応答スペクトルを用いた水平2方向入力地震動 の設定に関する研究

井上 和真1・渡辺 和明2・五十嵐 晃3・畑 明仁4

¹正会員 大成建設株式会社 原子力本部 (〒163-0606 東京都新宿区西新宿1-25-1新宿センタービル) E-mail:inukzm00@pub.taisei.co.jp

²正会員 大成建設株式会社 原子力本部 (〒163-0606 東京都新宿区西新宿1-25-1新宿センタービル) E-mail:kwatanab@ce.taisei.co.jp

³正会員 京都大学防災研究所 教授(〒611-0011京都府宇治市五ヶ庄) E-mail:igarashi.akira.7m@kyoto-u.ac.jp ⁴正会員 大成建設株式会社 技術センター(〒254-0051神奈川県横浜市戸塚区名瀬町344-1) E-mail:hata@ce.taisei.co.jp

土木構造物の耐震性能照査では、一般に、応答スペクトルに適合した地震波形を設定し、水平1方向と 鉛直方向の組合せによる動的解析が行われる.近年の設計手法の高度化に伴い、地震時挙動の3次元性を 考慮した耐震検討が行わるようになり、従来の水平1方向に加えて、直交する水平成分の入力地震動の設 定も必要となってきている.本研究は、既往の観測記録の水平面内における震動特性を分析し、1方向及 び2方向応答スペクトルに基づいた合理的な水平2方向入力地震動の組合せの設定方法を提案した.また、 従来の設計・照査用の応答スペクトルに基づいて設定された直交方向の応答スペクトルと2方向応答スペ クトルに適合する水平2方向入力地震動の組合せの作成方法を提案した.

Key Words : bi-directional ground motions, bi-axial response spectrum, seismic design, spectrum-compatible accelerograms

1. はじめに

橋梁,抗土圧構造物,地中構造物などの一般土木構造物の耐震設計・耐震性能照査は,道路橋示方書(以下, 道示)や鉄道構造物等設計標準(以下,鉄道標準)などの設計基準・指針で定義される応答スペクトルに適合した入力地震動を用いて行う.このときの地震動としては,水平方向として独立した1方向成分を考慮している.

原子力発電所等の重要構造物の耐震設計・耐震性能照 査は、各サイトにおける過去の地震発生状況等に基づく 断層震源モデルを用いた手法により入力地震動が設定さ れる.断層震源モデルによる地震動評価においては、計 算の過程で、同一の想定断層に対してNS-EW等の水平 面内の直交2成分の地震動を作成することができるが、 多くの想定断層があった場合、断層震源モデルで作成さ れた複数の応答スペクトルを、安全側の配慮で全ての周 期帯域で包絡する応答スペクトルを1つ決め、それに適 合する入力地震動を設定する事例が多い.断層震源モデ ルでの計算過程では水平面内に生じる2次元的な地震動 を表現できているものの、基準地震動としては包絡した スペクトルに適合した水平1方向の地震動となる.その ため、耐震設計や耐震性能照査に用いる入力地震動が水 平1方向のスペクトル適合波という意味では、道示や鉄 道標準と同様である.

このように、構造物の種類に依らず、設計・照査用の 入力地震動は水平1方向で定義されるのが一般的である が、水平2方向入力に対する耐震設計・性能照査が構造 物の形状や特性から必要となる場合もある. 例えば、中 谷ら¹は免震支承、すべり支承、シリンダー型の制震ダ ンパーからなる免制震すべりシステムを適用した多径間 連続曲線橋に対して、地震動の入力角度を変化させた道 示の標準波の1方向入力と,異なる2つの道示の標準波 を同時入力する2方向同時入力によって、多径間連続曲 線橋の耐震性を評価している.しかし、道示の標準波を 用いた2方向同時入力の解析では、入力地震動が合成さ れることで道示の応答スペクトルよりも大きな地震動と なり、過大設計になる恐れがあることを指摘しており、 水平2方向同時入力用の地震波形の必要性にも言及して いる.また,筆者ら²は,大深度地中構造物を対象とし た3次元動的解析の比較検討により、特に立坑と横坑の 構造変化部において水平2方向入力とすることで発生応 力が増加する傾向を指摘している.しかし,現行の設計 指針・設計基準では水平2方向の入力地震動の具体的な 設定方法まで規定されていないのが実情である.

本研究は、従来の水平1方向の設計用・照査用応答 スペクトルに加えて、2方向応答スペクトル³の概念を 導入して水平2方向同時入力の地震動の設定手法を提案 するものである.まず,強震動の観測記録の水平2方向 の強度特性を把握するために、海溝型および内陸直下型 の多数の観測記録を対象に主軸解析を実施し、主軸-主 軸直交方向の加速度応答スペクトルの比と、それらを入 力とする2方向応答倍率の傾向を分析した. これらの分 析結果に基づいて、基本となる水平1方向の応答スペク トルを用いて、直交するもう1方向の応答スペクトルと 水平2方向応答スペクトルの設定方法を提案した.加え て、強震動の観測記録の水平面内の軌跡の傾向を把握す るために、海溝型および内陸直下型の観測加速度軌跡に 複素偏極フィルター分析⁴ (Complex Polarization Filter, 以 下: CP 分析)を実施し、軌跡の特徴を示す楕円偏極指 標の傾向を分析した.また、同時に直交方向の応答スペ クトルと2方向応答スペクトルに適合する入力地震動の 組合せを、リサージュ図形の概念に基づいて作成する手 法を提案した. 最後に、提案した手法による具体的な入 力地震動の作成例を示す.

2. 水平2方向入力地震動の作成の設定に関する 基本方針

(1)水平2方向入力の設定のための評価指標

水平2方向応の入力地震動の設定および観測地震動の 分析のために3種類の評価指標を適用する.

a) 2方向応答スペクトル

与えられた2方向入力に対する、様々な固有周期Tを 持つ等方な2次元線形弾性1質点振動子(図 2.1 参照) の水平2次元応答の動径方向の最大値と、固有周期Tの 関係を表すもので、式(2.1)に表すS_{kt}(T)を2方向応答スペ クトルと呼ぶ.それぞれの軸方向の弾性応答スペクトル を2方向入力の場合に拡張したものである.例として、 兵庫県南部地震における神戸海洋気象台(以下、JMA神 戸)での観測記録(NS-EW)による2方向応答スペク トルを図2.2を示す.

$$S_{Ra}(T) = \max_{t} \sqrt{a_x(T,t)^2 + a_y(T,t)^2}$$
(2.1)



図 2.1 2次元線形弾性1質点振動子



b) 2方向応答倍率

2方向入力とした場合と1方向入力とした場合の最大 応答値の比と固有周期Tの関係を表すもので,式(2.2)に 示すy₄(T)を2方向応答倍率と呼ぶ⁶⁰. すなわち, 1方向入 力とした場合と比較して, 2方向入力とした場合の最大 応答の増加率を示している. 例として, 兵庫県南部地震 におけるJMA神戸での観測記録 (NS-EW) の2方向応答 倍率を図2.3に示す. JMA神戸のNS-EW波の2方向応答 倍率は, NS成分とEW成分間での加速度振幅と位相の違 いから, √2とならず,各固有周期で1.0~√2の範囲の 値となっている.



図 2.3 2方向応答倍率の例 (JMA神戸の観測記録)

c)楕円偏極指標

地震動の3次元的な粒子挙動を定量的に評価する方法 として Vidale により提案された CP 分析がある. この CP 分析を行うことで, 軌跡挙動を定量的に示す楕円偏極指 標 P_Eが時刻 t の関数として算出される. 楕円偏極指標 $P_{d}(t)$ は0から1の範囲の値をとり、 $P_{d}(t)$ が1に近いほど 円的挙動を示し、0に近いほど直線的挙動を示すことと なる(図 2.4). なお, CP 分析は本来は3次元の地震 動に対して適用されるが、ここでは水平2方向成分のみ を対象として計算する. 例として, 兵庫県南部地震にお ける JMA 神戸の観測記録を対象とした CP 分析結果とし て、楕円偏極指標-時刻関係を図 2.5 に、楕円偏極指標-合成加速度関係を図 2.6 にそれぞれ示す. JMA 神戸を対 象とした楕円偏極指標 P_e(t)は時々刻々と変化しているこ と、合成加速度が小さい範囲においては、P_r(t)が 0~1 の広範囲に分布し、合成加速度が大きい領域では、合成 加速度が小さい範囲に比べてで P_n(t)は小さい値となって いる.



図 2.6 合成加速度-PE関係(JMA神戸の観測記録)

(2) 水平2方向入力に関する既往の設定法

水平2方向同時入力地震動の作成法として,標準波と その標準波のヒルベルト変換により求まる相補直交成分 波の組合せを用いる手法が提案されている⁶⁷⁷.また,相 補直交成分波に楕円偏極指標を導入した水平2方向同時 入力地震動の作成法も検討されている⁵⁶.これらの作成 法は2方向応答スペクトルの大きさが与えられた設計・ 照査用の応答スペクトルと同じ大きさになるという,水 平2方向入力の強度として,明確な特徴を有している.

また,2方向同時入力用の地震動の作成法の一つとし て,正弦波合成法で位相の異なるスペクトル適合波を複 数作成し,これらを水平2方向同時入力の組合せとする 方法が考えられる.正弦波合成法で用いる地震動の位相 は、ランダム位相を用いることが一般的である.作成し た地震動は、スペクトル適合波であるため、位相によら ず複数の同じ入力強度を持った地震動を作成することが できる.しかし、これらを水平2方向同時入力した場合、 入力する地震動の組合せごとに2方向同時入力としての 入力強度が異なってしまうという問題があり、明確に2 方向入力としての強度を評価することができない.

(3)提案する応答スペクトルの設定法の概念

既往の設定法を踏まえ、以下の特性を有する水平2方 向地震動の組合せを作成することを目的とする. I.弾性応答を想定した場合に、水平2方向地震動の本 来の特性である1方向入力時よりも2方向入力時の方が 大きいという特徴を持つ水平2方向地震動の組合せ. II.与えられた設計・照査用の応答スペクトルに基づい て直交方向の応答スペクトルと2方向応答スペクトルを 定義した上で、それぞれの応答スペクトルに適合する地 震動の組合せ.すなわち、直交方向応答スペクトルと2 方向応答スペクトルに同時に適合する地震動の作成手法 を提案する.

I, IIの特性を満たす水平2方向地震動の組合せを作成するため、設計指針・基準等において水平方向の入力 地震動として基本となる1方向の加速度応答スペクトル $S_{x}(T)$ が与えられた場合に、直交するもう1方向の水平 入力地震動を作成する方法として、式(2.3)、式(2.4)のよ うな関係を導入する.また、図2.7にその概念図を示す.

$$S_{ya}(T) = \alpha \cdot S_{xa}(T) \tag{2.3}$$

$$S_{Ra}(T) = \beta \cdot S_{xa}(T) \tag{2.4}$$

ここに,

S_{µa}(T): 直交方向の応答スペクトル

S_{Rd}(T): 2方向応答スペクトル

α, β:それぞれの応答スペクトル比(一定値)

本研究においては,強震動の観測記録の分析結果に基 づいて,水平直交2成分間の応答スペクトルや2方向応 答倍率の平均値を評価し、それらに基づいてを α 、 β を 設定する.これにより、設計・照査用応答スペクトルに 適合した水平1方向の入力地震動が設定された場合に、 平均的な2方向特性を補うもう1方向の直交成分波を作 成することができると考えられる.



図 2.7 3種類の応答スペクトルの関係例

3. 強震動の観測記録を用いた震動特性の分析

(1) 分析の方針と条件

a) 応答スペクトルと2方向応答倍率の分析

式(2.3), 式(2.4)における α, βを設定するために, 強 震動の観測記録について, 応答スペクトルと2方向応答 倍率の分析を行う.分析の条件を以下に示す.

- ・観測記録は、多くの場合 NS-EW 成分で観測されてい るが、地震計の設置方向の依存性を取り除くことと、 地震動の最大方向を求めるため、観測記録の加速度軌 跡に対して主軸解析を行う.
- ・主軸 主軸直交方向の地震動による加速度応答スペクトルの比率 r_o(T)を式(3.1)によって算出する.

$$r_{\alpha}(T) = \frac{\min\left(S_{pa}(T), S_{wa}(T)\right)}{\max\left(S_{pa}(T), S_{wa}(T)\right)}$$
(3.1)

ここに,

Sun(T): 主軸直交方向の加速度応答スペクトル

・主軸 - 主軸直交方向の地震動を入力とした2方向加速
 度応答倍率 r_d(T)を式(3.2)より求める.

$$r_{\beta}(T) = \frac{S_{Ra}(T)}{\max(S_{pa}(T), S_{wa}(T))}$$
(3.2)

観測記録の加速度軌跡の主軸方向の算出方法を以下に示 す[®].

$$\theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left\{ \frac{2\sigma_{xy}^2}{\sigma_x^2 - \sigma_y^2} \right\}$$
(3.3)

ここに,

 $\sigma_x, \sigma_y: x 軸, y 軸方向の地震動時刻歴データの分散$ $<math>\sigma_w: x 軸方向と y 軸方向の地震時刻歴データの共分散$

式(3.3)における主軸の物理的な意味は、水平面内の方 位角を θ とすると、 θ 方向の加速度の分散が最大となる 方向であり、主軸方向が一意に求まる. 図 3.1 に、 JMA 神戸の観測記録による主軸の計算例を示す.



図 3.1 主軸解析の例(JMA神戸の観測記録)

b) 楕円偏極指標による加速度軌跡の分析

図 2.5 や図 2.6 に示したように,楕円偏極指標 $P_{E}(t)$ は, 各時刻ごとに算出され,観測加速度軌跡の $P_{E}(t)$ は時々 刻々と変化しているため,一つの値で評価することは難 しい. そこで重み付き平均 μ_{a}^{0} を式(3.4)で定義した.

$$\mu_a = \frac{\int_0^T P_E(t)\sqrt{x(t)^2 + y(t)^2} dt}{\int_0^T \sqrt{x(t)^2 + y(t)^2} dt}$$
(3.4)

ここに,

 $\mu_a: P_E$ の加速度に関する重み付き平均

dt: 観測記録の時間刻み

T:継続時間

観測加速度を1方向のみの値でなく、水平2方向成分 を合成し、 $P_{E}(t)$ を各時刻ごとに乗じることによって主要 動における $P_{E}(t)$ の値が強調されることになる. すなわち、 式(3.4)で算出される重み付き平均は地震動中に時々刻々 と変化する $P_{E}(t)$ を継続時間中全ての範囲を考慮し、主要 動の部分の $P_{E}(t)$ を強調した値となる. また、観測記録の ため、サンプリング時間により地震動の継続時間の決め 方に自由度が高くなるが、地震動のデータの選び方の影 響を小さくすることができる.

(2) 分析対象地震とその観測記録

分析対象地震は、原子力規制庁の『基準地震動及び耐 震設計方針に係る審査ガイド』⁹のうち、震源を特定せ ずに策定する地震動の評価において、内陸地殻内地震の 例に挙げられている16地震と、気象庁webページの『強 震観測データ』¹⁰に公開されている28地震とした.審査 ガイドに記載されている地震は、防災科学研究所のK-NETおよびKiK-netで観測されたものを用いた.また、そ れぞれの地震における観測点は、震源から最も近い観測 点を選んだ.また、同一地震における2方向特性の分析 として、2000年10月の鳥取県西部地震における14観測点 においても同一の検討を行った.分析対象とした地震及 び観測記録を表3.1に示す.

表 3.1 分析対象地震の観測記録

(a)「基準地震動及び耐震設計方針に係る審査ガイド」の 震源を特定せずに策定する地震動と分析に用いた観測点一覧

No	地震名	日時	観測 地点	距離 (km)
1	2008年岩手・宮城内陸地震	2008/06/14, 08:43	一関西	3
2	2000年鳥取県西部地震	2000/10/06, 13:30	日野	7
3	2011年長野県北部地震	2011/03/12, 03:59	津南	6
4	1997年3月鹿児島県北西部地震	1997/03/26, 17:31	出水	12
5	2003年宮城県北部地震	2003/07/26, 07:13	築館	38
6	1996年宮城県北部(鬼首)地震	1996/08/11, 03:12	鳴子	12
7	1997年5月鹿児島県北西部地震	1997/05/13, 14:38	宮之城	16
8	1998年岩手県内陸北部地震	1998/09/03, 16:58	田沢湖	20
9	2011年静岡県東部地震	2011/03/15, 22:31	富士宮	15
10	1997年山口県北部地震	1997/06/25, 18:50	津和野	10
11	2011年茨城県北部地震	2011/03/19, 18:56	高萩	1
12	2013年栃木県北部地震	2013/02/25, 16:23	栗山西	4
13	2004北海道留萌支庁南部地震	2004/12/14, 14:56	港町	9
14	2005年福岡県西方沖地震の最大余震	2005/04/20, 06:11	宇美	28
15	2012年茨城県北部地震	2012/03/10, 02:25	高萩	9
16	2011年和歌山県北部地震	2011/07/05, 19:18	広川	2

(b) 気象庁webページ「主な地震の強震観測データ」 と分析に用いた観測点一覧

No	地震名	日時	観 測 地点	震央 距離 (km)
1	長野県北部の地震	2014/11/22, 22:08	長野市箱清水	27.4
2	淡路島付近の地震	2013/4/13, 5:33	洲本市小路谷	12.3
3	福島県中通りの地震	2011/4/12, 14:07	いわき市三和町	15.1
4	福島県浜通りの地震	2011/4/11, 17:16	棚倉町棚倉中居野	27.2
5	宮城県沖の地震	2011/4/7, 23:32	大船渡市大船渡町	97.0
6	静岡県東部の地震	2011/3/15, 22:31	富士宮市弓沢町	12.9
7	長野県北部の地震	2011/3/12, 3:59	出雲崎町米田	61.4
8	茨城県沖の地震	2011/3/11, 15:15	鉾田市鉾田	67.2
9	東北地方太平洋沖地震	2011/3/11, 14:46	涌谷町新町	158.5
10	駿河湾の地震	2009/8/11, 5:07	御前崎市御前崎	33.0
11	岩手県沿岸北部の地震	2008/7/24, 0:26	五戸町古舘	92.8
12	岩手・宮城内陸地震	2008/6/14, 8:43	栗原市栗駒	24.9
13	新潟県中越沖地震	2007/7/16, 10:13	出雲崎町米田	11.0
14	能登半島地震	2007/3/25, 9:42	輪島市鳳至町	26.6
15	宮城県沖の地震	2005/8/16, 11:46	涌谷町新町	108.9
16	福岡県北西沖の地震	2005/3/20, 10:53	福岡中央区舞鶴	26.1
17	新潟県中越地震	2004/10/23, 17:56	川口町川口	2.8
18	十勝沖地震 (最大余震)	2003/9/26, 6:08	浦河町潮	90.7
19	十勝沖地震(本震)	2003/9/26, 4:50	幕別町本町	138.8
20	宮城県北部の地震	2003/7/26, 7:13	涌谷町新町	284.7
21	宮城県沖の地震	2003/5/26, 18:24	大船渡市大船渡町	29.2
22	芸予地震	2001/3/24, 15:27	北広島町有田	61.6
23	鳥取県西部地震	2000/10/6, 13:30	境港市東本町	31.4
24	兵庫県南部地震	1995/1/17, 5:46	神戸中央区中山手	16.5
25	三陸はるか沖地震	1994/12/28, 21:19	八戸市湊町	187.6
26	北海道東方沖地震	1994/10/4, 22:22	釧路市幣舞町	270.8
27	北海道南西沖地震	1993/7/12, 22:17	寿都町新栄	85.7
28	釧路沖地震	1993/1/15, 20:06	釧路市幣舞町	7.0

(c) 2000年鳥取県西部地震における主な観測点一覧

No	地震名	日時	観測 地点	震央 距離 (km)
1	2000年鳥取県西部地震	2000/10/6 13:30	日野	7
2	11	2000/10/6 13:30	新見	38
3	"	2000/10/6 13:30	伯太	8
4	"	2000/10/6 13:30	江府	13
5	11	2000/10/6 13:30	日南	13
6	"	2000/10/6 13:30	仁多	24
7	11	2000/10/6 13:30	東城	43
8	"	2000/10/6 13:30	油木	56
9	11	2000/10/6 13:30	横田	25
10	"	2000/10/6 13:30	高野	49
11	11	2000/10/6 13:30	北房	45
12	"	2000/10/6 13:30	落合	46
13	"	2000/10/6 13:30	米子	16
14	"	2000/10/6 13:30	賀祥ダム	-

(3) 応答スペクトルの分析結果

図3.2に主軸-主軸直交方向の応答スペクトル比を、図 3.3に主軸-主軸直交方向を入力とする2方向応答倍率を 示す. なお、図中の黒線は各観測記録に対する計算結果, 青線は各固有周期における平均値、赤線は各固有周期に おける平均値(青線)を全固有周期で平均した値、緑線 は青線に対する標準偏差(±1)をとったものである. 結果として, 主軸-主軸直交方向の応答スペクトル比は 各地震や固有周期ごとでばらつきはあるものの、その平 均値は0.6~0.7程度となり、海溝型、内陸直下型地震に 依らず同様の傾向を示す結果となった.また,鳥取県西 部地震における14観測点における主軸-主軸直交方向の 応答スペクトル比の平均値も0.62となり、同一地震内に おいても、同様の傾向を示す結果となった. 主軸-主軸 直交方向を入力とする2方向応答倍率の平均値も同様に, 海溝型地震,内陸直下型地震ともに1.07となり,主軸-主軸直交方向の応答スペクトル比と同様に地震のタイプ に依らず, 同様の結果となった. また, 鳥取県西部地震 時の複数の観測点の結果においても, 主軸-主軸直交方 向を入力とした2方向応答倍率の平均値は、1.06となり 同一地震に対しても同様の結果となった.

主軸方向-主軸直交方向を入力とした2方向応答倍率 の平均値が1.10弱と比較的小さくなった要因を以下に考 察する.2方向応答スペクトルは『θ方向の応答スペク トル*S*_&(*T*)の重ね書きの包絡線*S*_{on}(*T*)と等しい』⁷⁾ことが 知られている.図3.4にJMA神戸波の観測記録のθ方向 (5°刻み)の応答スペクトルと2方向応答スペクトルを 重ね書きしたものを示す.主軸方向の応答スペクトル

(赤)は2方向応答スペクトル(緑)と近い値を示して おり, 主軸方向の単独での入力強度は, 主軸方向-主軸 直角方向で2方向同時入力した際の入力強度とほぼ近い ことがわかる.これらを定量的に評価するために、JMA 神戸の観測記録を例に、横軸に方位角0、縦軸に2方向 応答スペクトルのSI値(応答スペクトルの積分値)と0方向 のSI値の比をとったものを図3.5に示す.図3.5において、 縦軸が1に近いほど、θ方向の応答スペクトルが2方向 応答スペクトルに近いことを示しているが、主軸方向の 応答スペクトルは2方向応答スペクトルとSI値がほぼ等 しいことが定量的に確認することができる.また、方位 角θと2方向応答スペクトル/θ方向の応答スペクトル 関係は、ほぼ三角関数のような形をとることが示されて おり, 主軸方向で最小値に近い値となった. また, 主軸 -主軸直交方向とNS-EW (90°-0°) を入力とした2方 向応答倍率の比較を図3.6に示す。固有周期によって値 が変動しているが、2方向応答倍率の平均値で比較する と、主軸-主軸直交方向の2方向央倍率の平均値は1.04、 NS-EW方向では121となり、主軸-主軸直交方向の方が小 さい結果となった.











図 3.2 主軸-主軸直交方向の応答スペクトル比



(a) 海溝型地震



(b) 内陸直下型地震



(c)鳥取県西部地震 図 3.3 主軸-主軸直交方向の2方向応答倍率



図 3.4 θ方向の応答スペクトルと2方向応答スペクトル (JMA 神戸の観測記録)



図 3.5 θ方向の応答スペクトルと2方向応答スペクトル (JMA 神戸の観測記録)



(4) 楕円偏極指標の分析結果

式(3.4)によって評価した最大合成加速度- P_e の重み付き 平均関係を図3.7に示す.海溝型地震,内陸直下型地震 の楕円偏極指標 $P_e(t)$ の重み付き平均の平均値は概ね0.3付 近の値となった.この0.3という値は,既往の知見¹¹⁾から 見ても整合的であると考えられる.



4. 2方向応答スペクトルに適合した地震動の作成

(1) 作成方法の概要

方法の提案

作成方法は、互いに直交する2つの単振動を合成して 得られる平面図形(リサージュ図形)の考え方に基づい ており、直交する2つの単振動が同じ振動数であれば楕 円になることに着目した作成法である.

水平2成分の地震動 x(t), y(t)を三角関数で表記すると,

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{N/2-1} \sqrt{a_k^2 + b_k^2} \cos(2\pi f_k t + \phi_{x_k}) + \frac{a_{N/2}}{2} \cos(2\pi f_{N/2} t)$$
(4.1)

$$y(t) = \frac{c_0}{2} + \sum_{k=1}^{N/2-1} \sqrt{c_k^2 + d_k^2} \cos(2\pi f_k t + \phi_{y_k}) + \frac{c_{N/2}}{2} \cos 2\pi f_{N/2} t \qquad (4.2)$$

 $k=1 \sim N/2-1$ までのある振動数 f_k に着目すると、

$$x_{k}(t) = \sqrt{a_{k}^{2} + b_{k}^{2}} \cos(2\pi f_{k}t + \phi_{x_{k}}) = A_{k} \cos(2\pi f_{k}t + \phi_{x_{k}})$$
(4.3)

$$y_k(t) = \sqrt{c_k^2 + d_k^2 \cos(2\pi f_k t + \phi_{y_k})} = B_k \cos(2\pi f_k t + \phi_{y_k})$$
(4.4)

となる. $x_k(t)$, $y_k(t)$ を同時入力すると,水平面内で楕円 軌跡となる. 言い換えれば,水平面内の加速度軌跡は各 振動数における $x_k(t)$ と $y_k(t)$ の2方向入力で構成される 楕円軌跡の重ね合わせと言える. 図 4.1 及び図 4.2 に位 相と振幅の異なる単振動を,2方向同時入力をした例を 示す.

(9)

$$x(t) = A\cos(2\pi t + \phi_x) \qquad A = 1 \qquad \phi_x = \frac{\pi}{3} \qquad (4.5)$$

$$y(t) = B\cos(2\pi t + \phi_y) \qquad B = 2/3 \qquad \phi_y = \frac{\pi}{12} \qquad (4.6)$$





(2) 直交方向と2方向応答スペクトルの適合方法

各振動数成分における位相差を有する単振動の2方向 同時入力が描く軌跡は、楕円形状となることに着目して 直交方向および2方向応答スペクトルへの適合を2つの ステップで行う.

ステップ1: 直交方向地震動の振幅及び位相の調整による初期地震動の作成

ある振動数 f_k における,楕円軌跡の軸方向 θ_k は

$$\tan 2\theta_k = \frac{2A_k B_k}{A_k^2 - B_k^2} \cos(\phi_{y_k} - \phi_{x_k})$$
(4.7)

より, 位相差を $\delta_k = \phi_{xk} - \phi_{yk}$ とおいて,

$$\theta_k = \tan^{-1} \left(\frac{2A_k B_k}{A_k^2 - B_k^2} \cos \delta_k \right)$$
(4.8)

となる. 直交する楕円軸の長さを lik, bkとすると,

$$l_{1k} = \sqrt{A_k^2 \cos^2 \theta_k + B_k^2 \sin^2 \theta_k + 2A_k B_k \cos \theta_k \sin \theta_k \cos \delta_k}$$
(4.9)

 $l_{2k} = \sqrt{A_k^2 \sin^2 \theta_k} + B_k^2 \cos^2 \theta_k - 2A_k B_k \cos \theta_k \sin \theta_k \cos \delta_k$ (4.10) 楕円軸 l_{1k} , $l_{2k} O 2 \rightarrow O O 5 5$, 長い方が楕円の長軸 $l_{mor} k_1$ 短い方が楕円の短軸 lmin k となる.

$$l_{\max_k} = \max(l_{1k}, l_{2k})$$
 (4.11)

$$l_{\min_{k}} = \min(l_{1k}, l_{2k})$$
(4.12)

ここで, x 方向に与えられた設計・照査用の応答スペクトルに適合した波形を入力するとし,以下の制約条件を 導入する.

$$B_k = \alpha \cdot A_k \tag{4.13}$$

$$l_{\max k} = \beta \cdot A_k \tag{4.14}$$

ここに,

α, β:式(2.3),式(2.4)の応答スペクトル比 これを楕円長軸の式に代入すると

0ľ

$$\frac{\sqrt{A_k^2 \cos^2 \theta_k + \alpha^2 A_k^2 \sin^2 \theta_k + 2\alpha A_k^2 \cos \theta_k \sin \theta_k \cos \delta_k}}{\beta A_k} = 1 \quad (4.15)$$

$$\frac{\sqrt{A_k^2 \sin^2 \theta_k + \alpha^2 A_k^2 \cos^2 \theta_k - 2\alpha A_k^2 \cos \theta_k \sin \theta_k \cos \delta_k}}{\beta A_k} = 1 \quad (4.16)$$

α, β, A_k は既知であるため、上式を満たす θ_k , $\delta_k = \phi_{x,k} - \phi_{y,k}$ を求める. なお、 θ_k は δ_k での変数であること、 $\phi_{x,k}$ は既知であること考えれば、変数は $\phi_{y,k}$ のみである. 数値計算を行い、式(4.15)もしくは式(4.16)を満たす $\phi_{y,k}$ を解析的に探索する. 式(4.15)もしくは式(4.16)の関係は、x方向の振幅と y方向の振幅と $x_k(t)$ - $y_k(t)$ の組合せで入力した際の楕円長軸の比が、 $1: \alpha: \beta$ となる振幅と位相差を探すものである. 図 4.3 に各振動数成分における $\alpha \ge \beta$ のイメージ図を示す.



x方向 加速度(gal)

図 4.3 各振動数成分におけるαとβのイメージ図

ステップ2:ステップ1で作成した地震動のスペクトル 適合

ステップ1で作成した水平2方向の地震動の入力強度 は、x方向を1とすれば、入力強度の比は 1: α : β の関 係となる.しかし、これは入力振幅における関係であり、 応答側で見ると、入力強度とほぼ同様の傾向を示すが、 厳密に応答スペクトルに適合しない、そこで、応答スペ クトルで上記の関係を満たすために、スペクトル適合の 処理を行う.ステップ1で作成した地震動をx(t),y(t)と して、これらを入力とした応答スペクトル $S_{x}(f)$, $S_{y}(f)$ お よび2方向スペクトル $S_{y}(f)$ を計算する.ここで、直交方 向目標スペクトルを $S_{y_{LOGG}}(f)$,2方向目標スペクトルを $S_{bi_{LOGG}}(f)$ とすると、それぞれの関係は次式のようになる.

$$S_{y_t \operatorname{arget}}(f) = \alpha \cdot S_x(f) \tag{4.17}$$

$$S_{bi \ target}(f) = \beta \cdot S_x(f) \tag{4.18}$$

それぞれの目標スペクトルに対する応答スペクトルの 誤差を下式のように定義する.

$$\gamma_{y}(f) = \frac{S_{y_target}(f)}{S_{y}(f)}$$
(4.19)

$$\gamma_{bi}(f) = \frac{S_{bi_target}(f)}{S_{bi}(f)}$$
(4.20)

直交方向の応答スペクトルの適合度を上げるために, 直交方向地震動の振幅を応答スペクトルの適合度に合わ せて修正を行う.

$$B_{new \ k} = \gamma_{v \ k} \cdot \alpha \cdot A_k \tag{4.21}$$

このとき,直交方向地震動の振幅を調整したことにより, 2方向応答スペクトル大きさが変わってしまう.これを 回避するために,

$$\gamma_{bi_{k}} = \frac{l_{\max_new_{k}}(A_{k}, B_{new_{k}}, \phi_{x_{k}}, \phi_{y_{new_{k}}})}{l_{\max_k}(A_{k}, B_{k}, \phi_{x_{k}}, \phi_{y_{k}})}$$
(4.22)

となる, $\delta_k = \phi_{x,k} - \phi_{y,k}$ を探索する.

直交方向の応答スペクトルおよび2方向応答スペクトル の適合度が目標を満たすまで、ステップ2を繰り返し、 最終的に直交するもう1つの水平方向の入力地震動を設 定することが出来る.

5. 水平2方向の入力地震動の作成例

鉄道標準¹²の地表面設計地震動の応答スペクトル(地 盤種別:Gl)加速度応答スペクトルのL2地震動スペク トルIIを例にとり、2方向応答スペクトルに適合する地 震動の作成例を図5.1~図5.9に示す.ここでは、基本 となる応答スペクトルと直交方向の応答スペクトルとの 比αを0.65、基本となる応答スペクトルと2方向応答ス ペクトルとの比βを1.10とした.

なお、スペクトルの適合範囲は表 5.1 に示される範囲 とし、その他の固有周期帯における位相差は乱数で与え た.なお、スペクトルの適合条件は、式(5.1)に示す SI 値 の比率および式(5.2)に示す応答スペクトル比の最小値と した、ステップ1終了時では、応答スペクトル比の最小 値が満足しておらず、ステップ2を繰り返したのち、ス ペクトルの適合条件を満たす結果となった. また,提案した手法を用いて作成した2方向地震動の 組合せに, CP 分析を実施したところ, $P_{E}(t)$ の合成加速 度による重み付き平均は, 0.267 となった. この値は観 測記録の分析結果と近い値となり,作成した水平2方向 地震動の組合せは,概ね,平均的な水平2方向の震動特 性を有していると考えられる.

$$SI 値 の比率 = \frac{\int_{0.1}^{2.5} S_{a_calcu}(T) dT}{\int_{0.1}^{2.5} S_{a_calcu}(T) dT} \ge 1.00$$
(5.1)

$$\varepsilon(T) = \frac{S_{a_calcu}(T)}{S_{a_taget}(T)}, \qquad \min(\varepsilon(T)) \ge 0.85$$
(5.2)



図 5.1 スペクトルII(G1)の加速度時刻歴波形

表 5.1 スペクトル II (G1)の弾性加速度応答スペクトル

周期 T(s)	応答加速度(gal)
$0.1 \leq T \leq 0.5$	2200
$0.5 < T \le 2.0$	$1000 \times T^{1.137}$



図 5.2 スペクトルII(G1)の弾性加速度応答スペクトル





凶 5.9 口风加速度于_EF

6. 結論

本研究は、土木構造物の耐震設計や耐震性能照査にお いて、水平2方向同時入力による動的解析を行う場合に、 必要となる水平2方向入力地震動の合理的な設定方法に ついて検討した.

複数の観測記録を用いた分析結果により以下の知見が 得られた

- 主軸方向と主軸直交方向の加速度応答スペクトル比の平均値αは、海溝型地震、内陸直下型地震に依らず、0.6~0.7程度の値となった。
- 主軸方向と主軸直交方向の、2方向応答倍率の平均 値はβは、海溝型地震、内陸直下型地震に依らず、 1.05~1.10程度の値となった.
- 3) CP解析をした結果,合成加速度を重みとする楕円 偏極指標P_E(*t*)は海溝型地震,内陸直下型地震に依ら ず0.3付近の値をとる結果となった.

これらの分析結果により,設計・照査用の水平1方向 の応答スペクトルが与えらえれた場合に,α,βを任意 の組合せで水平2方向入力地震動組合せを作成すること が出来るリサージュ図形(楕円)に基づく提案手法を用 いることで,直交方向応答スペクトルと2方向応答スペ クトルに適合した水平2方向の入力地震動を設定するこ とができた.

今後は、分析に用いた強震動の観測記録について断層 分類や観測位置と断層の走向の関係性などを調べ、2方 向特性や軌跡の特性をより詳細に整理する予定である.

謝辞:本研究に用いた地震観測記録は国立研究開発法人 防災科学技術研究所のK-NETおよびKiK-netと、気象庁が 公開されているものを使用させていただきました.

また、本研究の遂行にあたり、貴重なご意見をいただ きました大成建設株式会社技術センターの内山泰生氏と 山本優氏に感謝の意を表します.

参考文献

- 中谷隆生,五十嵐晃,古川愛子,上田卓司,和田吉憲, 松田哲夫,松田宏,宇野裕惠:免制震すべりシステム,2 方向同時入力よる耐震性の評価,土木学会第66回年次学 術講演会講演概要集,No.I-343,2011
- 井上和真,渡辺和明:水平2方向入力による大深度地中構 造物の地震時挙動に関する分析,土木学会第70回年次学 術講演会講演概要集,No.1-193, 2015
- Gavin, H.P. and Dickinson, B.W.: Generation of uniformhazard earthquake ground motion, ASCE Journal of Structural Engineering, Vol.137, No.3, pp.423-432, 2011.
- Vidale, J.E : Complex polarization analysis of particle motion, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.76, No.5, pp1393-1405, October 1986.
- Igarashi, A., Gigyu, S.: Synthesis of Spectrum-compatible Bi-directional Seismic Accelerograms with Target Elliptical Component Of Polarization, *Earthquake Resistant Engineering Structures X*, *WIT Transactions on The Built Environment*, Vol.152, pp.63-72, DOI : 10.2495/ERES150051, 2015.
- 6) 五十嵐晃,井上和真,古川愛子,宇野裕惠,松田宏:標 準波-相補直交成分波の組合せによる橋梁の耐震照査用水 平2方向入力地震動,土木学会論文集A1(構造・地震工 学), Vol.68, pp.I 458-I 469, 2012.
- 7) 井上和真,五十嵐晃,古川愛子,和田吉憲,松田哲夫, 宇野裕惠,松田宏,中谷隆夫:免制震すべりシステム(II-2):標準波 - 相補直交成分波を用いた2方向同時入力の作 成,土木学会第66回年次学術講演会講演概要集,No. I-344, 2011
- 8) 日本建築学会:多次元入力地震動と構造物の応答,丸善 出版,1998
- 9) 原子力規制委員会:基準地震動及び耐震設計方針に係る 審査ガイド, 2013
- 10) 気象庁Webページ:http://www.jma.go.jp/
- A.Khaleda, R.Tremblayb, B.Massicotteb : Effectiveness of the 30%rule at predicting the elastic seismic demand on bridge columns subjected to bi-directional earthquake motions, *Engineering Structures*, Vol.33, No.8, pp.2357–2370, 2011.
- 鉄道総合技術研究所:鉄道構造物等設計標準・同解説 耐 震設計,丸善,2012
- 日本電気協会:原子力発電所耐震設計技術指針 (JEAG4601-2008),(社)日本電気協会,2008
- Jennings, P.C, G.W. Housner, and N.C. Tsai : Simulated earthquake motions, Earthquake Engineering Research Laboratory., California Institute of Technology, Pasadena, 1968.
- 15) 日本道路協会:道路橋示方書・同解説V 耐震設計編, 丸
 善, 2012

- 16) 大崎順彦:新・地震動のスペクトル解析入門,鹿島出版, 1994
- 17) 日本原子力学会:日本原子力学会標準 原子力発電所の地 震を起因とした確率論的安全評価実施基準:2007,日本原 子力学会,2007
- JCOLD: Acceleration Records on Dams and Foundations, No.2, Japan Commission on Large Dams, CD-ROM, 2002

GENERATION OF RESPONSE SPECTRUM-COMPATIBLE BI-DIRECTIONAL ACCELEROGRAMS

Kazuma INOUE, Kazuaki WATANABE, Akira IGARASHI and Akihito HATA

Generally, the seismic performance verification of the civil structure in the process of seismic design is evaluated by spectrum-compatible time histories combination of both a horizontal and vertical directions. With the advanced seismic design method, it is necessary to generate two orthogonal horizontal directions for seismic design considering three dimensional behaviors.

This paper presents a synthetic method for both uniaxial response spectrum and bi-axial response spectrum compatible accelerograms by the concept of Lissajous curve based on the characteristics of observed horizontal strong ground motions.