

論文 RC 造建物が限界変形に至るまでの時間に関する研究

五十嵐 健太*1・千葉 翔太*2・中村 孝也*3

要旨：大地震時に鉄筋コンクリート造建物の柱が限界変形に至るまでの時間に関する検討は、靱性能の評価の指標のひとつになりうるという点で有用であると考え、地震応答解析による検討を行った。解析対象は、新耐震基準で設計された3層、6層、9層のRC造建物とし、ベースシア係数を変化させて過去の大地震で記録された12種類の地震動を入力した。本論では、ひび割れ発生時から限界変形に至るまでの時間を「限界時間」と定義した。解析の結果、ベースシア係数に関わらず建物層数が増えるにつれて限界時間が短くなることやモデルの限界変形が大きくなるにつれて限界時間が長くなること等が明らかとなった。

キーワード：鉄筋コンクリート造建物, 限界時間, 降伏時間, 限界変形, 曲げ破壊, 地震応答

1. はじめに

限界変形は、曲げ降伏する部材において水平力が最大耐力の80%まで低下したときの水平変形と定義され、鉄筋コンクリート(RC)部材の塑性化後の靱性能の評価の指標としてよく用いられている¹⁾²⁾など。大地震時にRC造建物が揺れ始めてから限界変形に至るまでの時間(以降、限界時間と呼ぶ)に関する検討はほとんど行われていないが、靱性能のひとつの評価指標になりうる可能性があり、有用であると考えられる。また、地震動時の避難方法を考える際には、それらの建物の柱が破壊に至るまでの時間が重要であるが、総体的な研究は行われていない。

先行研究³⁾では、脆弱な旧耐震基準建物が崩壊に至るまでの時間(崩壊時間)についての検討が行われているが、新耐震基準建物の限界時間についての検討は行われていない。そこで本論では、建物内部からの避難や机の下に頭を隠すなど安全確保行動をする際、建物の中の人々が初めて揺れを認識して行動を開始する時点がある程度変形が大きくなるひび割れ発生時とし、大きな破壊が生じる点を限界変形と考えた。そして、ひび割れ発生時から限界変形に至るまでの時間を「限界時間」と定義した。1981年以降の新耐震基準で設計されたRC建物モデルを使用し、ベースシア係数 C_B が0.2から0.4の3層、6層、9層の建物について地震応答解析を行い、地動最大速度や地震動の継続時間等が限界時間に対して及ぼす影響について比較・検討を行う。

2. 解析方法

2.1 解析モデル

解析モデルは、3層、6層、9層の多質点系せん断型モデルを使用した(梁は剛と仮定)。図-1に3層建物の解析モデルを、図-2に実建物のイメージを示す。各層階

高3600mm、柱内法高さ2400mm、柱の断面寸法600mm×600mmと設定した。各層の重量は753kN(各層柱1本に対して、 $11.8\text{ kN} \times 8\text{ m} \times 8\text{ m}$ の重量を負担する)と仮定した。モデルの耐力分布は新耐震基準による耐力分布で設定した。建物の高さ方向の初期剛性分布は剛性と耐力が関連していると考え、初期剛性 K_0 は耐力分布と同じ比率で設定した。建物の一次固有周期は $1T=0.02 \times h$ (h :建物高さ[m])で計算した。上式より、 $1T$ を3層建物で0.22s、6層建物で0.43s、9層建物で0.65sとした。

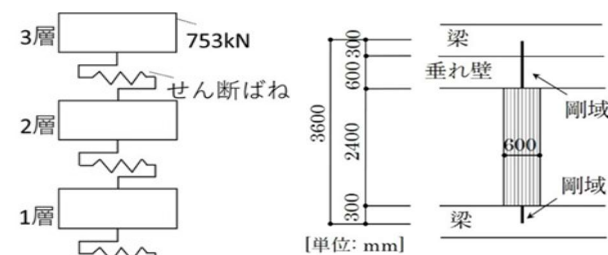


図-1 解析モデル

図-2 実建物のイメージ

2.2 復元力モデル

図-3に柱の復元力モデルを示す。 C_B を変化させる際には、 K_0 を一定とし、最大耐力(降伏耐力) F_y のみを変化させた。また、大変形領域で耐力が低下する曲げ破壊型RC柱を想定したUD2、UD4、UD6の3種類のモデルを用いた。3つの柱の復元力スケルトンは第3折れ点(後述)までは同じで、その後の耐力低下の程度が異なる。ひび割れ時の耐力 F_c は、最大耐力(降伏耐力) F_y の1/3と設定した。降伏時変形 δ_y は降伏時の剛性低下率を0.3と仮定し、 $\delta_y=F_y/(0.3K_0)$ で求めた。荷重が低下し始める点として、第3折れ点を設け、その時の変形 δ_3 は、層間変形角で1%と設定した。限界変形 δ_u は部材角で考えて順に2%、4%、6%と設定した。図-2より限界変形時の

*1 新潟大学大学院 自然科学研究科環境科学専攻 (学生会員)

*2 新潟大学大学院 自然科学研究科環境科学専攻

*3 新潟大学 工学部建築学プログラム教授 博士(工学) (正会員)

層間変形角は、柱の内法高さを 2400 mm、階高 3600 mm より、層間変形角 = $(2400/3600) \times$ 部材角、の式で求めた。よって、層間変形角は、UD2 で 1.3%、UD4 で 2.7%、UD6 で 4.0% となる。また、履歴特性は武田スリップモデル⁴⁾を用いた。粘性減衰は初期剛性比例型で減衰定数は 0.02 と設定した。

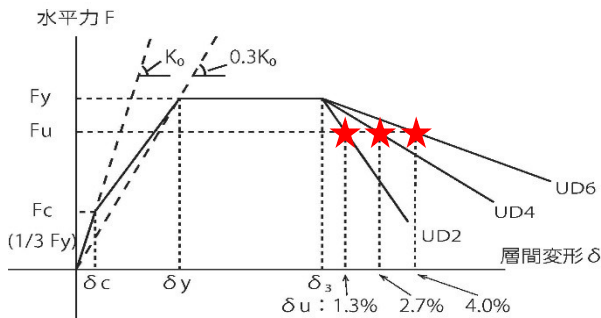


図-3 復元力スケルトン

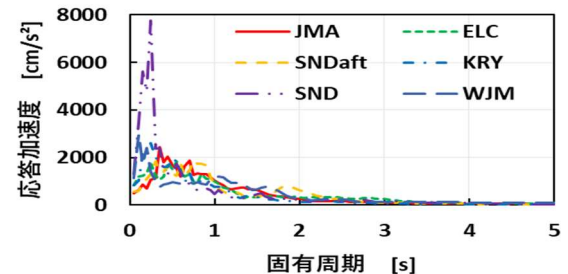
2.3 入力地震動

表-1 に入力地震動を示す。入力地震動は 12 種類とした。表-1 の地動最大速度 V_{max} は原記録による値が記載してある。 V_{max} は、10 cm/s から 150 cm/s まで 10 cm/s 刻みで変化させて解析を行った。また、限界変形に至る V_{max} と限界変形に至らない V_{max} の境で V_{max} を更に細かく変化させて解析を行い、限界変形に至る最小の地動最大速度の詳細値も求めた。運動方程式の数値積分には Newmark の β 法 ($\beta=1/4$) を用いた。表-1 の地震動の継続時間は、本論では、地動パワー (加速度の 2 乗累積値) が最終累積値の 5% から 95% に至るまでの時間とした⁵⁾。

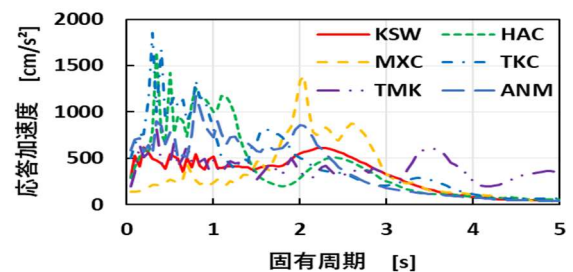
2.4 加速度応答スペクトル

図-4 に地動最大速度 V_{max} を 50 cm/s に基準化した入力地震動 12 波の加速度応答スペクトルを示す。本論で

は、加速度応答スペクトルのピークが固有周期 1 s 未満のものを短周期地震動 (図-4(a))、1 s 以上のものを長周期地震動 (図-4(b)) と区分した (表-1 参照)。なお、図-4(b) で HAC や TKC は固有周期 1 s 未満にピークがあるが、1 s 以上にもピークがあるため、本論では長周期に分類した。



(a) 短周期



(b) 長周期

図-4 加速度応答スペクトル ($V_{max}=50$ cm/s に基準化)
(減衰定数 : 0.02)

3. 解析結果

3.1 降伏時変形・限界変形に至るまでの過程

限界変形に至るまでの過程の例として、図-5 に $C_B=0.2$ の UD2 モデルの 3 層建物に JMA, $V_{max}=70$ cm/s を入力した場合の 1 層の層間変形の時刻歴と水平力-層

表-1 入力地震動 (*は K-NET⁶⁾, #は気象庁⁷⁾による)

略称	方向	地震名, 観測地	継続時間 [s]	地動最大速度 V_{max} [cm/s]	周期
JMA	NS	1995 兵庫県南部地震, 神戸#	8.3	82.6	短
ELC	NS	1940 Imperial Valley 地震, El Centro	24.4	33.6	
SNDaft	NS	2011 東北地方太平洋沖地震 余震, 涌谷町新町#	33.4	34.6	
KRY	NS	2011 東北地方太平洋沖地震, 郡山#	87.1	47.4	
SND	NS	2011 東北地方太平洋沖地震, 仙台#	98.8	31.5	
WJM	NS	2024 能登半島地震, 輪島*	27.7	92.3	
KSW	NS	2007 新潟県中越沖地震, 柏崎*	6.6	129.1	長
HAC	EW	1968 十勝沖地震, 八戸港湾	24.4	33.9	
MXC	EW	1958 メキシコ地震, Mexico City SCT1	38.9	60.6	
TKC	NS	2003 十勝沖地震, 十勝#	46.0	18.8	
TMK	NS	2003 十勝沖地震, 苫小牧*	93.9	23.4	
ANM	EW	2024 能登半島地震, 穴水*	21.6	143.9	

間変形の関係を示す。ここで、ひび割れ発生時から限界変形に至るまでの時間を「限界時間」と定義した。次に、限界時間との比較のために 3.1 節と 3.2 節でのみ、ひび割れ発生時から降伏時変形に至るまでの時間を「降伏時間」と定義して検討した。図-5 より、ひび割れ発生時（■印）から降伏時変形（▲印）に至るまでが 0.29 s、限界変形（★印）に至るまでが 0.67 s であった。前述の定義より、降伏時間は 0.29 s、限界時間は 0.67 s となり、降伏時間、限界時間ともに非常に短い結果となった。ここで、限界時間は、各層のうち最小のものを、降伏時間は比較のため限界時間が最小の層のものをとった。

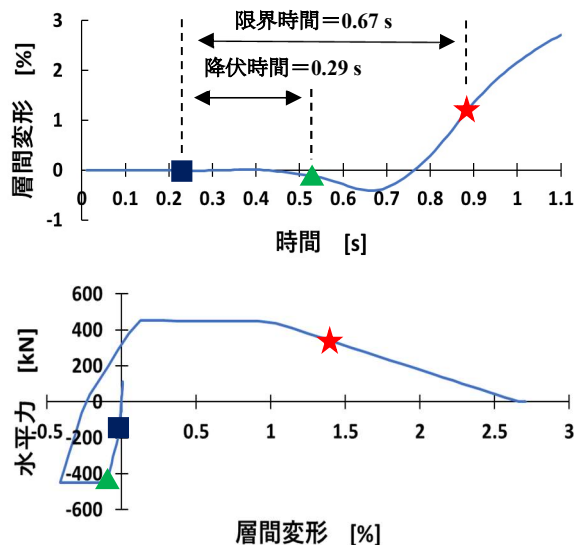


図-5 層間変形の時刻歴と水平力-層間変形の関係 ($C_B=0.2$, UD2, 3 層建物の 1 層, JMA, $V_{max}=70$ cm/s)

3.2 降伏時間と限界時間の比較

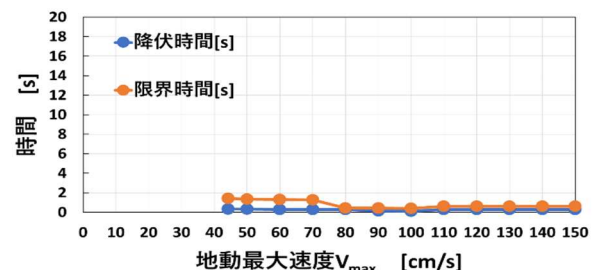
各モデルについて、上述のように地動最大速度を変化させて解析を行った。また、限界変形に至る最小の地動最大速度の詳細値も求めた。降伏時間および限界時間と地動最大速度 V_{max} の関係について、 $C_B=0.4$ の UD2 モデルの 3 層建物に対して、JMA を入力した場合を図-6(a) に、SND を入力した場合を図-6(b) にそれぞれ示す。図に点がない V_{max} については、降伏変形または限界変形に至らなかったことを示す。各ケースの一番左の点は上述した限界変形に至る最小の地動最大速度である。

JMA を入力した場合について、降伏時間は V_{max} に関わらず約 0.3 s、限界時間は V_{max} が 70 cm/s までは約 1.3 s でそれより大きくなると約 0.6 s という結果となった。JMA は継続時間（表-1 参照）が 8.3 s と短い地震動であり、地震動の継続時間が短いと限界時間も短くなる傾向が見られる。また、降伏後直ちに限界変形に達し、降伏時間と限界時間との差も短くなる傾向が見られた。

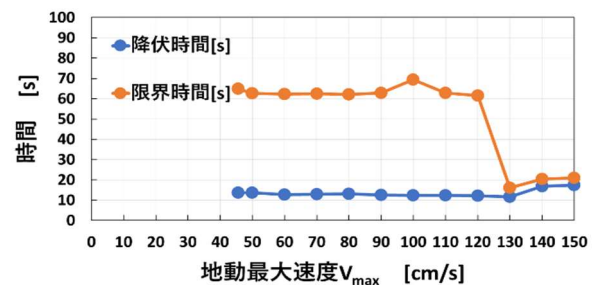
SND を入力した場合について、降伏時間は V_{max} が 130

cm/s までは約 12 s でそれより大きくなると約 17 s となり、限界時間は V_{max} が 120 cm/s までは約 62 s でそれより大きくなると約 20 s という結果となった。SND は継続時間が 98.8 s と長く、地震動の継続時間が長いと限界時間も長くなる傾向が見られるが、降伏時間と限界時間との差も大きくなる傾向が見られた。ここで、図-6(b) で限界時間が急変した SND の $V_{max}=120$ cm/s と 130 cm/s について、図-7 に層間変形の時刻歴を示す。図-7 より限界時間は、 V_{max} が 120 cm/s の場合には 61.6 s、 V_{max} が 130 cm/s の場合には 16.1 s であり、 V_{max} が変化すると限界変形（★印）に達する時刻が大きく変わり限界時間が急変する範囲が存在した。その場合、限界時間が急変した V_{max} よりも大きな V_{max} の範囲では、限界時間と降伏時間との差が小さくなった（図-6(b) 参照）。

なお、他の地震動を用いた場合においても概ね同様の傾向が見られた。



(a) JMA



(b) SND

図-6 降伏時間・限界時間の比較（地動最大速度が変化する場合）($C_B=0.4$, UD2, 3 層建物)

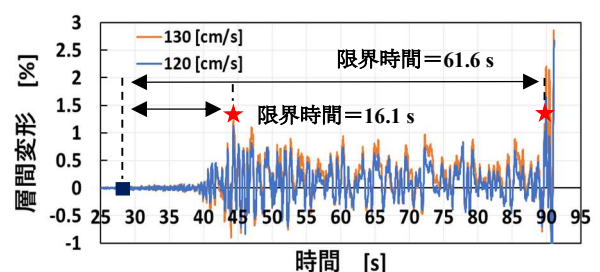


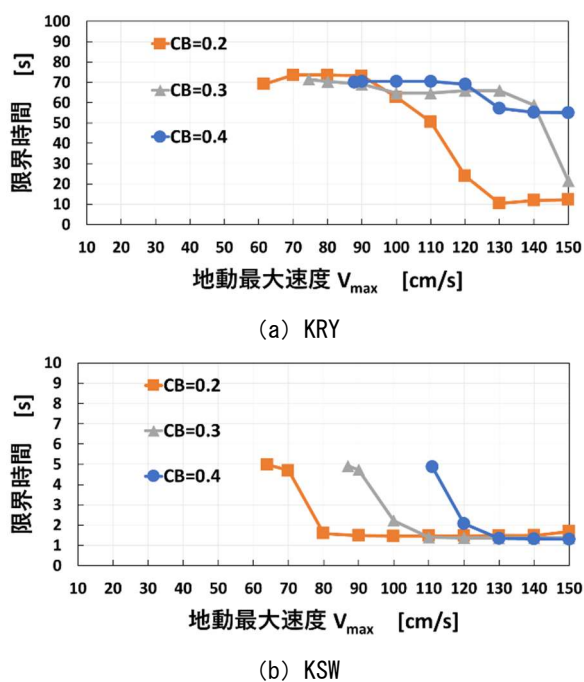
図-7 層間変形の時刻歴 ($C_B=0.4$, UD2, 3 層建物, SND)

3.3 限界時間と地動最大速度の関係

限界時間と地動最大速度 V_{max} の関係について、各ベースシア係数 C_B の UD2 モデルの 9 層建物に対して、KRY を入力した場合を図-8 (a) に、KSW を入力した場合を

(b) にそれぞれ示す。KRY を入力した場合には、限界時間は C_B に関わらず $V_{\max}$ が小さいときには約 70 s であるが、 $V_{\max}$ が大きくなるにつれて短くなった。KSW を入力した場合には、限界時間は C_B に関わらず $V_{\max}$ が小さいときには約 5 s であるが、 $V_{\max}$ が大きくなると約 1.5 s と短くなった。前述のように KRY と KSW に対しても、ある $V_{\max}$ を超えると限界時間が急激に短くなる範囲が存在する。

これより、最大耐力（降伏耐力）が小さい方がより小さい $V_{\max}$ で限界変形に至るといえる。また、 C_B が大きい場合でも地動最大速度が大きくなれば、限界時間は短くなる傾向が見られる。



図－8 限界時間と地動最大速度の関係 (UD2, 9 層建物)

3.4 建物層数と限界時間の関係

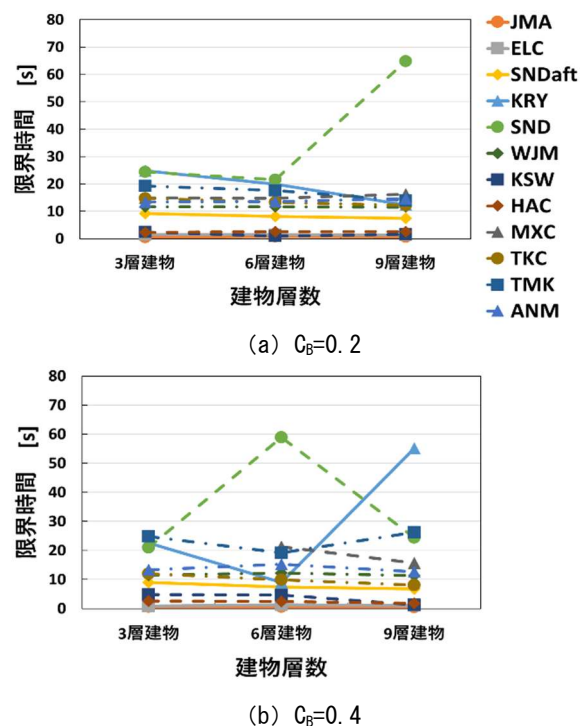
建物層数と限界時間の関係について、UD2 モデルに地動最大速度 $V_{\max}$ が 150 cm/s の 12 種類の地震動を入力したときを対象として、 $C_B=0.2$ の場合を図－9(a)に、 $C_B=0.4$ の場合を (b) にそれぞれ示す。 $V_{\max}$ が 150 cm/s を入力した場合を検討する理由としては、通常設計で用いられる $V_{\max}$ である 50 cm/s と比べるとかなり大きい、ANM の $V_{\max}$ が 143.9 cm/s であり (表－1 参照)、150 cm/s 程度の地震が発生する可能性があることや、UD6 モデルなどでは 50 cm/s では限界変形まで至らない地震動が存在したためである。

$C_B=0.2$ のモデルでは、9 層建物に SND を入力したときに、3 層、6 層建物に SND を入力した場合よりも限界時間が約 40 s 長くなるという結果であった。それ以外の地震動を入力した場合については、JMA, KSW, HAC, MXC,

WJM, ANM で限界時間が最大の建物層数と最小の建物層数とで限界時間の差が 5 s 以内であり、ELC, SNDaft, KRY, TKC, TMK では建物層数が増えると限界時間が短くなるという結果であった。

$C_B=0.4$ のモデルでは、6 層建物に SND を入力したときで、3 層、9 層建物よりも限界時間が約 40 s 長くなり、9 層建物に KRY と TMK を入力したときで、3 層、6 層建物よりも限界時間が長くなるという結果であった。それ以外の地震動については、JMA, ELC, WJM, ANM で限界時間が最大の建物層数と最小の建物層数とで限界時間の差が 5 s 以内であり、SNDaft, KSW, HAC, MXC, TKC では、建物層数が増えると限界時間は短くなった。

これより、ベースシア係数 C_B に関わらず、3 層、6 層、9 層と建物層数が増えるにつれて限界時間は短くなる傾向があるといえる。この理由としては、多層建物では各層の変形が限界変形に至る層に集中するため、層数が多い建物程変形が大きくなり、より早く限界変形に至るため、限界時間が短くなると考えられる。



図－9 建物層数と限界時間の関係 (UD2, $V_{\max}=150$ cm/s)

3.5 限界変形と限界時間の関係

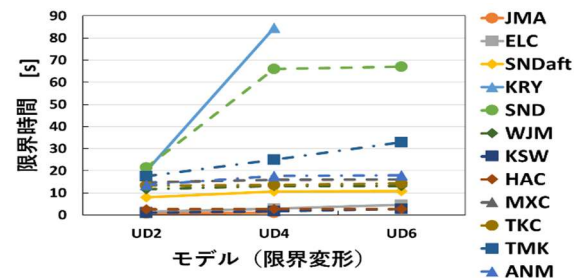
限界変形が異なる各モデルと限界時間の関係について、6 層建物に地動最大速度 $V_{\max}$ が 150 cm/s の 12 種類の地震動を入力したときを対象として、 $C_B=0.2$ の場合を図－10 (a) に、 $C_B=0.4$ の場合を (b) にそれぞれ示す。 $V_{\max}$ が 150 cm/s を入力した場合を検討する理由としては前述の通りである。

$C_B=0.2$ のモデルでは、JMA, KRY では、UD2 から UD4

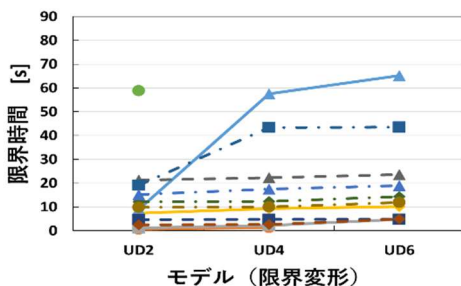
と限界変形が大きくなるにつれて、限界時間が長くなり、(UD6 モデルについては限界変形に至らず) それ以外の 10 種類の地震動では、UD2, UD4, UD6 と限界変形が大きくなるにつれて限界時間がやや長くなる傾向が見られた。ただし、それらの限界時間の差は小さいが、これは $V_{\max}$ が 150 cm/s と大きいため、降伏後すぐに限界変形に至るケースが多いためである。前述のように $V_{\max}$ が 50 cm/s 程度の場合には、特に UD6 モデルで限界変形に達しない場合が多くなり、限界変形の差の影響が顕著に表れる (後の $C_B=0.4$ でも同様)。

$C_B=0.4$ のモデルでは、JMA では、UD2 から UD4 と限界変形が大きくなるにつれて、限界時間が長くなり (UD6 モデルについては限界変形に至らず)、KRY と KSW では UD2, UD4, UD6 と限界変形が大きくなるにつれて、限界時間は長くなった。それ以外の 8 種類の地震動では、UD2, UD4, UD6 と限界変形が大きくなるにつれて、限界時間はやや長くなる傾向が見られた。また、SND を入力した場合では、UD2 モデルのみが限界変形に至った。

これより、 C_B に関わらず、UD2, UD4, UD6 と限界変形が大きくなるにつれて限界時間は長くなる傾向があるといえる。この理由としては、モデルの限界変形が大きい方がより大きい変形能力を有するため限界変形に至るまでの時間が長く、限界時間が長くなるためであると考えられる。



(a) $C_B=0.2$



(b) $C_B=0.4$

図-10 限界変形と限界時間の関係
(6 層建物, $V_{\max}=150$ cm/s)

3.6 ベースシア係数と限界時間の関係

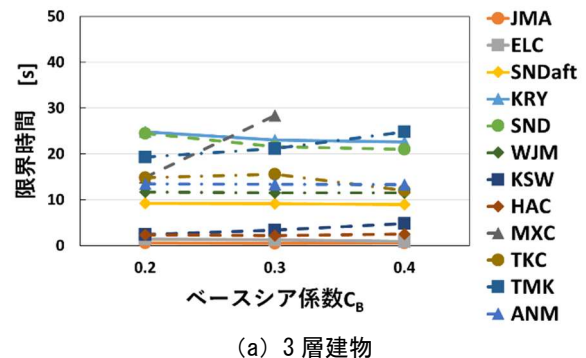
ベースシア係数 C_B と限界変形の関係について、UD2 モデルに地動最大速度 $V_{\max}$ が 150 cm/s の 12 種類の地震動を入力したときを対象として、3 層建物の場合を図-

11 (a) に、9 層建物の場合を (b) にそれぞれ示す。 $V_{\max}$ が 150 cm/s を入力した場合を検討する理由としては前述の通りである。

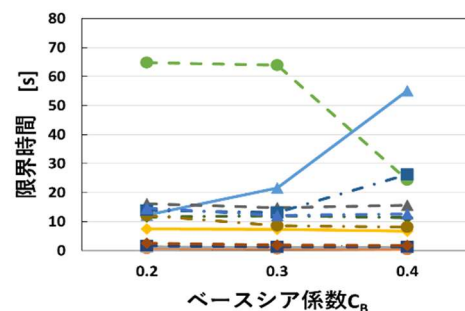
3 層建物では、MXC 以外の地震動で限界時間が最大の C_B の値と最小の C_B の値で限界時間の差が 6 s 以内となるという結果となった。MXC では、 C_B が 0.2 から 0.3 に大きくなると限界時間は、約 13.5 s 長くなった。

9 層建物では、JMA, ELC, SNDaft, KSW, HAC, MXC, TKC, WJM, ANM で、限界時間が最大の C_B の値と最小の C_B の値で限界時間の差が 5 s 以内となるという結果となった。KRY については、 C_B が 0.2, 0.3, 0.4 と大きくなるにつれて限界時間は長くなった。SND では、 C_B が 0.2, 0.3, 0.4 と大きくなるにつれて限界時間は短くなった。TMK では、 C_B が 0.2 から 0.3 と大きくなると限界時間は短くなり、0.3 から 0.4 と大きくなると限界時間は長くなった。

これより、ベースシア係数 C_B が 0.2, 0.3, 0.4 と変化しても限界時間はあまり変化しない例が多く見られた。この理由としては、図-6 や図-8 で見られる限界時間が急激に短くなる範囲が地震動やモデルの限界変形や建物層数などにより異なるため、限界時間があまり変化しない例が多く見られたと考えられる。



(a) 3 層建物



(b) 9 層建物

図-11 ベースシア係数と限界時間の関係
(UD2, $V_{\max}=150$ cm/s)

3.7 最小の地動最大速度と建物層数の関係

限界変形に至る最小の地動最大速度と建物層数の関係について、 $C_B=0.3$ の UD2 モデルを対象として、短周期の地震動を入力した場合を図-12 (a) に、長周期の地震

動を入力した場合を (b) にそれぞれ示す。限界変形に至る最小の地動最大速度は、図-6、図-8 の各ケースの最小の地動最大速度である。

6 種類の短周期の地震動を入力した場合には、JMA、ELC、SNDaft、KRY、SND で 9 層建物よりも、3 層または 6 層建物のほうが限界変形に至る最小の地動最大速度が小さくなった。WJM については、限界変形に至る最小の地動最大速度は、建物層数が 3 層から 6 層と大きくなると小さくなり、6 層から 9 層と大きくなると大きくなった。

6 種類の長周期の地震動を入力した場合には、KSW、HAC、MXC、TKC、TMK、ANM で 3 層建物よりも、6 層または 9 層建物のほうが限界変形に至る最小の地動最大速度が小さくなった。このような結果となる理由としては、降伏後には層数の多い建物ほど固有周期が長くなる傾向があり、固有周期の長い建物は長周期の地震動と共振しやすくなるためではないかと考えられる。

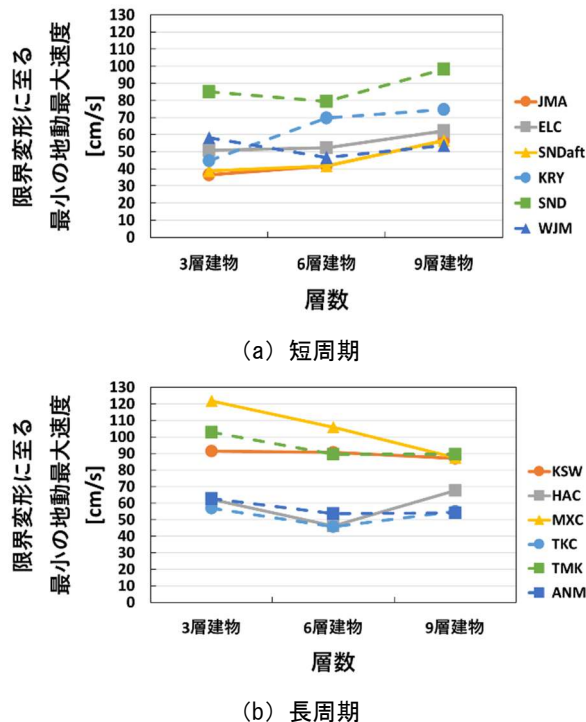


図-12 限界変形に至る最小の地動最大速度と建物層数の関係 ($C_B=0.3$, UD2)

4. まとめ

新耐震基準で設計された鉄筋コンクリート造建物を想定した 3 種類の曲げ破壊型の柱モデルで、ベースシア係数 C_B を 0.2, 0.3, 0.4 と変化させた 3 種類の層数の建物を想定し、12 種類の地震動を用いて地震応答解析を行った。ひび割れ発生時を建物の揺れ始めの時間と定義し、そこから降伏時変形に至るまでの時間を降伏時間、同じく限界変形に至るまでの時間を限界時間と定義し、降伏

時間と限界時間を求めた。地動最大速度 V_{max} は、10 cm/s から 150 cm/s まで変化させて解析を行った。また、限界変形に至る最小の地動最大速度の詳細値についても求めた。本論の範囲内で得られた結論を以下に示す。

- (1) 降伏時間と限界時間との差が大きくなるケースは、継続時間が長い地震動で見られた。
- (2) C_B が大きい場合でも、地動最大速度が大きくなれば、限界時間は短くなる傾向がある。
- (3) C_B に関わらず、3 層、6 層、9 層と建物層数が増えるにつれて、限界時間は短くなる傾向がある。
- (4) C_B に関わらず、UD2, UD4, UD6 と限界変形が大きくなるにつれて、限界時間は長くなる傾向がある。
- (5) 同じ V_{max} では、 C_B が 0.2, 0.3, 0.4 と変化しても限界時間はあまり変わらない。
- (6) 限界変形に至る最小の V_{max} は、短周期の地震動では、9 層よりも 3 層または 6 層建物のほうが小さくなり、反対に、長周期の地震動では、3 層よりも 6 層または 9 層建物のほうが小さくなる傾向がある。

謝辞

本論では、気象庁、防災科学技術研究所強震観測網 (K-NET) による観測地震動を使用した。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造保有水平耐力計算基準・同解説，2021
- 2) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の等価線形化法に基づく耐震性能評価型設計指針・同解説，2023
- 3) 中村孝也，井森大介：既存鉄筋コンクリート建物が崩壊に至る時間に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.40，No.2，2018
- 4) 江戸宏彰，武田寿一：鉄筋コンクリート構造物の弾塑性地震応答フレーム解析，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.1877-1878，1977.10
- 5) Trifunac M.D. and Brady A.G., : A study on the Duration of Strong Earthquake Ground Motion, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 65, No.3, pp.581-626,1975
- 6) 防災科学技術研究所 NIED,強震観測網 (K-NET, KiK-net) (閲覧日：2024 年 1 月 12 日)
<http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/>
- 7) 気象庁 (閲覧日：2024 年 1 月 12 日)
<http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/kyoshin/>