

地震に強い建築構造デザインの最前線

The Forefront of Earthquake-Resilient Structural Design

慶應義塾大学 理工学部 システムデザイン工学科
小檜山雅之研究室

Kohiyama Lab., Keio University

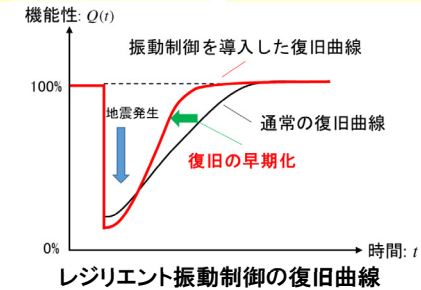
研究背景・目的

研究背景

- 震災時に病院において、構造安全性は保たれたものの、**医療設備の損傷**により**医療機能が停止**した事例が多く存在
- 病院は**機能維持・早期復旧**といった**レジリエンス性能**が必要

研究目的

- 医療機能の復旧阻害要因の特定し、故障木でモデル化
- 復旧時間の確率モデルを構築
- レジリエンス評価フレームワークを用いて、復旧時間の短縮を目的とした**制御系設計法**を提案

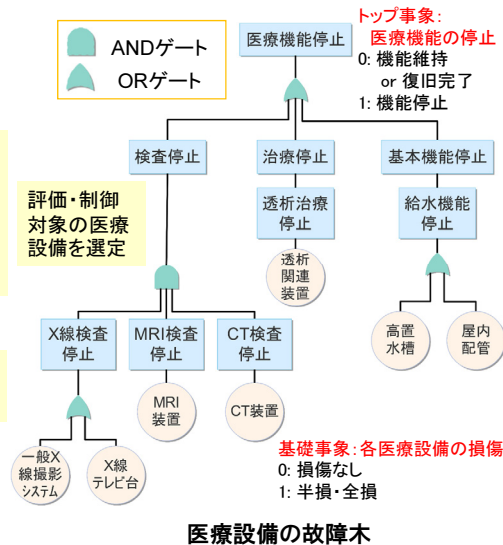


復旧阻害要因の特定と故障木解析

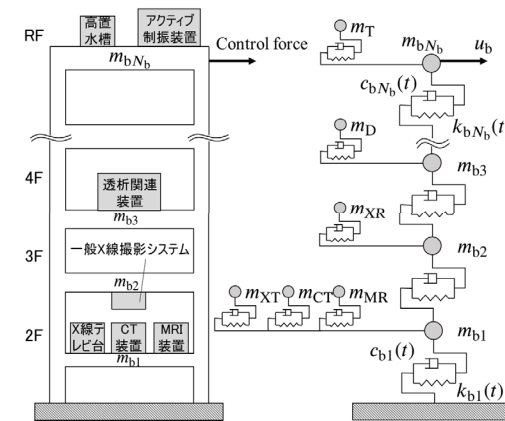
文献調査・聞き取り調査

- 医療設備関係の学協会の地震被害報告を中心に調査
- 医療設備メーカー8社に医療設備の**被害状況・復旧時間**
- 聞き取り調査

復旧阻害要因の特定、
制御対象医療設備の選定



建物・医療設備系の動的解析モデル



建物・医療設備系のモデル概要

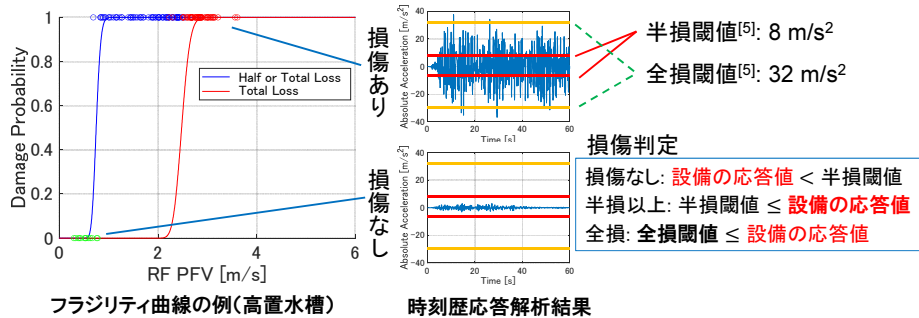
フラジリティ曲線の構築

二項尤度モデルによるフラジリティ曲線の評価

模擬地震動を入力し得られた最大応答値から二項尤度モデルでパラメータ推定

q_i : 「**損傷あり**」→1, 「**損傷なし**」→0を与える2値関数, α_i : 作用地震動, n : サンプル数,

c_m : 被害限界の中央値, ζ_z : 作用地震動と被害限界のばらつきを合わせた複合偏差



損傷別の復旧時間確率モデル

復旧時間モデルの例 (CT装置)

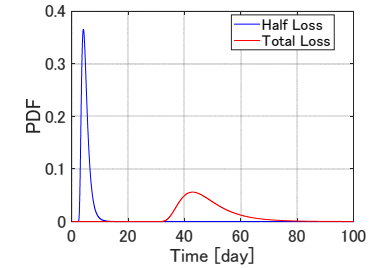
3パラメータ対数正規累積分布関数:

$$P_{CT}(t; \theta_{CT}) = \Phi\left(\frac{\ln(t - t_{CT}) - \ln\theta_{CT}}{\zeta_{CT}}\right)$$

t_{CT} : CT装置の損傷別の復旧不可能日数
(半損: t_{CTH} = 2日, 全損: t_{CTT} = 29日)

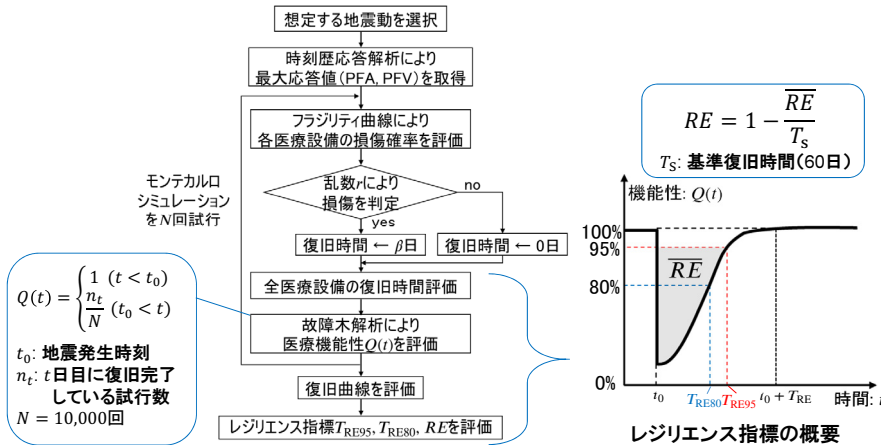
θ_{CT} : CT装置の損傷別の復旧時間モデルの中央値
(半損: θ_{CTH} , 全損: θ_{CTT})

ζ_{CT} : CT装置の損傷状態に共通の対数標準偏差

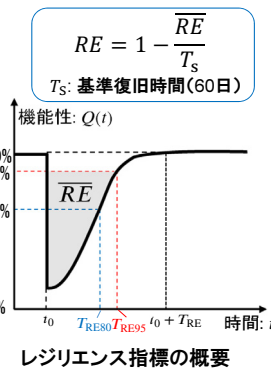


復旧時間確率密度関数の例 (CT装置)

レジリエンス評価フレームワーク



レジリエンス評価フレームワーク^{[1], [2]}



レジリエンス指標の概要

[1] Cimellaro, G.P., Reinhorn, A.M., and Bruneau, M.: Framework for analytical quantification of disaster resilience, *Engineering Structures*, Vol. 32, No. 11, pp. 3639–3649, 2010.
[2] Shang, Q., Wang, T., and Li, Ji: Seismic resilience assessment of emergency departments based on the state tree method, *Structural Safety*, Vol. 85, 101944, 2020.

レジリエンス性能を向上する制御系設計法

LQR制御系設計

告示波 (極稀, ランダム位相) を設計に使用

制御目的: 建物・医療設備系内の

- (a) 建物・医療設備系全体
 - (b) 建物のみ
 - (c) 医療設備のみ
- のそれぞれの絶対加速度

$$J = \int_0^{t_{\infty}} \{y^T y + R u_b^2\} dt$$

y : 低減する制御目的, u_b : 制御力, R : 制御力の重み

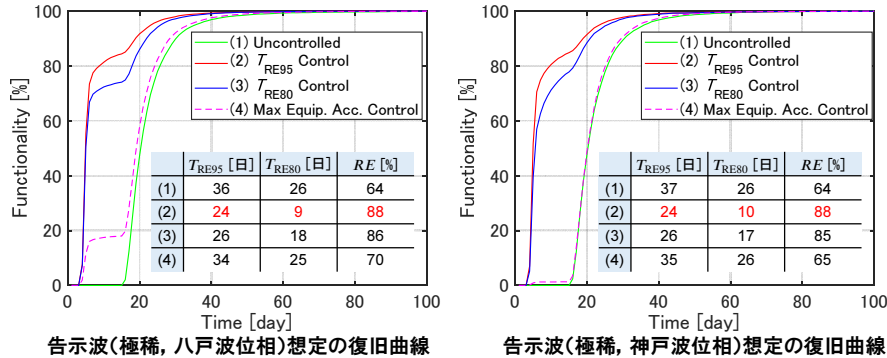
制御パラメータRの設計法の比較

提案制御手法①	提案制御手法②	従来制御手法
95%復旧時間 T_{RE95} 制御	80%復旧時間 T_{RE80} 制御	設備最大加速度応答制御
Minimize T_{RE95} Subject to $0 < R \leq 1$	Minimize T_{RE80} Subject to $0 < R \leq 1$	Minimize $a_{\max, e}$ Subject to $0 < R \leq 1$

有効性の検証

告示波(極稀, 八戸波位相および神戸波位相)の2波で検証
 制御目的は(a)~(c)の中で目的関数が最も低減したものを使用
 ● 95%復旧時間制御(2)では2波の検証波とも3つのレジリエンス指標で最適
 ● 80%復旧時間制御(3)では改善が見られたが T_{RE80} が最小にならず

➡ 提案手法の有効性を確認



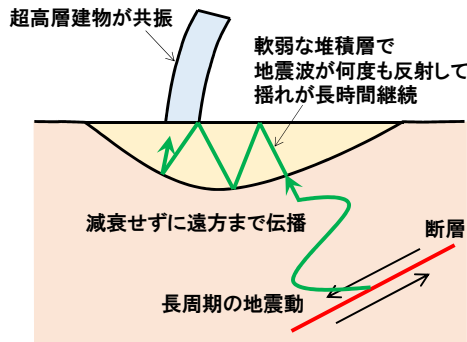
レジリエント振動制御のまとめ

- 医療機能の故障木を構築.
- 医療設備のフラジリティ曲線, 復旧時間の確率モデルを構築.
- 想定地震動に対し, 建物・医療設備系の機能維持性能と早期復旧性能を評価できるレジリエンス評価フレームワークを構築.
- 機能性が95%に復旧する時間や80%に復旧する時間を最小化する制御系設計法を提案.

長周期地震動と超高層建物

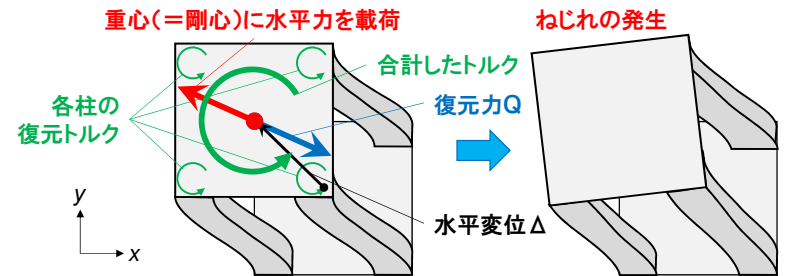
切迫する南海トラフ地震

- 長時間つづく長周期の揺れ
- 超高層建物の共振現象のリスク



大阪府咲洲庁舎: 東日本大震災で震源から約800km離れていたが、大きな被害が発生
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:WTC01s3200.jpg>

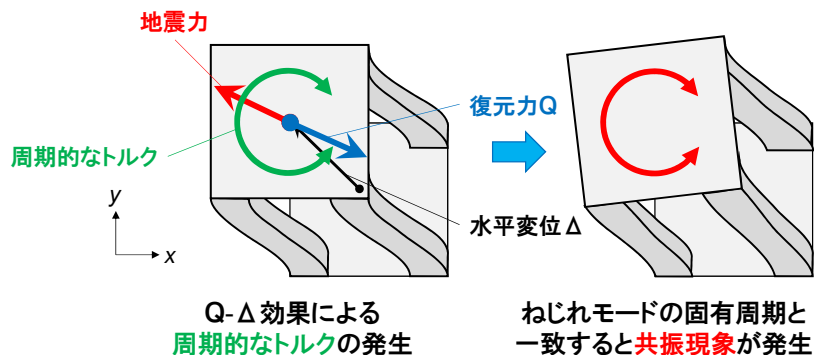
Q-Δ効果: 大きな変位によるねじりトルクの発生



静的な釣り合い状態のとき
 $水平力 + 柱の復元力 Q = 0 \rightarrow 復元力 Q$ は $水平力$ と逆向きの力

x, y 方向の剛性の差により
 $復元力 Q \times 水平変位 \Delta$ に比例する復元トルクが発生

Q-Δ共振: Q-Δ効果のトルクによる ねじれモードの共振現象



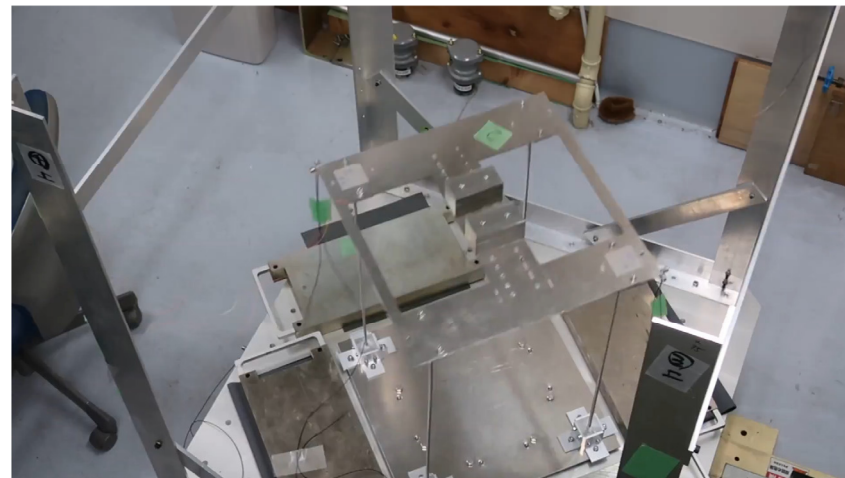
Q-Δ共振の発生条件

$$f_{\theta} = f_x \pm f_y$$

ここで、 f_x , f_y , f_{θ} はx方向、y方向、回転方向の固有振動数

13

Q-Δ共振の実証実験

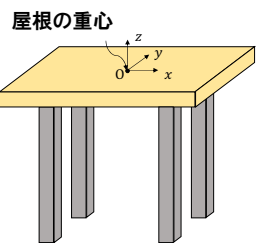


2軸対称でバランスがよいはずの構造物が1方向(45度方向)の揺れでも激しくねじれる!

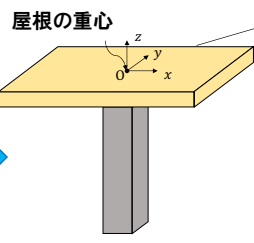
14

オイラーの梁理論に基づく 運動方程式の導出

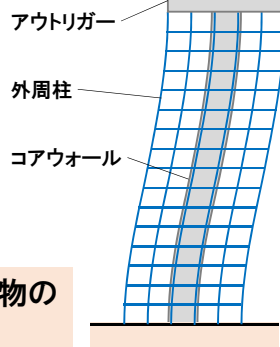
オイラー梁: 細長い棒によくあうモデル



1層建物のモデル



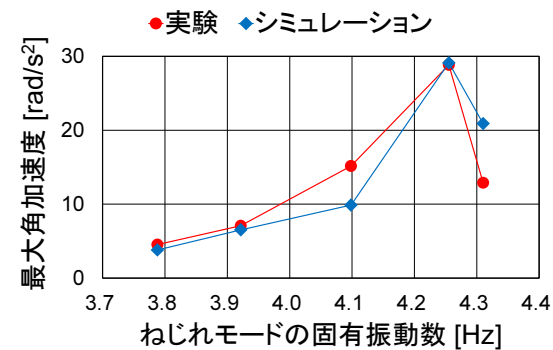
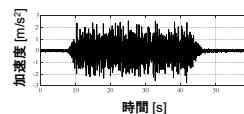
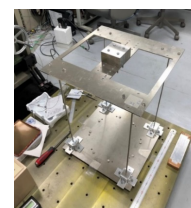
柱集約モデル



単層アウトリガー構造の超高層建物の運動方程式としても使用可能

15

振動台実験で理論を検証



$$f_x = 2.54 \text{ Hz}$$

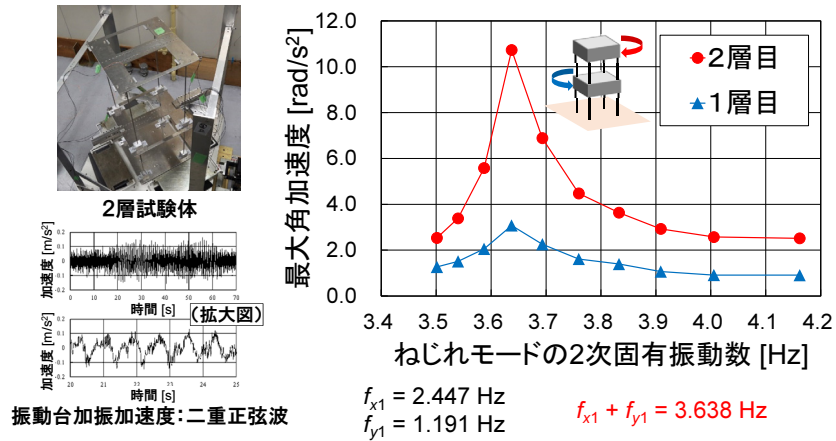
$$f_y = 1.69 \text{ Hz}$$

$$f_x + f_y = 4.23 \text{ Hz}$$

白色雑音地動で理論予測どおりQ-Δ共振が生じることを確認

16

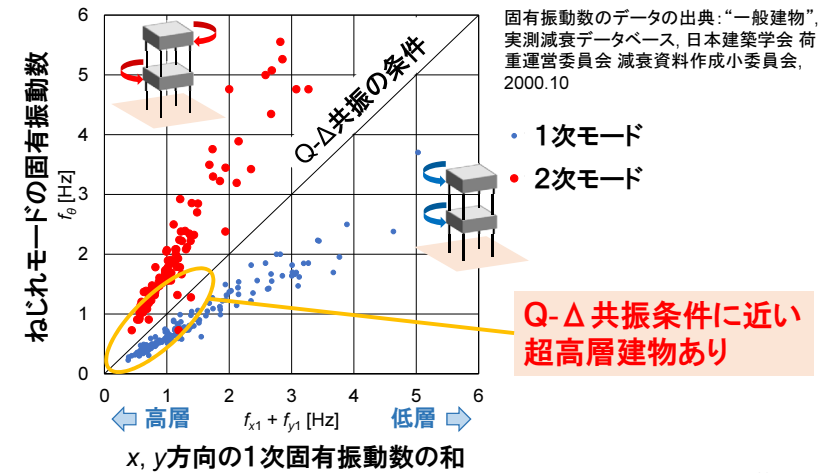
2層試験体の実験



ねじれの2次モードでもQ-Δ共振が発生することを確認

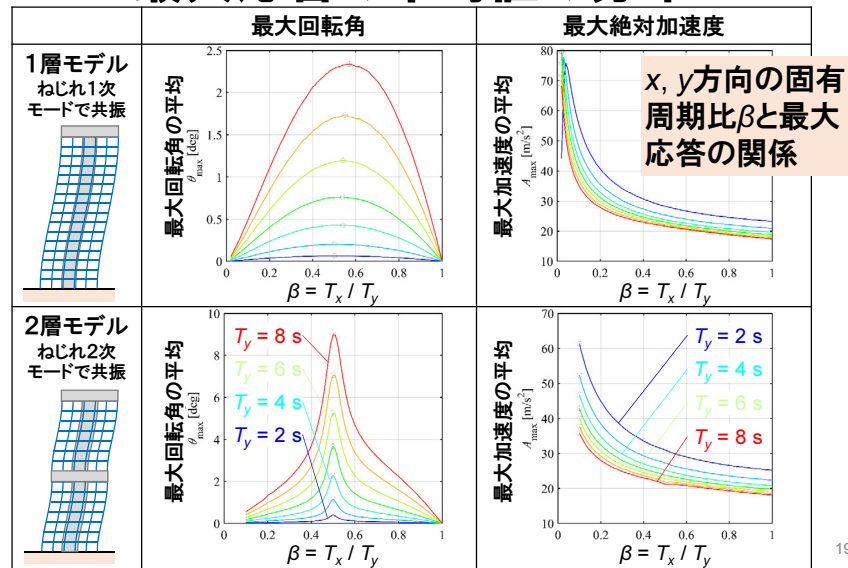
17

Q-Δ共振条件と ねじれ方向の固有振動数の分布



18

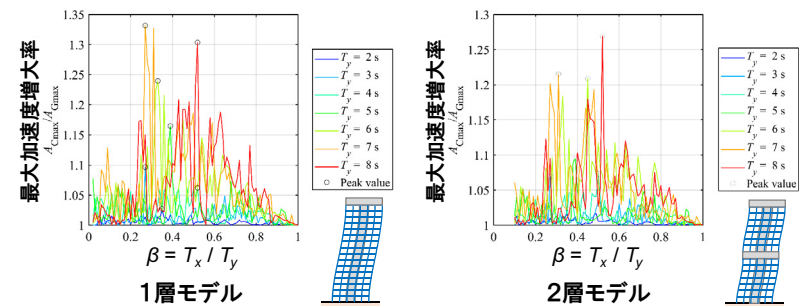
白色雑音地動加速度入力に対する 最大応答の平均値の分布



19

南海トラフ沿いの巨大地震による 長周期地震動対策の検討用地震動 大阪地方湾岸区域OS1

倍率が1.2を上回ることもある。



屋根の中心部と隅部の
Q-Δ共振による絶対加速度の増大率
(40m×40mの屋根を仮定)

20

Q- Δ 共振の注意点と対策

注意点

- 水平2方向の固有周期が異なると発生しうる。
- ねじれ応答による水平加速度の増大は重心と床の隅の距離が大きい(床面積が広い)ほど大きい。
- 共振するねじれモードの固有振動数が高いと加速度応答が大きい。

対策

- 水平2方向の固有周期をなるべく一致させる。
- ダンパーの導入など、減衰を増大させる。

21

Q- Δ 共振のまとめ

- これまで知られていなかった幾何学的非線形性による**ねじれモードの共振現象「Q- Δ 共振」**を発見。
- 運動方程式を導き、Q- Δ 共振現象の発生条件を定式化。
- 長周期地震動が超高層建物を襲ったとき、Q- Δ 共振により加速度応答を増大させるリスクがあることを指摘。
- 水平2方向の固有周期をなるべく一致させる、減衰を増大することが対策として有効。

22

ご清聴、ありがとうございました。

ご質問等は以下までどうぞ。

電子メールアドレス:

kohiyama@sd.keio.ac.jp