

長周期地震動とその対策について

徳島県立城南高等学校応用数理科 3 年

永井 誠 遠藤 悠生 猪井 綜信

目次

・ 研究の概要.....	3
・ 研究の動機・目的.....	4
・ 南海トラフ地震について	5
・ 長周期地震動について	6
・ 仮説.....	7
・ 準備物.....	8
・ じしん君 mini について	9
・ 実験 1 について 基礎実験	10
・ 実験 2 について L 字金具を用いた実験	11
・ 実験 3 について 重りを吊るした実験	12
・ 実験 4 について 重りを置いた実験	13
・ まとめ.....	14
・ 謝辞.....	15
・ 参考文献.....	16

1. 研究の概要

近年、国内外で巨大地震が多発しており、その巨大地震によって引き起こされる長周期地震動による被害が増加している。私たちは、どのような耐震構造が長周期地震動に有効なのかを疑問に思い研究をすることにした。本研究では、木材を組み合わせて独自のモデルを作った。様々な耐震構造を組み込んだモデルを地震発生装置に置き、揺らしてデータをとった。1 度目の研究では、建物を完全に固定するような構造を組み込むと長周期地震動に有効ではないかと考え研究を行った。2 度目の研究では、建物にしなりがでるような構造を組み込んで研究した。結果として、地震のエネルギーを逃がすことができるためしなりのある構造が長周期地震動に有効的だと結論づけた。

2. 研究の動機・目的

私達が生活を営む日本には4つのプレート上にあり、地震が絶えない。今後30年の間までに発生すると考えられている南海トラフ地震においても甚大な被害が予想されている。また、近年能登半島地震をはじめとした巨大地震が日本国内外で多発している。私達は巨大地震の地震動の中に長周期地震動というものがあることを知り、それによる高層ビルの倒壊や家屋の破壊といった被害に対してどのような耐震構造が有効なのか疑問に思った。南海トラフ地震が地元徳島にも甚大な被害が出る可能性もあり、そのための防災対策として研究してみようと思った。そこで、私達は長周期地震動による被害への対策を研究のテーマに選んだ。

本研究では、長周期地震動とはどのような地震なのか、どのような耐震構造が有効なのかを検証し、防災意識が深まることを狙いとしている。

3. 南海トラフ地震について

南海トラフ地震とは、フィリピン海プレートがユーラシアプレートの下に沈み込む日向灘から静岡湾にかけてに分布するプレート境界(南海トラフ)を震源域としてマグニチュード8〜9クラスという非常に大きな地震でこのエネルギー量は阪神淡路大震災の数百倍に匹敵し、100〜150年間隔で発生してきた大規模地震である。そのため、太平洋沿岸部に甚大な津波の被害をもたらすと共に広範囲で長周期地震動による被害が出ると考えられている。30年以内に起こる確率は80%程度と、今後いつ発生してもおかしくない地震の一つだ。過去には、1707年の宝永地震のように、駿河湾から四国沖にかけての広い範囲で同時に地震が発生したり、マグニチュード8クラスの地震が隣接する領域で時間差をおいて発生したりするなど、多様な発生パターンが確認されている。直近では1944年の昭和東南海地震と1946年の昭和南海地震がある

4. 長周期地震動について

長周期地震動とは、震源が浅く地震の規模を表すマグニチュードが大きい地震であり、発生する揺れの周期が長くて大きくゆったりとした(およそ2秒以上)地震の揺れのことである。震源から放出された長周期成分を多く含んだ地震波を平野に厚く積もっている堆積層が増幅する、これが大きな長周期地震動を

生み出す仕組みだ。長周期地震動は、揺れの強さが減衰しづらく遠くまで伝わりやすい性質がある。また、高層階になるほど揺れが大きくなるという性質もある。高層ビルの持つ固有周期と地震動の周期が一致したときに共振するためである。これらの性質より、長周期地震動は震源から遠く離れた平野にある高層ビル群に被害を及ぼすと考えられている。実際の例として、2003年の十勝沖地震や2011年の東日本大震災などが挙げられ、すべてにおいて高層マンションや高層ビルといった高い建物が大きく揺れ、天井崩落や転倒、エレベーターの停止などが多発した。

長周期地震動の被害の指標に「長周期地震動階級」というものがある。高層ビルの揺れを振り子でモデル化し、振り子の最大速度を建物の固有周期にプロットした絶対速度応答スペクトル(sva)を用いて表す(表1)。地震時の人の行動の困難さや家具の転倒・移動などの被害の程度を考慮して、4つの階級に分けられている。長周期地震動階級1では、揺れを少し感じるが家具の移動は起こらないレベル。長周期地震動階級2は、揺れが大きく歩くことが困難なレベル。長周期地震動階級3は、立つことが困難になり家具が大きく動くレベル。長周期地震動階級4では、言うことしかできず、固定しない家具の大半が多く移動し転倒するといったレベルになっている(表2)。南海トラフ地震では長周期地震動階級4相当の揺れが予想されている。

	長周期地震動階級	絶対速度応答スペクトル Sva (減衰定数 5 %) の値 (対象周期 T 1.5 秒 < T < 8.0 秒※)
	長周期地震動階級 1	5 cm/s ≤ Sva < 15 cm/s
	長周期地震動階級 2	15 cm/s ≤ Sva < 50 cm/s
	長周期地震動階級 3	50 cm/s ≤ Sva < 100 cm/s
	長周期地震動階級 4	100 cm/s ≤ Sva

表1：長周期地震動階級と絶対速度応答スペクトル

	長周期地震動階級	人の体感・行動	室内の状況	備考
	長周期地震動階級 1 (やや大きな揺れ)	室内にいたほとんどの人が揺れを感じる。 驚く人もいる。	ブラインドなど吊り下げ ものが大きく揺れる。	—
	長周期地震動階級 2 (大きな揺れ)	室内で大きな揺れを感じ、 物につかまりたいと感じる。 物につかまらなと歩くことが 難しいなど、行動に支障 を感じる。	キャスター付き什器がわ ずかに動く。棚にある食 器類、書棚の本が落ち ることがある。	—
	長周期地震動階級 3 (非常に大きな揺れ)	立っていることが困難 になる。	キャスター付き什器が大 きく動く。固定してい ない家具が移動するこ とがあり、不安定なも のは倒れることがある。	間仕切壁などにひび割れ・ 亀裂が入ることがある。
	長周期地震動階級 4 (極めて大きな揺れ)	立っていることができ ず、はわないと動くこ とができない。揺れに ほんろうされる。	キャスター付き什器が大 きく動き、転倒するも のがある。固定してい ない家具の大半が移動 し、倒れるものもある。	間仕切壁などにひび割れ・ 亀裂が多くなる。

表2：長周期地震動階級と揺れによる影響

5. 仮説

高層建築物、長大構造物は固有周期が長いため、共振現象により揺れが増幅される。特に、20 階以上の高層ビルでは、地上階に比べて、上層階ではおよそ 10 倍以上の揺れ幅になるとされ、長時間の揺れにより、倒壊する事例もあった。そのため、耐震構造だけでは、性能限界があるのではないかと考えた。本研究は、制震装置に着手のもとに、次の仮説を提案する。

高層建築物において、建物の固有周期と長周期地震動が一致した場合、建物上層階では、10 倍以上の揺れが発生するが、構造物の固有振動に調和させた制震ダンパーを設置することにより、最大応答変位を 50%低減することが可能である。また、制震装置と L 字金具を用いた耐震構造を比較すると、制震装置の方が、より低減しやすいのではないかと考えた。

6. 準備物

- 1 ; じしん君 mini (地震発生装置)
- 2 ; 70cm の竹ひご (4 本)
- 3 ; $1 \times 20 \times 20$ cm の合板 (1 枚)
- 4 ; $0.2 \times 18 \times 18$ cm の合板 (10 枚)
- 5 ; 30 g の重り (3 個)
- 6 ; 60 g の重り (3 個)
- 7 ; 0.5×6.5 cm のプラスチックストロー (40 本)
- 8 ; L 字金具 (20 個)
- 9 ; 5×5 mm の方眼用紙
- 10 ; 耐震防止粘着マット $0.4 \times 5 \times 5$ cm (4 個)
- 11 ; スタンド (1 個)
- 12 ; グルーガン
- 13 ; iphone15 (カメラ機能)
- 14 ; 真中ヒートン (フック) (6 個)
- 15 ; ガムテープ
- 16 ; 木工用ボンド
- 17 ; 紙やすり (800mm, 1600mm)

- 18 ; タブレット (記録用)
- 19 ; カッター・カッターマット
- 20 ; ワイヤー
- 21 ; ドライヤ

7. じしん君 mini について

本研究で使用した地震発生装置で、振幅、周波数を別々に設定できるので長い周期の大きな揺れと短い周期の細かい揺れを再現でき、建物の揺れ方の違いや変化を実験で確かめることができる(図1)。



図1 : 利用したじしん君 mini

8. 実験1 方法と結果

第一に、高層ビルに見立てた木製のモデルを作る。基礎となる大きい合板の四隅から縦横2cmのところに穴を開け、その4つの穴に竹ひごを刺す。それに、下から6.5cmのプラスチックストローを刺し、その上に四隅から1cmのところに穴を開けた小さい合板を置き、この事象を10階分繰り返す。方眼用紙の基準を決め赤線を引き、基準から2.5cmずつに黒線を引く。線を引いた方眼用紙をスタンドに固定してモデルの後方15cmにたるませずに置く。完成したモデル(図2)の裏に耐震防止粘着マットを貼り振幅0.5cm、振動数5Hzで揺らす。モデルから1m離れた位置で、iPhone15を高さ20cm、70cmの場所で10秒間5回測定する。結果は以下の通りである(表3)。この実験を基準として他の構造を組み込んだときと比較する。



図 2：高層ビルに見立てた作成したモデル

	1 回目	2 回目	3 回目	4 回目	5 回目	平均
振幅 (cm)	7.5	8	7.5	7.5	7.5	7.6
角度 (度)	6.11	6.51	6.11	6.11	6.11	6.19

表 3：振幅 0.5cm、振動数 5 Hz で揺らしたときの、振幅と角度

9. 実験 2 方法

モデルの各階の合板と竹ひごの交わる場所に L 字金具を取り付けたモデル(図 3)を揺らす。グルーガンを用いて L 字金具を接着する。10 階から順に L 字金具を増やしていったときの揺れの変化と、10 階から順に外していったときの揺れの変化を調べる。揺れの大きさと継続時間は実験 1 と同じものにする。



図3：L字金具を取り付けたモデル

10. 実験2結果

		1回目	2回目	3回目	4回目	5回目	平均
4個	振幅 (cm)	7.5	7	7.5	7	7	7.2
	角度 (度)	6.11	5.71	6.11	5.71	5.71	5.87
8個	振幅 (cm)	4.5		4.5	4.5	5	4.5
	角度 (度)	3.68	3.27	3.68	3.68	4.08	3.68
12個	振幅 (cm)	6.5	7	7	7	6	6.7
	角度 (度)	5.3	5.71	5.71	5.71	4.89	5.46
16個	振幅 (cm)	3.5	3	3.5	3.5	3.5	3.4
	角度 (度)	2.86	2.45	2.86	2.86	2.86	2.78
20個	振幅 (cm)	3.5	3	3.5	3	3	3.2
	角度 (度)	2.86	2.45	2.86	2.45	2.45	2.61

表4：L字金具を付けた結果

		1回目	2回目	3回目	4回目	5回目	平均
4個	振幅 (cm)	0	0.5	0	0	0	0.1
	角度 (度)	0	0.4	0	0	0	0.08
8個	振幅 (cm)	0.5	1	0.5	0	0.5	0.5
	角度 (度)	0.4	0.81	0.4	0	0.4	0.4
12個	振幅 (cm)	1	1	1	1.5	1	1.1
	角度 (度)	0.81	0.81	0.81	1.22	0.81	0.9
16個	振幅 (cm)	2	2.5	2.5	2.5	2	2.3
	角度 (度)	1.63	2.04	2.04	2.04	1.63	1.88
20個	振幅 (cm)	3	3.5	3.5	3.5	3.5	3.4
	角度 (度)	2.45	2.86	2.86	2.86	2.86	2.78

表5：L字金具を外したときの結果

11. 実験2考察

L字金具を付けたことにより実験1と比べて揺れをほぼ完全に抑えることができたが建物のしなりがなくなったことから、建物のエネルギーが放出されていないと考えた。この構造では、20階以上の建物になると、長周期地震動での大振幅の変形により、設計ストロークを超えるリスクがある。設計ストロークとは、装置自体が安全に動作できる最大変位量。また、他の耐震構造に比べ、剛固定構造では、変形分布が

小さくなるため、エネルギー吸収の効率が低くなるのではないかと予想した。以上のことから、この構造は、応力集中が発生するため、特定の部位が破壊されやすく、実際の高層ビルでは崩壊する可能性があるため長周期地震動には不向きである。

12. 実験 3 方法

実験 2 では建物にしなりがでず、建物のエネルギーが放出されにくく、オーバーストロークを起こすリスクが高いため、長周期地震動には不向きと考えた。そのため、実験 3 では、オモリを吊るすことにより、建物と重りの固有周期を一致させ、振動制御性能を高くすることができるのではないかと考え、この構造を組み込むことにした（図 4）。モデルの 10 階に 120g、150g、180g、210g、240g の重りを吊るし、重りが重くなっていったときの揺れの変化を調べる。真中ヒートンとワイヤーを用いて重りを吊るす。揺れの大きさと継続時間は実験 1 と同じものにする。



図 4：最上部におもりをつるしたモデル

13. 実験 3 結果

		1 回目	2 回目	3 回目	4 回目	5 回目	平均
120g	振幅 (cm)	2.5	3.5	3	4	5	3.6
	角度 (度)	2.04	2.86	2.45	3.27	4.08	2.94
150g	振幅 (cm)	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5
	角度 (度)	2.86	2.86	2.86	2.86	2.86	2.86
180g	振幅 (cm)	3.5	4	3.5	3.5	3.5	3.6
	角度 (度)	2.86	3.27	2.86	2.86	2.86	2.94
210g	振幅 (cm)	1	1	1	1.5	1	1.1
	角度 (度)	0.81	0.81	0.81	1.22	0.81	0.9
240g	振幅 (cm)	0.5	0	0	0	0.5	0.2
	角度 (度)	0.4	0	0	0	0.4	0.16

表 6：最上部につるしたおもりの重さと振幅並びに角度

14. 実験 3 考察

実験 1 より揺れを小さくすることができた。重りが 210 g 以上になると、固有周期の一致により、減衰効果が見られた (表 6)。揺れを観察していると、大きな相対変形にも対応し、ストロークに余裕があるため、地震時の破損リスクが少ないと考えた。「相対変形」とは、ダンパーや構造部材の両端に生じる変位の差。また、重りにより、位相差が生まれ、相対運動による減衰が働き、エネルギーを逃がせていることが実験結果から読み取れた。よってこの構造は長周期地震動に有効である。

15. 実験 4 方法

実験 3 で重りを使うとしなりがでたため、実験 4 でも重りを使うことにした。重りを使った構造を考え、ていたときに、東京に屋上に重りを固定させ、長周期地震動対策をしている高層ビルがあることを知った。そして、この構造に興味を持ち、自分たちも実験してみようと考えた。モデルの屋上と 10 階に 60g、120g、180g、210g、240g、270g を置いたときの揺れの変化を調べる。重りと合板はグルーガンで接着する。揺れの大きさと継続時間は実験 1 と同じものにする。



図 5 : 10 階におもりを固定したモデル

16. 実験 4 結果

		1 回目	2 回目	3 回目	4 回目	5 回目	平均
60g	振幅 (cm)	6.5	7	7	7	7	6.9
	角度 (度)	5.3	5.71	5.71	5.71	5.71	5.62
120g	振幅 (cm)	3.5	4	4	4	4	3.9
	角度 (度)	2.86	3.27	3.27	3.27	3.27	3.18
180g	振幅 (cm)	2.5	2	2.5	2	2	2.2
	角度 (度)	2.04	1.63	2.04	1.63	1.63	1.8
210g	振幅 (cm)	3.5	3	3.5	2.5	2.5	3
	角度 (度)	2.86	2.45	2.86	2.04	2.04	2.45
240g	振幅 (cm)	2.5	3	3	3.5	2.5	3.1
	角度 (度)	2.04	2.45	2.45	2.86	2.04	2.53
270g	振幅 (cm)	2.5	2.5	2.5	3	2	2.5
	角度 (度)	2.04	2.04	2.04	2.45	1.63	2.04

表 7 : おもりを屋上に置いた時のおもりの重さと振幅並びに角度

		1 回目	2 回目	3 回目	4 回目	5 回目	平均
60g	振幅 (cm)	6.5	7.5	7.5	7	7.5	7.2
	角度 (度)	5.3	6.11	6.11	5.71	6.11	5.87
120g	振幅 (cm)	6.5	5.5	3.5	3.5	3.5	4.5
	角度 (度)	5.3	4.49	2.86	2.86	2.86	3.67
180g	振幅 (cm)	4	4	4	4	4	4
	角度 (度)	3.27	3.27	3.27	3.27	3.27	3.27
210g	振幅 (cm)	2	2	2	2	2	2
	角度 (度)	1.63	1.63	1.63	1.63	1.63	1.63
240g	振幅 (cm)	2.5	2	2	2	2	2.1
	角度 (度)	2.04	1.63	1.63	1.63	1.63	2.53
270g	振幅 (cm)	2.5	3	2	2	2	2.3
	角度 (度)	2.04	2.45	1.63	1.63	1.63	1.88

表 8：おもりを 10 階に置いた時のおもりの重さと振幅並びに角度

17. 実験 4 考察

実験 1 より揺れを減衰させることができた。屋上と 10 階のどちらの場合も重りを重くしていくごとに大振幅は小さくなり、固定させることにより、大きなストロークにも対応できるとわかった。このことから、この実験でもしなりが発生したため長周期地震動に有効であると言える。しかし、結果を見てもらうと、数値にばらつきが出たため、固有周期の調整が難しいのではないかと考えた（表 7、8）。また、長周期地震動では、周期が多様なため、重りを固定することにより、自然な吸収が起きにくく、減衰効果が限定されてしまうのではないかと考えた。そして、参考にした高層ビルでは屋上に重りを固定していたが、私たちの実験では屋上よりも最上階におもりを固定させたほうが揺れを軽減させることができるのを発見した。

18. まとめ

実験 2 から、揺らしたときに建物を固定するような耐震構造は、共振時のエネルギー吸収が不十分であると考えた。その結果、揺れがかえって増幅され、剛性だけで抑え込むのは、非効率であり、部材や接合部分に過大な応力が集中した。このから、長周期地震動には不向きであり、実際の高層ビルは倒壊してしまうということが分かった。また、実験 3、4からは、長周期地震動には重りを使うことが有効であるということが分かった。実験 3 では、210g のときに急激に揺れを抑えることに成功した。ここでは本研究で使用したモデルに 210g 以上の重りを吊るすことで、重りに揺れとは逆向きの力が発生して揺れを小さくすることができたのではないかとこの可能性が挙げられる。

実験 4 から、長周期地震動には有効であることがわかったが、共振制御が難しいことと、変位が大きい場合に応答がしづらいことから、重りと建物の固有周期を調整するのが難しいと考えた。以上のことから

ら、実験3の重りを吊るす耐震構造が最も有効であるとわかった。

19. 今後の展望

重りを吊るす構造が最も長周期地震動に有効であることがわかったが、現実にと考えると費用が高く、構造を組み込むのが難しいことがわかったため、実際の建物を建てる時にかかる費用をなるべく減らし、独自の構造を組み込みたいと考えている。

20. 参考文献・参考サイト

- ・山辺 豊彦, ヤマベの木構造 増補改訂版 (エクスナレッジムック) 2009
- ・Calc サイト「三角関数の変換」 https://www.calc-site.com/triangles/trigonometric_convert
- ・気象庁「長周期地震動に関する観測情報 (2025 年 6 月 19 日 08 時 08 分 根室半島南東沖の地震)」
<https://www.data.jma.go.jp/eeew/data/ltpgm/event.php?eventId=20250619080821>
- ・気象庁「長周期地震動階級について」
https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/jishin/ltpgm_explain/about_level.html
- ・YouTube「Eqoi05RAM0M」(動画)
<https://www.youtube.com/watch?v=Eqoi05RAM0M>

21. 謝辞

最後に、本研究を行うにあたってアドバイスやご指導いただきご協力してくれたすべての人に感謝しています。本当にありがとうございました。