地震被害にあっているのでしょうか。事業所や工場の建物自体には、大きな被害を受けていないことは、私共の調査でも分かっています。ただ、非構造部材については、結構な被害が出ています。

スライド50は、津波とは関係のない内陸部にある工場の被害例です。ALC板の脱落、天井材の脱落、内装材の被害などが出ています。このような天井の脱落ですと、下にいる従業員は危険ですし、機械や製造装置も間接的な被害にあう可能性が非常に高くなります。それから、エクspansions・ジョイントの被害も出ています。一見大きな被害でないように見えるのですが、ここはクリーンルームの出入口ですので、密封された空間が必要な場所です。写真のように、隙間にシートを貼って



目張りをすることにより、塵の含んだ空気が流入しないように応急処置をしています。このように、事業を再開するために、非常にご苦勞をされているということが分かりました。





(スライド 52)

スライド51は、配管の取合い部の被害、ケーブルラック取合い部の被害など、配管やケーブルと建物との繋ぎ目での被害状況の写真です。屋外にあるタンクの基礎の被害や、液状化による地中埋設管の被害も確認されています。高圧ガスなどのタンクでは、耐震性は非常に高く造られています。しかし、被害にあったタンクは活性炭のタンクで、あまり耐震性が要求されないタンクでした。

スライド52は、仙台空港近くの物流倉庫の被害の様子です。被害は津波によるものと思いましたが、明らかに地盤の液状化による被害でした。建物の基礎の被害、搬入路の地割れ、地盤沈下による被害が見られました。

事業活動の影響についてお話したことをスライド53にまとめておきます。東日本大震災による生産施設の被害の特徴は、津波や液状化で広範囲に被害が発生して、事業所のみならず倉庫などの物流拠点の被害の影響も大きかったということです。それから地震動による躯体被害は少なかったのですが、非構造部材や生産設備の被害が顕著でした。また、同じ敷地内での類似被害が目立ったということです。これは損傷に相関があるのではないかとということで、重要なポイントだと思います。それから、ライフラインの被害やサプライチェーンの被害、ガソリンなどの燃料供給の途絶による復旧活動の遅れということが挙げられます。

私もちょうどこの日はつくばにいて、研究所の中の色々な実験装置の点検に追われ、かなり大変な状態でした。私共の会社もBCPをやっていますので、2日以内にお客様の建物の安全を確認す

1. 事業活動への影響(被害の特徴・まとめ)



■ 震災による生産施設の被害の特徴

(事業活動に与える影響の観点から)

- ・津波と液状化により広範囲で被害が発生し、事業所のみならず、倉庫などの物流拠点の被害の影響が大きい
- ・震動による躯体被害は少ないが、非構造材や生産設備の被害が顕著
- ・同じ敷地内、建物内で類似被害が目立つ(損傷の相関)
- ・通信、電力、水道などのライフライン被害の影響
- ・サプライチェーンの被害による、原材料・部品供給不足
- ・ガソリンなど燃料供給の途絶による復旧活動の遅れ

(スライド 53)

る必要があったのですが、ガソリンの調達が困難で遠距離の移動ができない状況でしたから、支店の担当者の代わりに研究所の周りの施工物件を見に行きました。

次に話題は変わるのですが、免震・制震の効果とその課題についてお話したいと思います(スライ

2. 免震・制震の効果と課題(免震・制震の原理・その1)



免震・制震の原理

地震動の性質

- ・地震動は建物周期が長くなる(高層建物)と
⇒ 建物に入る地震力は小さくなり、建物の変形は大きくなる
- ・減衰が大きくなると
⇒ 建物に入る地震力・全体変形ともに小さくなる

免震構造

積層ゴム等で建物周期を伸ばし
建物に入る力を小さくし、
ダンパーにより減衰を付加し変形
を抑えようとする

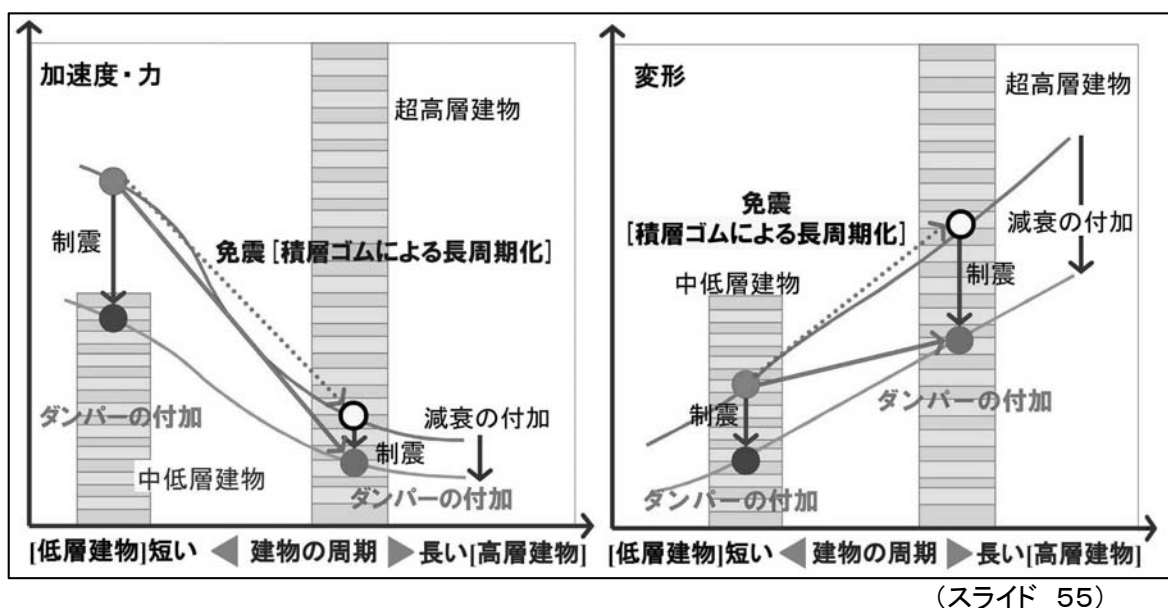
制震構造

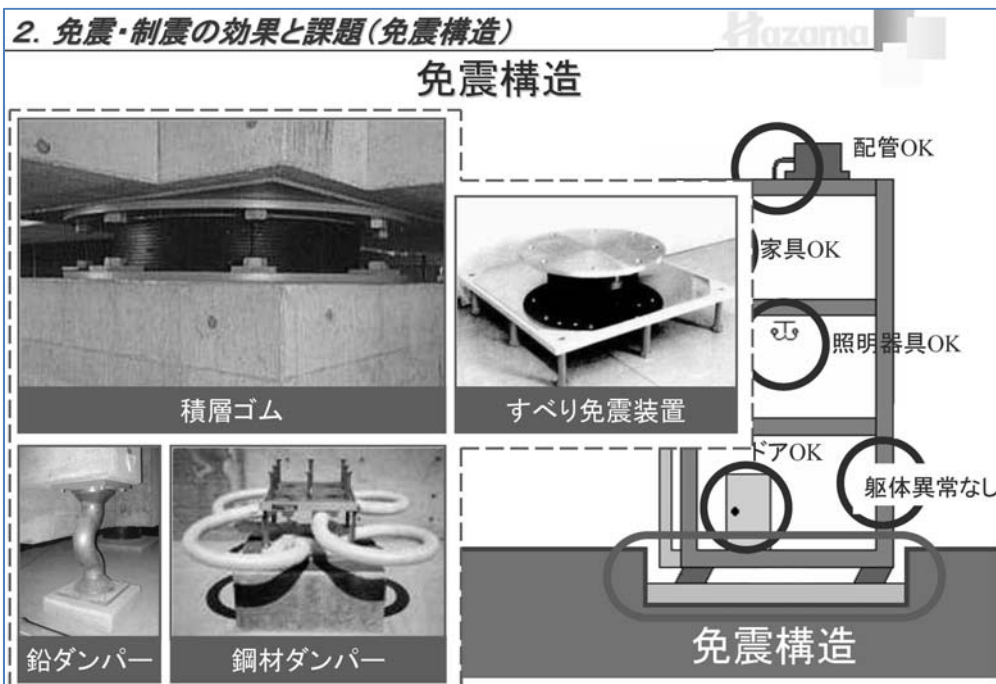
ダンパー機構等を建物内に組
み込み減衰を付加して変形を
抑えようとする

(スライド 54)

ド54)。まず、地震動の一般的な性質として、建物の固有周期が長くなると、つまり高層建物になると、建物に入ってくる地震力は小さくなり、建物の変形は逆に大きくなります。また、地震動のエネルギーを吸収させて減衰を大きくすると、建物に入る地震力と全体変形がともに小さくなるという性質を持っています。免震構造や制震構造は、この性質を利用しています。免震構造は、積層ゴムを使って建物の固有周期を長周期化していますが、同時にダンパーを組み込むことによって減衰を付加して変形も抑制します。制震構造は、ダンパーを建物の中に組み込んで、減衰を付加することで変形を抑えようとするものです(スライド54)。

スライド55は、今お話したことを図にしたものです。横軸が建物の固有周期で右にいくほど周期が長くなります。一般的には、建物が高層になればなるほど固有周期は長くなります。阪神淡路大震災の時のような周期1～2秒の「やや短周期地震動」では、中低層建物あるいはもっと低層の建物に被害を及ぼしますが、超高層建物では、そのような地震動の力や加速度応答は小さくなります(スライド55左図)。そこにダンパーによる減衰を付加し、加速度応答をさらに小さくしています。つまり、免震構造とは、積層ゴムを付けることによって建物の固有周期を延ばし、さらにダンパーで加速度応答を抑える仕組みのことをいいます。一方、建物の固有周期が長くなるほど、建物の変形は大きくなります(スライド55右図)。超高層建物は、ゆっくりと大きく揺れるということです。その変形が行き過ぎると良くないので、制震部材を入れて減衰を付加して応答変位を小さくします。また、中層建物を免震化して周期を延ばすと変形は却って大きくなりますので、免震積層ゴムに大きな変形を集めることにより、建物自体が変形を生じないよう工夫がなされています。

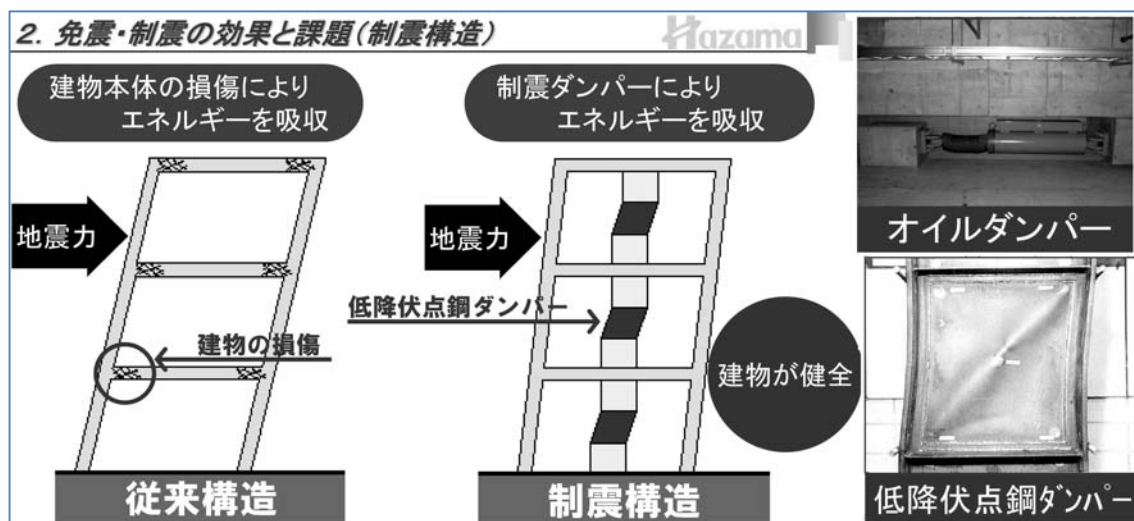




(スライド 56)

スライド56は、免震部材および免震構造の例です。通常の耐震構造ですと、建物自体は被害を受けなくても、室内の家具や配管などが壊れることがあります。免震構造の場合は、免震層や免震部材に変形を全て集中させて、建物上部や室内にあまり被害のないように工夫をしています。免震部材には、スライド56左側の写真のような積層ゴムやすべり免震装置、あるいは鉛ダンパーや鋼材ダンパーが使われます。この他にも、色々な新しい免震部材が出てきていますが、一般的には、スライド56に示したような部材を免震層に入れて使います。

スライド57は、制震構造についての説明です。制震構造でない場合には、地震力を受けた時に

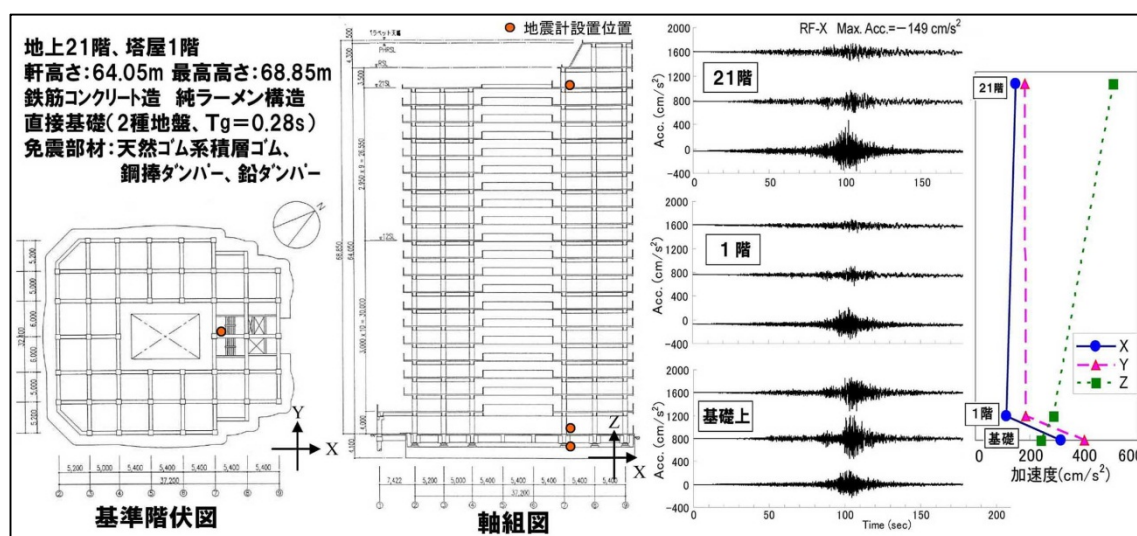


(スライド 57)

建物本体が損傷してエネルギーを吸収します。しかし、制震ダンパーを取り付けて、そこで地震のエネルギーを吸収してやれば、建物本体の損傷を防ぐことができます。このように、制震ダンパーを取り付けて、揺れに対して建物自体の健全性を保つ構造を制震構造と呼びます。制震ダンパーには色々な種類がありますが、代表的なものに、オイルダンパーや低降伏点鋼ダンパーがあります。低降伏点鋼ダンパーには、靱性が高い鋼材を用いて、鋼材の変形によりエネルギーを吸収させます。時間の関係で詳しいことは省略しますが、建設会社のホームページなどでは詳しく紹介されています。

スライド58は、茨城県にある21階建の鉄筋コンクリート造の免震建物です。高さが60mを超えると超高層建物と呼びますので、64m の高さを持つこの建物も一応は超高層建物です。この建物の基礎部分に免震装置を入れております。私共が初めて建設した超高層免震建物でしたから、地震計を付けて挙動を把握していました。地震計の位置は、スライド58に示しているとおり、21階部分と1階部分、そして免震層を挟んで基礎部分の3箇所です。

スライド58右側に、東日本大震災の時に記録された地震動の加速度のグラフを示しています。上から順に21階、1階、基礎上での記録です。1つの階で3種類のグラフがありますが、上2つが水平方向の地震動で、下1つが垂直方向の地震動です。通常の免震構造は水平方向にしか効きませんので、上下方向には地震動は増幅していますが、水平方向については、基礎上に比べて1階と21階のどちらも揺れは小さくなっており、はっきりとした効果が認められます。基礎上では 400 ガルぐらいの揺れが免震層を介して 185 ガルぐらいに減っていますから、約2分の1以下になっています。さらに、1階から21階の揺れの増幅もほぼないという状況が分かります。スライド58の一番右側の図は、最大加速度の分布を示したものです。水平方向(XおよびY方向)の揺れは、基礎上の記録は非常

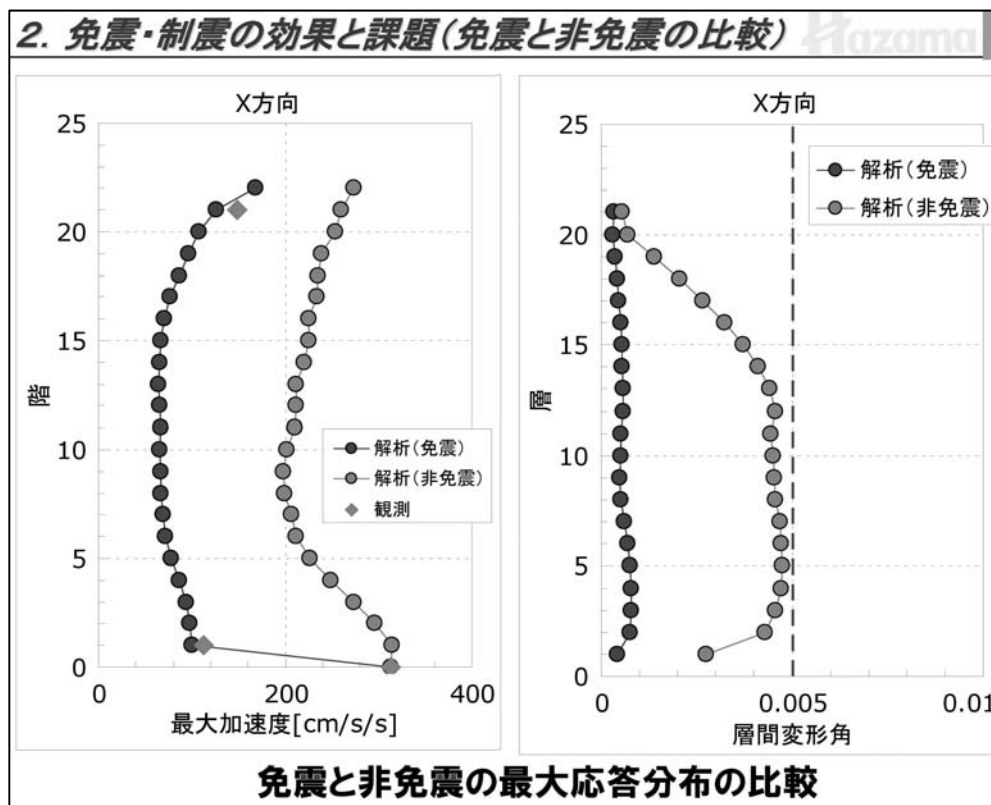


(スライド 58)

に大きいのですが、それが半分から3分の1程度になり、建屋上階に向かつての増幅もそれほどないということがわかります。ただ、上下方向の揺れについては、建物上階に向かつてかなり増幅が見られます。しかし、上下方向の揺れは、室内の家具などに与える影響はほとんどなかったようです。実際に、この建物の免震装置の点検に行きましたが、家具が倒れるとか棚の上の物が落ちるとかの室内被害はなかったというふうに聞いています。

スライド59は、この建物が免震構造であった場合と非免震構造であった場合を比較したシミュレーション結果です。実際の観測値を◆印で示しています。非免震構造であったならば、どの階でも加速度応答は 200 ガル以上あったはずですが、免震構造のおかげで 200 ガル以下に落ちています(スライド59左図)。揺れの大きさが 200 ガルを超えると、室内の家具が倒れるなどの被害が起きる可能性が大きくなります。

また、揺れの大きさだけでなく、層間変形角という指標も重要です。層間変形角とは、各層での変形を柱の長さで割った値です。層間変形角が大体 200 分の1すなわち 0.005 を超えると、壁にクラックや亀裂が入ります。スライド59の右図より、免震構造にすることによって層間変形角が大幅に抑えられていることが分かります。壁にクラックや亀裂が入れば補修の必要性が生じますが、それがなくなりますので、このことも免震構造の大きなメリットだと言えます。

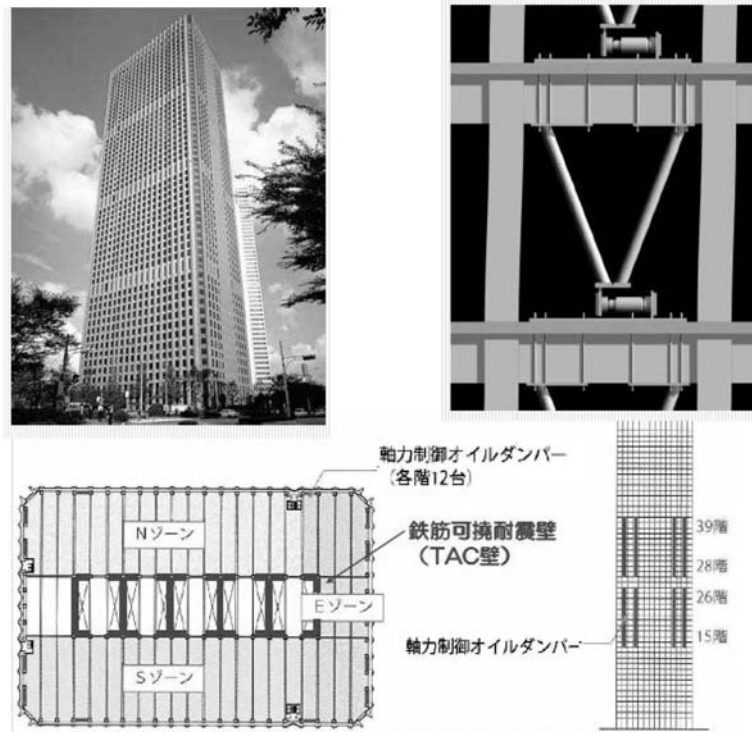


(スライド 59)

2. 免震・制震の効果と課題(制震建物の強震観測事例)

制震建物 新宿センタービルの事例

(大成建設:木村氏資料より)



(スライド 60)

スライド60は、大成建設さんの発表資料をお借りしたものです。制震超高層建物としての新宿センタービルの事例です。右上の写真には、制震ダンパーとしてオイルダンパーが組み込まれている様子が分かります。制震ダンパーのある場合と無い場合について、地震動によるこの建物の変形をシミュレーションしたのが、スライド61です。少し見にくいのですが、制震ダンパーのない場合では最大変形が 69.8cm ですが、制震ダンパーがある場合には 54.2cm となり、変形は 22%小さくなることがわかります。減衰定数は 1.3%から 2.7%になり、1.4%の増加ですが、この減衰定数の増加が、変形を 22%少なくするというように効いているわけです。東京都庁の変形は 65cm あり、中の色々な仕上げなどに被害があったということを聞いております。ですから、制震効果で変形をおさえるということは効果が大きいと思っています。

2. 免震・制震の効果と課題(制震建物の強震観測事例)

新宿センタービルの制震システムの効果

減衰定数

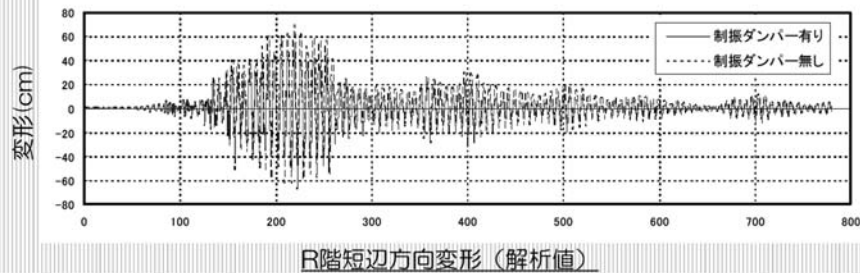
- 短辺方向の建物の減衰が1.3%から2.7%に増加

応答低減効果(解析的検討)

- 最大変形

制振ダンパーなし：R階短辺方向 69.8cm (解析値)

制振ダンパーあり：R階短辺方向 54.2cm (観測値) ←22%低減



R階短辺方向変形(解析値)

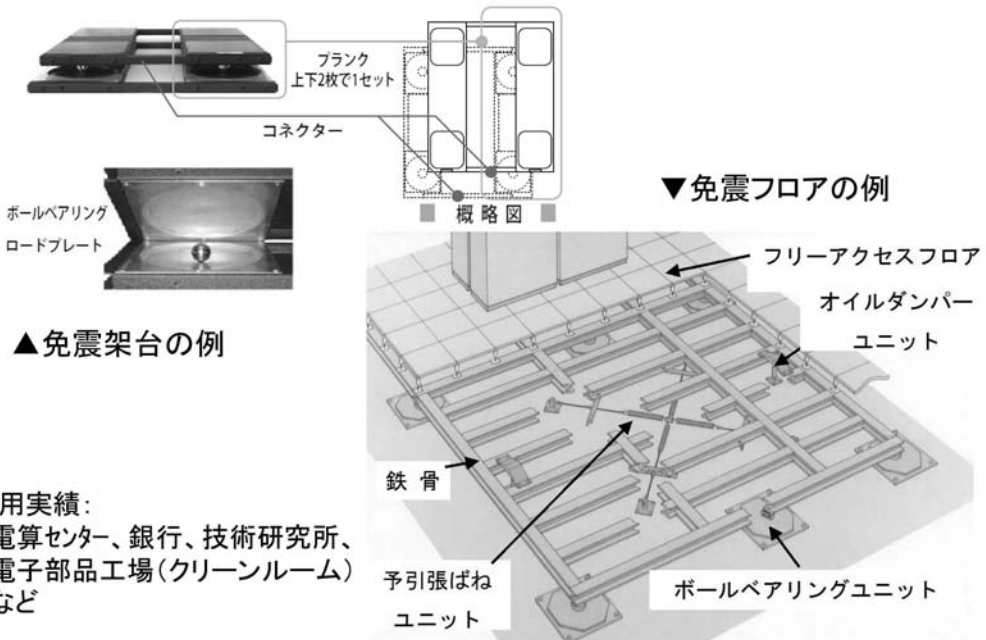
※建築物物理研究センターセミナー(第97回)「東北地方太平洋沖地震における建物強震記録」大成建設木村氏講演資料より

(スライド 61)

次に、建物の免震や制震構造ではなく、生産機械や設備に対して、免震架台や免震床などを適用することがありますが、そのことについてお話ししたいと思います(スライド62)。この免震架台の方は、事実確認できていませんが、ボールベアリングが飛び出したという被害があったと聞いています。免

2. 免震・制震の効果と課題(免震架台・免震床)

サーバーや生産装置の耐震化(免震架台・免震床)



(スライド 62)



(スライド 63)

震床については、被害があったとは聞いておりません。被害を受けた茨城県の電子部品工場でも、2階の床には免震床を採用しており、重要な生産設備は被害をのがれています。免震床の効果は非常に大きかったと思います。

さて、免震構造については課題もあります。免震構造だと動き方の異なる部分がありますので、その継ぎ目のエクspansion・ジョイントの部分に被害が生じます。スライド63は、外溝部や天井部でのエクspansion・ジョイントの被害の写真です。メーカーも実験はしているのかもしれませんが、静的な実験のみで、地震動に対する動的な実験はしていないと思います。実際の地震動に対するエクspansion・ジョイント部分の挙動を把握できていなかったと思います。

それから、鋼材系のダンパーに対して、残留変位が生じている状況が出ております(スライド64)。ボルトの緩みや鉛ダンパーの亀裂も観測されています。本震の後に余震が何度も続けば、金属疲労も起こします。このようなことがあれば、免震効果が低減している可能性があり、次の大きな地震の時に効果を発揮できない可能性があります。今回の地震でどのような被害が出たのかをきちんとデータを取りながら把握しておくことが重要だと思われます。

2. 免震・制震の効果と課題(ダンパーの損傷例)

課題(その2): 鋼材ダンパー・鉛ダンパーの損傷例



鋼材ダンパーの残留変位・塗装のはがれ



鋼材ダンパーのボルトの緩み・塗装のはがれ



鉛ダンパー(関東地区)の亀裂(深さ約3mm)



鉛ダンパー(東北地区)の亀裂(深さ約7mm)

(スライド 64)

スライド65は、今説明した課題をまとめています。問題は、免震建物や制震建物について、余震を含む繰り返しの地震動に対する健全性評価や、地震後の残余耐力の評価の基準が明確になっ

2. 免震・制震の効果と課題(課題のまとめ)

■ 免震・制震の課題

・エクspansion・ジョイント部

- ⇒ ・利用者、管理者への十分な説明
- ・維持管理の徹底
- ・メーカーの動的試験による稼動・性能の確認

・免震・制震装置

- ⇒ ・ボルトの締め直しや装置交換に関する十分な説明
- ・維持管理の徹底
- ・余震を含む繰り返しの振幅による健全性評価
- ・地震後の残余耐力の評価

⇒ 構造ヘルスマモニタリング技術の活用・高度化

(スライド 65)

■ まとめと今後の課題

- ・東日本大震災では、建物の構造体の被害は少なかったが、非構造部材や生産設備、ユーティリティ設備に被害が見られ、事業活動に影響した。
- ・事業活動では、自社の事業所だけでなく、サプライチェーンや物流倉庫、ライフラインの被害が影響し、今後のBCPの課題である。
- ・生産施設の被害では、屋外タンク基礎や生産装置など、同じ場所、同じ形式で損傷したものが多く、被害に相関があると考えられる。
- ・免震・制震建物は、今回の地震ではそれなりに効果を発揮し、有効性が確認された。しかし、今後想定される南海・東南海地震に対する長周期地震動には、十分注意することが必要である。
- ・免震建物においてEXP.Jや免震装置の一部に損傷が見られた。EXP.Jについては、実際の挙動を考慮した動的試験による確認が必要であり、また、利用者や管理者への十分な説明が必要である。免震・制震装置については、地震後の健全性評価や残余耐力の評価が重要である。

(スライド 66)

ていないことです。1つの解決方法として、構造ヘルスマニタリング技術などを活用するのが良いと思います。

最後に、スライド66に講演の内容をまとめておきます。最初に非構造部材やサプライチェーンの被害の話をし、後半は、免震や制震建物が今回の地震ではそれなりに効果を発揮したというお話をしました。しかし、今後想定される南海・東南海地震の長周期地震動には十分に注意する必要があります。今回のように、何度も余震が繰り返すような場合には、特に注意が必要だと思います。また、エクспанション・ジョイントや免震装置の一部に被害が出ましたが、地震後の部材の健全性評価や残留耐力の評価が今後重要になると思います。以上、駆け足になりましたが、私の話は以上です。どうもご清聴ありがとうございました。

ご清聴ありがとうございました。



(スライド 67)

質 疑 応 答

【司会者】 どうもありがとうございました。それでは、最初の境有紀先生、それから先ほどの境茂樹先生、どちらにでも構いませんので、何かご質問がございましたらお願いします。

【質問者1】 文部科学省で学校の施設整備を担当しています。境有紀先生への質問です。弾性加速度応答スペクトルのグラフについては、場所によってデータが全く違うのではないかと思います。例えば、東日本太平洋沖地震の時には、新宿などでは長周期地震動が観測されており、スペクトルのグラフは、かなり右の方に寄っていたようにも記憶しております。

震源から離れていくに従って、地震波形がどのように変わっていくのか。あるいは、地盤が弱いところでは、長周期地震動が起きやすいのかどうか。例えば、今回、山の上にある東北大学の建物は大きな被害を受けたのですが、場所によって地震動のスペクトルは変わるのかどうか。そういうことをお聞きしたいと思います。

もう1つの質問は、地震の揺れの方向についてです。今ご説明を頂いたのは、横揺れだけの話なのか、それとも縦揺れも含めた話でしょうか。例えば、建物被害には、横方向の揺れだけが影響するのか、それとも縦方向の揺れも影響するのでしょうか。その辺りを教えて頂ければと思います。

【境有紀】 ご質問ありがとうございます。まず場所によってスペクトルが変わるかというご質問ですが、場所によってスペクトルは変わります。しかし、建物被害があったところのスペクトルは、岩手県・宮城県・福島県でも瓜二つと言えます。場所は離れていても被害のあったところで、震度6弱以上の地点のスペクトルを重ねると重なります。ただ震源から距離が離れるとスペクトルは徐々に広がっていきます。震源からずっと離れていくと地震波は減衰していきます。そして、その減衰には周期特性があって、短い周期の地震波の減衰は大きくなります。地震波に限らず波には周期の短い波は早く減衰し、周期の長い波つまり波長の長い波は遠くまで伝わるという性質があります。周期の短いところは削ぎ落されて、遠くでは長い周期の地震波だけが残ります。従って、東京ではゆっくりとした揺れを感じられたと思います。大阪などはさらに顕著で、ゆっくりとした揺れしか残らないことになります。

それと、地盤の影響は勿論あります。今回の講演では省略させて頂いたのですが、唯一被害のあった古川三日町というところは地盤が少し緩いところですが、その地盤の特性分だけ、長周期側のスペクトルが持ち上がっていて、少し被害が出たということです。震源に近ければ近いほど揺れは大きく、その揺れも伝わる距離に応じて減衰していきます。それでも残る長周期側のスペクトルと地盤の特性との両方の影響があります。被害調査に行くと、昔そこが川であったという地質的な要因で線状に建物被害が出ていることがあります。また、傾斜地を造成した場合には盛土と切土が交互になりますので、建物被害が一軒おきに出るということも実際にあります。このように地盤の影響もありま

すし、震源から距離が離れると地震波は減衰するのですが、その減衰の仕方に周期特性があるということにも注意が必要です。

もう1つのご質問は、建物被害には横揺れがきくのか縦揺れがきくのかということですが、縦揺れは建物被害には全くといってよい程関係はありません。上下方向の揺れでは建物は潰れません。縦に細長い柱をどれだけ縦に潰そうとしても潰れないからです。割り箸を折るのは簡単ですが、縦に潰そうと思っても潰れないのと同じです。最終的に家が潰れたとしても、それは水平方向の揺れによってダメージを受けた後に重さによって潰れたもので、上下動の影響はほとんど考える必要はありません。阪神淡路大震災の時には、建物の柱が折れて2階部分が落下した家が多くありましたが、これは上下方向の揺れて潰れたのではなく、水平方向の揺れが原因です。

【質問者1】 そうすると、ご講演での揺れという言葉は、水平方向の揺れということでしょうか。

【境有紀】 はい、水平方向のみです。地震動は上下方向も揺れていて、しかも、人体感覚は上下方向の揺れを敏感に感じます。ですから、計測震度は、3方向の合成です。講演で用いた加速度応答スペクトルは水平2方向の合成ですが、3方向の合成のスペクトルが使われることもあります。ただし、上下方向の振幅は、水平方向の振幅に比べて大体3分の1から4分の1ぐらいですから、上下方向を合成してもスペクトル自体はほとんど変わりません。

【司会者】 宜しいでしょうか。他にはございませんか。どうぞ。

【質問者2】 今日は興味深いお話をありがとうございました。有紀先生と茂樹先生に1つずつ質問があります。境有紀先生は、地震動の周期1秒以下の部分では人体感覚に一致し、1秒以上の部分では建物に被害を与えるということと、それに関連して、今後の震度算定法の向上ということも課題として挙げておられました。建物被害の状況を反映するためには、周期1秒以上の部分を現行の震度算定法に組み入れた方が良いのか、あるいは建物被害をあらわす別の指標として出した方が良いのか、その辺のご意見があればお伺いしたいと思います。

【境有紀】 そうですね。そのようなことを言いだしたのは、今から10年前です。10年前は私も若かったので、震度算定法を変えようと言って颯を買いしました。私の主張は、最初の頃はなかなか分かってもらえなかったのですが、その後沢山地震があつて、私の言った通りになるものですから、今は

信用して頂いております。この頃では、気象庁の検討会にも呼んで頂けるようになりました。私も年を取って世の中の仕組みが分かってきて、震度を変えるのは難しいと感じるようになりました。ただ、新しい震度算定法も提案させて頂いていますし、実は気象庁から発表される資料に、私の震度も載るようになっております。震度については、第2報や第3報が出るのですが、そこには被害対応を含めて私の震度も掲載されています。

震度は人体感覚を測るものであり、それとは別に被害指標のようなものを作ってはどうかという考え方もあります。官僚になった同級生も沢山いて、震度を変えるのは難しいので、そのような指標を考えれば良いのではないかと、アドバイスをくれることもあります。また、そのようにおっしゃって下さる先生方もいます。それも分かるのですが、震度は幾つ、被害と対応した震度は幾つと出ているのは、国民目線で考えるとダブルスタンダードになってしまいます。専門家にとっては問題ないでしょうが、一般市民の立場に立つと分かりにくいのではないかと考えております。

実は、体感というのは震度5以上では同じなのです。震度5以上では、怖くて立っていられないので、震度5や震度6や震度7は、体感ではあまり区別が付かないわけです。ですから、震度6や震度7で人体感覚と一致するといっても、意味があるとは思えません。それで、震度5までは人体感覚に一致させて、震度6と震度7は被害状況と一致する指標が良いのではないかと思います。建物被害に対応する震度の計算方法を提案させて頂いておりますので、それを採用して頂けるかどうかは気象庁さん次第だと考えております。ダブルスタンダードでは分かりにくいので、その方が良いのではないかと考えています。しかし、たとえ指標という形であっても、被害を判定する指標はあった方がよいので、その辺りは妥協点を考えていくことになると思います。

【質問者2】 防災関係者向けには、そのようなものも出ているということでしょうか。

【境有紀】 私の研究室のホームページ上では発表しておりますし、気象庁さんの方でも計算して、一応30分後に指標を出して頂いているようです。

【質問者2】 ありがとうございます。境茂樹先生は、免震構造物の例や長周期地震動に対する課題などを挙げられていました。先ほどご紹介頂いた例も含めて、堆積地盤上に超高層の免震建物を建設する場合の何か良い考え方があればお聞かせください。

【境茂樹】 ご紹介した茨城県の超高層建物は、実際に地震の揺れが測定できた建物で、免震の効

果が確認されたケースです。これは、今回の東北地方太平洋沖地震が短周期の地震動が卓越した地震であったこと、地震動が短周期であればあるほど免震の効果が出やすいことの2つが関係していると思います。長周期地震動に対応するためには、ダンパーをパラメータ制御するなどして、免震の周期を変えることも必要ではないかと思っています。

先程、境有紀先生の講演にあった大崎市古川では、周期3～4秒の地震動が卓越していました。その地震波を使ってシミュレーションした結果、この建物でもやはり 50cm ぐらいの変位が起きます。今の免震建物のクリアランスは大体 30～40cm ぐらいの変位で設計されていますので、変位が 50cm になると何らかの被害が予想されます。例えば、建物が擁壁にぶつかる被害が起きるだろうと思います。もう少し減衰ダンパーの性能を向上させると同時に、たとえ擁壁ぶつかってもクッション材で受けて被害が出ないようにする、などの工夫が必要だと思っています。

【質問者2】 例えば、減衰ダンパーの性能を向上させれば、都心の超高層ビルなどにも適用できるのでしょうか。

【境茂樹】 はい、そう思います。

【司会者】 私も便乗して質問させていただきますが、現在の東京で 100mを超えるような超高層ビルは、ほとんど制震・免震などの対策はなされていると考えてよいのでしょうか。

【境茂樹】 はい。最近の建物のほとんどは、対策済みだと思います。高さ 60mを超えて 100mぐらいの超高層建物になると、地震荷重よりも風荷重の方が大きくなってきます。ですから、地震用ではなくても、風対策用に制振(制震)装置を入れなければ強風によって被害を受けます。制振(制震)装置は、最近のほとんどの高層建物に設置されています。後は、どれぐらいの長周期地震動まで有効に働くのかとか、減衰がどれだけ効くのかということになりますが、まだはっきりわかっていません。新宿センタービルのように、今回の地震で確認されたものもありますが、結果が公表されていないところも多くあると思います。やはり建物内での地震観測を増やして、制震装置や免震装置を修正したり、検討したりしていく必要があるのではないかと思います。

【質問者3】 境有紀先生に質問です。建物の弾性周期ではなく、塑性化した時の等価周期で建物の被害が決まるというお話ですが、揺れは最初のうちは小さくても、共振して揺れが徐々に大きくな

り、それに伴って変位も大きくなって塑性化が起こり、その時に等価周期の地震動があれば建物が壊れるという意味でしょうか。

【境有紀】 必ずそのようなご質問を受けるのですが、そうではありません。普通は、周期 0.3 秒の振り子を1秒の周期で揺すっても揺れません。このことから類推で、先ず周期が 0.3 秒の波が来て、徐々にヒビが入って建物の塑性化が起こり、その後に壊れると考える人が多いと思いますが、実際にはそうではありません。いきなり周期1秒の振動を与えても建物は壊れます。これは、実験もシミュレーションもやったことがあります。弾性周期 0.3 秒の非線形の模型をつくり、そこに周期1秒のサイン波を入れても立派に壊れます。兵庫県南部地震の記録を見ても、周期が1～2秒の波は、サイン波にして1波か2波なのです。それで家が壊れるので、そこがやはり不思議なところですよ。周期 0.3 秒の(非線形)振り子に周期1秒の振動を1周期だけ加えても振り子は大きく揺れてしまう、ということに相当しています。非線形微分方程式を解いても非線形模型の実験でもそうなるのですが、感覚的には非常に理解し難い現象です。周期 0.3 秒の振り子に周期1秒のサイン波がやって来ても、振り子は揺れ始めるのです。時系列的には、まず少し壊れて、次に周期が1～2秒に延びて、壊れる時には周期1～2秒で共振するということが、1周期の間に一気に起こってしまうと考えると、少しは理解しやすいかもしれないと思います。

【質問者3】 なかなか難しい話ですが、ありがとうございました。

【司会者】 そろそろ時間になりましたので、最後にどうしてもというご質問があれば伺いたいと思います。無ければこれで講演会を終了したいと思います。それでは、今日は本当に貴重なお話をありがとうございました。最後に両先生に拍手をお願いします。

(終了)