



地震時における構造物の 「揺れ」の評価方法を「定量化」する新技術

日本大学 工学部 建築学科
教授 ガン ブンタラ ステンリー
(GAN, BUNTARA STHENLY)

2022年12月20日

日本における耐震建築技術について

- 日本における耐震建築技術の開発は1891年から～
- 大地震で多くの建物が倒壊した経験が、研究や技術開発を後押し
- 1919年以來、建物や橋の耐震設計を義務付ける法律が制定された



出典：南海地震昭和21年（坂出市ウェブ）
<https://www.city.sakaide.lg.jp/site/bousai/jisin3.htm>



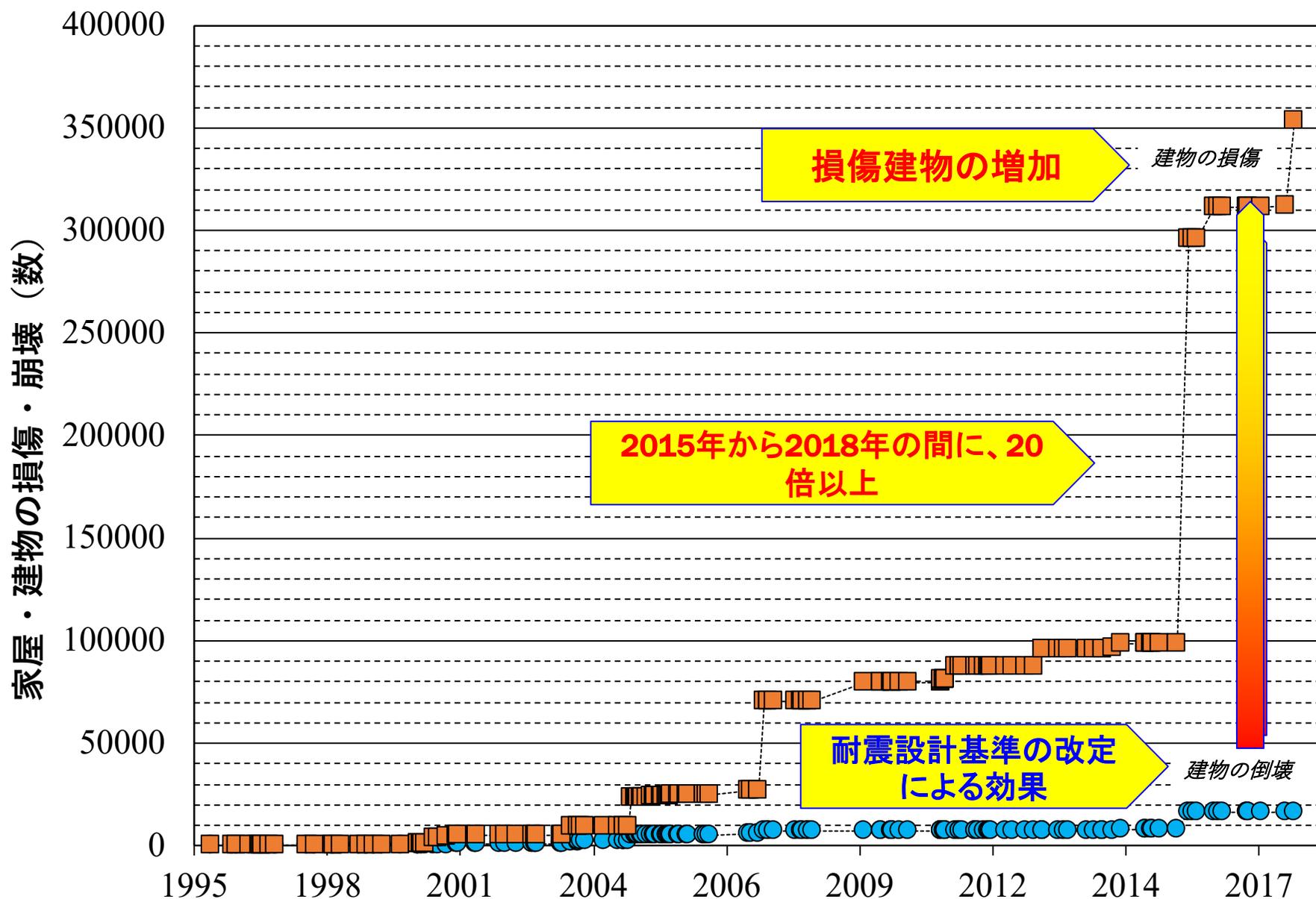
出典：福井地震昭和23年（ウィキペディア）
<https://ja.wikipedia.org/wiki/福井地震>



出典：兵庫県南部地震平成7年（ウェザーニューズウェブ）
<https://weathernews.jp/s/topics/201903/290075/>

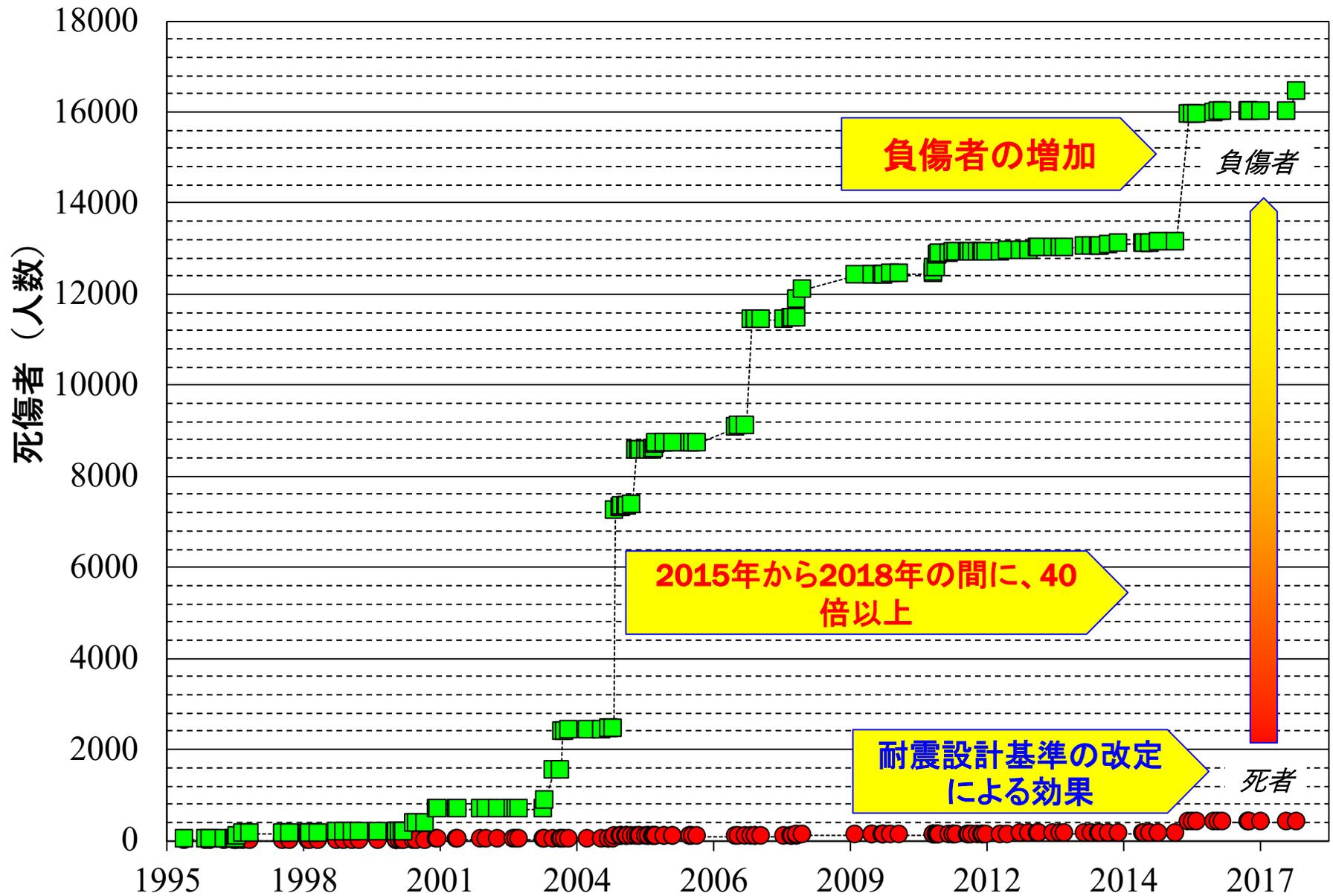


建物倒壊に関する統計(気象庁、1995～2018)





人的被害に関する統計(気象庁、1995~2018)



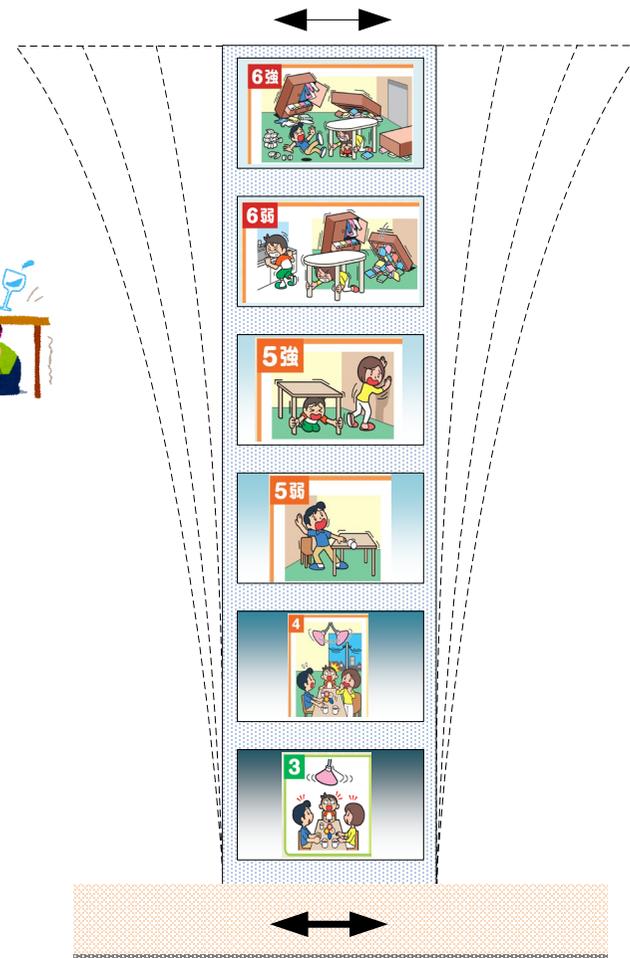


耐力概念に加えて“ゆれ”による被害対策・防止

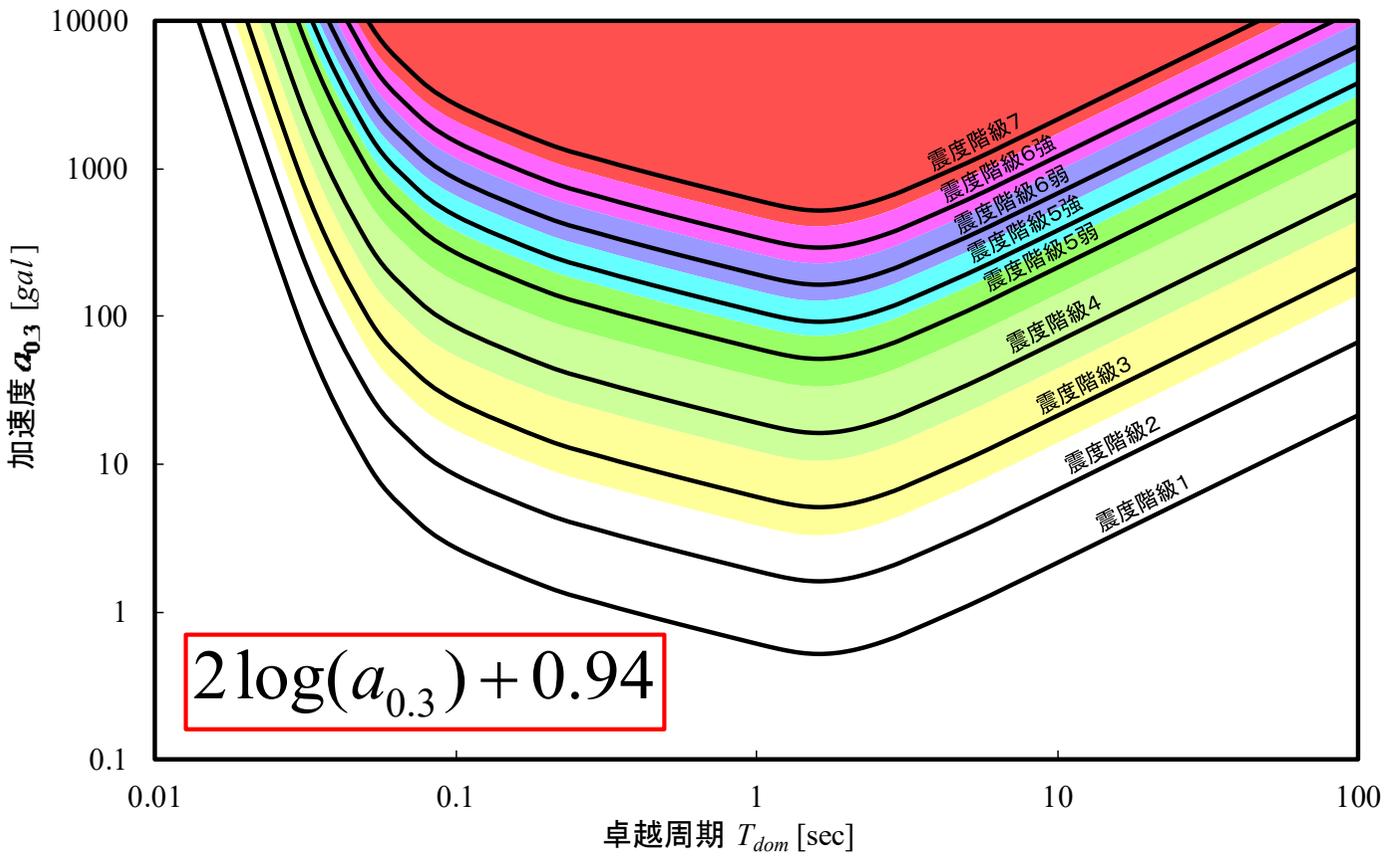
STRONG... but ...**Shaking**



強震時の家屋・建物の状況
(震度階級6強相当例)



ゆれなどの現象の目安表(震度階級)および算出方法



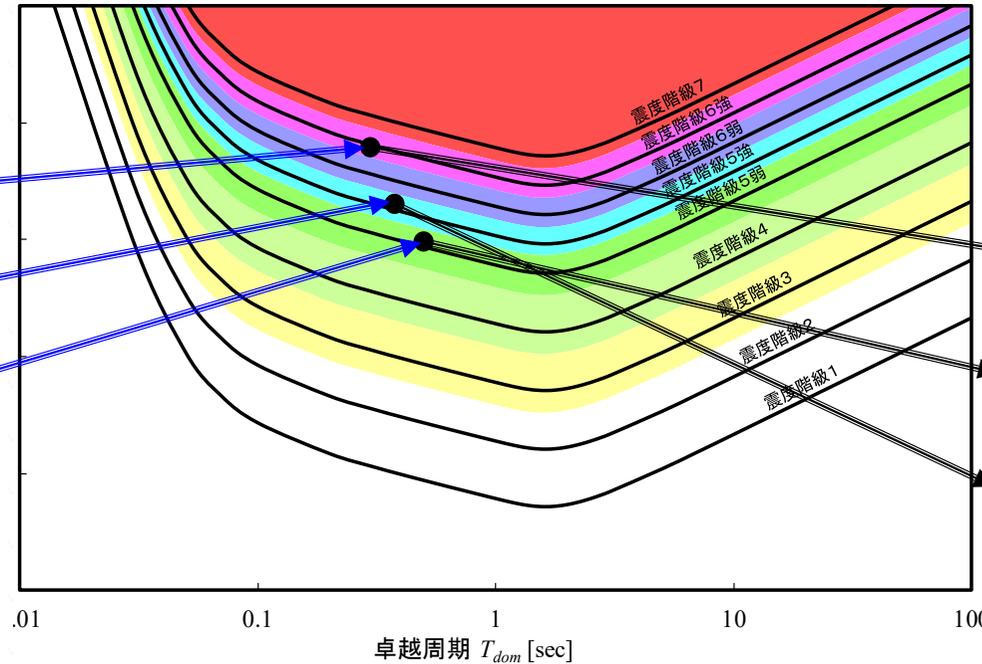
出典: 気象庁 リーフレット「その震度 どんなゆれ？」
(<https://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/kaikyuhyo/index.html>)

計測震度

- 気象庁が発表する震度は、気象庁、地方公共団体及び国立研究開発法人防災科学技術研究所が全国各地に設置した地震観測点で観測した震度である。



定量的ゆれ(震度階級)の計算は、なぜ必要か



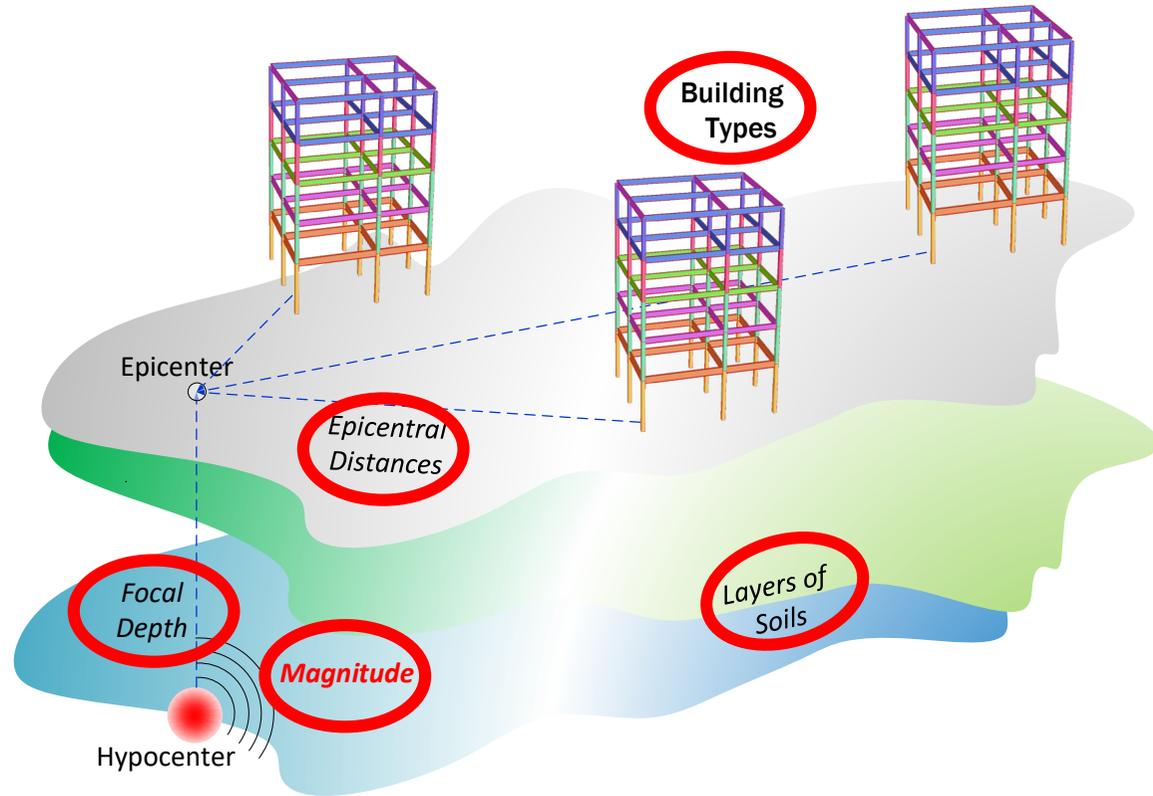
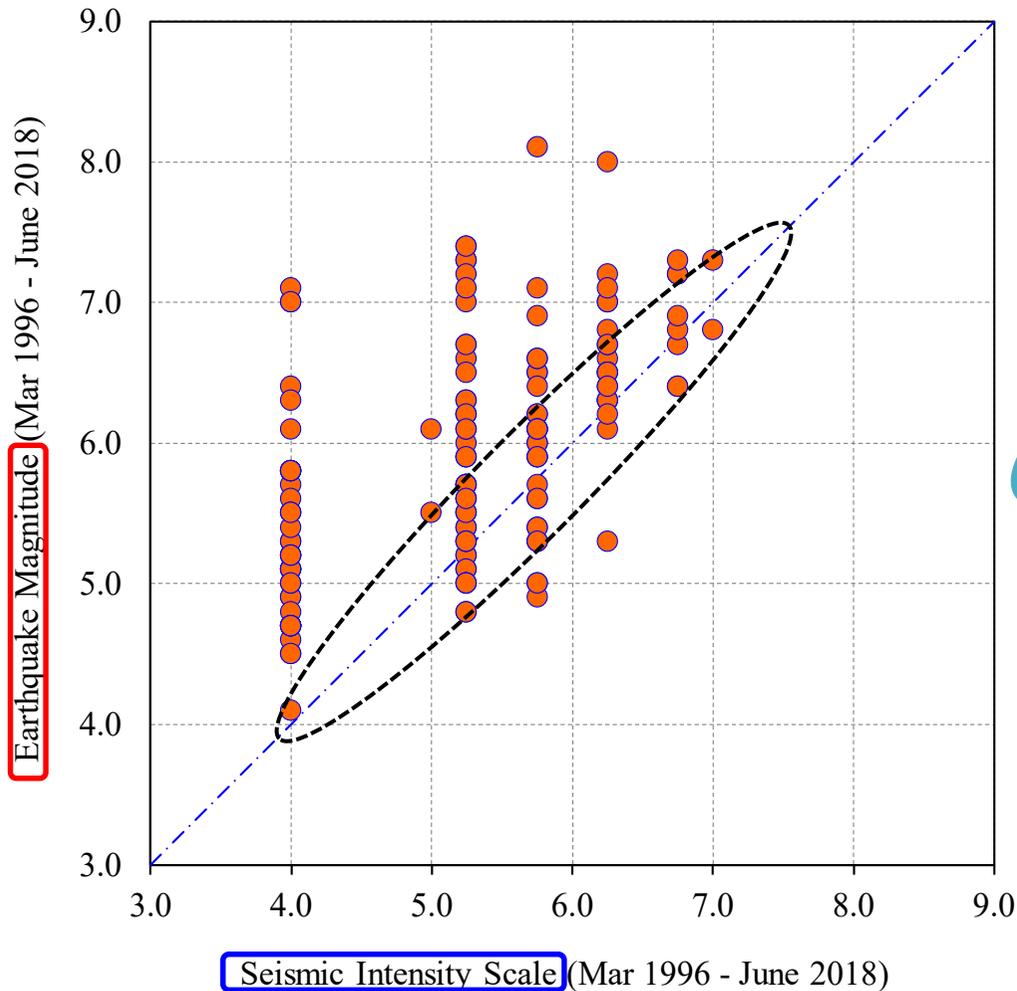
<p>0 【震度0】人は寝ている。</p>	<p>1 【震度1】室内で静かにしている人の大半がゆれを感じる。</p>	<p>2 【震度2】室内で静かにしている人がいる。</p>	<p>3 【震度3】室内にいる人のほとんどがゆれを感じる。</p>
<p>4 【震度4】ほとんどの人が驚く。電灯などのつり下げ物は大きく揺れる。席の悪い電物が倒れることがある。</p>	<p>5弱 【震度5弱】大勢の人が恐怖を感じ、物につまづきたいと感じる。棚にある食器や本が落ちることがある。固定していない家具が揺れることがあり、不安定なものは倒れることがある。</p>	<p>5強 【震度5強】物につまづかないと歩くことが難しい。棚にある食器や本で落ちるものが増える。固定していない家具が倒れることがある。揺らがないフロアコンクリートが割れることがある。</p>	<p>6弱 【震度6弱】はわいといふことができない。飛ばされるものもある。固定していない家具のほとんどが移動し、倒れるものが増える。前震性の強い水産物は、傾くものや、倒れるものが増える。</p>
<p>6強 【震度6強】はわいといふことができない。飛ばされるものが増える。固定していない家具のほとんどが移動し、倒れるものが増える。前震性の強い水産物は、傾くものや、倒れるものが増える。大きな地面げが生じたり、大規模な崖すべりや山崩れが発生することがある。</p>	<p>7 【震度7】前震性の強い水産物は、傾くものや、倒れるものが増える。固定していない家具のほとんどが移動し、倒れるものが増える。前震性の強い水産物でも、傾くものや、倒れるものが増える。前震性の強い水産物でも、傾くものや、倒れるものが増える。</p>		

1. 地震観測点(地表面)で観測した震度
2. 地震観測点の地震波を用いて建物の時刻歴応答(加速度)は動的解析より
3. 建物の特階における応答加速度より震度階級を算出



なぜマグニチュードではなく震度階級を使用する理由

リヒターマグニチュードと震度階級の
の相関関係 (気象庁, 1995-2018)



震度階級に影響を及ぼす項目

1. マグニチュード
2. 震源の深さ
3. 建物との距離
4. 建物の種類
5. 地盤

なぜマグニチュードではなく震度階級を使用する理由

さまざまな建物の地震対策工法



免震装置



建物

アクティブダンパー



建物

耐震補強



建物



応用：建物の計画・設計（構造）

建物の設計においては、基準の耐力要求に加えて“ゆれ”の設計もできる

【震度0】 屋内で歩いている人が感じるような揺れはほとんどありません。

【震度1】 屋内で歩いている人が感じるような揺れはありますが、大抵は問題ありません。

【震度2】 屋内で歩いている人が感じるような揺れはありますが、大抵は問題ありません。

【震度3】 屋内で歩いている人が感じるような揺れはありますが、大抵は問題ありません。

【震度4】 ほとんどの人が驚く。固定している家具の大半が移動し、倒れるものもある。倒れるものがある。

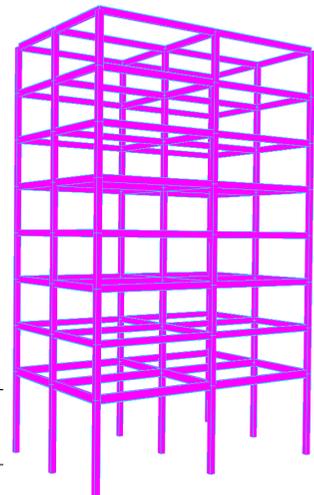
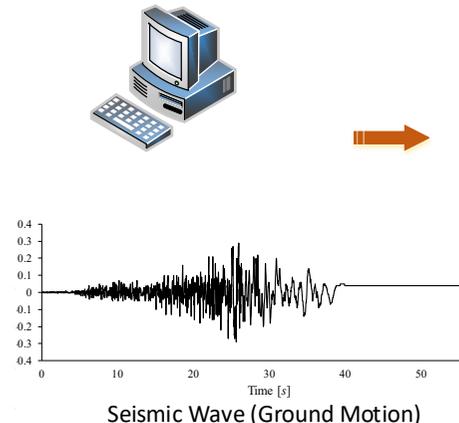
【震度5弱】 ほとんどの人が恐怖を感じる。固定している家具の大半が移動し、倒れるものがある。倒れるものがある。

【震度5強】 ほとんどの人が恐怖を感じる。固定している家具の大半が移動し、倒れるものがある。倒れるものがある。

【震度6弱】 ほとんどの人が恐怖を感じる。固定している家具の大半が移動し、倒れるものがある。倒れるものがある。

【震度6強】 ほとんどの人が恐怖を感じる。固定している家具の大半が移動し、倒れるものがある。倒れるものがある。

【震度7】 ほとんどの人が恐怖を感じる。固定している家具の大半が移動し、倒れるものがある。倒れるものがある。



Computed SIL values (e.g.)

- 6.0
- 5.5
- 5.0
- 4.5
- 3.5
- 3.3
- 3.0

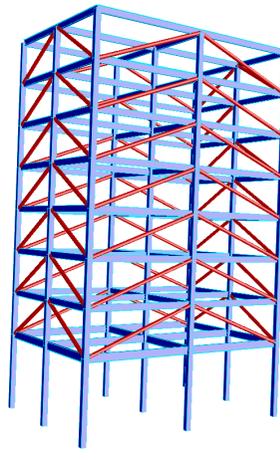
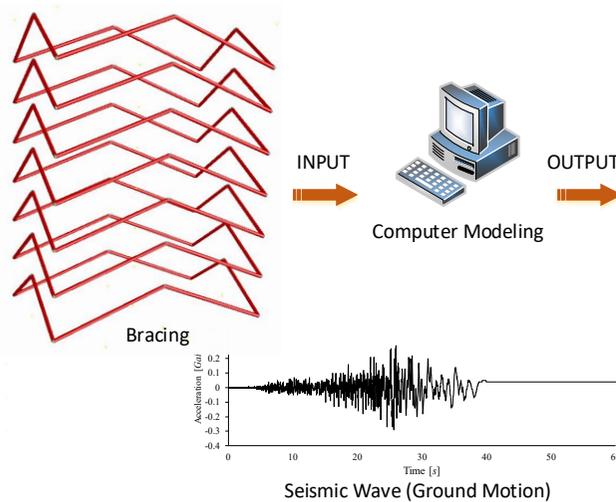


応用：既存建物の耐震補強（ブレーシング工法）

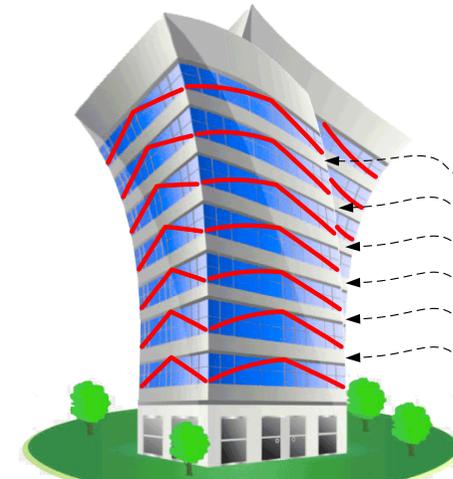
建物の耐震補強においては、基準の耐力要求に加えて“ゆれ”の推定もできる



Existing Building



Building Model



Existing Building

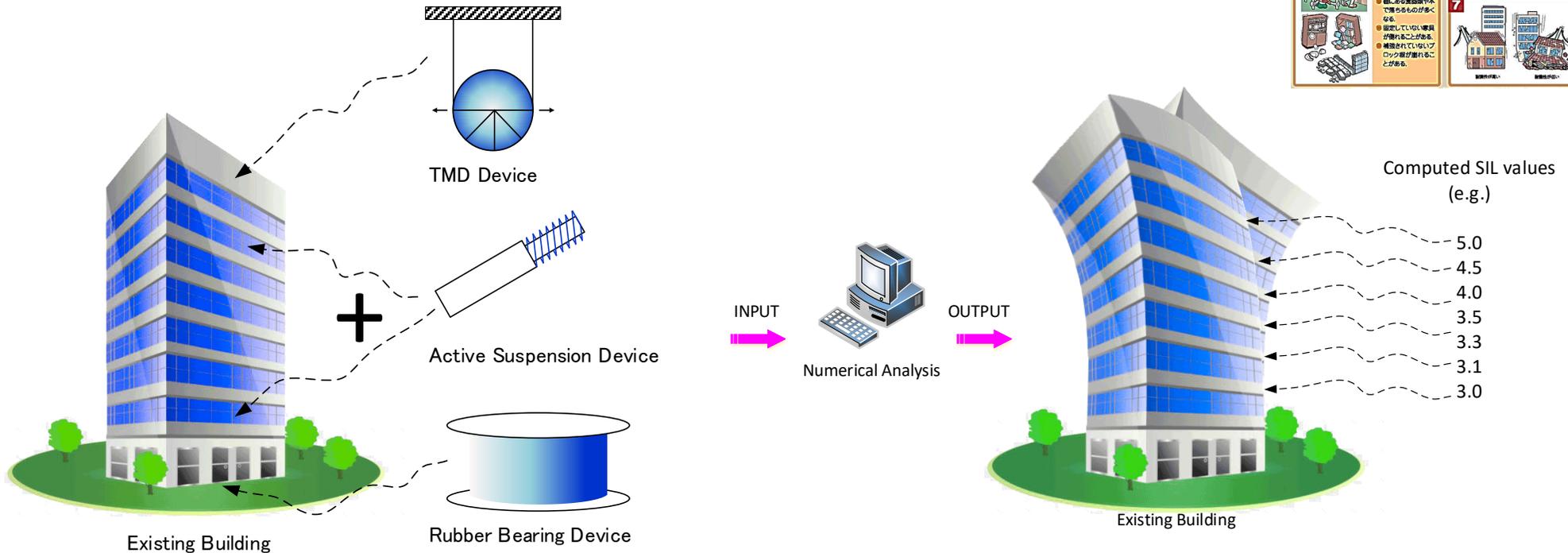
Computed SIL values (e.g.)

- 5.0
- 4.5
- 4.0
- 3.5
- 3.3
- 3.1
- 3.0



応用：免震装置・アクティブダンパーなどの耐震評価

建物に取り付ける制震・免震などの地震対策法においては、基準の耐力要求に加えて“ゆれ”の評価もできる

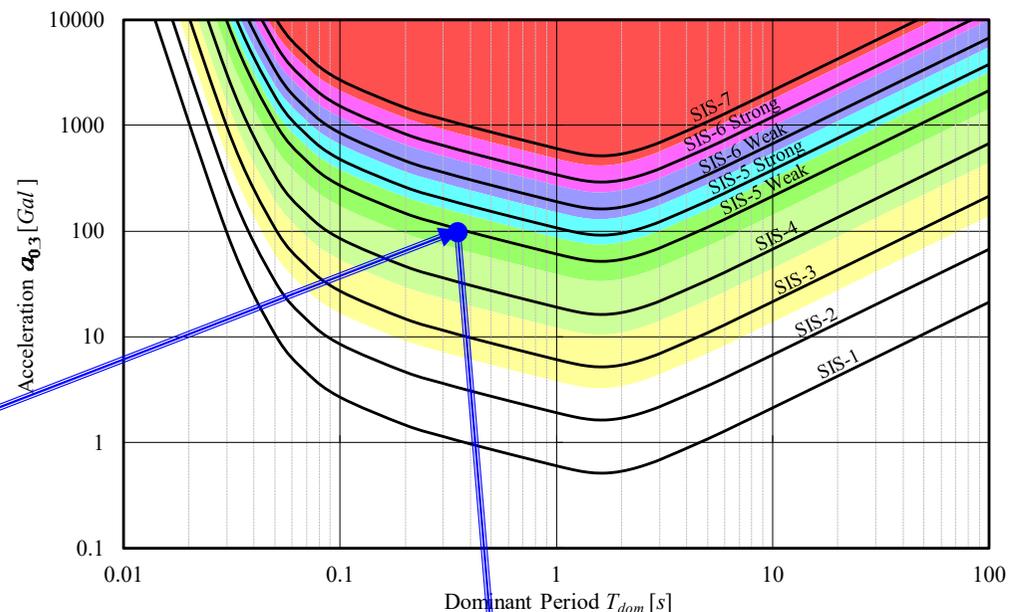


実証実験：地震時の建物の性能評価する

出典：国立研究開発法人防災科学技術研究所

E-DEFENSE 【32】高さ27.45mの10階建て鉄筋コンクリート造建物(2015年12月)

(<https://www.bosai.go.jp/hyogo/research/movie/movie-detail-1402.html>)



<p>【震度0】</p> <ul style="list-style-type: none"> 人はいずれも感じない。 	<p>【震度1】</p> <ul style="list-style-type: none"> 室内で静かにしている人の大半は、震れをわずかに感じる人がいる。 	<p>【震度2】</p> <ul style="list-style-type: none"> 室内で静かにしている人の大半は、震れを感じる。 	<p>【震度3】</p> <ul style="list-style-type: none"> 室内にいる人のほとんどが、震れを感じる。
<p>【震度4】</p> <ul style="list-style-type: none"> ほとんどの人が驚く。 壁などの上のつり下げ物は大きく揺れる。 窓の悪い建物が、壊れることがある。 	<p>【震度5弱】</p> <ul style="list-style-type: none"> 大平の人が恐怖を感じ、物につかまらないうる。 壁にある食器棚や本が落ちることがある。 固定していない家具が移動することがあり、不安定なものも壊れることがある。 	<p>【震度5強】</p> <ul style="list-style-type: none"> 物につかまらないうる。 壁にある食器棚や本で落ちるものがある。 固定していない家具が壊れることがある。 傾斜しているフロアが崩れることがある。 	<p>【震度6弱】</p> <ul style="list-style-type: none"> 立てっことも所崩れる。 固定していない家具の大半が移動し、倒れるものもある。ドアが開かなくなることがある。 壁のタイルや窓ガラスが破損、落下することがある。 耐震性の低い水廻り設備は、瓦が落下したり、建物が傾いたりすることがある。倒れるものもある。
<p>【震度6強】</p> <ul style="list-style-type: none"> ほとんどの人が驚くことができない。 固定していない家具のほとんどが移動し、倒れるものがある。 耐震性の低い水廻り設備は、壊れるものが多い。 大きな揺れが生じたり、大規模な破損や倒壊が生じることがある。 	<p>【震度7】</p> <ul style="list-style-type: none"> 耐震性の低い水廻り設備は、壊れるものが多い。 耐震性の高い水廻り設備でも、壊れるものがある。 耐震性の高い水廻り設備でも、壊れるものがある。 耐震性の高い水廻り設備でも、壊れるものがある。 		

事例：既存建物の耐震補強（ブレーシング工法）



出典：日本大学工学部 東日本大震災 被害報告書

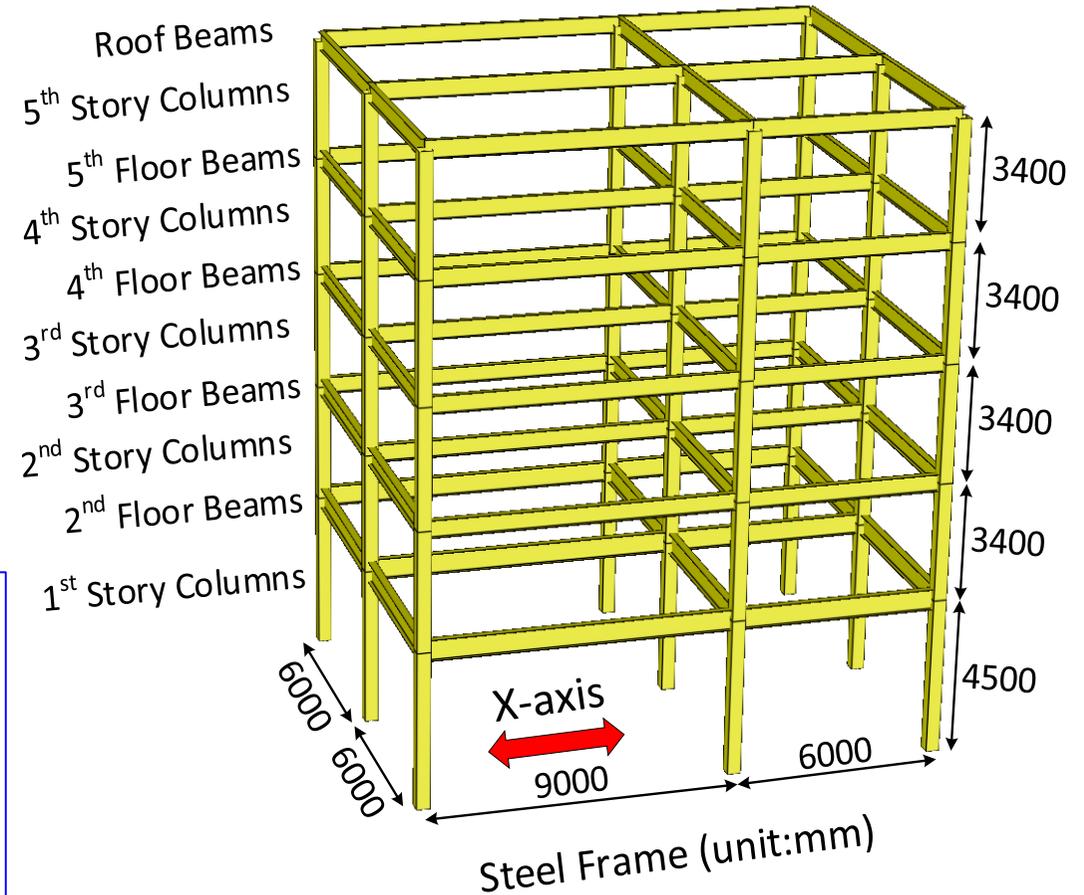


解析例：E-DEFENSE Projectに用いた鉄骨造（耐震の評価）

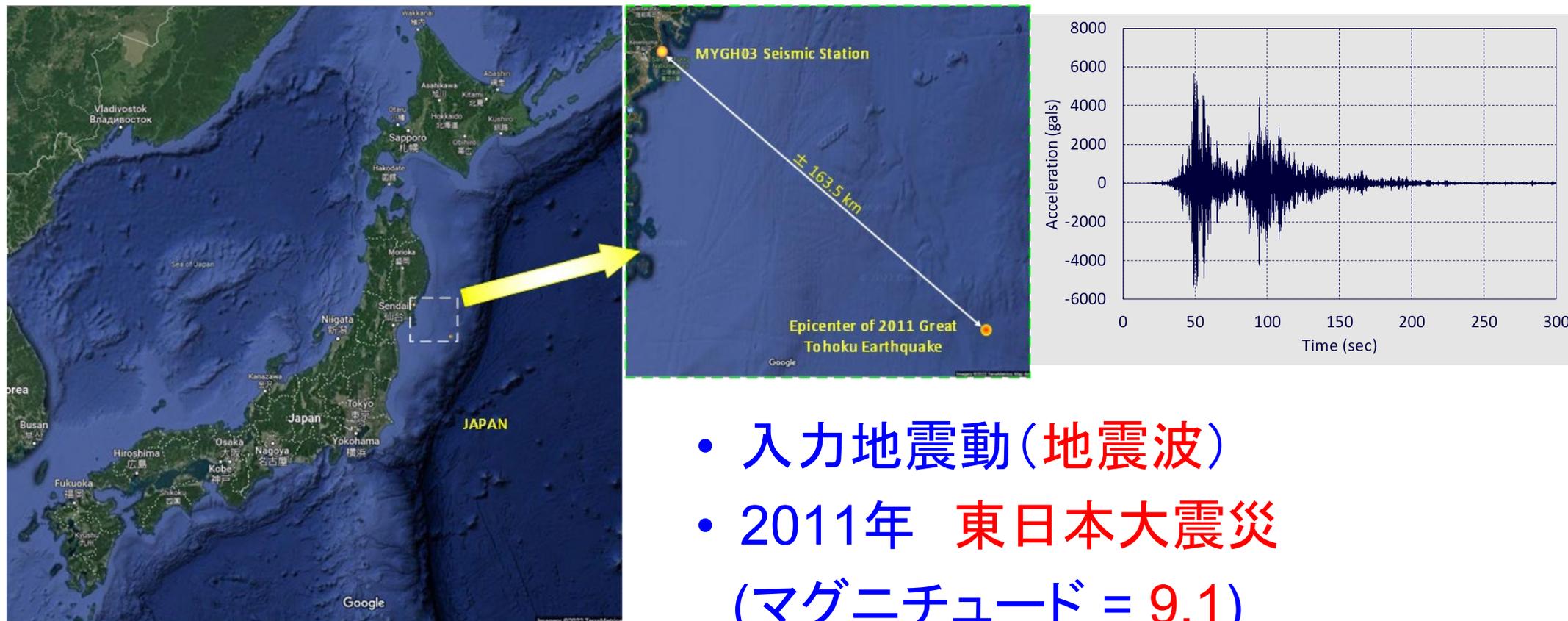
- 構造モデル
- 鉄骨造5階建
(E-DEFENSEプロジェクト)
- X軸方向に「東北地方太平洋沖地震」の地震波

Table 1 Cross sections of beams and columns of the building prototype.

Floor	Story	Beam	Column
Roof		W-500x200x9x16	
	5		□-400x400x12
5		W-500x200x9x19	
	4		□-400x400x16
4		W-500x200x9x22	
	3		□-400x400x19
3		W-500x250x9x22	
	2		□-400x400x19
2		W-600x250x12x22	
	1		□-400x400x22



解析例：地震観測点MYGH03の「東北地方太平洋沖地震」



出典：グーグルマップ
(<https://www.google.com/maps/>)

- 入力地震動(地震波)
- 2011年 東日本大震災
(マグニチュード = 9.1)
- MYGH03地震観測点で記録された地震波を使用

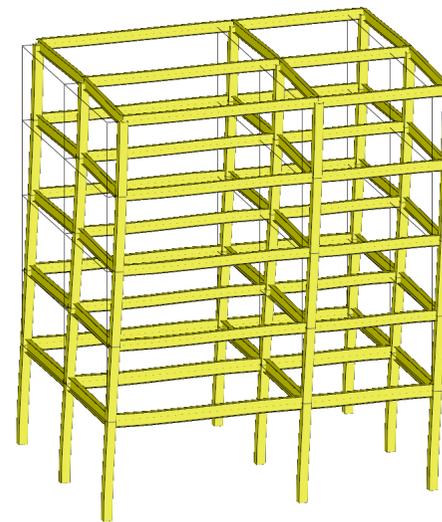
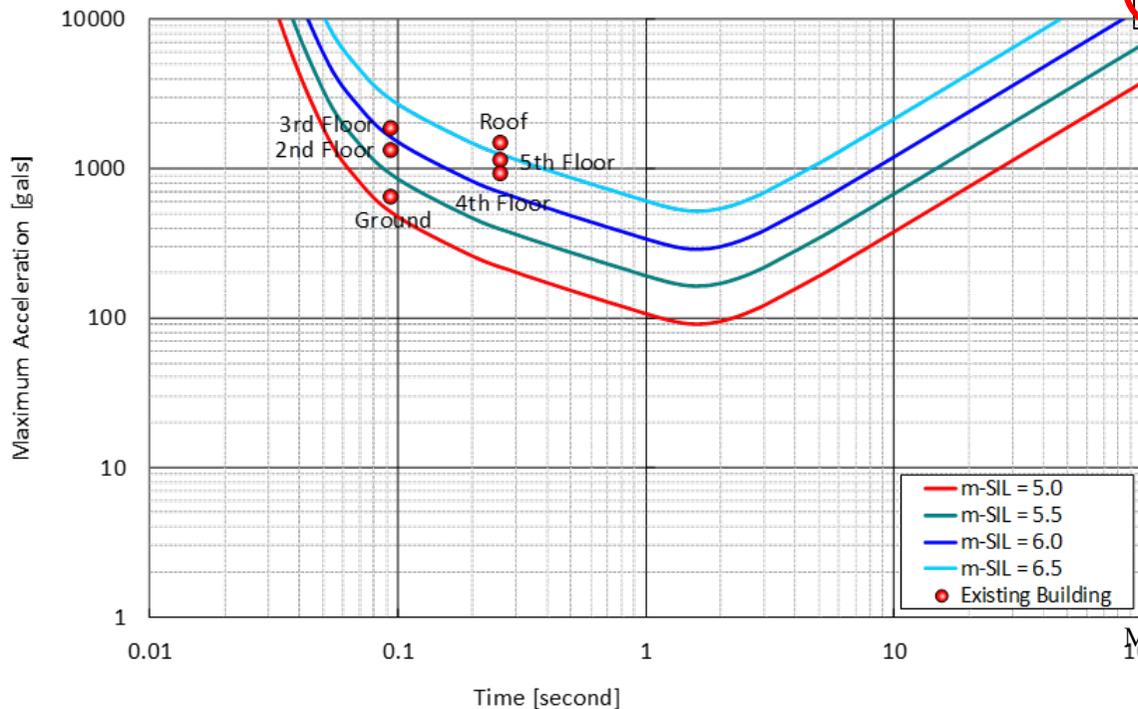


解析例：既存鉄骨造の“ゆれ”状況

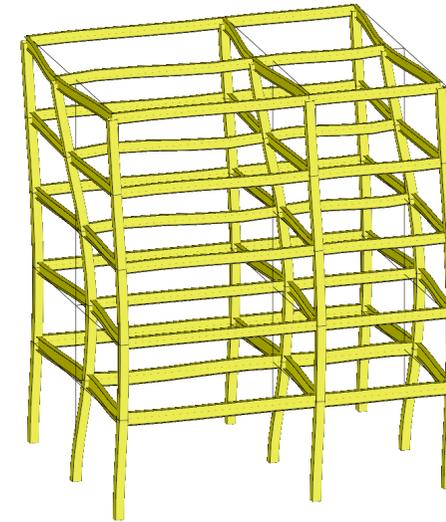
- 既存鉄骨造の定量的“ゆれ”の評価
- 建物の特階の震度階級値の算出
- 気象庁の震度階級図に提示

Table 2 Responses of the existing building prototype.

Floor	SIS	Max Acceleration (gals)	T (sec)	Modal Analysis
Roof	6.6	1461.4	0.2621	Mode 1: T = 0.2621 sec
5	6.4	1116.0	0.2621	Mode 2: T = 0.2173 sec
4	6.2	909.70	0.2621	Mode 3: T = 0.1870 sec
3	6.1	1831.4	0.0942	Mode 4: T = 0.0942 sec
2	5.8	1303.3	0.0942	...
1	5.2	640.20	0.0942	...



Mode 1 (T=0.2621 sec)

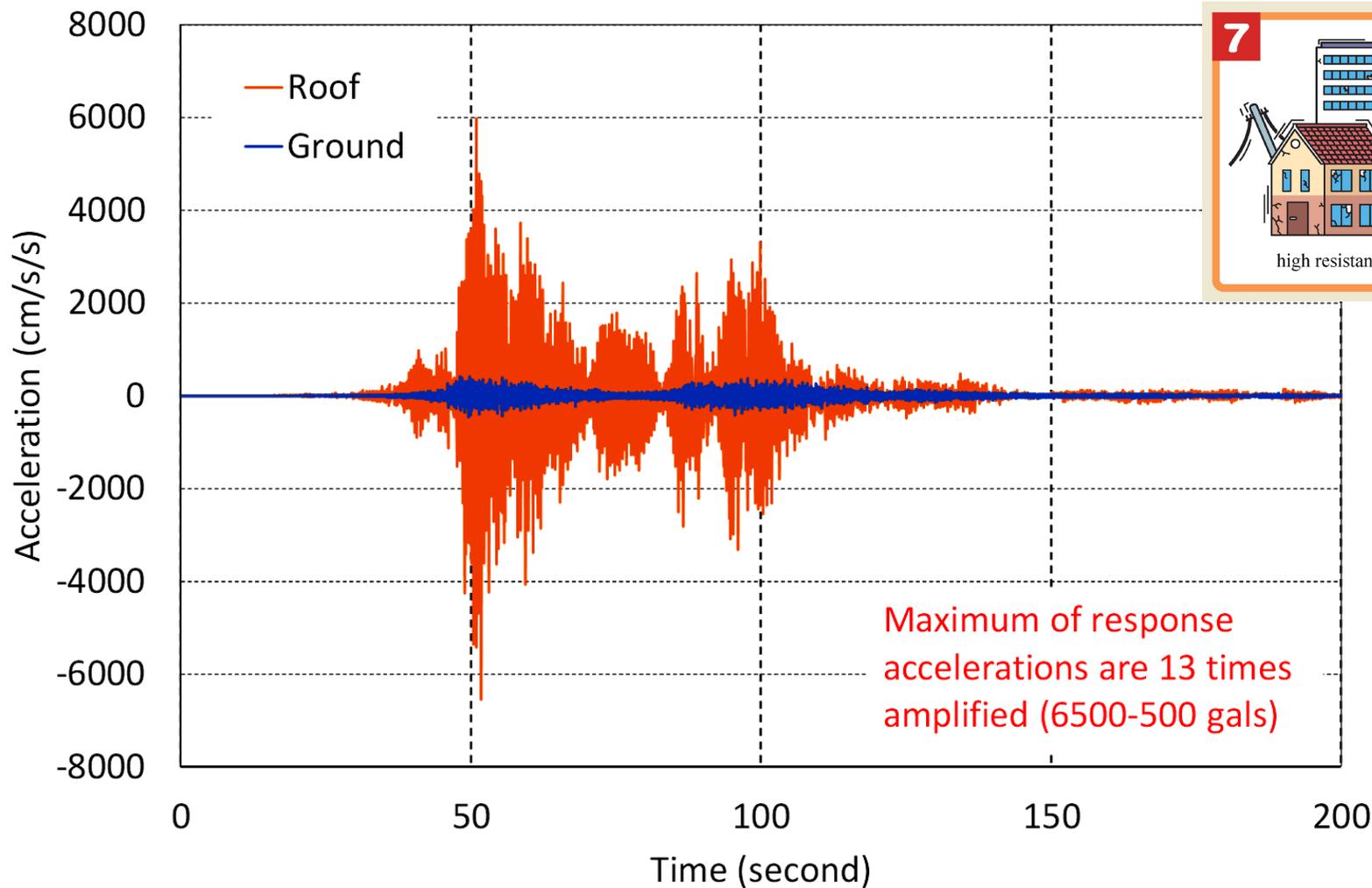


Mode 4 (T=0.0942 sec)



解析例：既存鉄骨造の“ゆれ”状況

- 地表面と屋上既の加速度により算出した定量的“ゆれ”の比較



7

high resistance low resistance

[SIL : 7]

- Wooden houses with low earthquake resistance are more likely to lean or collapse.
- Wooden houses with a high earthquake resistance may lean.
- The majority of reinforced concrete buildings with low earthquake resistance will collapse.

5w

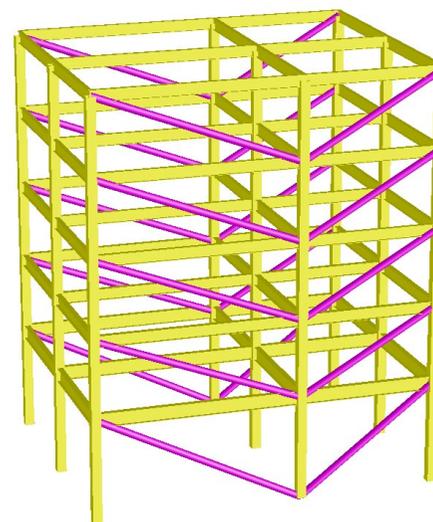
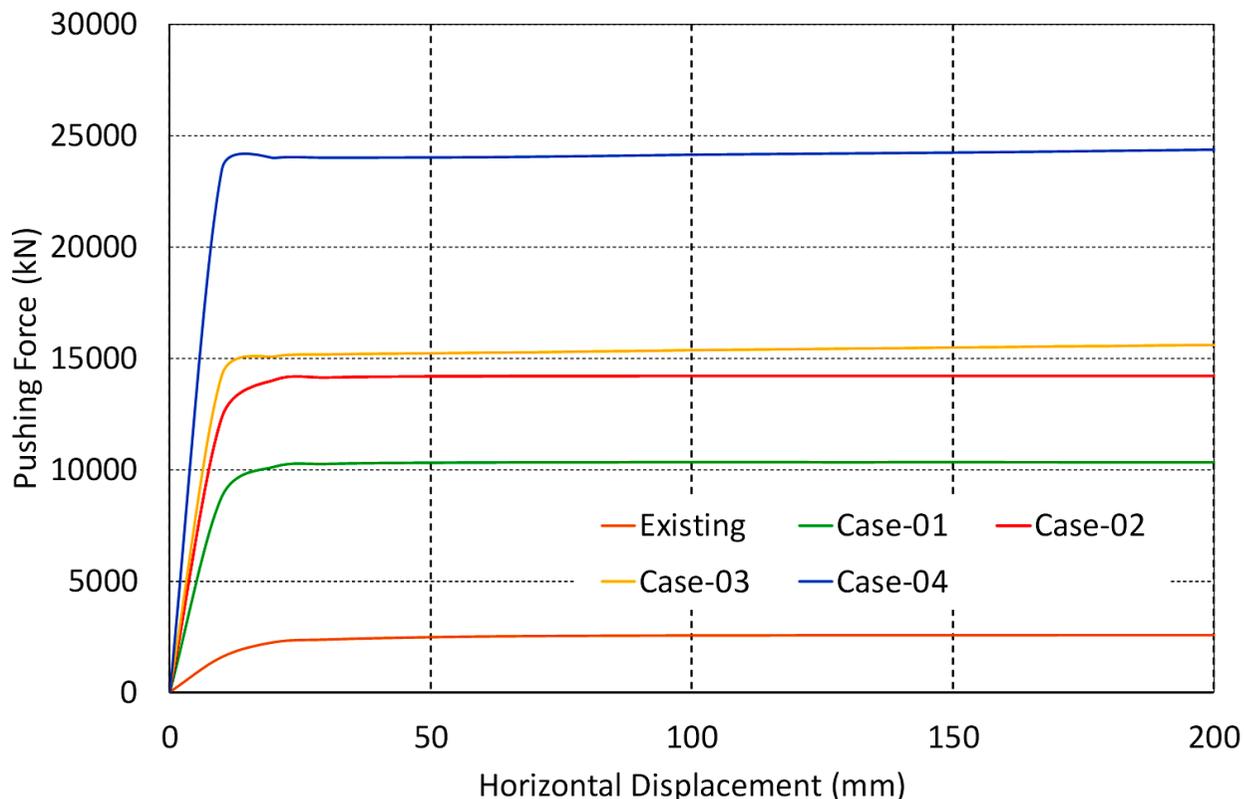
[SIL : 5 WEAK]

- Many people are frightened and feel the need to hold onto something stable.
- Dishes in cupboards and items on bookshelves may fall.
- Unsecured furniture may move, and unstable furniture may topple over.

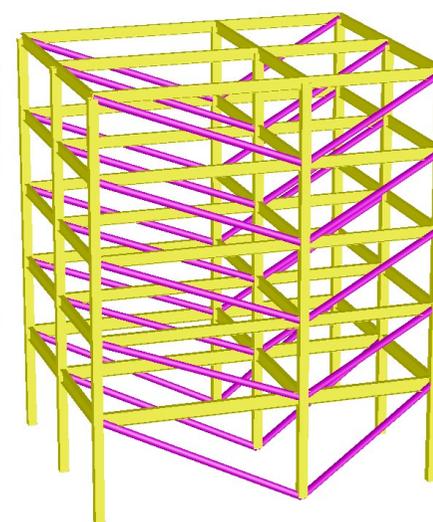


補強例：既存鉄骨造を耐震補強する場合（ブレーシング工法）

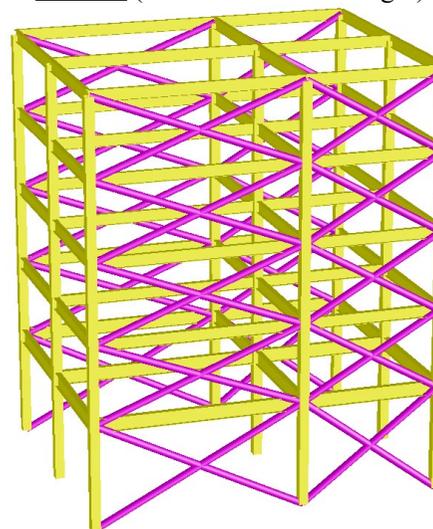
- ブレーシング工法で4つの強化例
- 既存の鉄骨造総質量より17.4%、26.0%、34.7%、52.1%質量増加例
- 保有水平耐力解析の結果



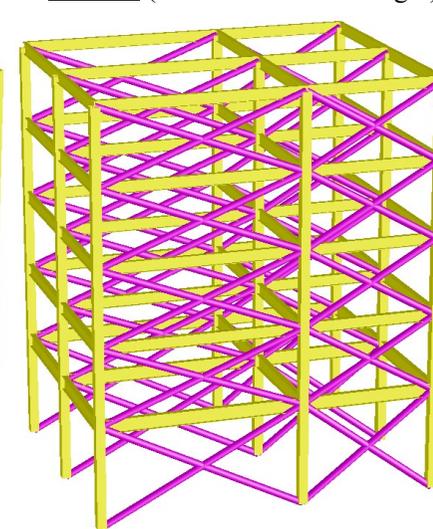
Case-01 (17.4% additional weight)



Case-02 (26.0% additional weight)



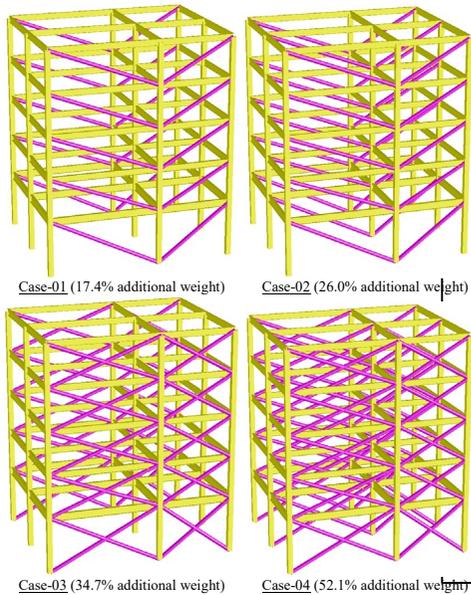
Case-03 (34.7% additional weight)



Case-04 (52.1% additional weight)



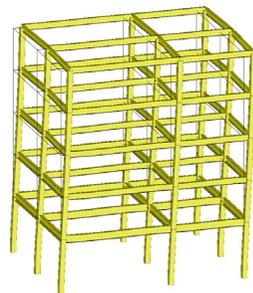
補強例：既存鉄骨造を耐震補強する場合（ブレーシング工法）



Floor	Case-01		Case-02		Case-03		Case-04	
	SIS	T (sec)	SIS	T (sec)	SIS	T (sec)	SIS	T (sec)
Roof	6.8	0.0941[2~1]	6.9	0.0995[1]	6.8	0.2129[1]	6.6	0.0718[1]
5	6.6	0.2164[1]	6.9	0.0995[1]	6.6	0.2129[1]	6.5	0.0718[1]
4	6.4	0.2164[1]	6.7	0.0995[1]	6.4	0.2129[1]	6.4	0.0718[1]
3	6.2	0.0941[2]	6.4	0.0995[1]	6.1	0.2129[1~2]	6.1	0.0725[1]
2	5.7	0.0941[2]	6.0	0.0995[1]	5.7	0.0941[2~1]	5.7	0.0725[1]
1	5.2	0.0941[2]	5.2	0.0995[1]	5.2	0.0941[2~1]	5.2	0.0725[1]

Note: [*] shows the mode number where the floor shows the most responsive shaking behavior.

既存の鉄骨造



Mode 1 (T=0.2621 sec)

Floor	SIS	Max		Modal Analysis
		Acceleration (gals)	T (sec)	
Roof	6.6	1461.4	0.2621	Mode 1: T = 0.2621 sec
5	6.4	1116.0	0.2621	Mode 2: T = 0.2173 sec
4	6.2	909.70	0.2621	Mode 3: T = 0.1870 sec
3	6.1	1831.4	0.0942	Mode 4: T = 0.0942 sec
2	5.8	1303.3	0.0942	...
1	5.2	640.20	0.0942	...

鉄骨造の補強例に対する定量的な“ゆれ”の評価

- 定量的な“ゆれ”に関しては、ブレーシング工法のCase-01～Case-04の屋上にての計算震度階級が既存鉄骨造屋上にての計算震度階級に対して、著しく耐震効果を得られない
- 一般的に、既存鉄骨造にブレースによる補強工法は、建物の強度を高めるには適しているが、“ゆれ”を抑える効果は見られない
- 既存鉄骨造にブレースを加えれば、構造物の剛性が高くなり、地震が発生する際には、既存建物より大きめの“ゆれ”を推測できる



定量的な“ゆれ”の応用について

- 震度階級は、
建物の ◎耐震設計 ◎耐震補強 ◎耐震診断 などにおける既存建物の設計や調査や適切な補強方法の選定のための評価ツールとして多くの潜在的な用途を持っている
- 震度階級は、
 - 現在の耐震設計基準は「強さ」という概念に付加価値をつけている
 - 強震の“ゆれ”による建物内の人命への影響を防ぐため、定量的な「快適性」の評価ツールが必要不可欠



本技術に関する知的財産権

- 発明の名称 : 揺れ指標値算出方法、
揺れ指標値算出装置及び
揺れ指標値算出プログラム
- 出願番号 : 特願2019-091512
- 出願人 : 日本大学
有限会社住環境設計室
- 発明者 : ガン ブンタラステンリー、
影山 千秋



お問い合わせ先

日本大学産官学連携知財センター

TEL 03-5275-8139

FAX 03-5275-8328

e-mail nubic@nihon-u.ac.jp