サイン波 1 波による 1 質点系の最大地震変位応答予測に関する研究

山田耕司 — * 1

キーワード：
地震応答解析, サイン波 1 波, 速度応答スペクトル, 最大変位応答, 固有周期

Keywords:
Earthquake response analysis, 1 Cycle Sine Wave, Velocity response spectrum, Maximum displacement response, Natural period

MAXIMUM DISPLACEMENT RESPONSE OF 1 DOF SYSTEM SUBJECTED TO 1 CYCLE SINE WAVE

Koji YAMADA — * 1

Maximum displacement response of 1 DOF system subjected to 1 cycle sine wave is calculated in order to estimate the maximum displacement response of structures in any earthquake. As results, the maximum velocity responses of linear system based on this proposed method have the constant maximum velocity. The period of sin wave that makes the structure most deformed is 0.85 times of the natural period of that structure. The estimated maximum displacement response displacement is less than 1.5 times of the displacement based on this proposed method.

1. 序

最大地動速度50cm/secの地震動に耐える建物を設計する場合、複数の実地震動もしくはサイト特性を考慮した人工地震動を用いて応答を検討することが多い。しかし、有限個の地震応答解析により発生しうる最大応答は予測できている保証はない。構造物の耐震設計における地震荷重は、境ら¹⁾がまとめているように1)震源特性、2)伝搬経路、3)表層地盤の増幅特性、4)構造物と地盤の相互作用等に基づいて設定する必要がある。しかし、実際の地震動に関するすべての要因を考慮に入れて、その波形を再現することは非常な困難を伴う。また、現在までに観測されていない構造物に致命的なダメージを与える地震動が今後発生する可能性も捨てきれない。

地震時の最大応答変位を予測する研究は、向井ら²⁾がまとめているように瞬間エネルギー量によるもの、応答スペクトル法によるもの、等価線形化法によるものがある。しかし、構造物に発生しうる最大変位応答の予測を目的とした有限サイン波によるパラメトリックな研究は、著者の知る限りではRC構造物を対象とした向井らの研究²⁾のみである。

そこで本報では、構造物に発生しうる最大変位応答の予測を目的として、最大地動速度50cm/secのサイン波 1 波による 1 質点系の最大変位応答を計算して構造物に発生しうる最大変形を検討する。また実地震動での共振の影響を検討するために、最大地動速度50cm/secの実地震最大変位応答とサイン波 1 波変位応答の最大値を比較し、その有効性を検証する。本報の結果を用いれば、最大地動速度が決められた地震動に対する最大変位応答の範囲が予測できる。

有限サイン波に対する建物応答の研究としては、境らが応答スペクトルにより地震動の強さが表現できると仮定し、地震動をサイン波 1 波に単純化する方法を提案し、単純化したサイン波を弾塑性復元力特性モデルに入力すれば、必要耐力スペクトルを 2 割程度の誤差で求めることができると結論している¹⁾。また渡辺らは、有限サイン波を用いた模擬地震動を作成し、弾性応答スペクトル、弾塑性応答スペクトル、復元力、塑性変形、エネルギースペクトル、弾塑性履歴特性も良く近似していると報告している³⁾。

サイン波 1 波に対する応答の研究成果としては、向井らが 1 質点系にモデル化した RC 構造物応答の片寄りを検討し、サイン波 1 波で片寄り量の算出が可能であると結論している²⁾。

2. 仮定

2. 1 入力サイン波 1 波の仮定

境らの研究では、実地震動の最大加速度と等価周期をパラメータとしてサイン波を規定している¹⁾。しかし、本報では地震動の最大速度が建物の応答に関係していると考え、入力地震動はサイン波 1 波の加速度波形とし、その最大速度(PGV)を40, 50, 60cm/secとした。

サイン波の振動数は0.1Hz刻みで0.1~10Hzまで変化させ、各々の振動数に対する最大応答を平均加速度法(時間刻み0.005sec)により計算する。本報では、以上で求めた最大変位応答値の内での最大値(以下、最大サイン波 1 波変位応答と称す)とその最大変位発生時の加振周期を検討対象としている。

*1 豊田工業高等専門学校建築学科 助教授・博士(工学)
(〒471-8525 豊田市栄生町2-1)

*1 Assoc. Prof., Toyota National College of Technology, Dr. Eng.

2. 2 構造物の履歴特性

構造物は、固有周期、降伏荷重をベースシア係数で与えた。履歴特性は、線形系および図1に示す3つの弾塑性系モデルを想定した。各モデルの降伏点は降伏ベースシア係数を表す。このモデルの2次剛性は1次剛性の1/100と仮定した。

固有周期は0.25~2.0sec(0.25~0.70sec間では0.05sec刻み、0.7~2.0sec間では0.1sec刻み)、ベースシア係数は0.25~0.60まで0.05刻みでパラメトリックに計算を行った。

モデル1 モデル2 モデル3

図1 履歴モデル

3. サイン波1波に対する変位応答

3. 1 線形系の応答

加振最大速度振幅を50cm/sec一定とした時の線形系の5%減衰時最大サイン1波変位応答に対応する速度応答スペクトルを図2に、

図2 線形系の最大サイン1波変位応答時の最大速度応答(h=0.05)

図3 線形系最大サイン1波変位応答時の加振周期

図4 線形系最大変位応答

その時の加振周期/構造物の固有周期を図3に示す。図より、本報で採用している計算法に拠れば速度応答スペクトルをほぼ一定値になること、最大応答値発生時の加振周期は構造物の固有周期の0.85倍程度であることが分かる。これはサイン1波に対する共振周期および応答倍率を表していると考えられる。

固有周期0.6secの場合の加振周期に対する線形系の最大変位応答(h=0.02)を図4に示す。図より固有周期近辺で最大応答が発生していることが分かる。従って、本報のようなサイン波1波の場合でも固有周期と同程度の周期の加振波が構造物の最大応答値を与えることが分かる。

3. 2 弾塑性系モデルの応答

図5に弾塑性系における最大塑性率発生時の加振周期と固有周期の比、および最大塑性率発生時の加振周期を示す。

図よりモデル1の場合は、最大塑性率発生時の加振周期は構造物の固有周期の0.8~1.4倍の範囲にあり、線形系の場合よりは範囲が大きいこと、構造物の固有周期の±0.3secの範囲に加振周期が存在することが分かる。

モデル2の場合は、最大塑性率発生時の加振周期は、モデル1の応答の場合と異なり、構造物の固有周期が短くベースシア係数が小さい場合は固有周期に比べて非常に大きな加振周期であることが分かる。ただし、構造物の固有周期が1.2sec以上の場合には、加振周期

モデル1

モデル2

モデル3

モデル3

図5 弾塑性系における最大塑性率発生時の加振周期
(図中の0.25~0.60はベースシア係数を表す)

は固有周期の0.8～1.5倍の範囲にある。また図より、最大塑性率発生時加振周期はベースシア係数と相関が高いことが分かる。

モデル3における最大塑性率発生時の加振周期の傾向は、モデル1の場合より、モデル2の場合に近く、構造物の固有周期が短くベースシア係数が小さい場合は固有周期に比べて非常に大きな加振周期であることが分かる。ただし、構造物の固有周期が1.0sec以上の場合には、加振周期は固有周期の1.0～1.5倍の範囲にある。また図より、最大塑性率発生時加振周期はベースシア係数と相関が高いことが分かる。

4. 実地震応答解析結果との比較

本節では、地震動での共振の影響を検討するために実地震最大変位応答と最大サイン波1波変位応答を比較し、その有効性を検証する。地震動波形は、日本建築センターで配布している地震動加速度波形(ELCENTEW, ELCENTNS, HACHINEW, HACHINNS, TAFTEW, TAFTNS, TOKYO101, OSAKA205, SND501EW, SND501NS, TUN11FEW, TUN11FNS)およびノースリッジ地震のSYLMARでの波形(<http://docinet3.consrv.ca.gov/csmip/>), 兵庫県南部地震の神戸海洋気象台波と鷹取波(<http://nisee.berkeley.edu/>), 十勝沖地震の釧路気象台での気象庁波形の最大速度を40, 50, 60 cm/secに変換したものを使用した。数値積分には、中間加速度法を用い、時間刻み0.005secで計算している。固有周期(T_0)を0.25～2.0sec(0.25～0.70sec間では0.05sec刻み, 0.7～2.0sec間では0.1sec刻み), ベースシア係数を0.25～0.60まで0.05刻み, 減衰定数(h)を0.01～0.05まで0.01刻みでパラメトリックに計算している。

表1, 2に実地震動時変位応答の最大サイン波1波変位応答に対する比(以下、変位応答比(x)と称する)の発生率を減衰率(h)・最大地動速度(PGV)毎に示す。表より線形系に比して、弾塑性系の場合では変位応答比が1.5以上の場合が少ないことが分かる。特にモデル3では変位応答比が1.5を越える場合が存在しなかった。また、各モデルとも最大地動速度および減衰定数の変位応答比への影響は少なく、変位応答比の平均は0.5前後であり、標準偏差は0.15～0.30程度の範囲にあり、変動係数は0.5程度である。変位応答比の上限はモデル1の場合で1.5, モデル2の場合で2.0, モデル3の場合で1.5が目安と判断できる。

表3, 4に最大地動速度(PGV)50cm/sec時の変位応答比分布の発生率を系の固有周期別に示す。表より線形系では固有周期0.4～0.6secをピークして変位応答比が1.5を越える場合が多いが、変位応答比の平均は固有周期0.6～1.4secの範囲が大きい。弾塑性系ではモデル毎に状況が変化し、モデル1, モデル2の場合では、変位応答比1.5以上のケースが見られる固有周期0.2～1.0secの変位応答比の平均が大きい。モデル3の場合では、変位応答比の平均への固有周期の影響を見だし難く、変位応答比の平均は0.45～0.55の範囲に存在する。

従って今回の計算結果の範囲内では、最大地動速度40～60cm/secに対する最大変位応答は最大サイン波1波変位応答の1.5倍以内と考えて良いと言える。なお、変位応答比が大きい計算例は、特定地震動である場合が多い。モデル1の変位応答比が1.5以上の計算例は、十勝沖地震釧路気象台のEW成分、兵庫県南部地震神戸海洋気象台のNS成分の場合が多い。モデル2の変位応答比が1.5以上の計算例は、十

勝沖地震釧路気象台のNS成分、日本建築センターのTUN11FEW, HACHINEWの場合が多い。モデル3の変位応答比が1.0以上の計算例は、兵庫県南部地震神戸海洋気象台のNS成分および鷹取操車場のNS, EW成分の場合が多い。

5. まとめ

本報では、構造物に発生しうる最大変位応答の予測を目的として、サイン波1波による1質点系の最大変位応答を計算し、構造物に発生しうる最大変形を計算した。また実地震最大変位応答と最大サイン波1波変位応答を比較しその有効性を検証した。その結果以下の事項が判明した。

- ・線形系の場合、本報で採用している計算法に拠れば速度応答スペクトルをほぼ一定値になること、最大応答値発生時の加振周期は構造物の固有周期の0.85倍程度になる。
- ・本報で扱った地震動波形の範囲では、最大地動速度40～60cm/secに対する最大変位応答は最大サイン波1波変位応答の1.5倍の変位以内と考えて良いと言える。なお、地震動に対する最大応答の最大サイン波1波変位応答に対する比の平均は、0.5～0.6であり、標準偏差は0.15～0.30程度であった。

本報で行ったサイン波1波による応答解析は、最大変位応答が共振によるものでなくパルス的な加振により発生する場合について、非常に簡単な仮定を用いてその最大塑性変形を論じたものである。結果として、実地震応答解析結果との比較により、サイン波1波による応答解析で最大変形応答が予測できる結果を得ている。当然本報で用いた実地震動以外の地震動により今回の結果を覆す結果が出ないとは断言できない。また今後、地震動の入力損失の考慮が必要などの問題もある。しかし、発生しうる最大変位応答を予測する手段として、本報の結果は一助になると考える。

謝辞

本研究に際し、WWW上の公開強震記録を用いた。記して関係各位に謝意を表する。

参考文献

- 1) 境有紀, 壁谷澤寿海: 地震動の単純化および距離減衰式を用いて基盤動をサイン波1波で与える方法, 構造工学論文集 Vol.46B, 2000, pp.399-404
- 2) 向井智久, 衣笠秀行, 野村設郎: RC 構造物における塑性時の片寄りのメカニズムとその算出法 SIN波1波に関する検討, 構造工学論文集 Vol.47B, 2001, pp.491-496
- 3) 渡辺雅生, 酒造敏廣: 実地震波の有限Sin波による近似, 構造工学論文集 Vol.46B, 2000, pp.405-412

表1 線形系における変位応答比の発生率(%)と平均および標準

偏差(PGV=50cm/sec)					
変位応答比	h=0.01	h=0.02	h=0.03	h=0.04	h=0.05
$0.0 \leq x < 1.0$	79.8	85.0	89.3	91.5	93.5
$1.0 \leq x < 1.5$	15.4	13.5	9.8	7.6	6.1
$1.5 \leq x < 2.0$	3.3	1.1	0.7	0.7	0.4
$2.0 \leq x$	1.5	0.4	0.2	0.2	0.0
平均	0.73	0.65	0.60	0.57	0.55
標準偏差	0.42	0.34	0.30	0.27	0.25

表2 弾塑性系における変位応答比の発生率 (%) と平均および標準偏差

モデル1の場合

	h	0.01			0.02			0.03			0.04			0.05		
	PGV	40	50	60	40	50	60	40	50	60	40	50	60	40	50	60
変位 応答 比	$0.0 \leq x < 1.0$	94.2	94.7	94.4	94.8	94.7	94.2	95.2	94.9	94.3	95.3	95.0	94.4	95.6	95.2	94.6
	$1.0 \leq x < 1.5$	5.5	4.8	5.0	4.9	4.7	5.2	4.5	4.5	5.1	4.2	4.4	5.0	3.9	4.2	4.8
	$1.5 \leq x < 2.0$	0.4	0.5	0.6	0.4	0.5	0.6	0.4	0.5	0.6	0.5	0.6	0.6	0.4	0.5	0.6
	$2.0 \leq x$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	平均	0.61	0.60	0.60	0.59	0.59	0.59	0.58	0.58	0.59	0.57	0.57	0.58	0.56	0.57	0.58
	標準偏差	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.25	0.24	0.24	0.24	0.24	0.25	0.23	0.24	0.25

モデル2の場合

	h	0.01			0.02			0.03			0.04			0.05		
	PGV	40	50	60	40	50	60	40	50	60	40	50	60	40	50	60
変位 応答 比	$0.0 \leq x < 1.0$	80.6	80.5	80.5	83.9	83.4	83.0	87.0	85.8	85.0	88.8	87.4	85.9	90.9	88.5	87.7
	$1.0 \leq x < 1.5$	17.2	17.4	18.1	14.9	15.2	15.6	12.1	13.1	14.2	10.5	11.9	13.2	8.3	11.0	11.7
	$1.5 \leq x < 2.0$	2.1	2.0	1.4	1.2	1.4	1.3	0.9	1.1	0.8	0.7	0.7	0.9	0.8	0.5	0.5
	$2.0 \leq x < 2.5$	0.1	0.1	0.1	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	$2.5 \leq x$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	平均	0.71	0.71	0.70	0.66	0.67	0.67	0.62	0.64	0.64	0.59	0.61	0.63	0.57	0.59	0.61
	標準偏差	0.35	0.34	0.34	0.33	0.33	0.33	0.31	0.32	0.32	0.30	0.31	0.32	0.29	0.30	0.31

モデル3の場合

	h	0.01			0.02			0.03			0.04			0.05		
	PGV	40	50	60	40	50	60	40	50	60	40	50	60	40	50	60
変位 応答 比	$0.0 \leq x < 1.0$	97.3	98.9	99.6	97.7	98.9	99.4	98.2	99.1	99.5	98.3	99.0	99.2	98.6	99.0	99.2
	$1.0 \leq x < 1.5$	2.7	1.1	0.4	2.3	1.1	0.6	1.8	0.9	0.5	1.7	1.0	0.8	1.4	1.0	0.8
	$1.5 \leq x < 2.0$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	平均	0.53	0.50	0.49	0.52	0.50	0.49	0.51	0.49	0.49	0.50	0.49	0.49	0.50	0.49	0.49
	標準偏差	0.22	0.20	0.18	0.21	0.19	0.18	0.20	0.19	0.18	0.20	0.19	0.18	0.20	0.18	0.18

表3 線形系における変位応答比の発生率 (%) (PGV=50cm/sec)

変位応答比	$0.2 \leq T_0 < 0.4$	$0.4 \leq T_0 < 0.6$	$0.6 \leq T_0 < 0.8$	$0.8 \leq T_0 < 1.0$	$1.0 \leq T_0 < 1.2$	$1.2 \leq T_0 < 1.4$	$1.4 \leq T_0 < 1.6$	$1.6 \leq T_0 < 1.8$	$1.8 \leq T_0 < 2.0$	$2.0 \leq T_0$
$0.0 \leq x < 1.0$	91.0	89.4	81.5	77.0	78.0	83.3	98.0	97.0	95.5	94.0
$1.0 \leq x < 1.5$	6.7	6.4	17.0	22.0	20.0	16.0	2.0	3.0	4.5	6.0
$1.5 \leq x < 2.0$	1.3	2.8	1.5	1.0	1.5	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0
$2.0 \leq x$	1.0	1.4	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
平均	0.48	0.62	0.67	0.77	0.76	0.72	0.56	0.53	0.55	0.58
標準偏差	0.36	0.40	0.32	0.29	0.32	0.31	0.23	0.22	0.23	0.24

表4 弾塑性系における変位応答比の発生率 (%) (PGV=50cm/sec)

モデル1の場合

変位応答比	$0.2 \leq T_0 < 0.4$	$0.4 \leq T_0 < 0.6$	$0.6 \leq T_0 < 0.8$	$0.8 \leq T_0 < 1.0$	$1.0 \leq T_0 < 1.2$	$1.2 \leq T_0 < 1.4$	$1.4 \leq T_0 < 1.6$	$1.6 \leq T_0 < 1.8$	$1.8 \leq T_0 < 2.0$	$2.0 \leq T_0$
$0.0 \leq x < 1.0$	94.9	89.0	90.3	94.3	99.1	98.2	100.0	99.4	98.1	97.1
$1.0 \leq x < 1.5$	4.3	9.2	9.3	5.7	0.9	1.8	0.0	0.6	1.9	2.9
$1.5 \leq x < 2.0$	0.8	1.8	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
$2.0 \leq x$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
平均	0.50	0.66	0.67	0.65	0.60	0.59	0.51	0.49	0.51	0.54
標準偏差	0.26	0.27	0.26	0.21	0.18	0.20	0.19	0.19	0.21	0.21

モデル2の場合

変位応答比	$0.2 \leq T_0 < 0.4$	$0.4 \leq T_0 < 0.6$	$0.6 \leq T_0 < 0.8$	$0.8 \leq T_0 < 1.0$	$1.0 \leq T_0 < 1.2$	$1.2 \leq T_0 < 1.4$	$1.4 \leq T_0 < 1.6$	$1.6 \leq T_0 < 1.8$	$1.8 \leq T_0 < 2.0$	$2.0 \leq T_0$
$0.0 \leq x < 1.0$	70.9	74.6	78.3	84.4	90.1	93.5	99.3	98.7	96.6	96.3
$1.0 \leq x < 1.5$	24.0	23.5	20.8	15.6	9.9	6.5	0.8	1.3	3.4	3.8
$1.5 \leq x < 2.0$	4.9	2.0	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
$2.0 \leq x$	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
平均	0.75	0.75	0.71	0.68	0.64	0.60	0.50	0.49	0.51	0.55
標準偏差	0.42	0.37	0.34	0.29	0.27	0.25	0.22	0.21	0.22	0.22

モデル3の場合

変位応答比	$0.2 \leq T_0 < 0.4$	$0.4 \leq T_0 < 0.6$	$0.6 \leq T_0 < 0.8$	$0.8 \leq T_0 < 1.0$	$1.0 \leq T_0 < 1.2$	$1.2 \leq T_0 < 1.4$	$1.4 \leq T_0 < 1.6$	$1.6 \leq T_0 < 1.8$	$1.8 \leq T_0 < 2.0$	$2.0 \leq T_0$
$0.0 \leq x < 1.0$	99.7	99.1	99.6	99.9	99.8	97.6	100.0	99.3	97.7	97.1
$1.0 \leq x < 1.5$	0.3	0.9	0.4	0.1	0.2	2.4	0.0	0.7	2.3	2.9
$1.5 \leq x < 2.0$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
$2.0 \leq x$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
平均	0.39	0.46	0.50	0.55	0.56	0.56	0.49	0.49	0.51	0.55
標準偏差	0.18	0.17	0.17	0.16	0.18	0.20	0.19	0.19	0.21	0.21

[2002年4月3日原稿受理 2002年7月23日採用決定]