

設計用入力地震動研究委員会
平成3年度成果報告書

設計用入力地震動作成手法技術指針(案)

本文解説編

平成4年3月

建設省建築研究所
財団法人日本建築センター

まえがき

建築物の耐震設計理念とその手法を定めた建築基準法およびその関係法令は昭和56年に約30年ぶりに本格的に改正された。この改正は、これまでの地震被害経験、大地震時における建築物の動的挙動に関する研究的及び技術的成果を設計方法に反映したものである。この中で地震荷重を設定するとき振動特性係数や高さ方向の層せん断力係数分布など、地盤および建築物の動的性質をある程度盛り込んでいる。

一方、超高層建築物の耐震設計では、動的解析によりその耐震安全性を検討するという設計手法が行なわれている。その場合の設計用入力地震動としては特定の地震動観測波形が多く使われる。建築物の動的解析においては当該物件の設計条件（建物の動特性、敷地の地盤条件、および地震生起頻度）に適応した地震動特性の設定が重要であるが、各種の建築物に共通して適用できる入力地震動の合理的な作成手法はなく、依然として米国エルセントロ、タフトなどで観測された強震動波形が広く利用されているのが現状である。これらの特定の地震動波形のみでは、変化にとむ我が国の敷地地盤条件に対しては充分ではない。このような状況のもとで現在、設計に使用すべき地震動波形の評価・作成方法に関する適切なガイドラインを策定する必要性が叫ばれている。

地盤震動論的観点から、地震動特性予測に関する研究の現状を概観すると、地震動の発生から建設敷地までの波動伝播特性や表層地盤の増幅特性などが、地震動観測・振動実験や解析により、かなり解明されてきている。

以上のような背景のもとに、建設省建築研究所と（財）日本建築センターは、耐震設計の合理化および効率化に資するため、現時点における地震動に関する知見を集大成し、設計用入力地震動の作成手法に関する技術指針を作成することを目的として、昭和63年度より共同研究契約を結び、同センターに設計用入力地震動研究委員会（委員長：加藤勉東洋大学教授）を設置し、設計用入力地震動に関する調査検討を行ってきた。

本委員会の活動は、平成3年度末をもって終了した。最終年度成果物として平成3年度研究成果報告書に加えて、「設計用入力地震動作成手法技術指針（案）本文解説編」と「同技術指針（案）資料編」を作成した。本書はそのうちの本文解説編である。本指針（案）は、地震動および地盤震動に関する研究の現状を踏まえたものとなっているが、全ての特性を同等なレベルで定量的に評価しているものではない。液状化や地形効果の影響等、今後の検討にゆだねられている部分もあることを留意されたい。

なお、本指針案の取りまとめ作業は幹事会、作業委員会が行なった。

末筆ながら多くの御教示を頂いた設計用入力地震動研究委員会委員各位、報告書や本指針（案）の作成のための多くの検討作業を行なって頂いた作業委員会委員各位の御尽力に対して深甚なる謝意を表するものである。

設計用入力地震動研究委員会 平成3年度成果報告書
設計用入力地震動作成手法技術指針（案）

目 次

	本文ページ	解説ページ
1. 総 則	1	9
1. 1 適用範囲	1	9
1. 2 用語	1	10
1. 3 記号	1	11
2. 基本方針	2	12
3. 評価手順	2	16
4. 設計用応答スペクトル	3	18
4. 1 地震活動度係数 ξ	3	19
4. 2 水平動設計用応答スペクトル	3	22
4. 2. 1 水平動基準応答スペクトル	3	23
4. 2. 2 水平動やや長周期補正係数	4	33
4. 2. 3 水平動増幅特性係数	4	36
4. 2. 4 水平動液状化補正係数	6	44
4. 2. 5 水平動地形効果補正係数	6	48
4. 3 上下動設計用応答スペクトル	6	50
4. 3. 1 上下動基準応答スペクトル	7	51
4. 3. 2 上下動やや長周期補正係数	7	53
4. 3. 3 上下動増幅特性係数	7	53
4. 3. 4 上下動液状化補正係数	7	54
4. 3. 5 上下動地形効果補正係数	7	54
5. 設計用入力地震動時刻歴	8	55
5. 1 時刻歴波形の作成	8	55
5. 2 時刻歴波形の継続時間と包絡関数	8	59
6. 設計用入力地震動の使い方	8	63
6. 1 減衰定数に応じた設計用応答スペクトルの補正	8	63
6. 2 入力位置に応じた設計用地震動の設定	8	65
付録1 設計用応答スペクトルの算定例と設計用入力地震動時刻歴波形の作成例		67
付録2 水平動設計用応答スペクトルの作成例		69

設計用入力地震動研究委員会 平成3年度委員名簿

(敬称略、順不同、平成4年3月末日現在)

委員会

顧問	梅村 魁	評定会議議長
	志賀 敏男	東北学院大学工学部土木工学科教授
委員長	加藤 勉	東洋大学工学部建築学科教授
委員	青山 博之	東京大学工学部建築学科教授
	和泉 正哲	東北大学工学部建築学科教授
	井上 豊	大阪大学工学部建築工学科教授
	平野 道勝	東京理科大学工学部建築学科教授
	松島 豊	筑波大学構造工学系教授
	渡部 丹	清水建設(株)専務取締役
	広沢 雅也	建設省建築研究所国際地震工学部総括研究職
※	北川 良和	建設省建築研究所国際地震工学部長
※	大川 出	建設省建築研究所国際地震工学部主任研究員
※	鹿嶋 俊英	建設省建築研究所国際地震工学部研究員
※	小山 信	建設省建築研究所第三研究部研究員
	梅野捷一郎	建設省住宅局建築指導課長
	青木 仁	建設省住宅局建築指導課課長補佐
	若松 邦夫	(株)大林組技術研究所振動研究室主任研究員
※	中江新太郎	(株)奥村組筑波研究所長
※	太田外気晴	鹿島建設(株)技術研究所第二研究部専門部長
	芳賀 勇治	(株)熊谷組技術研究所建築構造研究部係長
	吉田 望	佐藤工業(株)中央技術研究所耐震・解析研究室長
※	横田 治彦	清水建設(株)技術研究所構造技術研究部主席研究員
※	河村 壮一	大成建設(株)技術本部技術研究所地震・風研究グループリーダー
	阿部 康彦	(株)竹中工務店技術研究所研究開発部門第2グループ主任研究員
	林田 敏弘	東急建設(株)技術研究所建築研究部振動研究室長
	千葉 脩	戸田建設(株)技術研究所建築技術開発室長
	増渕 孝二	飛鳥建設(株)技術本部技術企画部長
	阿世賀 宏	西松建設(株)技術研究所研究部構造研究課長
	永井 潔	(株)間組技術研究所研究第二部第二課長
※	平澤 光春	(株)フジタ技術研究所建築研究部長
	嶋田 三朗	前田建設工業(株)技術研究所耐震研究室長
	野路 利幸	三井建設(株)技術研究所所長代理
※	寺本 隆幸	(株)日建設計東京構造設備事務所長

※：幹事

W G

(全体WG)

主査	北川 良和	前 掲
委員	大川 出	前 掲
	鹿嶋 俊英	前 掲
	小山 信	前 掲
	若松 邦夫	前 掲
	中江新太郎	前 掲
	吉川 正昭	(株)奥村組筑波研究所技術課長
	太田外気晴	前 掲
	丹羽 正徳	鹿島建設(株)技術研究所第二研究部第四研究室主管研究員
	芳賀 勇治	前 掲
	中村 晋	佐藤工業(株)中央技術研究所土質基礎研究室研究員
	横田 治彦	前 掲
	片岡 俊一	清水建設(株)技術研究所構造技術研究部研究員
	河村 壮一	前 掲
	萩尾 堅治	大成建設(株)技術本部技術研究所地震・風研究グループ耐震チームリーダー
	天池 文男	(株)竹中工務店技術研究所研究開発部門第2グループ研究員
	小嶋 英治	東急建設(株)技術研究所建築研究部振動研究室主任研究員
	藤堂 正喜	戸田建設(株)原子力部技術課主任
	森 伸一郎	飛鳥建設(株)技術本部研究開発部主任
	阿世賀 宏	前 掲
	市川 正武	(株)間組技術研究所研究第二部第二課研究員
	平澤 光春	前 掲
	高崎 芳夫	(株)フジタ技術研究所建築研究部基礎構造グループ主任研究員
	嶋田 三朗	前 掲
	野路 利幸	前 掲
	寺本 隆幸	前 掲

(WGA)

主査	太田外気晴	前	掲	
委員	大川 出	前	掲	
	鹿嶋 俊英	前	掲	
	池浦 友則			鹿島建設(株)技術研究所第二研究部第四研究室主任研究員
	片岡 俊一	前	掲	
	小林喜久二			(株)竹中工務店技術研究所研究開発部門第2グループ研究員
	小嶋 英治	前	掲	
	西出 俊夫			(株)間組技術研究所研究第二部第二課研究員

(WGB)

主査	河村 壮一	前	掲	
委員	大川 出	前	掲	
	鹿嶋 俊英	前	掲	
	小山 信	前	掲	
	若松 邦夫	前	掲	
	石田 寛			鹿島建設(株)技術研究所第二研究部第四研究室主任研究員
	中村 晋	前	掲	
	萩尾 堅治	前	掲	
	藤堂 正喜	前	掲	
	森 伸一郎			飛鳥建設(株)技術本部研究開発部主任
	三輪 滋			飛鳥建設(株)技術本部研究開発部主任
	小林 孝至			西松建設(株)技術研究所研究部構造研究課
	市川 正武	前	掲	
	高崎 芳夫	前	掲	
	嶋田 三朗	前	掲	

(WGC)

主査	横田 治彦	前	掲	
委員	大川 出	前	掲	
	鹿嶋 俊英	前	掲	
	釜田 正毅			鹿島建設(株)小堀研究室研究員
	末富 岩雄			佐藤工業(株)中央技術研究所耐震・解析研究室
	片岡 俊一	前	掲	
	天池 文男	前	掲	
	阿世賀 宏	前	掲	
	市川 正武	前	掲	
	嶋田 三朗	前	掲	

(WGD)

主査	中江新太郎	前	掲	
委員	北川 良和	前	掲	
	大川 出	前	掲	
	野畑 有秀			(株)大林組技術研究所振動研究室
	吉川 正昭	前	掲	
	丹羽 正徳	前	掲	
	芳賀 勇治	前	掲	
	高木 政美			大成建設(株)技術本部技術研究所地震・風研究グループ 副主任研究員
	平澤 光春	前	掲	
	谷垣 正治			三井建設(株)技術研究所第4研究開発室主任研究員

(WGE)

主査	寺本 隆幸	前	掲	
委員	北川 良和	前	掲	
	鹿嶋 俊英	前	掲	
	若松 邦夫	前	掲	
	秦 雅史			(株)奥村組筑波研究所耐震研究室主任研究員
	川野 浩一			(株)熊谷組技術研究所建築構造研究部研究員
	藤堂 正喜	前	掲	
	森 伸一郎	前	掲	
	野路 利幸	前	掲	
	村上 勝英			(株)日建設計東京構造設備事務所構造部

(幹事会)

主査	北川 良和	前	掲	
委員	大川 出	前	掲	
	鹿嶋 俊英	前	掲	
	小山 信	前	掲	
	中江新太郎	前	掲	
	太田外気晴	前	掲	
	横田 治彦	前	掲	
	河村 壮一	前	掲	
	平澤 光春	前	掲	
	寺本 隆幸	前	掲	

設計用入力地震動作成手法
技術指針（案）・本文編

1. 総 則

1. 1 適用範囲

本指針は、建築物の耐震設計における動的解析のための設計用入力地震動の作成に適用する。

ただし、特別な調査、研究に基づく場合は、本指針の関連する部分の適用を除外することができる。

1. 2 用語

本指針で用いる用語は以下の定義による。

設計用入力地震動—地表面で設定する動的解析に用いる地震動の総称

設計用応答スペクトル—応答スペクトルで表現した設計用入力地震動

基準応答スペクトル—解放工学的基盤で設定した応答スペクトル

工学的基盤—せん断波速度400m/sec程度以上の地盤

解放工学的基盤—地表面に露頭した工学的基盤

設計用入力地震動時刻歴—設計用応答スペクトルを加速度時刻歴に変換した波形

やや長周期地震動—地震動に含まれる周期2秒から10秒程度の周期成分

レベル1、2—本指針2.(2)で与える地震動のレベル

液状化—飽和した砂が、地震の作用により繰り返しせん断力を受けることにより有効応力が減少しこれに伴い、剛性、強度が著しく低下し大きな変形が生じ易くなった状態

地震基盤—当該敷地付近の広い範囲にわたって存在するせん断波速度3 km/s程度以上の地層

加速度応答スペクトル—1自由度系の最大絶対加速度応答値を、周期と減衰定数をパラメータとして表したもの

擬似速度応答スペクトル—加速度応答スペクトルを固有円振動数で除した値

包絡関数—地震動の時刻歴において見られる振幅レベルの経時変化を表す関数

表層地盤—工学的基盤以浅に存在する地盤

増幅特性—表層地盤中で地震動の振幅・周期が変化する状況を示す特性

地震活動度—過去における当該地域周辺での地震発生頻度

地形効果—地盤構造の不整形性が地震動の性質に与える影響

スペクトルモーダル解析—建築物の最大地震応答値を各モードの最大応答値から略算する解析方法

加速度応答倍率—設計用入力地震動時刻歴の応答スペクトル計算時の加速度応答倍率

1. 3 記号

本指針で用いる記号は以下による。

T	: 周期 (s)
ζ	: 地震活動度係数
Z	: 地震地域係数
T_i	: 地盤の増幅特性を規定するi番目の設定周期 (s)

T_g	: 表層地盤の1次固有周期 (s)
V_c	: 表層地盤の平均せん断波速度 (m/s)
V_b	: 工学的基盤のせん断波速度 (m/s)
V_i	: 表層地盤を構成するi番目の地層のせん断波速度 (m/s)
h_i	: 表層地盤を構成するi番目の地層の層厚 (m)
ΔV	: 表層地盤のせん断波速度のばらつき (m/s)
α	: 短周期側増幅率
β	: 最大増幅率
${}_H S(T)$: 水平動設計用応答スペクトル (cm/s)
${}_H S'(T)$: 補正された水平動設計用応答スペクトル (cm/s)
${}_H B(T)$: 水平動基準応答スペクトル (cm/s)
${}_H G(T_i)$: 水平動増幅特性係数
${}_H L(T)$: 水平動やや長周期補正係数
${}_H P(T)$: 水平動液状化補正係数
${}_H I(T)$: 水平動地形効果補正係数
${}_V S(T)$: 上下動設計用応答スペクトル (cm/s)
${}_V S'(T)$: 補正された上下動設計用応答スペクトル (cm/s)
${}_V B(T)$: 上下動基準応答スペクトル (cm/s)
${}_V G(T_i)$: 上下動増幅特性係数
${}_V L(T)$: 上下動やや長周期補正係数
${}_V P(T)$: 上下動液状化補正係数
${}_V I(T)$: 上下動地形効果補正係数

2. 基本方針

設計用入力地震動は、以下に示す基本方針にしたがって定める

- (1) 設計用入力地震動は、当該敷地周辺の地震活動度、工学的基盤における地震動特性、やや長周期地震動の特性、表層地盤の増幅特性を考慮して定める。その際、必要に応じて液状化や地形の影響を考慮する。
- (2) 設計用入力地震動は、以下の2つのレベルに対して定める。
 - レベル1の地震動 ー 耐用年数中1度以上受ける可能性が大きい地震動
 - レベル2の地震動 ー 過去に受けたことのある地震動のうち最強と考えられるものおよび将来において受けることが考えられる最強の地震動
- (3) 設計用入力地震動は、水平1成分、上下成分に対して定める。
- (4) 設計用入力地震動は、地表面における設計用応答スペクトルとして以下の条件により定める。
 - ①減衰定数5%の加速度応答スペクトルあるいは擬似速度応答スペクトルとして定義する。
 - ②周期範囲は0.02～10秒とする。
- (5) 設計用入力地震動時刻歴波形は、設計用応答スペクトルに基づき作成する。

3. 設計用入力地震動作成手順

設計用入力地震動は、以下の手順により算定する。

- (1) 解放工学的基盤面での応答スペクトルの算定
- (2) 表層地盤の増幅特性の算定
- (3) 設計用応答スペクトルの算定
- (4) 必要に応じて、設計用入力地震動時刻歴波形を作成

なお、この手順に従わない場合は、個別に検討を行なうことができる。

4. 設計用応答スペクトル

設計用応答スペクトルは、地震動のレベルに応じて、水平、上下各成分毎に定めることとし、地震活動度係数、基準応答スペクトル、やや長周期補正係数、増幅特性係数により算定する。なお、液状化や特殊な地形の影響を考慮する必要がある場合には、上記に加えて、液状化補正係数、地形効果補正係数を用いて算定する。

4. 1 地震活動度係数 ζ

地震活動度係数 ζ は、地域毎の地震活動度を考慮して定める地震動強さに関わる係数である。地震活動度係数 ζ として、当面建築基準法施行例第88条で定められるZ（地震地域係数）を用いることができる。

4. 2 水平動設計用応答スペクトル ${}_H S(T)$ 、 ${}_H S'(T)$

水平動に対する設計用応答スペクトル ${}_H S(T)$ は次式により算定する。

$${}_H S(T) = \zeta \cdot {}_H B(T) \cdot {}_H L(T) \cdot {}_H G(T) \quad (4.2-1)$$

ここに、

ζ ：地震活動度係数

${}_H B(T)$ ：水平動基準応答スペクトル

${}_H L(T)$ ：水平動やや長周期補正係数

${}_H G(T_i)$ ：水平動増幅特性係数

である。

なお、砂質地盤にあって液状化の影響を考慮する必要がある場合や、特殊な地形の影響を考慮する必要がある場合には水平動に対する補正された設計用応答スペクトル ${}_H S'(T)$ を次式により算定する。

$${}_H S'(T) = {}_H S(T) \cdot {}_H P(T) \cdot {}_H I(T) \quad (4.2-2)$$

ここに、

${}_H P(T)$ ：水平動液状化補正係数

${}_H I(T)$ ：水平動地形効果補正係数

である。

ただし、解放工学的基盤面で設計用応答スペクトルを与える場合には、

$${}_H S(T) = \zeta \cdot {}_H B(T) \cdot {}_H L(T) \quad (4.2-3)$$

とする。

設計用応答スペクトル ${}_H S(T)$ および ${}_H S'(T)$ においては、加速度応答倍率は4倍を越えないものとする。

4. 2. 1 水平動基準応答スペクトル ${}_H B(T)$

水平動基準応答スペクトル ${}_H B(T)$ は、解放工学的基盤上での応答スペクトル特性で、表4.2.1-1により定める。

表4.2.1-1 水平動基準応答スペクトル ${}_H B(T)$

地震動レベル	水平動基準応答スペクトル ${}_H B(T)$ (cm/s)						
レベル1	T(s)	0.02	0.04	0.18	$\pi/6$	5	10
	${}_H B(T)$	0.637	1.273	17.2	50	50	35.4
レベル2	T(s)	0.02	0.05	0.2	$\pi/5$	10	-
	${}_H B(T)$	1.114	2.79	31.8	100	100	-

なお、各設定周期間のスペクトル値は両対数軸上での直線補間した値とする。

4. 2. 2 水平動 やや長周期補正係数 ${}_H L(T)$

水平動 やや長周期補正係数 ${}_H L(T)$ は、地域毎のやや長周期地震動の振幅特性を評価する係数で、表4.2.2-1で示す3つの地域区分に対して、補正係数を表4.2.2-2によって定める。

なお、各設定周期間の係数は両対数軸上で直線補間した値とする。

表4.2.2-1 各地域区分に入る平野、盆地など

地域1	十勝平野、青森平野、北上盆地、秋田平野、庄内平野、関東平野、新潟平野、長野盆地、佐久盆地、濃尾平野、大阪平野、熊本平野、大分平野、鹿児島市周辺
地域2	石狩平野、仙台平野、白河市周辺、富山平野、甲府盆地、駿河湾沿岸、浜松市周辺、近江盆地、奈良盆地、高知平野、延岡市周辺、宮崎平野、およびこれらの平野、盆地に規模の類する地域
地域3	上記以外の平野、盆地およびその他の周辺地域、岩盤上の地域

表4.2.2-2 やや長周期補正係数 ${}_H L(T)$

地域 \ 周期 (s)	0.02	2.0	10
地 域 1	1.0	1.0	1.0
地 域 2			0.8
地 域 3			0.6

4. 2. 3 水平動増幅特性係数 ${}_H G(T)$

水平動増幅特性係数 ${}_H G(T)$ は標準的な表層地盤の水平動の増幅特性を表す係数で、表4.2.3-1に示す表層地盤の地盤分類と地震動レベルに応じて表4.2.3-2のように定める。

表4.2.3-1 地盤分類

V_e/V_b	$\Delta V/V_e$	0.2未満	0.2以上
	0.25未満	均質型	均質型
0.25以上		均質型	不均質型

ここに、

V_b ：工学的基盤のせん断波速度で、 $V_b \geq 400\text{m/s}$ の場合は、 $V_b=400\text{m/s}$ としてよい。

V_e ：表層地盤の平均せん断波速度で (4.2.3-1) 式による。

ΔV ：表層地盤内のせん断波速度のばらつきであり (4.2.3-2) 式による。

$$V_e = \sum V_i \cdot h_i / \sum h_i \quad (4.2.3-1)$$

$$\Delta V = \sum (|V_i - V_d| \cdot h_i) / \sum h_i \quad (4.2.3-2)$$

h_i ：表層地盤を構成する各層の層厚

V_i ：表層地盤を構成する各層のせん断波速度

表4.2.3-2 水平動増幅特性係数 ${}_H G(T_i)$

地盤分類	レベル	水平動増幅特性係数 ${}_H G(T_i)$						
均質型	レベル1	T_i ${}_H G(T)$	0.5 T_g 以下 α		1.6 T_g β		5 T_g 以上 1	
	レベル2	T_i ${}_H G(T)$	0.5 T_g 以下 α		2.2 T_g β		8 T_g 以上 1	
不均質型	レベル1	T_i ${}_H G(T)$	$T_g/15$ 以下 α	0.2 T_g β	0.6 T_g 0.7 β	T_g β	1.6 T_g β	5 T_g 以上 1
	レベル2	T_i ${}_H G(T)$	$T_g/15$ 以下 α	0.2 T_g β	0.6 T_g 0.7 β	T_g β	2.2 T_g β	8 T_g 以上 1

ここに、

T_i ：増幅特性係数を規定する*i*番目の周期 (s)

T_g ：表層地盤の一次固有周期 (s) で(4.2.3-3)式による。

$$T_g = 4 \sum h_i / V_e \quad (4.2.3-3)$$

α ：表4.2.3-3に定める短周期側増幅率

β ：表4.2.3-3に定める最大増幅率

表4.2.3-3 短周期側増幅率 α 、最大増幅率 β

地盤分類	地震動レベル	短周期側増幅率 α	最大増幅率 β
均質型	レベル1	1.5 - 0.5 T_g かつ0.5以上	2.6 - 1.6(V_e/V_b)
	レベル2	1.0 - 0.4 T_g かつ0.5以上	2.4 - 1.4(V_e/V_b)
不均質型	レベル1	1.9 - 0.9 T_g かつ0.5以上	3.2 - 2.2(V_e/V_b)
	レベル2	1.6 - T_g かつ0.5以上	2.9 - 1.9(V_e/V_b)

4. 2. 4 水平動液状化補正係数 $\mu_p(T)$

水平動液状化補正係数 $\mu_p(T)$ は、地盤の液状化が水平動に与える影響を考慮するための係数で、液状化の程度に応じて定める。

4. 2. 5 水平動地形効果補正係数 $\mu_l(T)$

水平動地形効果補正係数 $\mu_l(T)$ は、地盤構造の不整形性が水平動に与える影響を考慮するための係数で、不整形の程度に応じて定める。

4. 3 上下動設計用応答スペクトル $v_s(T)$ 、 $v_s'(T)$

上下動に対する設計用応答スペクトル $v_s(T)$ は次式により算定する。

$$v_s(T) = \zeta \cdot v_b(T) \cdot v_l(T) \cdot v_g(T) \quad (4.3-1)$$

ここに、

- ζ : 地震活動度係数
- $v_b(T)$: 上下動基準応答スペクトル
- $v_l(T)$: 上下動やや長周期補正係数
- $v_g(T)$: 上下動増幅特性係数

である。

なお、砂質地盤にあって液状化の影響を考慮する必要がある場合や、特殊な地形の影響を考慮する必要がある場合には上下動に対する設計用応答スペクトル $v_s'(T)$ を次式により算定する。

$$v_s'(T) = v_s(T) \cdot v_p(T) \cdot v_l(T) \quad (4.3-2)$$

ここに、

- $v_p(T)$: 上下動液状化補正係数
- $v_l(T)$: 上下動地形効果補正係数

である。

ただし、解放工学的基盤面で設計用応答スペクトルを与える場合には、

$$v_s(T) = \zeta \cdot v_b(T) \cdot v_l(T) \quad (4.3-3)$$

とする。

設計用応答スペクトル $v_s(T)$ および $v_s'(T)$ においては、加速度応答倍率は4倍を越えないものとする。

4. 3. 1 上下動基準応答スペクトル $v_B(T)$

上下動基準応答スペクトル $v_B(T)$ は、解放工学的基盤面での上下動応答スペクトル特性で、地震動のレベルに応じて表4.3.1により定める。

表4.3.1-1 上下動基準応答スペクトル $v_B(T)$

地震動レベル	上下動基準応答スペクトル $v_B(T)$ (cm/s)							
	レベル1	T(S)	0.02	0.04	0.1	0.2	$\pi/6$	5
$v_B(T)$		0.38	1.02	4.77	9.55	25	25	17.7
レベル2	T(S)	0.02	0.04	0.1	0.2	$\pi/5$	10	-
	$v_B(T)$	0.67	1.78	7.96	15.9	50	50	-

なお、各設定周期間のスペクトル値は両対数軸上での直線補間した値とする。

4. 3. 2 上下動やや長周期補正係数 $v_L(T)$

上下動やや長周期補正係数 $v_L(T)$ は、当面水平動やや長周期補正係数 ${}_H L(T)$ の値を準用する。すなわち、

$$v_L(T) = {}_H L(T) \quad (4.3.2-1)$$

4. 3. 3 上下動増幅特性係数 $v_G(T_i)$

上下動増幅特性係数 $v_G(T_i)$ は、標準的な表層地盤の上下動の増幅特性を表す係数で地震動レベルに応じて表4.3.3-1により定める。

表4.3.3-1 上下動増幅特性係数 $v_G(T_i)$

地震動レベル	上下動増幅特性係数 $v_G(T_i)$							
	レベル1	T_i (s)	0.02	0.04	0.1	0.2	$\pi/6$	5
$v_G(T_i)$		1.2	1.5	1.5	1.5	1.0	1.0	1.0
レベル2	T_i (s)	0.02	0.04	0.1	0.2	$\pi/5$	10	-
	$v_G(T_i)$	1.2	1.5	1.5	1.5	1.0	1.0	-

4. 3. 4 上下動液状化補正係数 $v_P(T)$

上下動液状化補正係数 $v_P(T)$ は、地盤の液状化が上下動に与える影響を考慮するための係数で、液状化の程度に応じて定める。

4. 3. 5 上下動地形効果補正係数 $v_I(T)$

上下動地形効果補正係数 $v_I(T)$ は、地盤構造の不整形性が上下動に与える影響を考慮するための係数で、不整形の程度に応じて定める。

5. 設計用入力地震動時刻歴

設計用入力地震動時刻歴波形は、各レベルの地震動に対応した周期特性と振幅の経時変化を考慮して作成する。

5. 1 時刻歴波形の作成

時刻歴波形は、その周期特性が設計用応答スペクトルに適合するように作成する。

5. 2 時刻歴波形の継続時間と包絡関数

時刻歴波形の経時変化は継続時間と包絡関数で定める。

6. 設計用入力地震動の用い方

6. 1 減衰定数に応じた設計用応答スペクトルの補正

スペクトルモーダル解析法を用いた動的解析においては、各モードの減衰定数に応じて設計用応答スペクトルを補正する。

6. 2 入力位置に応じた設計用地震動の設定

動的解析において、地中での入力地震動を設定する必要がある場合には、表層地盤モデルを用いた応答解析により、入力位置に応じた設計用入力地震動を定める。

設計用入力地震動作成手法
技術指針（案）・解説編

1. 総 則

1.1 適用範囲

本指針（案）は、建築物の耐震設計における動的解析のための設計用入力地震動の作成に適用する。

ただし、特別な調査、研究に基づく場合は、本指針の関連する部分の適用を除外することができる。

解 説

本指針（案）は主として現在耐震設計において動的解析を行なう以下の建築物、すなわち、

- (1) 高さが60メートル以上の高層建築物
- (2) 高さが45～60メートルの建築物
- (3) 免震構造建築物

などを対象に、地盤震動論的立場から解放地盤面での設計用入力地震動の作成手法を示すものである。ここで示す入力地震動作成手法の考え方は、当該建築物の基本固有周期が0.1秒から8秒程度の間であれば、上記以外の建築物にも適用可能である。

1. 2 用語

本指針で用いる用語は以下の定義による。

設計用入力地震動—地表面で設定する動的解析に用いる地震動の総称

設計用応答スペクトル—応答スペクトルで表現した設計用入力地震動

基準応答スペクトル—解放工学的基盤で設定された応答スペクトル

工学的基盤—400m/sec程度以上のせん断波速度を有する地盤

解放工学的基盤—地表面に露頭した工学的基盤

設計用入力地震動時刻歴—設計用応答スペクトルを加速度時刻歴に変換した波形

やや長周期地震動—周期2秒から10秒程度の周期成分を含む地震動

レベル1、2—本指針2.(2)で与えられる地震動のレベル

液化化—飽和した砂が、地震の作用により繰り返しせん断力を受けることにより有効応力が減少しこれに伴い、剛性、強度が著しく低下し大きな変形が生じ易くなった状態

地震基盤—当該敷地付近の広い範囲にわたって存在する3km/s程度以上のせん断波速度を有する地層

加速度応答スペクトル—1自由度系の最大絶対加速度応答値を、周期と減衰定数をパラメータとして表したもの

疑似速度応答スペクトル—加速度応答スペクトルを固有円振動数で除した値

包絡関数—地震動の時刻歴において見られる振幅レベルの経時変化を表す関数

表層地盤—工学的基盤以浅に存在する地盤

増幅特性—表層地盤中で地震動の振幅・周期が変化する状況を示す特性

地震活動度—過去における当該地域周辺での地震発生頻度

地形効果—地盤構造の不整形性が地震動の性質に与える影響

スペクトルモーダル解析—建築物の最大地震応答値を各モードの最大応答値から略算する解析方法

加速度応答倍率—設計用入力地震動時刻歴の応答スペクトル計算時の加速度応答倍率

1. 3 記号

本指針で用いる記号は以下による。

T	: 周期 (s)
ζ	: 地震活動度係数
Z	: 地震地域係数
T_i	: 地盤の増幅特性を規定する <i>i</i> 番目の設定周期 (s)
T_g	: 表層地盤の1次固有周期 (s)
V_c	: 表層地盤の平均せん断波速度 (m/s)
V_b	: 工学的基盤のせん断波速度 (m/s)
V_i	: 表層地盤を構成する <i>i</i> 番目の地層のせん断波速度 (m/s)
h_i	: 表層地盤を構成する <i>i</i> 番目の地層の層厚 (m)
ΔV	: 表層地盤の層のせん断波速度のばらつき (m/s)
α	: 短周期側増幅率
β	: 最大増幅率
${}_H S(T)$: 水平動設計用応答スペクトル (cm/s)
${}_H S'(T)$: 補正された水平動設計用応答スペクトル (cm/s)
${}_H B(T)$: 水平動基準応答スペクトル (cm/s)
${}_H G(T)$: 水平動増幅特性係数
${}_H L(T)$: 水平動やや長周期補正係数
${}_H P(T)$: 水平動液状化補正係数
${}_H I(T)$: 水平動地形効果補正係数
${}_V S(T)$: 上下動設計用応答スペクトル (cm/s)
${}_V S'(T)$: 補正された上下動設計用応答スペクトル (cm/s)
${}_V B(T)$: 上下動基準応答スペクトル (cm/s)
${}_V G(T_i)$: 上下動増幅特性係数
${}_V L(T)$: 上下動やや長周期補正係数
${}_V P(T)$: 上下動液状化補正係数
${}_V I(T)$: 上下動地形効果補正係数

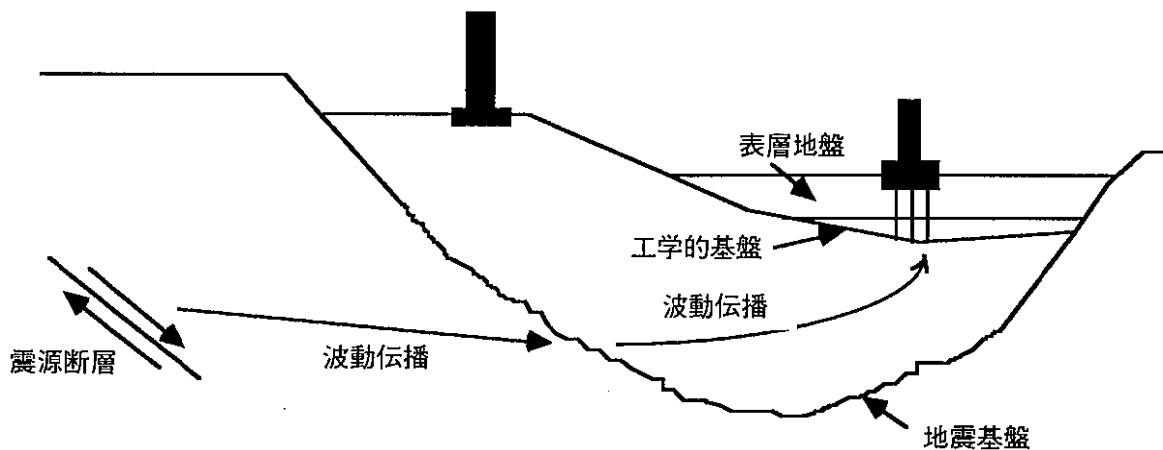
2. 基本方針

設計用入力地震動は、以下に示す基本方針にしたがって定める。

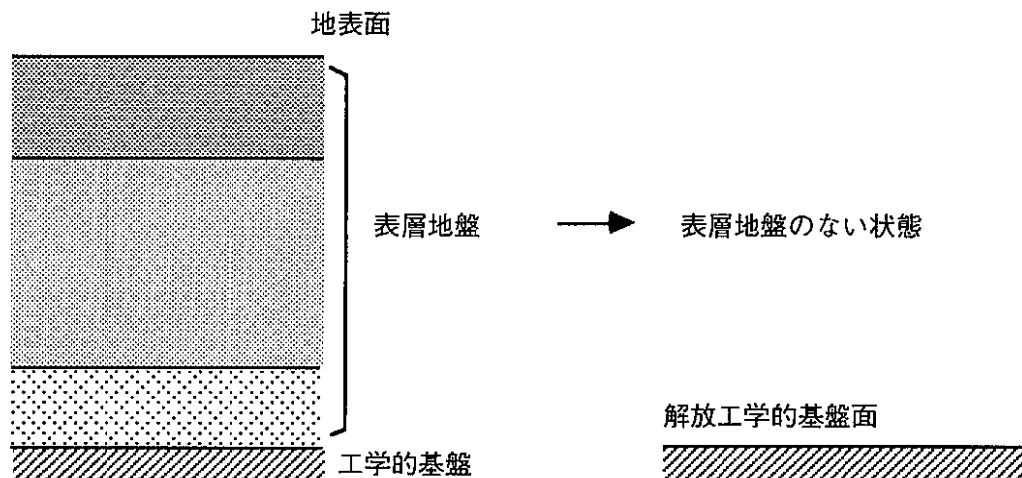
- (1) 設計用入力地震動は、当該敷地周辺の地震活動度、工学的基盤における地震動特性、やや長周期地震動の特性、表層地盤の増幅特性を考慮して定める。その際、必要に応じて液状化や地形の影響を考慮する。
- (2) 設計用入力地震動は、以下の2つのレベルに対して定める。
 - レベル1の地震動 ー 耐用年数中1度以上受ける可能性が大きい地震動
 - レベル2の地震動 ー 過去に受けたことのある地震動のうち最強と考えられるものおよび将来において受けることが考えられる最強の地震動
- (3) 設計用入力地震動は、水平1成分、上下成分に対して定める。
- (4) 設計用入力地震動は、地表面における設計用応答スペクトルとして以下の条件により定める。
 - ①減衰定数5%の加速度応答スペクトルあるいは擬似速度応答スペクトル
 - ②周期範囲は0.02～10秒
- (5) 設計用入力地震動時刻歴波形は、設計用応答スペクトルに基づき作成する。

解 説

建築物の地震応答に影響を与える地震波動伝播の概念は解図2-1のように表わされる。



解図2-1 地震波動伝播の概念



解図2-2 設計用地震動の設定

地震動の性質のうち、本指針（案）では、以下の5項目について評価し、設計用入力地震動を作成することを原則とする。

- a) 解放工学的基盤面における地震動特性
- b) 工学的基盤から地表面までの増幅特性
- c) やや長周期地震動特性
- d) 液状化の可能性
- e) 特殊な地形の影響

上記a)は、その特性を基準応答スペクトルとして与え、b)～e)はそれぞれの特性がa)の基準応答スペクトル特性に及ぼす影響度を補正係数として算定する。また地域の地震活動度についても考慮する。

工学的基盤としては、1. 2用語で記したようにせん断波速度が400m/s程度以上を有する地層を設定する。地震動を設定する基盤としては、一般的に工学的基盤あるいは地震基盤が使われている。地震基盤は通常約3km/s以上のせん断波速度を有する岩盤層で、我が国の都市部では地下深部に存在しており、その深さでの地震観測例は少ない。これに対してここで設定した工学的基盤程度の地層での地震観測は、近年実施例が多く、観測波形を活用した地震動特性に関する研究が精力的に行なわれている。

工学的基盤が地表に現われている場合を除いて、工学的基盤面上に表層地盤がある場合、解図2-2に示すように、これを取り除いた状態（以下解放工学的基盤面という）で基準地震動を定める。これは、表層地盤がある場合、工学的基盤面での地震動特性は表層地盤の特性の影響を受けるため、これを取り除くことにより各地点共通の地震動を与えることができるという考えに基づいている。

設計用地震動の2つのレベルは、基本的には（財）日本建築センター・高層建築物構造評定委員会「高層建築物の動的解析用地震動について」（ビルディングレター'86.6）の考え方に準じている。

すなわち、レベル1の地震動に対しては「建築物は損傷を受けることがなく、主要構造体は概ね弾性的な挙動で応答すること」を、レベル2の地震動に対しては、「倒壊あるいは外壁の脱落などの人命に損傷を与える可能性のある破損を生じないこと」を、それぞれ

目標にしている。レベル1、2に対応する地震動の算定については4.2.1の詳しい記述を参照されたい。

地震動には実際は水平2成分、上下1成分の合計3成分がある。ここでは、水平方向の1成分と上下動1成分についての定め方を示している。このうちの水平方向1成分は、どの方向に対しても適用することができる。また、水平2方向の成分を同時入力する場合は、各方向それぞれにここで算定された地震動（スペクトル）を適用すればよい。

本指針（案）では、設計用入力地震動の周期特性を減衰定数5%の加速度応答スペクトル、あるいはそれを固有円振動数で除した擬似速度応答スペクトル（pSv）の形で表現しているが、これは以下の理由による。

加速度応答スペクトルは、ある固有周期と減衰定数を有する1自由度系の最大絶対加速度応答である。これに質量を乗じたものは系に作用する最大慣性力であり、減衰力の影響は小さいとして無視すれば、系のばねに生じる最大せん断力となる。また、加速度応答スペクトルの値と重力加速度の比は静的水平震度に対応するものであるり、近似的にベースシア係数に等しい。このように、加速度応答スペクトルは、耐震設計上の立場からみて地震動の特性を表わすきわめて有効な指標で、従来からしばしば用いられている。

これに対して、擬似速度応答スペクトルは、加速度応答スペクトルのような明確な物理量ではないが、近似的には系の最大相対速度応答を与える。このとき周期0.1秒程度から2秒程度の範囲では近似度は良いが、その範囲外の周期帯域では誤差が大きくなる。

擬似速度応答スペクトルの有効性は、その物理的特性よりもむしろ応答スペクトルを図示する上での便利さにある。すなわち、横軸に周期を縦軸に擬似速度応答値をとり両対数軸で図示すれば解図2-3のように、加速度、擬似速度そして擬似変位（最大絶対加速度応答値を固有円振動数の2乗で除したもので、系の最大変位応答値の近似値である。）となり、3種の応答スペクトルを一つの図、いわゆるトリパートイト応答スペクトルで表わすことができる。これにより、例えば加速度応答値が、短周期領域で一定となる性質は右上がりの軸に平行になり、長周期領域で周期の逆数に比例する性質は右下がりの軸に平行な直線で表わされ、地震動の周期特性を把握しやすくなる。なお、擬似速度応答スペクトルとして最大相対変位応答値に固有円振動数を乗じたもので定義することもあるが、それと本指針（案）での定義による差は、減衰定数5%で周期0.02秒から10.0秒までの範囲で数%前後であり大差はない。したがって、そのような定義による既往研究の擬似速度応答スペクトルと、本指針のそれを比較する場合でも特に支障はない。

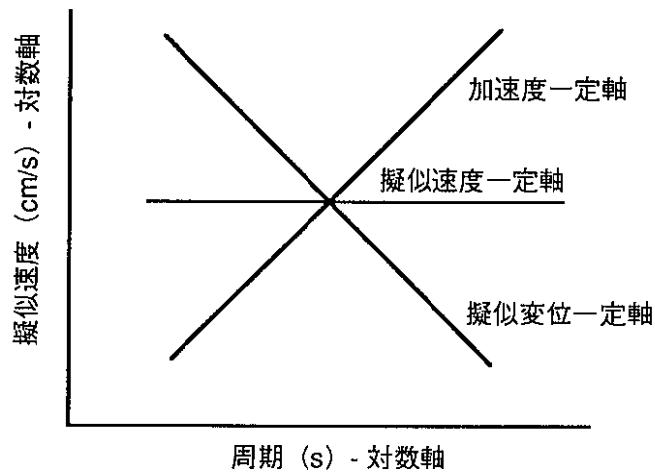
減衰定数を5%としたのは、既往の研究例と比較しやすいこと、中低層の鉄筋コンクリート建築物ではその値が慣用されていること、鉄骨造建築物が弾塑性状態の場合その程度以上の減衰値になること等の理由による。

設計用応答スペクトルの周期範囲を0.02秒から10秒で与えている。これは、加速度応答スペクトルが周期0秒で地震動の最大加速度振幅に等しくなることから、できるだけ短周期までのスペクトル値を規定することで、最大加速度を所要の値に近づけることを可能にするためである。また、応答スペクトルを周期10秒まで与えているのは、本指針（案）を、一次固有周期が8秒程度の建築物まで適用可能にするためには、8秒よりある程度長周期側のスペクトル値を必要とするためである。

動的解析において、地震動時刻歴を用いた応答解析を行なう場合には、算定した設計用応答スペクトルに適合する応答スペクトル特性を有する地震動時刻歴波形を作成する必要がある。その方法については5.1～2で述べられている。

設計では地表面以外の地震動を必要とする場合がある。例えば埋め込み直接基礎の場合

の基礎底面レベルの地震動や、杭基礎の場合の杭先端位置での入力地震動が必要になる場合である。そのような場合には、解放基盤面の応答スペクトルから作成した時刻歴波形を用い、第6章に示す考え方に基づく地震応答解析により、所要深さでの地震動を求めることができる。



解図2-3 トリパートイト応答スペクトルの概念図

3. 設計用入力地震動作成手順

設計用入力地震動の作成は、以下の手順による。

- (1) 解放工学的基盤面での応答スペクトルの算定
- (2) 表層地盤の増幅特性の算定
- (3) 設計用応答スペクトルの算定
- (4) 必要に応じて設計用入力地震動時刻歴波形を作成

なお、この手順に従わない場合は、個別に検討を行なうことができる。

解 説

地表面上の地震動を作成する方法の一般的な流れ図を解図3-1に示す。本指針（案）では具体的方法に拠らない場合も含めて6つの方法を想定している。図中(a)の太線の手順が本指針（案）を適用した場合である。これは以下に示す4つの部分に分けられる。

(1) 解放工学的基盤面での応答スペクトルの算定

解放工学的基盤面での設計用応答スペクトルを算定する。これは基準応答スペクトル $B(T)$ に当該地域の地震活動度を表す係数 ζ と、深い地下構造を考慮したやや長周期補正係数 $L(T)$ を乗じて求められる。

(2) 表層地盤の特性の算定

工学的基盤以浅の表層地盤の増幅特性係数 $G(T_i)$ を算定する。この係数は表層地盤の地層構成を考慮して算定する。また地盤が液状化の可能性がある場合は液状化補正係数 $P(T)$ を、当該地点近傍が不整形である場合は地形効果補正係数 $I(T)$ を算定する。

(3) 設計用応答スペクトルの算定

設計用応答スペクトル $S(T)$ は、(1)及び(2)の結果より算定する。スペクトルモーダル解析では、ここで得られた設計用応答スペクトルを、対象建築物の減衰定数に応じて補正して用いる。

(4) 時刻歴波形の作成

時刻歴応答解析を行なう場合、(3)で得られた設計用応答スペクトルを時刻歴波形に変換する。

これら各項目に具体的方法を次章以降に述べる。

一方、実際の地震動には様々な要因が複雑に影響しあっており、本指針（案）の具体的方法が適用できない場合や新たな知見を活用により、より合理的で信頼性の高い検討が可能な場合もある。このような場合には上記手順の各段階で、必要な項目を個別に検討することができる。以下にその手順（解図3-1の(b)～(f)）を概説する。

(b)及び(c)は基準応答スペクトルを本指針（案）に準じて与え、表層地盤の増幅特性を個別に検討する場合である。(b)は周期領域、すなわちスペクトルによる検討であり、(c)は時刻歴に変換した解放工学的基盤面の設計用地震動を用いて表層地盤の時刻歴応答解析を行なう場合である。例えば液状化が生じる地盤や地表面付近の不整形地形に対して、その影響を個別に検討する場合等である。この場合は地盤の非線形応答解析や二次元、三次元の応答解析を行なうことになる。

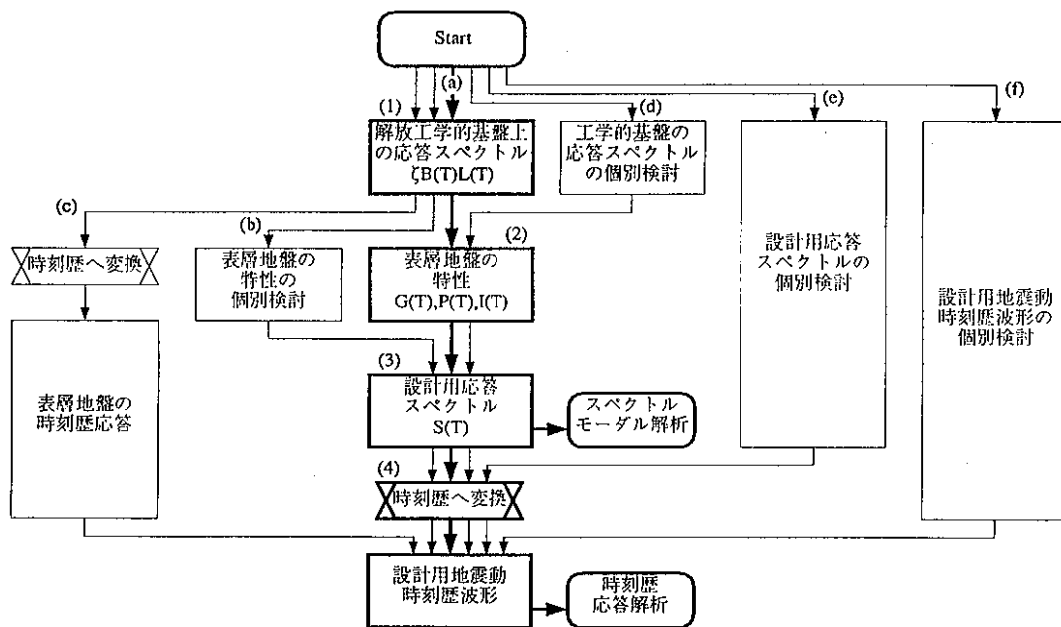
(d)の流れは基準応答スペクトルを個別に検討し、表層地盤の影響を指針により考慮するものである。指針（案）では関東での検討結果を基準として地震活動度係数とや

や長周期補正係数を介して全国に適用しているが、より対象地域に適した検討が可能な場合には、基準応答スペクトルを個別に検討することができる。個別検討の方法としては、地域的な特徴が反映されたスペクトルの回帰分析結果の利用、震源から工学的基盤までの波動伝播を理論的、あるいは半経験的な検討等がある。

(e)及び(f)は検討全体を個別に行なう場合である。(e)はスペクトル領域での検討で、時刻歴解析を行なう場合は時刻歴に変換する。建設地点近傍の観測記録を用いた回帰分析による検討等である。(f)は時間領域による検討で、直接時刻歴波形を求める。建設地点近傍で観測された強震記録を直接用いる場合や、建設地点近傍の記録を使った波形合成法、断層破壊過程から考慮した理論的検討などである。

個別的検討を行なう場合、それぞれの手法に応じた資料の蓄積が不可欠となる。また手法の特質を十分に理解して、その適用範囲や信頼性に留意する必要がある。

研究の現状から判断して、設計用入力地震動の作成手法は必ずしも一義的に定められるものでないため、本指針（案）では作成手順として一つの標準的な考え方を解図3-1に示した。



解図3-1 作成のフロー

4. 設計用応答スペクトル

設計用応答スペクトルは、2つの地震動レベルに対して、水平、上下各成分毎に定める。このとき地震活動度係数、基準応答スペクトル、やや長周期補正係数、表層地盤増幅特性係数を用いて算定する。なお、液状化や特殊な地形の影響を考慮する必要がある場合には、上記に加えて、液状化補正係数、地形効果補正係数を用いて算定する。

解 説

地震発生が断層の破壊に起因することが現在の一般的認識であり、各建設地点で想定される地震動は、震源特性、伝播経路および表層地盤の各特性により変動する。

本指針（案）では、設計用応答スペクトルをつぎの諸量により算定する。

- 1) 地震活動度係数
- 2) 基準応答スペクトル
- 3) やや長周期補正係数
- 4) 表層地盤増幅特性係数
- 5) 液状化補正係数
- 6) 地形効果補正係数

このうち1)、2)、3)は震源特性、伝播経路に関係し、4)、5)、6)は工学的基盤以浅の表層地盤の性状により定まる。

2)～6)のスペクトルと係数は、水平動、上下動それぞれに対して、さらに2つの地震動レベルに対して定められる。

1)～6)の各パラメータの解説は後の各項でのべられている。

3)から6)の各係数はいずれも周期(s)の関数である各係数は以下の2種類の方法のいずれかで設定する手法を採った。

1) 表層地盤の増幅特性係数(水平動、上下動とも)に限って、設定周期という概念を導入し、その値を設定周期のみで与え、それ以外の係数は周期の連続関数として設定する。

2) 設定周期での設計用応答スペクトルを基準応答スペクトルと各係数の積の形で算定し、その間のスペクトル値は設定周期におけるスペクトル値を両対数軸座標上で直線補間する。

このような方法を採った理由は、各係数が両対数軸上での折れ線として定められることから、各係数を周期に対する連続関数として用いると、非常に凹凸の激しいスペクトルとなることによっている。

4. 1 地震活動度係数 ζ

地震活動度係数 ζ は、地域毎の地震活動度を考慮して定める地震動強さに関わる係数である。地震活動度係数 ζ として、当面建築基準法施行例第88条で定められるZ（地震地域係数）を用いることができる。

解 説

ある地点での地震動強さは、基本的に、地震の規模（M：マグニチュード）と震源までの距離に依存する。わが国での大きな地震が発生する場所は、太平洋側など特定の地域に偏在していることもよく知られている。その結果、ある建築物の耐用年数中に、その建築物がうける地震動強さは、地域間で格差を生ずることになる。

地震活動度係数 ζ は、このような地震動強さ期待値の地域格差を考慮するために、後述する地震地体構造などの考え方を取り入れることにより導かれる係数である。

本指針（案）では、基準応答スペクトルを、主として関東地域で得られた地震動データを用いた解析結果に基づいて定めている。したがって、関東地方内のある地点を対象として設計用入力地震動を算定する場合には、 ζ は1と考えて良い。すなわち、本指針（案）においては、地震活動度係数 ζ は関東地域を標準値1とする相対的な値として与えられている。

しかし、関東以外の地域については、利用できる強震動記録などが少ない地域がほとんどであるため、本指針（案）においては、具体的に ζ の値を示していない。

最大加速度、最大速度各振幅に基づく、地震動強さの地域格差については地震動期待値の観点から近年いくつかの研究が公表されている。その結果によると、地震活動度が低い地域、または歴史地震の資料が少ない地域と、地震活動度が高くかつ歴史地震の資料が多い地域の地震動期待値を比較すると、場所によっては1：10程度の割合である。しかしながら地震動のスペクトルに基づく同様の検討は関東地域以外については、まだ十分とはいえない。

現行の耐震設計法においては、設計用地震荷重の地域格差を考慮するものとして地震地域係数Zがある。地震地域係数は解図4.1-1に示すように、0.7～1.0の範囲で与えられているが、わが国の地質学的特異性を考慮して地域間の差を期待値的検討結果よりも小さく設定している。

地震学や地質学における地震地体構造の研究によれば、同一性質の地震が発生する領域の区分図（地震地体構造図）と、各領域内で予想される最大地震規模Mmaxが示されている。これらは地震活動度係数 ζ の検討や建築物の耐震設計で想定する設計用地震規模Mdなどの設定に際して参考となる。たとえば、上記の地震地体構造図をもとに、解表4.1-1に示すように区分a～dによる最大地震規模（Mmax）の分類を用いて、わが国各地でのMmaxの区分図を描くと解図4.1-2のようになる。同図は、地震規模Mが8級の地震について地震動強さの強い影響圏を考慮して作成したものである。すなわち、M8級の地震では、その影響圏が隣接する区域でも無視できないので、等価断層半径（R）の経験式（ $R = 10^{0.5M - 2.28}$ ）を用いて、M8級の区域の境界線からそれ以下のMの区域に影響圏を広げている。

解図4.1-1で示す地震地域係数の区分図と解図4.1-2の区分図を比較すると、Z=1.0の地域はM8級地震の強い影響圏と西南日本の一部で調和していないが、それ以外のほとんどの地域で良く対応している。

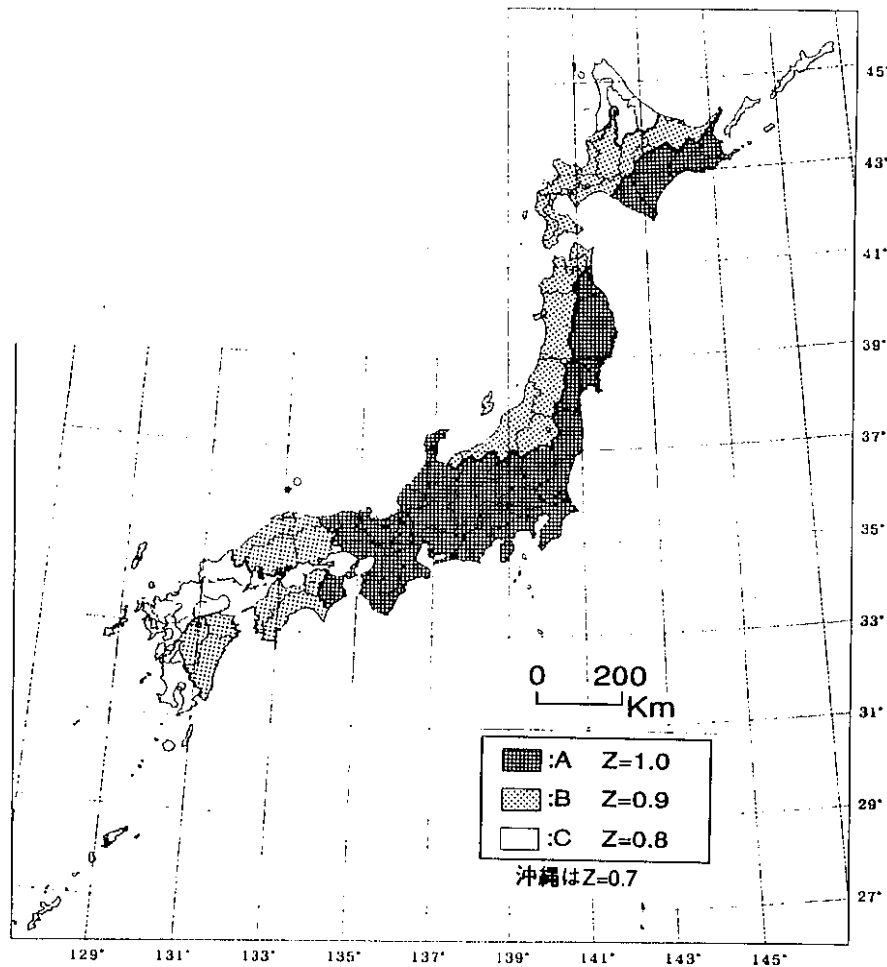
以上のような考えから、本指針（案）では地震活動度係数を、当面地震地域係数で代用してよいものとした。

解表4.1-1 Mmax の区分と記号

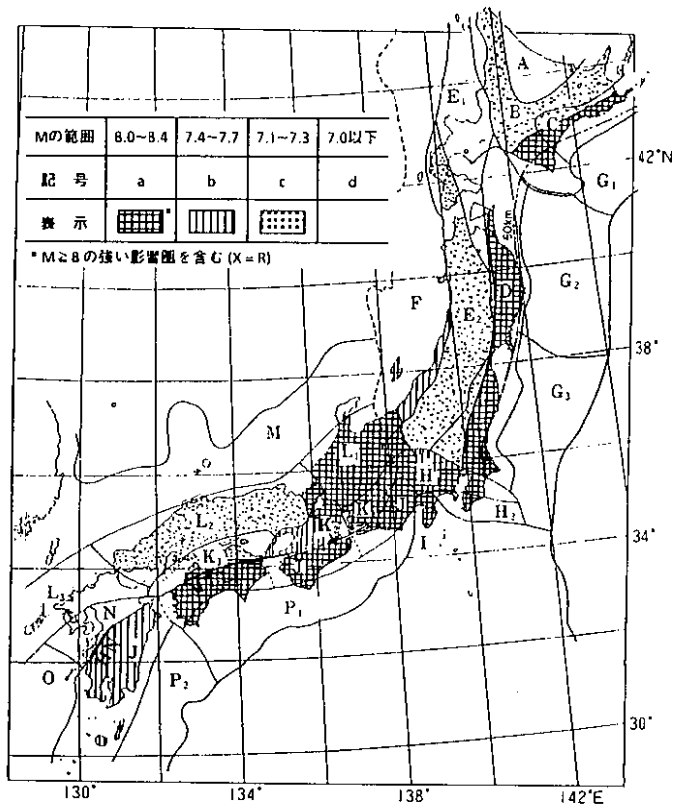
Mmaxの範囲	8.4 ~ 8.0	7.7 ~ 7.4	7.3 ~ 7.1	7.0以下
記号	a	b	c	d

(参考文献)

- 1) 萩原尊礼編：日本列島の地震、地震工学と地震地体構造，鹿島出版会，1991年1月
- 2) 大野晋、太田外氣晴、池浦友則、武村雅之：海外震源近傍記録の回帰分析による地震動スペクトル評価、第8回日本地震工学シンポジウム、pp.295-300,1990年12月
- 3) 太田外氣晴：地震と地震動の性質を考慮した新設計用地震動の考え方、その1、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.361~362、1992年8月



解図4.1-1 地震地域係数 Z の区分図



解図4.1-2 最大地震規模 (Mmax) を考慮して作成した設計用地震規模Mdの参考図

4. 2 水平動設計用応答スペクトル ${}_H S(T)$ 、 ${}_H S'(T)$

水平動に対する設計用応答スペクトル ${}_H S(T)$ は次式により算定する。

$${}_H S(T) = \zeta \cdot {}_H B(T) \cdot {}_H L(T) \cdot {}_H G(T) \quad (4.2-1)$$

ここに、

ζ : 地震活動度係数

${}_H B(T)$: 水平動基準応答スペクトル

${}_H L(T)$: 水平動やや長周期補正係数

${}_H G(T)$: 水平動増幅特性係数

である。

なお、砂質地盤にあって液状化の影響を考慮する必要がある場合や、特殊な地形の影響を考慮する必要がある場合には水平動に対する設計用応答スペクトル ${}_H S'(T)$ を次式により算定する。

$${}_H S'(T) = {}_H S(T) \cdot {}_H P(T) \cdot {}_H I(T) \quad (4.2-2)$$

ここに、

${}_H P(T)$: 水平動液状化補正係数

${}_H I(T)$: 水平動地形効果補正係数

である。

ただし、解放工学的基盤面で設計用応答スペクトルを与える場合には、式 (4.2-1) は

$${}_H S(T) = \zeta \cdot {}_H B(T) \cdot {}_H L(T) \quad (4.2-3)$$

となる。

設計用応答スペクトル ${}_H S(T)$ および ${}_H S'(T)$ において、加速度応答倍率は 4 倍を越えないものとする。

解 説

地表面における水平動設計用応答スペクトル ${}_H S(T)$ は、地震活動度係数 ζ 、工学的基盤面における水平動基準応答スペクトル ${}_H B(T)$ 、水平動やや長周期補正係数 ${}_H L(T)$ および水平動増幅特性係数 ${}_H G(T)$ の積として定められる。

水平動増幅特性係数 ${}_H G(T)$ および水平動やや長周期補正係数 ${}_H L(T)$ は離散量として設定周期とそれに対応した値によって定める。全周期範囲における水平動設計用応答スペクトル ${}_H S(T)$ は、各設定周期間を両対数軸上で直線補間することにより求める。

後述するように、本指針（案）では設計用基準スペクトル $B(T)$ 、やや長周期補正係数 $L(T)$ 、表層地盤増幅特性係数 $G(T)$ 共に、設定周期におけるスペクトル値あるいは補正係数値としてあたえる。これら 3 量のうち $B(T)$ 、 $L(T)$ の設定周期は、いずれの場合も固定されており、レベルによる差があるだけであるが、 $G(T)$ については、適用地点の地盤条件により $G(T)$ の設定周期が変動する。そのため、この 3 量ともに設定周期間を独立に直線補間して掛け合わせると、場合によってはかなり凹凸の激しい設計用スペクトルとなる可能性がある。

したがって、ここでは表層地盤増幅特性係数 $G(T)$ の解説にも記しているように、 $G(T)$ は設定周期でのみ定義される離散的な係数とみなし、設計用応答スペクトル算定の手順と

しては、以下のようになる。

- (1) $B(T)$ 、 $L(T)$ 、 $G(T)$ について $G(T)$ の設定周期における値を計算する。
- (2) 各設定周期で設計用応答スペクトル $S(T)$ を計算する。
- (3) 設定周期以外の $S(T)$ の値は、両対数軸上での直線補間で求める。
- (4) 液状化補正係数 $P(T)$ 、地形効果補正係数 $I(T)$ を適用する場合には(3)で求めた $S(T)$ にそれぞれの係数を乗ずる。

なお、水平動設計用応答スペクトル ${}_H S(T)$ および ${}_H S'(T)$ において、スペクトル上の加速度最大値の最短周期における加速度値に対する倍率を加速度応答倍率とし、この値が4倍を越えないものとする。

最短周期における最大加速度値は、水平動設計用基準スペクトル ${}_H B(T)$ の0.02秒での値に、水平動増幅特性係数 ${}_H G(T)$ の短周期側増幅率 α および地震地域係数 ξ を乗じた値となる。解放工学的基盤面で設計用応答スペクトル ${}_H S(T)$ を定める場合、 ${}_H S(T)$ の0.02秒での値が最短周期における加速度値となる。

一般に、減衰定数5%の一質点系の加速度応答倍率は平均的にみて、3倍程度の値となるが、入力地震動の周期成分が単一に近い場合には本指針(案)ではより大きな倍率となることや実地盤の非線形地震応答計算による検討結果などを考慮して4倍とした。

4. 2. 1 水平動基準応答スペクトル ${}_H B(T)$

水平動基準応答スペクトル ${}_H B(T)$ は、解放工学的基盤面での応答スペクトル特性を表わすもので、表4.2.1-1により定める。

表4.2.1-1 水平動基準応答スペクトル ${}_H B(T)$

地震動レベル	水平動基準応答スペクトル ${}_H B(T)$ (cm/s)						
	T(s)	0.02	0.04	0.18	$\pi/6$	5	10
レベル1	${}_H B(T)$	0.637	1.273	17.2	50	50	35.4
	T(s)	0.02	0.04	0.2	$\pi/5$	10	-
レベル2	${}_H B(T)$	1.114	2.79	31.8	100	100	-
	T(s)	0.02	0.04	0.2	$\pi/5$	10	-

なお、各設定周期間のスペクトル値は両対数軸上での直線補間する。

解 説

各レベルの基準応答スペクトルの値は以下の算定式を用いて計算することができる。

レベル1

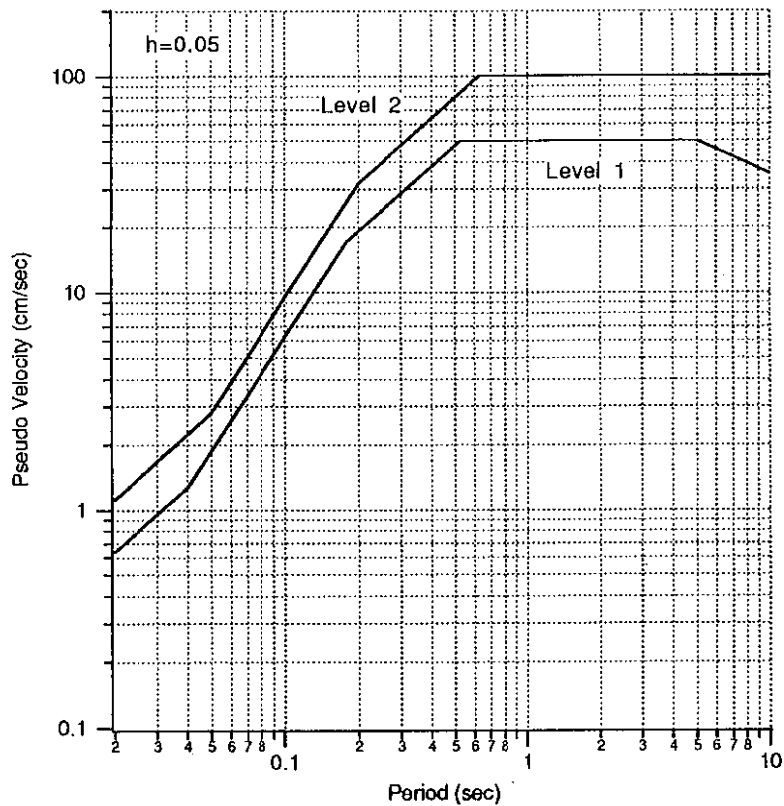
$${}_H B(T) = 200 \cdot \frac{T}{2\pi} \quad 0.02 \leq T < 0.04$$

$$\begin{aligned}
&= 200 \cdot \frac{T}{2\pi} \left(\frac{T}{0.04} \right)^{\log 3 / \log 4.5} & 0.04 \leq T < 0.18 \\
&= 600 \cdot \frac{T}{2\pi} & 0.18 \leq T < \frac{\pi}{6} \\
&= 50 & \frac{\pi}{6} \leq T < 5 \\
&= \frac{50\sqrt{5}}{\sqrt{T}} & 5 \leq T \leq 10
\end{aligned}$$

レベル2

$$\begin{aligned}
h_B(T) &= 350 \cdot \frac{T}{2\pi} & 0.02 \leq T < 0.05 \\
&= 350 \cdot \frac{T}{2\pi} \left(\frac{T}{0.05} \right)^{(1 + \log(5/7) / 2 \log 2)} & 0.05 \leq T < 0.2 \\
&= 1000 \cdot \frac{T}{2\pi} & 0.2 \leq T < \frac{\pi}{5} \\
&= 100 & \frac{\pi}{5} \leq T \leq 10
\end{aligned}$$

さらに、各レベルの設計用基準スペクトルは解図4.2.1-1のようになる。



解図4.2.1-1 水平動基準応答スペクトル

(1) 基本的考え方

本指針(案)における水平動基準応答スペクトル ${}_H B(T)$ は、次の各項目を骨子とする考え方に基づいて作成した。

- i) 地震学と地震工学を合せた思考体系のもとに地震と地震動の性質を考える。
- ii) 地震動の強さを定めることを目的として強震記録を分析する。
- iii) 設計基準類としての応答スペクトル ${}_H B(T)$ を作成する。

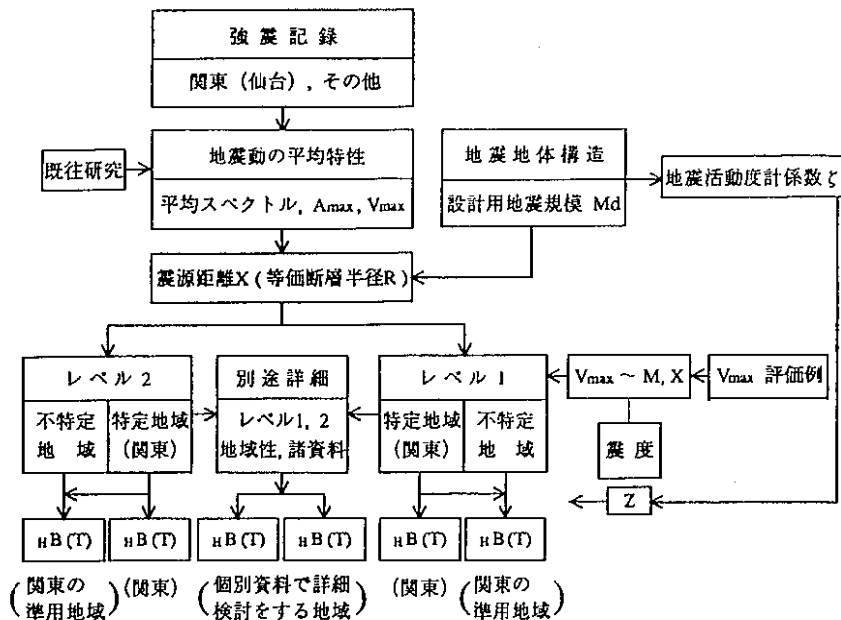
これらを実現するためには、i)とii)を通して構築された地震動強さの評価にかかわる論理性や、iii)に示す設計面から要求される明快さや便宜性が望まれる。これらに基づくレベル1、2の地震動評価のうちi)、ii)の要点は次のとおりである。

レベル2の地震動：将来起こりうる地震を決定論的な方法で考案したM、Xを用いて ${}_H B(T)$ を定める。

レベル1の地震動：確率論に基づく研究結果を参考に最大速度を設定し、その様な地震動をもたらす地震のM、Xを考えて ${}_H B(T)$ を定める。

ここに、 ${}_H B(T)$ はせん断波速度 $V_s \geq 400\text{m/s}$ の解放工学的基盤面で定められる。

解図4.2.1-2において、設計用入力地震動を決める支配的な要素として、地震規模Mと震源距離Xを考えて統一的に取り扱おう。Mは、最近の地震地体構造図における最大地震規模 $M_{\text{max}}^{1)}$ を参考に、地域毎に設計用の地震規模 M_d を決めてレベル2の地震動に用い、地震動強さを決めるための震源距離Xを考案する。Mはある程度想定し得るのでXの考案が重要となる。震源距離Xとして等価断層半径Rを採用してこれを用いる。レベル1の地震動は確率統計的に V_{max} を評価してM、Xを定める。 ${}_H B(T)$ は軟弱な表層地盤の非線形応答による不確実性の問題を避けるため、工学的基盤において作成する。以上の関係を整理して解表4.2.1-1に示す。



解図4.2.1-2 基準応答スペクトルの作成フロー

解表4.2.1-1 地震動レベルと地震諸元M、X

基本事項	レベル2		レベル1	
	地震諸元の決定		V _{max} の決定	
M, X	大M小X	中M小X	大M中X	中M中X
地震規模M	M 8級	M 7級	M 8-7.5	M 7級
距離の程度	R	R	2R	2R

長周期用：レベル2；M 8級，X=3 R程度の別途検討

レベル1；M 8級，X=4 R程度の別途検討

具体的には、国内外の強震記録の回帰分析結果により基準とするスペクトルを定め、さらに地域性を加味する。このための強震記録は、①関東の記録の擬似速度応答スペクトル(pSv)、②米国ほか海外の記録²⁾、③国内の主要記録と仙台高密度観測網の記録である。これらは資料の偏在も考慮し、各種の記録を用いた評価をする。

(2) 地震動評価法と強震記録

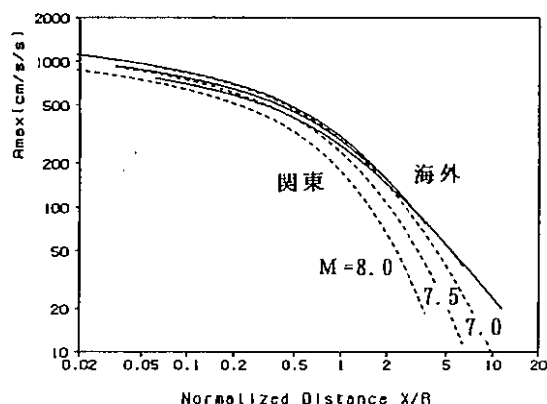
地震動評価のための回帰分析に際し、スペクトルS(T)は一般にM, X, 及び地盤条件の各項目で点震源仮定として $\log S(T)=a(T)M-b(T)\log X+c(T)$ またはこの変形として表現される。ここでは係数の物理的意味を明確にした方法³⁾により、また点震源仮定に代えて断層面の広がり考慮した、等価震源距離X_{eq}を用いて震源域で頭打ちとなる次式⁴⁾によった。

$$\log S(T)=a(T)M-\{b(T)X_{eq}+\log X_{eq}\}+c(T)$$

$$X_{eq}=R/[\ln\{1+(R/X)^2\}]^{0.5}$$

地震動強さのパターンはMが変化しても相似的な傾向にある。従って、適切な尺度の距離を用いて基準化すれば距離減衰の値はMの異なる地震でも同程度となる⁵⁾。そこで、震源域まで評価できる距離減衰式として、4.1の解説に示した等価断層半径Rによる基準化距離の $r=X/R$ を用いて検討した。

解図4.2.1-3は横軸を基準化距離rで示したA_{max}の距離減衰であり、(1)項に示した①と②のデータによっている。同図によれば、A_{max}はMの変化に関わらず、基準化によってかなり纏まる。この傾向はRの採用目的に添う結果となっている。



解図4.2.1-3 A_{max}の基準化距離減衰

ここで用いる記録は、海外記録のMが気象庁マグニチュード M_j に換算して最大7.9（表面波マグニチュード M_s 8.1）、最小6.0であるのに対して、関東の記録の M_j が7.0から5.3である。関東の記録は36地震における19地点39測点で得られた418水平成分の pSv （擬似速度応答スペクトル）であり、これらの中から伊豆半島や山梨県等の地震を除くサブダクションゾーンの24地震について回帰分析した。これらの震源距離は約50~200kmである。

そのほか、国内の強震記録として東北日本の3地震の記録、仙台高密度地震観測網の記録、及びその他の研究成果を引用した。これらの記録は観測点における表層軟弱地盤の影響を簡便法によって除去することにより、工学的基盤の入射波として扱っている。

海外の記録は米国西岸、メキシコ、及びチリの合計16地震における硬質地盤の300水平成分である。これらの記録の断層中心からの距離は5~300kmである。

(3) レベル2地震動の $\mu B(T)$

レベル2の地震動は解放工学的基盤面での水平方向の $\mu B(T)$ として求めた。ここでは始めにMとXの決定根拠、ついで強震記録の応答スペクトルを主とする分析、最後に $\mu B(T)$ の決定について述べる。

i) M, Xの検討

建築基準法における2次設計の地震力は「関東大地震級の地震動強さが最大加速度 A_{max} で約300~400 m/s^2 、震度がVI~VII…」と考えられてきた⁶⁾。M8について $X=R$ の値を求めると52.5kmとなる。この値は現在の地震工学の分野においてある程度の共通の認識といえる地震動強さの評価距離 $X=50km$ の値に近い。また、この値は歴史地震の資料に基づく確率論的な評価による、東京の工学的基盤における最大速度の200~400年期待値⁷⁾から算定される距離 $X=60~70km$ とも近い。

M7級地震は、全国各地でいつ発生しても不思議ではないといわれている。その場合の地震は、関東平野の位置するユーラシアプレート（厚さ20-50 km ⁸⁾）のプレート内地震とし、厚さの約半分の10-20 km を考慮してXを定める。この値は $X=R$ に相当する。

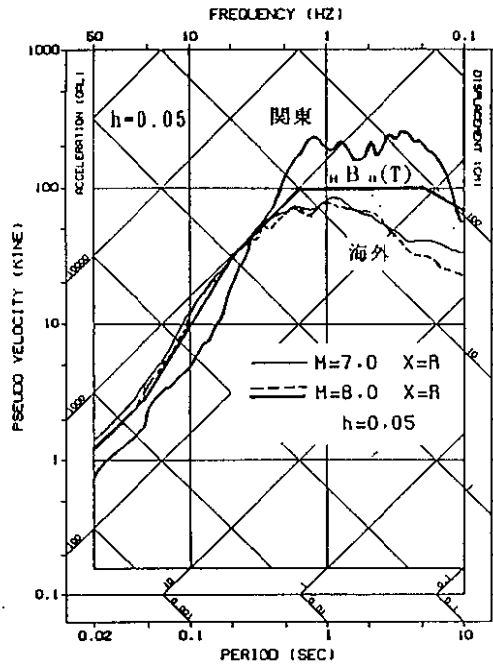
以上のことから、M8、M7の両地震について、ともに $X=R$ をとる。

ii) スペクトルの検討

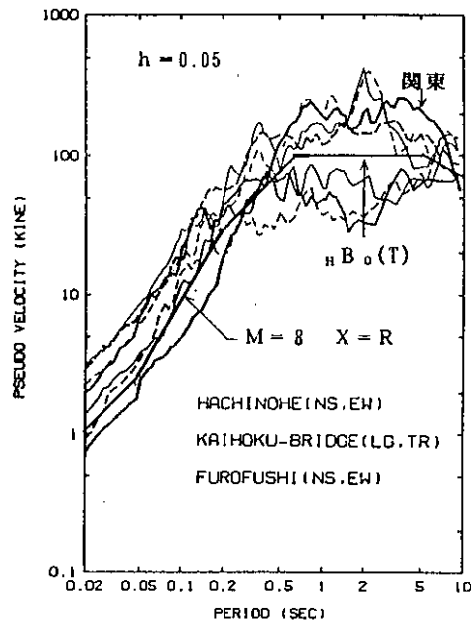
解図4.2.1-4に関東、海外の両記録の回帰分析による pSv と、解放工学的基盤面での水平方向の $\mu B(T)$ を示す。M、Xの値はM8近距離の地震が $X=R=52.5km$ 、M7近距離の地震が $X=R=16.6km$ である。M8の近距離地震は中央防災会議の「南関東のプレート境界地震は今後100年か200年先に発生する可能性が高い」という見解を念頭に置き、1923年の関東地震の再来（南関東地震と仮称する）を考えたものである。解図4.2.1-4に示した関東、海外の記録の両 pSv は、短周期側では良く対応しているが、0.3~0.4秒より長い周期領域ではかなりの差異がある。このとき関東のデータはM8の場合、完全に外挿となるが、海外データは外挿ではない。関東のデータは重心がほぼM5.8、 $X\approx 120km$ であるのに対して海外データの重心はM6.8、 $X\approx 40km$ である。このデータの差が大きく影響している可能性があることから、その他のデータも含めた検討結果によることとした。

関東の記録による回帰分析結果を基準にして、東北日本の強震記録についてM8、 $X\approx R=52.5km$ の pSv に換算した結果を解図4.2.1-5に示す。 $\mu B(T)$ の中間周期と長周期は換算した観測値の平均値に近いが、短周期は小さめで、解図4.2.1-4と同一傾向となる。

この差の原因は、地殻のQ値の地域性、関東の厚い堆積層、震源の性質の相違等から長周期成分は大きくなり、短周期成分は小さくなること、逆に海外のデータはその様な

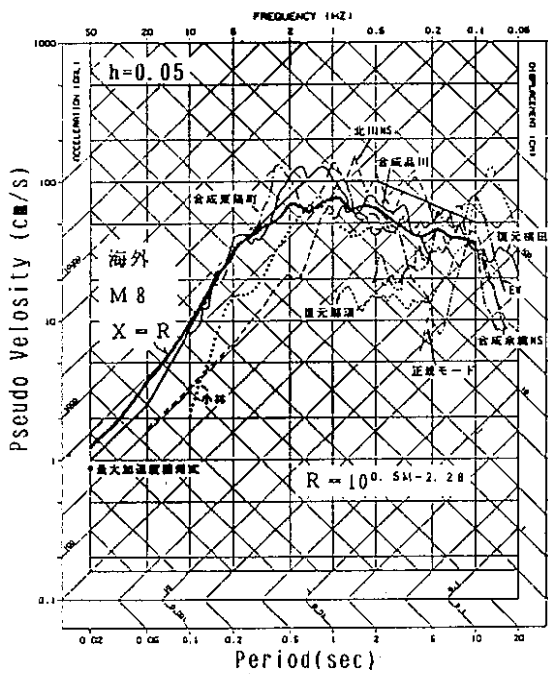


解図4.2.1-4 東京における評価pSvと
レベル2地震動の $H_B(T)$

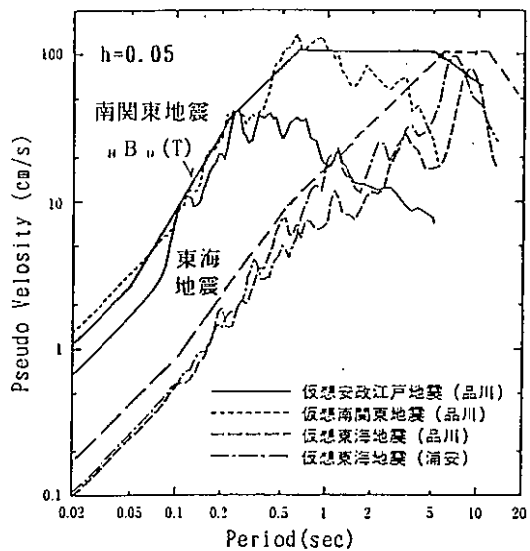


解図4.2.1-5 関東の回帰結果を活用した
既往記録のレベル2地震動の $H_B(T)$

厚い堆積層地盤における記録がないこと等によっている。また、関東のデータのM、X平面における偏在も原因している可能性があることから、その他のデータも加えて $H_B(T)$ の値を以下のように検討した。



解図4.2.1-6 臨海部で検討されたpSvと
海外記録の平均pSv



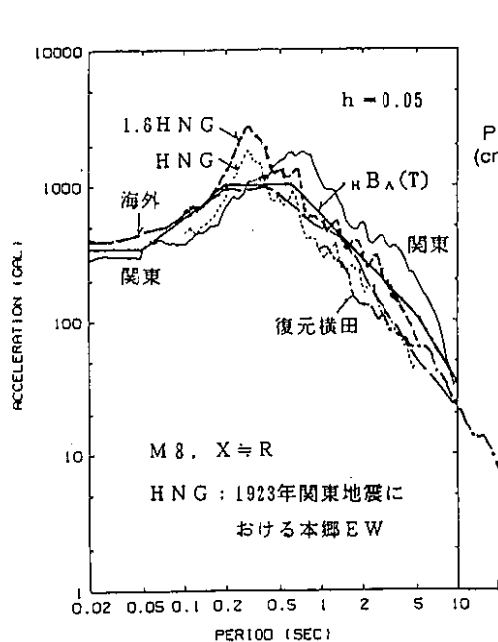
解図4.2.1-7 波形合成法による推定地震動の
pSvと $H_B(T)$ (細線は $H_B(T)$)

解図4.2.1-6は東京湾の臨海部における耐震設計用スペクトルとその裏付け資料であり⁹⁾、これに海外の記録によるM8、X=Rとした場合の平均pSvを併記した。海外の記録のpSvは臨海部の分析結果の平均的なレベルである。

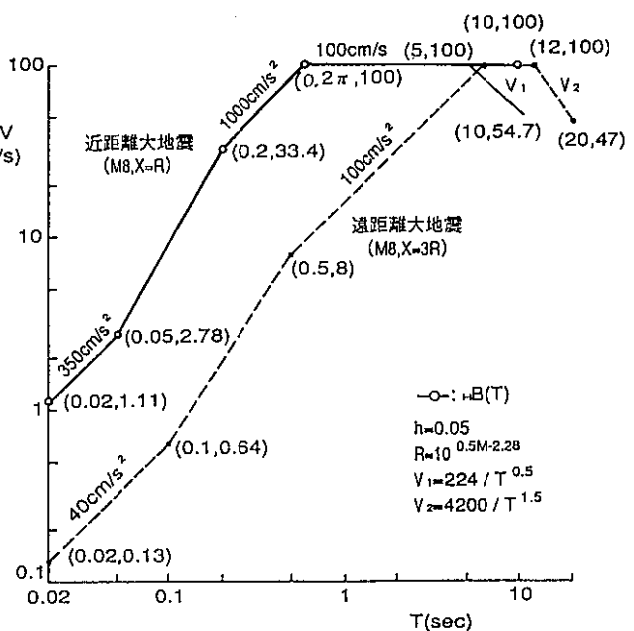
解図4.2.1-7は東京周辺において、波形合成法による南関東、安政江戸、東海の各予測地震動の例に ${}_H B(T)$ を併記したものである¹⁰⁾。ここで注目したいのは仮想東海地震による約8秒にピークをもつ成分である。この成分は伊豆半島周辺の浅い地震の際に観測されるラブ波で、Amaxは 40cm/s^2 以下という小加速度ながら、8秒のスペクトル振幅は 100cm/s に近い大きな値となる。約5秒以上の長周期成分についてまとめると、8秒前後の成分が 50cm/s 前後である2例と、約 100cm/s の2例である。よって、提案する ${}_H B(T)$ は上限をとって周期1秒弱から10秒まで 100cm/s とした。

なお、一次固有周期が5秒程度以上の建築物の場合、解図4.2.1-7の点線の様なスペクトルで、時刻歴波形もそれに相応しいものが用いられる方がよい。この周期成分はその他の観測結果や解析結果でも確認されている。この様な周期選択性の強い表面波が現れる伊豆半島周辺における地震の地震動は、個別の検討によった方がよい。

解図4.2.1-8は短周期成分の検証の意味で、1923年関東地震における本郷の強震記録の加速度応答スペクトル¹¹⁾と ${}_H B(T)$ の加速度換算値 ${}_H B_A(T)$ を比較したものである。図中海外、関東の両回帰結果も併記してある。 ${}_H B(T)$ の加速度軸の最大値は ${}_H B_A(T)$ を参考に定めた。既往の平均スペクトルによれば建築基準法同施行令I、II種地盤の基準化加速度応答スペクトルの平均値のスペクトル倍率は約2.8といった値が得られている¹²⁾。 ${}_H B(T)$ の最短周期におけるスペクトルの加速度値は、海外記録の平均値、東北日本の主要記録のpSvや、既往設計に用いられてきた値の上限に近い 350cm/s^2 程度が適当とし、これに約2.8の倍率を掛けると周期0.2~0.6秒において 1000cm/s^2 となる。こうして得られたレベル2地震動の ${}_H B(T)$ をその原案とともに図4.2.1-9に示す。



解図4.2.1-8 1923年関東地震等との加速度
応答スペクトルの比較



解図4.2.1-9 レベル2地震動用の ${}_H B(T)$

以上が現在までの各種の研究に基づくレベル2の ${}_H B(T)$ であるが、周期10秒前後の地震動特性については情報量が少ないことは確かである。ところが、ごく最近の1923年関東地震に関する武尾・金森の研究¹³⁾によれば、多種類の条件を考慮した断層モデルの解析による膨大な数のpSvのうち、主として考えられるNS、EWのpSvはピーク周期が10~13秒でスペクトル振幅の最大値は約180ないし130 cm/sec^2 で、短周期成分は漸減しており、これらはユースング地震計による記録のpSv¹⁴⁾と調和的で記録の信頼性は高いが、今村式地震計による記録のpSv¹⁵⁾の周期10秒の成分はこれらの数分の1しかないとしている。ただし、この解析は $V_s \leq 700\text{m/sec}$ の表層地盤を考慮していないので、長周期のみ参考とし、短周期は解図4.2.1-4~6によることが ${}_H B(T)$ 策定の目的達成につながる。以上のことから、 ${}_H B(T)$ の最大値を100 cm/s としたことは現段階での適切な判断と考えられる。

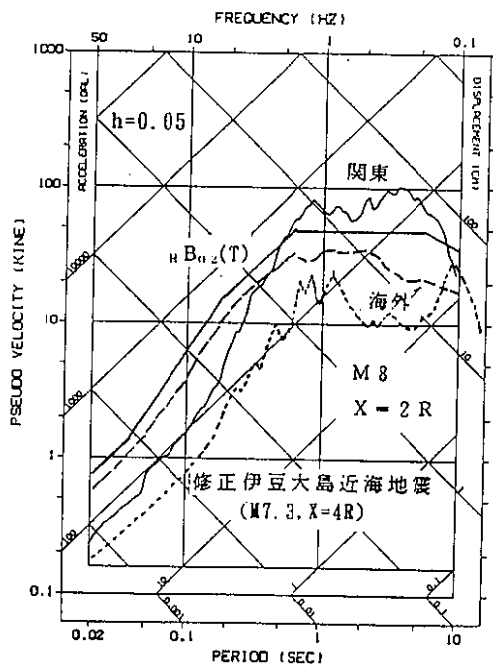
周期10秒以上のスペクトル振幅が10 cm/sec を超える問題については今後の検討が期待される。¹⁶⁾

(4) レベル1地震動の ${}_H B(T)$

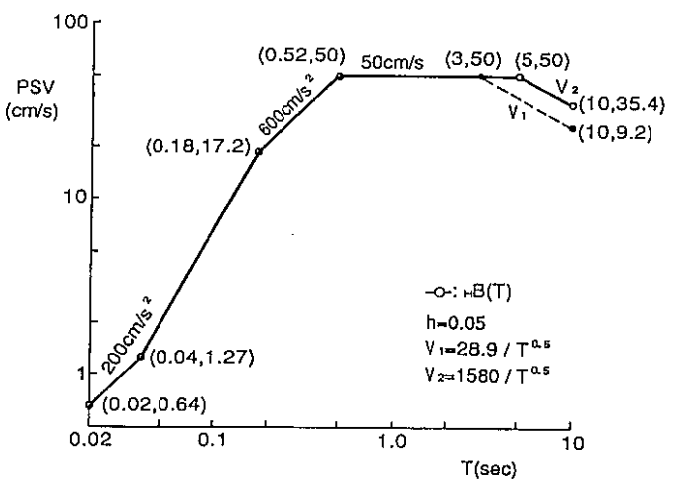
レベル1地震動は確率統計手法をもとに設定した。ここ以下に最大速度値設定の根拠、それに相応しい地震のM、X及び震度の検討、最後に ${}_H B(T)$ の決定について述べる。

i) 最大速度値の設定

確率統計的に評価された工学的基盤における最大速度値 V_{\max} は3種類の評価結果に基づいて定める。その1¹⁷⁾は東京礫層上における再現期間50年の評価値で $V_{\max} = 25\text{cm/s}$ と得られている。



解図4.2.1-10 東京におけるレベル1地震動
中近距離中地震のpSvと ${}_H B_0(T)$



解図4.2.1-11 レベル1地震動用の
 ${}_H B(T)$ 、 ${}_H B_0(T)$

その2は地震危険度解析システムERISA-Gで求めた東京の硬質地盤における評価結果で、耐用年数50年における非超過確率 $Q=0.9$ の場合、 $V_{max}=32\text{cm/s}$ である¹⁸⁾。その3は、金井式による東京の地震基盤における50年期待値⁷⁾の最大速度 6.5cm/s を用い、これに速度の増幅倍率として文献¹⁹⁾による値の最大値の2.7を乗じて求めたもので、硬質地盤では V_{max} は約 18cm/s となる。以上の結果から、ここでは中間値の 25cm/s を洪積層上部の値とした。

ii) M, Xの検討

この V_{max} に相応しい地震として中規模中距離地震と、大規模中距離地震を考える必要がある。前者は何時、どこで発生してもおかしくないと言われていたM7級のプレート内地震や、中規模のプレート境界地震を考えることになる。後者は元録地震

(M7.9~8.2)または千葉県東南沖等のM8級プレート境界地震が考えられるが、これらは切迫した地震として認識されてはいないので、当面、抽象化された地震を考え、以下の検討を進めた。確率統計的な評価を行うとなれば、震度の面からの検討がなされることが望ましい。東京の震度5以上の地震は1923年の関東地震の評価によって異なるが、1898-1984年の資料²⁰⁾より、最来年数は34~44年となる。これより、建築物の耐用年数50年の間に一度以上経験する可能性の高い地震動として、震度5をもたらす地震が適切と考えた。工学的基盤における V_{max} は50年期待値として 25cm/s を採用したので、M7ならば $A_{max}/V_{max}=8$ として $A_{max}=200\text{cm/s}^2$ となり、距離減衰の経験式によって $X\approx 2R=33.2\text{km}$ と得られ、かつ確率統計的に得られた 40km に近い⁷⁾。M8の場合の震源距離 X は、地震基盤の V_{max} から換算した工学的基盤における値が 25cm/s であるとき $X=100\sim 110\text{km}$ となる⁷⁾。この値はレベル1の地震動評価に際するM8級の地震では $X=2R$ ($=105\text{km}$)と極めて近い値である。即ちレベル1地震動を定める距離はM7, $X=2R$ が適切な値とし、また $M=8$, $X=2R$ は安全側の値とした。

iii) スペクトルの検討

前項までの諸条件に従って、大規模地震の中距離地震動と、中規模地震の中距離地震動を評価する。

解図4.2.1-10はM8, $X=2R$ の関東、海外の pSv および $_{\mu}B(T)$ を示す。この図には長周期成分がよく現れる伊豆半島の地震動記録の換算結果も参考までに示した。東京におけるレベル1地震動のうちM7, $X=2R$ の平均 pSv も求めたが、これは図4.2.1-10に包含されるので、ここでは除いた。図4.2.1-11にレベル1地震動の $_{\mu}B(T)$ を原案と共に示す。レベル1地震動の $_{\mu}B(T)$ はレベル2地震動の $_{\mu}B(T)$ に対して短周期側に移行した結果となっている。これは両者の地震諸元を考えれば妥当な傾向である。

(5) 地震動の地域性

基準応答スペクトル $_{\mu}B(T)$ は関東や東北日本及び海外の強震記録によった。関東地域以外において参考とし得る資料が不十分な場合、関東の $_{\mu}B(T)$ を準用せざるを得ない。そこで、仙台の記録や東北日本の大加速度記録と関東の記録の各平均スペクトルの対応を調べた。その結果、関東に対する仙台の平均応答スペクトル比は短周期側が3程度で、長周期側が1前後となる。また、関東に対する東北日本の主要記録のスペクトル比は短周期側が約2、長周期側が1前後となる。比較結果によると、長周期側では他の記録とは調和的である。しかしながら、短周期側では関東のデータによる結果は、他のデータによる結果よりもスペクトル値が小さい。これは、関東のデータには大きな地震規模、および比較的短い震源距離に対応するものがほとんどなく、外挿によるスペクトル値を比較していることによるためと考えられる。このようなことから、 $_{\mu}B(T)$ の決定に際しては関東以外のデータをも重視している。

(参考文献)

- 1) 萩原尊礼編：日本列島の地震、地震工学と地震地体構造、鹿島出版会、1991年1月
- 2) 日本建築学会、地震荷重—地震動の予測と建築物の応答、2.3地震動予測の方法とその結果、(3)B2法(強震記録の応答スペクトルによる方法、太田外氣晴、大野晋の担当)、pp.25-34、1992年5月
- 3) 武村雅之、太田外氣晴、稗圃成人：地震動の平均応答スペクトルを評価する経験式の物理的基礎、日本建築学会構造系論文報告集、pp.1-9、昭和62年5月
- 4) 大野晋、太田外氣晴、池浦友則、武村雅之：海外震源近傍記録の回帰分析による地震動スペクトル評価、第8回日本地震工学シンポジウム、pp.295-300、1990年12月
- 5) 太田外氣晴：地震と地震動の性質を考慮した新設計用地震動の考え方、その1 日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.361~362、1992年8月
- 6) (財)日本建築センター：改正建築基準法施行令に基づく構造計算の解説、pp.28~29、昭和55年11月。
- 7) 小嶋英治、林田敏弘：地震動期待値の観点からみた入力レベルについて、その1 その2、日本建築学会大会学術講演梗概集、1992年8月、及び設計用入力地震動研究委員会平成3年度成果報告書第3章
- 8) 石田瑞穂：関東・東海地域の地震活動とプレート構造、地質ニュース、432号 pp.18-26、1990年8月。
- 9) 丹羽正徳、渡部丹、横田治彦、田村保：東京臨海部における動的設計用入力地震動の検討、その1、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.361~362、1991年9月
- 10) 太田外氣晴、丹羽正徳、武村雅之、清田芳治、増田潔、大川潤：ウォーターフロントにおける高層建築物の新動的設計法、鹿島技術研究所年報、第39号、pp.125~132、1991年10月
- 11) 山原浩：関東地震の記録、第4回地盤振動シンポジウム、日本建築学会、pp.35~38、1976年1月
- 12) 太田外氣晴、安藤治彦：地盤種別と地震動の平均的特性、第5回地盤振動シンポジウム、日本建築学会、pp.27~34、1977年2月
- 13) 武尾実、金森博雄：1923年関東地震(M≒8)の長周期地震動、地震学会講演予稿集、1993、NO.1
- 14) 森岡敬樹：1923年関東大地震の地震動、第4回地盤振動シンポジウム、日本建築学会、pp.27-34、1977年4月
- 15) 横田治彦、片岡俊一、田中貞二、吉沢静代：1923年関東地震のやや長周期地震動、日本建築学会構造系論文報告集、第401号、pp.35-45、1989年7月
- 16) 太田外氣晴：強震記録に基づく工学的基盤の設計用地震動、日本建築学会構造系論文報告集(1993年3月投稿中)
- 17) 渡部丹：設計用入力地震動、建築研究所秋期講演特集あらか8、pp.71~84、平成2年ほか
- 18) 戸松征夫、片山恒雄：地震危険度解析のグラフィックシステムERISA-Gの開発とその機能、土木学会論文集、No.362-I、pp.397-406、1985
- 19) 翠川三郎：地震断層と地盤条件を考慮した地表面最大加速度・最大速度分布の推定、第8回地盤振動シンポジウム、日本建築学会、pp.59-64、1980年3月
- 20) 国立天文台編：理科年表、1980年版および1986年版

4.2.2 水平動やや長周期補正係数 $\mu_L(T)$

水平動やや長周期補正係数 $\mu_L(T)$ は、地域毎のやや長周期地震動の振幅特性を評価する係数で、表4.2.2-1で示す3つの地域区分に対して、補正係数を表4.2.2-2によって定める。

なお、各設定周期間の係数は両対数軸上で直線補間する。

表4.2.2-1 各地域区分に入る平野、盆地など

地域1	十勝平野、青森平野、北上盆地、秋田平野、庄内平野、関東平野、新潟平野、長野盆地、佐久盆地、濃尾平野、大阪平野、熊本平野、大分平野、鹿児島市周辺
地域2	石狩平野、仙台平野、白河市周辺、富山平野、甲府盆地、駿河湾沿岸、浜松市周辺、近江盆地、奈良盆地、高知平野、延岡市周辺、宮崎平野、およびこれらの平野、盆地に規模の類する地域
地域3	上記以外の平野、盆地およびその他の周辺地域、岩盤上の地域

表4.2.2-2 やや長周期補正係数 $\mu_L(T)$

地域 \ 周期 (s)	0.02	2.0	10
地域 1	1.0	1.0	1.0
地域 2			0.8
地域 3			0.6

解説

やや長周期補正係数の値は具体的には以下のように算定する。

すなわち、全ての地域に対して

$$\mu_L(T) = 1.0$$

$$T \leq 2$$

$2 < T \leq 10$ の場合に対して

$$\mu_L(T) = 1.0$$

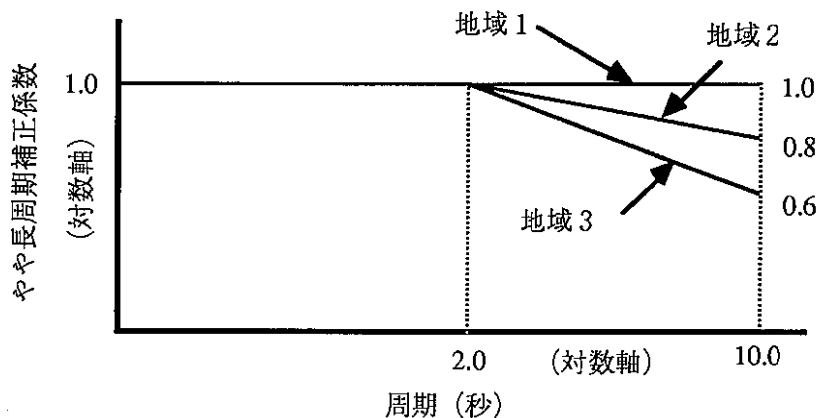
地域1に対して

$$\mu_L(T) = 10^{\{\log(0.8)/\log(5)\}\log(T/2)}$$

地域2に対して

$$\mu_L(T) = 10^{\{\log(0.6)/\log(5)\}\log(T/2)}$$

地域3に対して



解図4.2.2-1 やや長周期補正係数

水平動やや長周期補正係数 $\mu L(T)$ は平野規模の地下構造、地震基盤までの深い地下構造等に関係して生じる地域毎のやや長周期地震動の振幅特性（揺れ易さ）を評価する係数で、周期2秒から10秒の範囲で地域の揺れ易さの相異を考慮している。

水平動基準応答スペクトル $\mu B(T)$ の設定には、関東地方の地震観測記録（主に東京の記録）などを用いている。このためやや長周期領域では、関東平野の深い地下構造を反映したスペクトルの大きさを与えている。従って、個々の対象地域に対しては、この周期領域における水平動基準スペクトル $\mu B(T)$ の大きさを、対象地域の平野規模の地下構造、地震基盤までの深い地下構造等に応じて $\mu L(T)$ によって補正する。

やや長周期補正係数スペクトル $\mu L(T)$ を提案するに当たって直接的に参考となる文献は非常に少ない。その中でも、日本各地のやや長周期領域での揺れやすさを定量的に評価しようとした6研究の研究成果を用い、論文中で評価されている各地の揺れやすさの指標を具体的に抽出した。これらの個々の論文の結論ではやや長周期領域で揺れやすい地域は共通しており、平野規模の地下構造、地震基盤までの深い地下構造等に関係している。従って、これらの研究の結果を参照して平野規模の深い地下構造を反映した3地域の区分を行なった。これらの研究によれば、やや長周期領域での揺れやすさの相異は、地域によって数倍以上に及ぶことが示されている。しかし、 $\mu L(T)$ の係数の設定に当たっては地震地域係数 Z にも大きな差は与えられていないことを鑑み、周期2秒における係数を1.0とし、周期10秒における係数を1.0、0.8、0.6の3段階と設定した。周期2秒と10秒の範囲では両対数軸上で直線補間して係数を求めることとした。

表4.2.2-1および表4.2.2-2によって大規模な平野の中心部で補正係数を与えているが、平野以外の地域など厚い堆積層がない場合は地域3に区分することができる。具体的に平野、盆地、都市名などが表4.2.2-1によって与えられていない地域、建設地が大規模な平野の端部等に位置する場合などには表4.2.2-1に準じて地域区分を行うことができる。

やや長周期地震動は震源の特性、伝播経路、深い地下構造の影響などをうけている。震源の特性は $\mu B(T)$ で考慮されるべきと考えられるが、 $\mu B(T)$ を全国共通の基準応答スペクトルとして与えるとなると、地域による震源特性の影響は反映されないことになる。また、やや長周期地震動の主な成分を堆積層表面波と考えるとその振幅特性は伝播経路、深い地

下構造、震源との位置関係などの影響を受けるため、ある地域のやや長周期補正係数 $H_L(T)$ を単純にその地域の深い地下構造を反映した係数として定義すると無理が生ずる。さらに、堆積層表面波の振幅特性は、同じ平野内であっても平野中央部と端部付近ではその特性が大きく異なり、非常に複雑な現象を呈する。従って、周期数秒以上の長周期構造物を設計する場合には最新の知見を用いて十分な検討を行なう必要がある。その場合には地域によって個別の検討を行なうことが必要と考えられる。地震動の個別的検討手法については資料編を参照されたい。

(参考文献)

- 1) 岡田成幸、鏡味洋史：日本各地におけるやや長周期の地盤特性の定量評価の試み、日本建築学会論文報告集第267号、昭和53年5月、pp.29～38
- 2) 工藤一嘉、Mamula、嶋悦三：日本各地における地震動の増幅特性（周期3～15秒）、第7回日本地震工学シンポジウム（1986）、pp.199～204
- 3) 北川良和、尾崎昌凡：地震動の地域特性に関する研究（その2）やや長い周期領域（2～数秒）での地盤特性を考慮した地震動期待値、日本建築学会論文報告集第277号昭和54年3月、pp.33～43
- 4) 吉村直樹：港湾技研資料に基づく全国各地の揺れやすさの評価、設計用入力地震動研究委員会平成2年度成果報告書、pp.232～239
- 5) 勝又護：地震動振幅の地盤係数（その1）、験震時報19巻3～4号、pp.7～10、1955
- 6) 勝又護：地震動振幅の地盤係数（その2）—最大振幅について—、験震時報第30巻4号、1967、pp.1～11

4. 2. 3 水平動増幅特性係数 ${}_H G(T)$

表層地盤の水平動増幅特性係数 ${}_H G(T)$ は、標準的な表層地盤の増幅特性を表わす係数で表4.2.3-1に示す表層地盤の地盤分類と地震動レベルに応じて表4.2.3-2のように定める。

表4.2.3-1 地盤分類

$\Delta V/V_e$ / V_e/V_b	0.2未満	0.2以上
0.25未満	均質型	均質型
0.25以上	均質型	不均質型

ここに、

V_b : 工学的基盤のせん断波速度で、 $V_b \geq 400\text{m/s}$ の場合は $V_b=400\text{m/s}$ としてよい。

V_e : 表層地盤の平均せん断波速度で(4.2.3-1)式による。

ΔV : 表層地盤内のせん断波速度のばらつきであり(4.2.3-2)式による。

$$V_e = \sum V_i \cdot h_i / \sum h_i \quad (4.2.3-1)$$

$$\Delta V = \sum (|V_i - V_d| \cdot h_i) / \sum h_i \quad (4.2.3-2)$$

h_i : 表層地盤を構成する各層の層厚

V_i : 表層地盤を構成する各層のせん断波速度

表4.2.3-2 水平動増幅特性係数 ${}_H G(T_i)$

地盤分類	レベル	水平動増幅特性係数 ${}_H G(T_i)$						
		T_i ${}_H G(T)$	$0.5T_g$ 以下 α	$0.2T_g$ β	$0.6T_g$ 0.7β	T_g β	$1.6T_g$ β	$5T_g$ 以上 1
均質型	レベル1	T_i ${}_H G(T)$	$0.5T_g$ 以下 α	$1.6T_g$ β				$5T_g$ 以上 1
	レベル2	T_i ${}_H G(T)$	$0.5T_g$ 以下 α	$2.2T_g$ β				$8T_g$ 以上 1
不均質型	レベル1	T_i ${}_H G(T)$	$T_g/15$ 以下 α	$0.2T_g$ β	$0.6T_g$ 0.7β	T_g β	$1.6T_g$ β	$5T_g$ 以上 1
	レベル2	T_i ${}_H G(T)$	$T_g/15$ 以下 α	$0.2T_g$ β	$0.6T_g$ 0.7β	T_g β	$2.2T_g$ β	$8T_g$ 以上 1

ここに、

T_i : 増幅特性係数を規定する i 番目の周期 (s)

T_g : 表層地盤の一次固有周期 (s) で(4.2.3-3)式による。

$$T_g = 4 \sum h_i / V_e \quad (4.2.3-3)$$

α : 表4.2.3-3に定める短周期側増幅率

β : 表4.2.3-3に定める最大増幅率

表4.2.3-3 短周期側増幅率 α 、最大増幅率 β

地盤分類	地震動レベル	短周期側増幅率 α	最大増幅率 β
均質型	レベル1	1.5 - 0.5 T_g かつ0.5以上	2.6 - 1.6(V_s/V_b)
	レベル2	1.0 - 0.4 T_g かつ0.5以上	2.4 - 1.4(V_s/V_b)
不均質型	レベル1	1.9 - 0.9 T_g かつ0.5以上	3.2 - 2.2(V_s/V_b)
	レベル2	1.6 - T_g かつ0.5以上	2.9 - 1.9(V_s/V_b)

解 説

(1) 概要

本指針(案)では、地層がほぼ水平成層状態で、しかも過剰間隙水圧の影響が無視しうるような表層地盤を標準的な表層地盤とみなしている。そのような地盤に対する水平動増幅特性係数 $\mu G(T)$ を以下のような考え方で定めている。

- ①表層地盤の水平動増幅特性は、鉛直方向に伝播するせん断波(SH波)の重複反射により定まる。
- ②設計用入力地震動の振幅レベルでは地盤のせん断ひずみがかなり大きくなることもと考えられるため、表層地盤の非線形性を考慮する。その際、地震動のレベル(レベル1、レベル2)ごとに増幅特性を与える。
- ③地盤の分類は、地盤の振動的な性質を支配する因子に着目して行なう。
- ④水平動増幅特性係数 $\mu G(T)$ は、地表面地震動の加速度応答スペクトル(減衰定数5%)の工学的基盤面の基準地震動の加速度応答スペクトル(減衰定数5%)に対する比(増幅特性スペクトル)として定める。

水平動増幅特性係数 $\mu G(T)$ を定めるに際しては、種々の地盤調査資料から選定した複数の代表的な地盤モデルの一次元非線形地震応答計算を行ない、この結果に基づいて簡略化した形で係数を定めた。

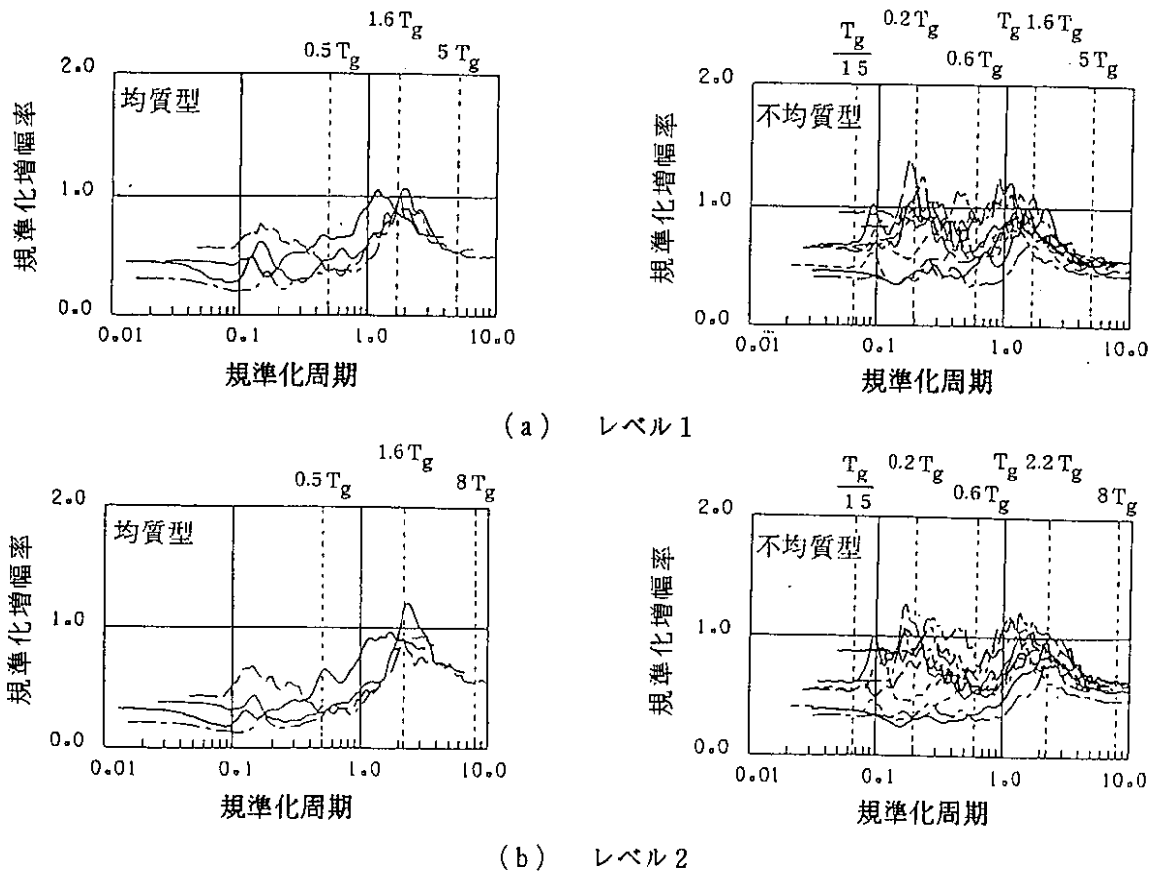
(2) 地盤分類

本指針(案)では、表層地盤の増幅特性を考えたときの地盤分類を、建築基準法同施行令で定める地盤種別分類とせず、以下に述べるように表層地盤の動的な特性を反映して2

種類に分類した。すなわち、表層地盤のせん断波速度構造が特に均質な地盤を「均質型」とし、それ以外の一般的な速度構造の地盤を「不均質型」とした。

増幅特性スペクトルを表層地盤の一次固有周期と最大増幅率で基準化すると、速度構造が均質な場合と不均質な場合とでは、解図4.2.3-1に示すように明らかにスペクトル形状が異なる。「均質型」では1次の卓越モードによる増幅が顕著で単峰型のスペクトル形状を呈するが、「不均質型」では、1次の卓越モードより単周期側にはほぼ同程度のピークが多数現われる多峰型のスペクトル形状を呈する。

なお、「不均質型」には、せん断波速度が地表面から深くなるに従い漸増する場合、中間層で突出する凸型や陥没する凹型を呈する場合等を含む。



解図4.2.3-1 地盤の分類による増幅特性スペクトルの相違

「均質型」と「不均質型」の分類は以下のように行なう。

- ①まず、対象地盤のせん断波速度構造を明らかにする。せん断波速度構造は、PS検層や弾性波探査などの原位置試験に基づいて定めることが望ましい。これらの直接的な試験が行なわれていない場合は、標準貫入試験結果のN値などとせん断波速度の関係式により算定する。関係式の一例として、後藤・太田¹⁾(1977)の式を示す。

$$V_s = 68.79 \cdot N^{0.171} \cdot H^{0.199} E \cdot F \quad (\text{解4.2.3-1})$$

ここに、

V_e : せん断波速度(m/s)

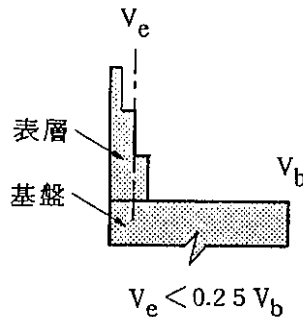
N : 標準貫入試験によるN値

H : 地表面からの深さ(m)

E : 地質時代による指標 (洪積層 : 1.303、沖積層 : 1.00)

F : 土質種別による指標 (粘土 : 1.000、細砂 : 1.086、中砂 : 1.066、粗砂 : 1.135、砂礫 : 1.153、礫 : 1.448)

- ②せん断波速度400m/s以上の地盤を工学的基盤とし、それ以浅の地盤を表層地盤とする。
- ③表層地盤の平均せん断波速度 V_e は4.2.3-1式に示すように層厚で重み付けした平均値とする。
- ④表層地盤と工学的基盤の速度構造のコントラストが強い場合、すなわち、表層地盤の平均せん断波速度 V_e と工学的基盤のせん断波速度 V_b の比 V_e/V_b が0.25未満の場合は、表層地盤内の各層のせん断波速度のばらつきにかかわらず平均せん断波速度 V_e をもつ均質型地盤とみなす。(解図4.2.3-2)

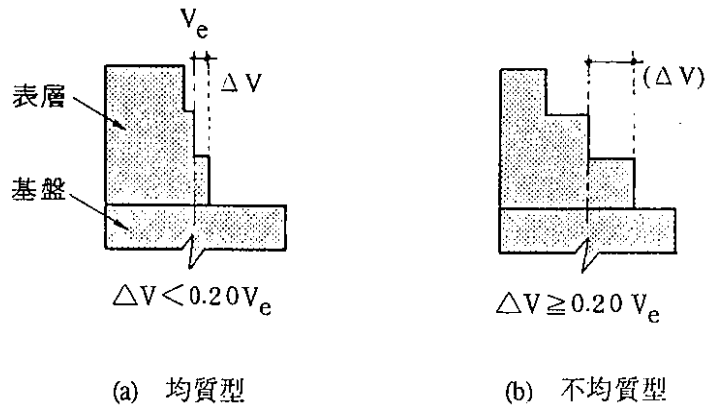


解図4.2.3-2 せん断波速度比 V_e/V_b で均質型と判定される地盤

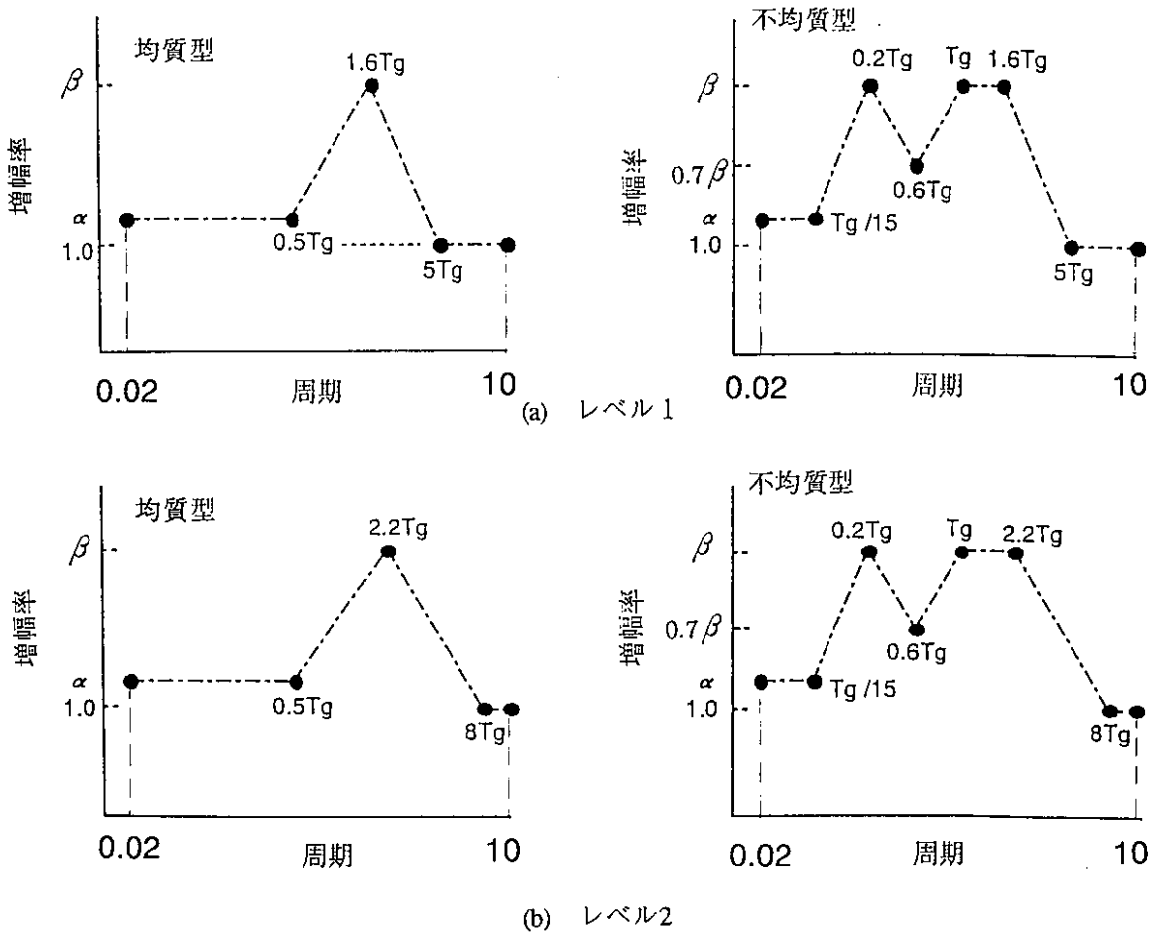
- ⑤表層地盤の平均せん断波速度 V_e と基盤のせん断波速度 V_b が近似し、 V_e/V_b が0.25以上となる場合は、表層地盤各層間のせん断波速度の差が増幅特性に大きく影響してくるため、平均せん断波速度 V_e と表層各層のせん断波速度 V_i の差を検討し、その程度によって均質型と不均質型に分けて考える。本指針(案)では、平均せん断波速度 V_e と各層のせん断波速度 V_i の差を4.2.3-2式により層厚で重みづけ平均した値 ΔV が、平均せん断波速度 V_e の20%未満の場合を均質型、それ以上の場合を不均質型とする(解図4.2.3-3)。

(3) 表層地盤増幅特性係数 $_{H}G(T)$

$_{H}G(T)$ は、地盤分類ごと、また地震動のレベルごとに、表4.2.3-2に示す設定周期 T_i に対して離散的に与える。これを図示すると解図4.2.3-4のようになる。 $_{H}G(T)$ は、解図4.2.3-1に示した代表的な地盤の増幅特性スペクトルに基づき、これらを簡略な形に表現したものである。係数の値を規定する因子は、表層地盤の一次固有周期 T_g 、短周期側増幅率 α 、最大増幅率 β である。解図4.2.3-4から明らかなように、均質型は単峰型、不均質型は多峰型である。



解図4.2.3-3 表層地盤のせん断波速度のばらつきによる地盤分類



解図4.2.3-4 表層地盤の増幅特性係数

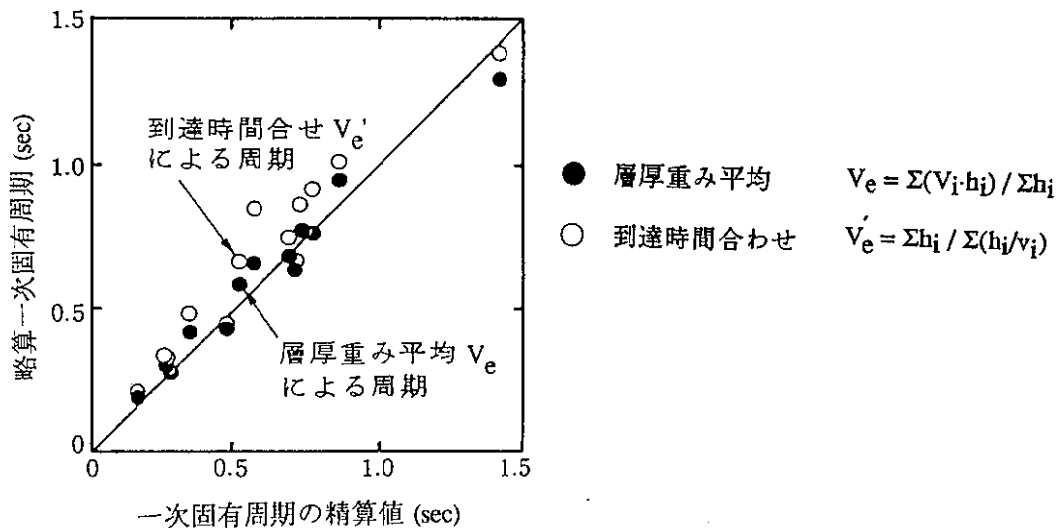
なお、係数値を離散的に与えたのは、表層地盤の増幅特性の要点を押さえてかつ計算の簡略化をはかるためである。

3.1) 表層地盤の1次固有周期 T_g および設定周期 T_1

微小ひずみ時における表層地盤の1次固有周期を T_g とする。 T_g は表層地盤の平均せん断波速度 V_e と表層地盤の厚さ Σh_i とから4.2.3-3式により定める。

なお、この方法で得られる一次固有周期と精算値は、解図4.2.3-5に示すようにほぼよく対応している。なお同図中にはせん断波の到着時間を等しくするように平均せん断波速度を定めた場合についても示している。

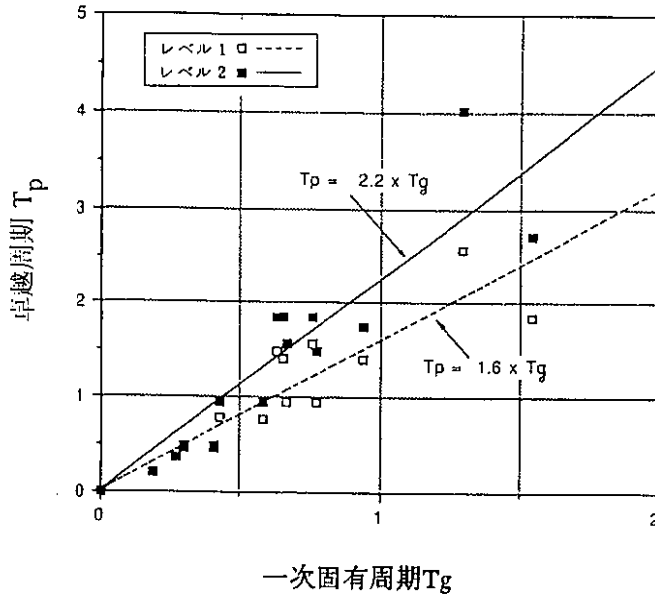
増幅特性スペクトルの卓越周期 T_p は、表層地盤の非線形性によって微小歪み時の一次固有周期 T_g より伸びる。 T_p と T_g の関係は解図4.2.3-6に示すとおりであり、 T_p は一次固有周期 T_g の1次式で近似し、これを設定周期 T_1 の一つとしている。ただし、不均質型速度構造に分類される地盤の卓越周期は均質型に比べてばらつきがあるので、 T_g と T_p の間でのばらつきを考え T_g を設定周期に加えている。さらに、不均質型地盤では高次振動モードの卓越部分を考慮して $0.2T_g$ にも設定周期を設け、かつ、1次と高次モードの間の谷の部分の設定周期は $0.6T_g$ とした。



解図4.2.3-5 一次固有周期の略算値と精算値の比較

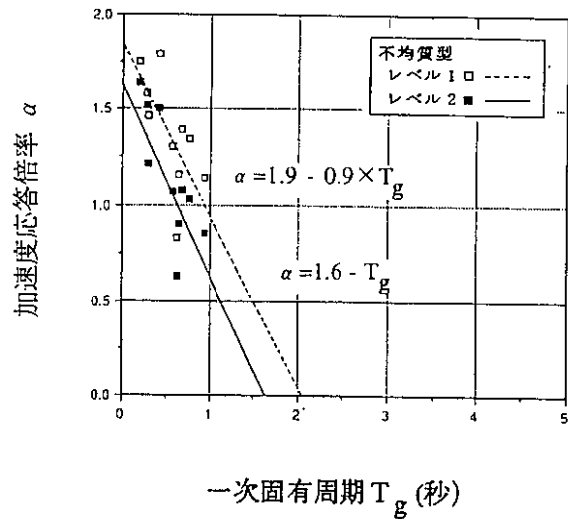
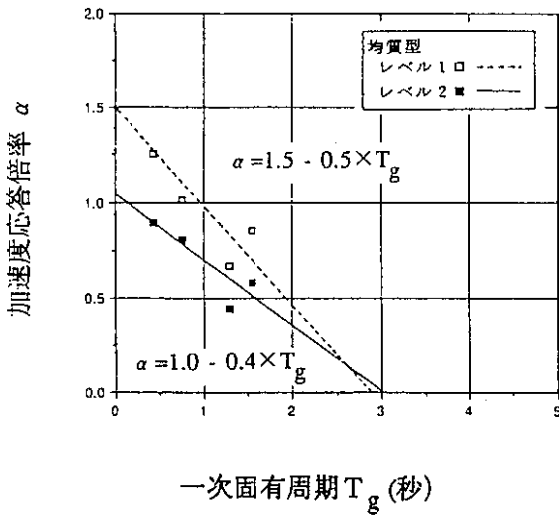
3.2) 短周期側増幅率 α

固有周期が極めて短い振動系の応答は剛体の応答に近く、その最大応答加速度は、入力加速度の最大値に近い値となる。従って、工学的基盤と地表面との地震動の応答スペクトルの比の短周期側の値は、工学的基盤では地震動と地表面での地震動の最大加速度との比、即ち、応答倍率に近い値となる。さらに、表層地盤の1次固有周期と応答倍率の関係をみると解図4.2.3-7に示すようにほぼ1次式で近似できることから、応答倍率を一次固有周期の1次式で表し、短周期側の増幅率とした。ただし検討地盤モデルの固有周期は、最も長いものでも1.5秒までにかぎられており、これより長周期の検討がなされていないこと、地盤の非線形性による応答加速度の低下が極めて著しい場合の解析結果を裏付けるような観測例が乏しいことを考慮して、本指針(案)では下限値を0.5とした。



解図4.2.3-6 卓越周期 T_p と一次固有周期 T_g の関係

なお、 T_g が極めて短く、かつ線形の場合は α は1に漸近すると考えられるが、上記の1次式では1を越えることになる。しかし、実際には非線形性により周期が伸びるため、計算例でみると少なくとも $T_g=0.2$ 程度では増幅がみられ1を上回る結果が得られていること、また、できるだけ簡略的に扱う主旨から1次式のままとした。



解図4.2.3-7 応答倍率 α と基準周期 T_g の関係

3.3) 最大増幅率 β

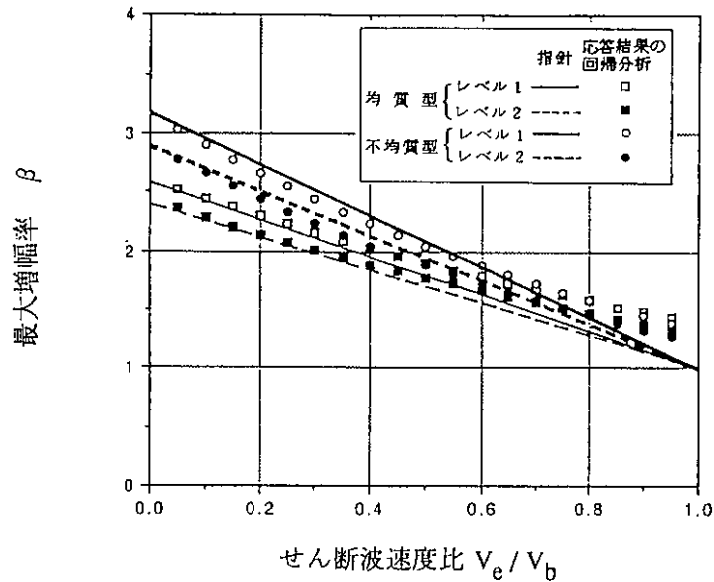
表層地盤による増幅特性係数の最大増幅率 β は、表層地盤と工学的基盤層のせん断波速度 (V_c/V_b) の比に支配されると考え、速度構造を理想化した地盤モデルの応答解析により

両者の関係を解図4.2.3-8より定めた。両者の関係はほぼ一次式で近似できる。

応答計算の結果で、 $V_e/V_b=1.0$ のところでは β が1.0となっていないのは、表層地盤の非線形性によるものであるが、表層地盤のせん断波速度が工学的基盤に等しい場合には増幅はないものとし、 $V_e/V_b=1.0$ で $\beta=1.0$ になるように近似した。

(参考文献)

- 1) 後藤典俊、太田裕：横波速度と土質工学的諸指標との関係式の構成、自然災害資料解析シンポジウム講演資料、1977



解図4.2.3-8 最大増幅率と速度比の関係

4. 2. 4 水平動液状化補正係数 $\mu P(T)$

水平動液状化補正係数 $\mu P(T)$ は、地盤の液状化の影響を考慮するための係数で、液状化の程度に応じて定める。

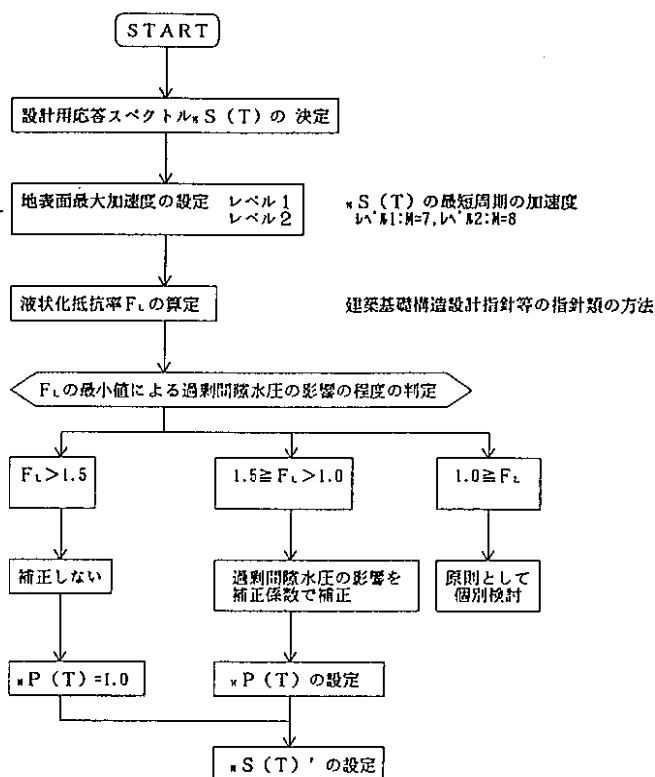
解 説

(1) 拘束圧に依存した土の非線形性

飽和した緩い砂質土層では地震時に繰返しせん断を受けると負のダイレタンシー特性により過剰間隙水圧が発生する、過剰間隙水圧が初期有効拘束圧と等しくなると有効応力がゼロとなると、緩い砂質地盤はせん断抵抗を失い完全に「液状化」する。完全液状化に至らない場合でも過剰間隙水圧が発生・蓄積することで有効応力は減少し、それによって土の強度・地盤の支持力が低下するとともに、地盤のせん断剛性も低下し、動的特性が変化する。液状化過程も含むこの一連の現象を液状化現象と呼ぶ。

このように液状化の可能性のある飽和した砂層の存在する地盤では、歪みの増大による非線形性に加えて、間隙水圧の上昇、すなわち有効拘束圧の低下による非線形性も考慮する必要がある¹⁾。

本指針(案)では、歪に依存した土の非線形性については、水平動増幅特性係数 $\mu G(T_i)$ の中に織り込んであり、拘束圧に依存した土の非線形性の影響を、水平動液状化補正係数 $\mu P(T)$ として表すこととした。



解図4.2.4-1 過剰間隙水圧の影響(液状化)の補正方法の手順

なお、ここで示す方法は、非線形有効応力解析と非線形全応力解析の結果とを比較して、表層地盤の地震動増幅特性に及ぼす過剰間隙水圧の影響を検討した結果¹⁾に基づいている。

(2) 補正の手順

地震時における砂質地盤の液状化現象は、過剰間隙水圧が増大し有効拘束圧が減少することによって起きると解釈される。液状化が、表層地盤の増幅特性に影響を与える可能性があるときは、過剰間隙水圧の影響の程度を表す水平動液状化補正係数 $\mu_P(T)$ を用いて水平動設計用応答スペクトル $\mu_S(T)$ を補正する。ただし、過剰間隙水圧の上昇・蓄積が著しく、液状化の可能性が高い場合については、原則として個別に検討する。

解図4.2.4-1に過剰間隙水圧の影響による補正の手順を示す。

解表4.2.4-1 過剰間隙水圧の影響の程度の区分

影響の程度の区分	影響の程度	F_L の最小値による判定	設計用応答スペクトルの補正
区分A	影響を無視できる	$1.5 < F_L$	補正しない
区分B	影響あり	$1.0 < F_L \leq 1.5$	補正する
区分C	液状化する	$F_L \leq 1.0$	原則として個別検討を行う

解表4.2.4-2 水平動液状化補正係数 $\mu_P(T)$ (区分Bに対して)

地震動レベル		水平動液状化補正係数 $\mu_P(T)$			
レベル1	T (s)	0.02	$1.6T_g$	$5T_g$	$8T_g$
	$\mu_P(T)$	1.0	1.0	1.2	1.0
レベル2	T (s)	0.02	$2.2T_g$	$5T_g$	$8T_g$
	$\mu_P(T)$	1.0	1.0	1.2	1.0

なお、解表4.2.4-2で示された係数の周期間における係数は両対数軸上で直線補間して求める。

(3) 過剰間隙水圧の影響の程度の判定と区分

過剰間隙水圧の影響の程度を判定する指標には、液状化の判定に広く用いられている液状化抵抗率 F_L を用いる。 F_L の算定手法は現行の設計法との整合性を考慮して建築基

基礎構造設計指針等の方法に基づくものとし、その際必要な地表面水平加速度 A_{max} は設計用応答スペクトル設計用応答スペクトル $_{\mu}S(T)$ の最短周期の値を用いる。また、マグニチュードは工学的基盤での基準応答スペクトルの設定根拠との整合性を考えてレベル1で $M=7$ 、レベル2で $M=8$ とする。

過剰間隙水圧の影響の程度は、各砂質土層の F_L の最小値により、解表4.2.4-1のように三つに区分し、それぞれに応じた取り扱いをする。

(4) 補正方法

過剰間隙水圧が増幅特性に及ぼす影響は、入力地震動のレベルが大きくなり、過剰間隙水圧が大きくなるにしたがい大きくなる。それは、地盤の剛性低下により卓越周期が長周期化し、地表面のスペクトルの短周期成分が低減し、長周期成分が増大するという形で現われる。

このような過剰間隙水圧の影響による補正については、区分A、B、Cごとに異なる対応をする。

1) 区分Aではその影響が無視できるため補正は行なわない。

2) 区分Bではその影響があらわれるが過剰間隙水圧が初期有効上載圧にまでは達せず、影響の程度は比較的小さいことから、解表4.2.4-2および解図4.2.4-3に示す液状化補正係数 $_{\mu}P(T)$ によって設計用応答スペクトル $_{\mu}S(T)$ を補正する。このとき、短周期成分の低減はそれが明瞭でない場合もあるため考慮せず、長周期成分の増大のみを表現した。この手法により補正された設計用スペクトルの例を解図4.2.4-4に示す。

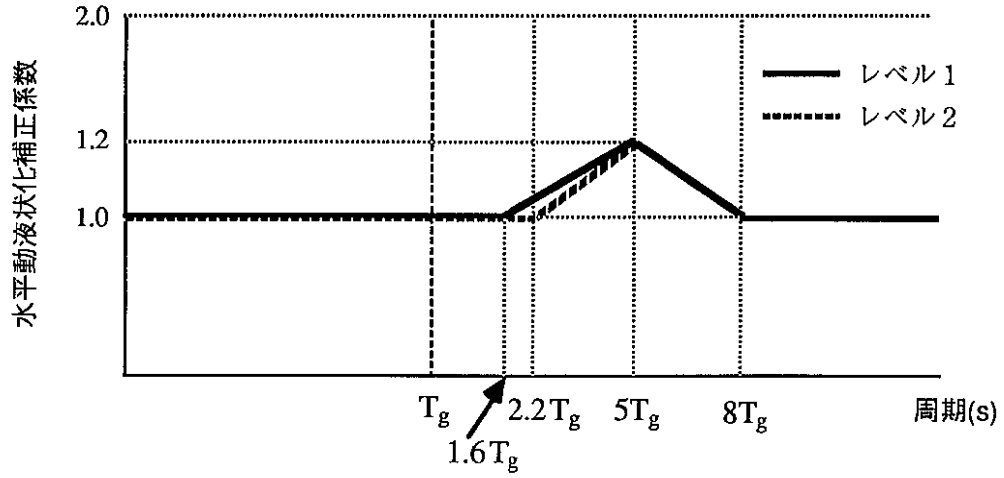
3) 区分Cでは過剰間隙水圧の上昇が大きく、液状化の可能性が高いため、過剰間隙水圧の応答への影響は、地震動特性や地盤条件により、複雑になると考えられる。この場合には、液状化時の地盤の応答特性を適切に考慮できる方法を用いて個別に検討を行うことを原則とする。

なお、この場合でも、地表面における地震動特性の大略を知るために区分Bに準じた形で解図4.2.4-5に示す区分C用の補正係数を参考として用いてもよい。

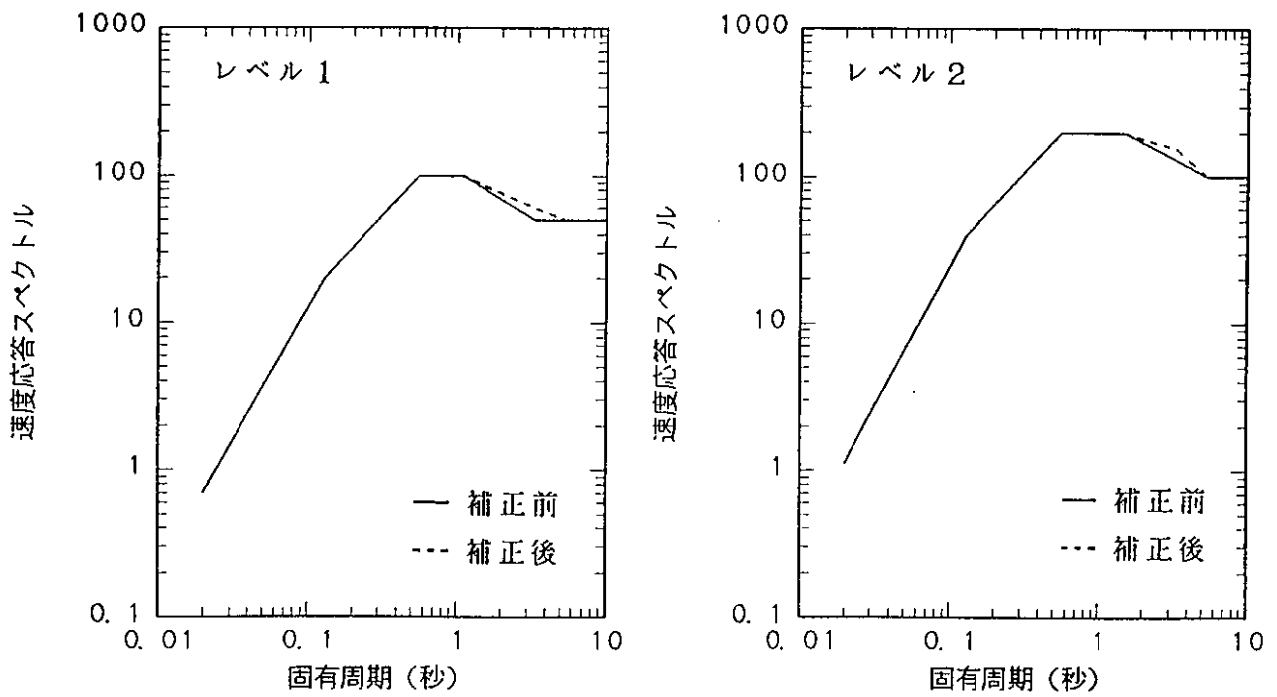
この場合の補正係数は短周期成分の低減と長周期成分の増大が考慮されている。また、スペクトルの増幅の程度は、液状化層厚によって異なるので、液状化層厚比 R_{LL} （表層地盤の全層厚に対する液状化層厚の比）によって補正係数を区別している。 $R_{LL} \geq 1/2$ の場合には、液状化の影響が大きいため、補正係数の適用範囲外とする。

(5) 設計における液状化に対する留意事項

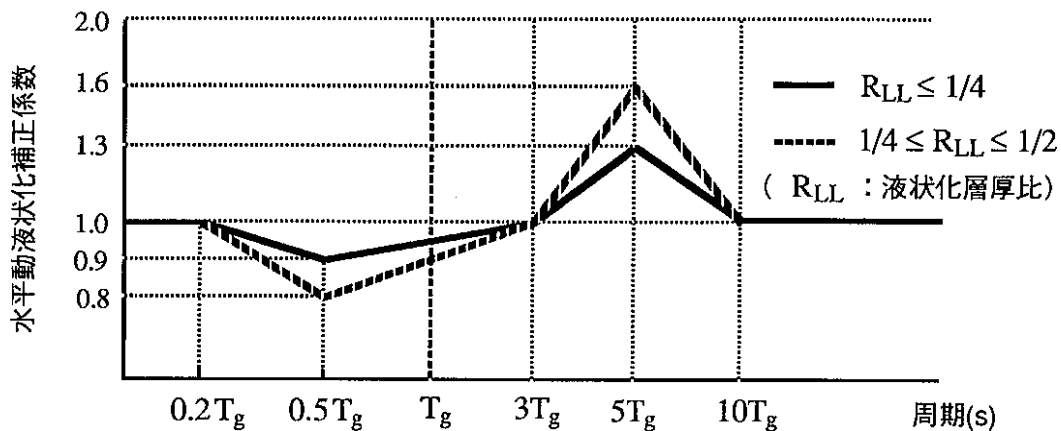
設計実務においては、以上に述べた地震動増幅特性への影響という動的な外力評価以外にも、①地盤変状・地盤の永久変位、②支持力・周面摩擦力の低下、沈下、③水平方向地盤反力係数の低減、④側方土圧の増加、⑤上向き土圧の発生（アップリフトの増加）といった地盤や構造物の安定性に関する項目で液状化の影響を考慮する必要がある。



解図4.2.4-3 水平動液状化補正係数 $\mu_P(T)$ (区分Bに対して)



解図4.2.4-4 設計用応答スペクトルの補正例



解図4.2.4-5 区分Cに対する水平動液状化補正係数 $\mu_P(T)$ (参考図)

(参考文献)

- 1) 森伸一郎、三輪 滋：地盤の地震動増加特性に及ぼす間隙水圧の影響、(その3：基本的な考えと研究の方向性の提示)、日本建築学会大会学術講演梗概集、B構造I、pp.476-477、1991.9

4. 2. 5 水平動地形効果補正係数 $\mu_I(T)$

水平動地形効果補正係数 $\mu_I(T)$ は、地盤構造の不整形性が水平動に与える影響を考慮するための係数で、不整形の程度に応じて定める。

解 説

(1) 不整形地盤とは

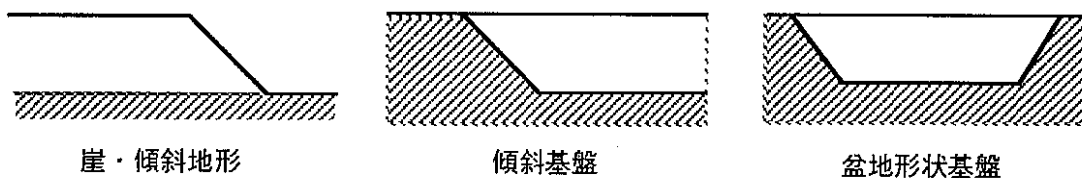
表層地盤が概ね水平成層状態であるとは見なせないような地形や地盤の構造を有し、地震動の増幅特性が水平成層地盤とは異なる地盤を不整形地盤とよぶ。

不整形地盤には、地表面の形状や地盤の構造により以下のような地盤が含まれる。

地表面の形状 崖、傾斜地、丘陵、堤体、谷

地盤の構造 傾斜、盆地、凹凸のある地層境界を有する地盤

解図4.2.5-1に不整形地盤の例を示す。



解図4.2.5-1 不整形地盤の例

検討の対象とする地盤が不整形であるか否かを定量的に、かつ動的な特性と関連づけて判定する手法や規準は未だ確立しておらず、現状では多分に定性的な判断に頼らざるを得ない。

これまでに用いられている不整形地盤の判定条件を参考までに挙げると、例えば、崖・傾斜地形では、法面の傾斜角が30度以上の場合¹⁾、傾斜地盤では基盤の傾斜角が5度以上の場合²⁾などがある。

なお、不整形性の影響範囲としては、崖・傾斜地形では崖端部から崖高さの4～5倍、傾斜基盤では、傾斜基盤上はもちろん傾斜基盤端部から表層地盤厚さの4～5倍の範囲を越えることが望ましい。

(2) 地形効果補正係数 $\mu_l(T)$ の設定

不整形地盤に対して一般化した地形効果補正係数を設定することは、不整形地盤が種々の形態を有することから困難である。

そこで、検討対象とする各々の地盤の状況を考慮して、以下の方法で補正係数を設定する。

1. 類似する地形に関する既往の数値解析結果、地震動や常時微動等の記録、関連する基準、指針などを参考にする。
2. 当該地盤をモデル化して数値解析を行ない、その結果に基づく。

(参考文献)

- 1) 横浜市建設局、横浜市公共建築物の耐震診断調査報告書、昭和61年3月
- 2) (社)日本ガス協会、ガス導管耐震設計指針、昭和57年3月

4. 3 上下動設計用応答スペクトル $\sqrt{v}S(T)$ 、 $\sqrt{v}S'(T)$

上下動に対する設計用応答スペクトル $\sqrt{v}S(T)$ は次式により算定する。

$$\sqrt{v}S(T) = \zeta \cdot \sqrt{v}B(T) \cdot \sqrt{v}L(T) \cdot \sqrt{v}G(T) \quad (4.3-1)$$

を使うことができる。ここに、

ζ : 地震活動度係数

$\sqrt{v}B(T)$: 上下動基準応答スペクトル

$\sqrt{v}L(T)$: 上下動やや長周期補正係数

$\sqrt{v}G(T)$: 上下動増幅特性係数

である。

なお、砂質地盤にあって過剰間隙水圧の影響を考慮する必要がある場合や、特殊な地形の影響を考慮する必要がある場合には上下動に対する設計用応答スペクトル $\sqrt{v}S'(T)$ を次式により算定する。

$$\sqrt{v}S'(T) = \sqrt{v}S(T) \cdot \sqrt{v}P(T) \cdot \sqrt{v}I(T) \quad (4.3-2)$$

ここに、

$\sqrt{v}P(T)$: 上下動液状化補正係数

$\sqrt{v}I(T)$: 上下動地形効果係数

である。

ただし、解放工学的基盤面で設計用応答スペクトルを与える場合には、

$$\sqrt{v}S(T) = \zeta \cdot \sqrt{v}B(T) \cdot \sqrt{v}L(T) \quad (4.3-3)$$

とする。

設計用応答スペクトル $\sqrt{v}S(T)$ および $\sqrt{v}S'(T)$ においては、加速度応答倍率は4倍を越えないものとする。

解 説

地表面における上下動設計用応答スペクトル $\sqrt{v}S(T)$ は、水平動の場合と同様な形で地震活動度係数 ζ 、工学的基盤における上下動基準応答スペクトル $\sqrt{v}B(T)$ 、上下動やや長周期補正係数 $\sqrt{v}L(T)$ および上下動表層地盤増幅特性係数 $\sqrt{v}G(T)$ を掛け合わせたものとして定める。

上下動表層地盤増幅特性係数 $\sqrt{v}G(T)$ は離散量として設定周期とそれに対応する値によって定める。全周期範囲における上下動設計用応答スペクトル $\sqrt{v}S(T)$ は、各設定周期間を両対数軸上で直線補間することにより算定する。

表層地盤が砂質地盤で過剰間隙水圧の影響（液状化現象）を考慮する必要がある場合や、表層地盤が水平成層地盤とは見なせないような不整形地盤の場合には $\sqrt{v}S(T)$ に上下動液状化補正係数 $\sqrt{v}P(T)$ や上下動地形効果補正係数 $\sqrt{v}I(T)$ を乗じて、地表面での設計用応答スペクトル $\sqrt{v}S'(T)$ を求める。

工学的基盤が地表面に露頭している場合には、 $\sqrt{v}G(T)$ 、 $\sqrt{v}P(T)$ 、 $\sqrt{v}I(T)$ を用いる必要はない。なお、設計用応答スペクトル $\sqrt{v}S(T)$ および $\sqrt{v}S'(T)$ においてスペクトルの加速度最大値の最短周期0.02秒における加速度値に対する倍率を加速度応答倍率とし、この値が

4倍を越えないものとする、これは、水平動設計用応答スペクトル ${}_H S'(T)$ および ${}_H S'(T)$ の場合に準じたものである。

4.3.1 上下動基準応答スペクトル ${}_V B(T)$

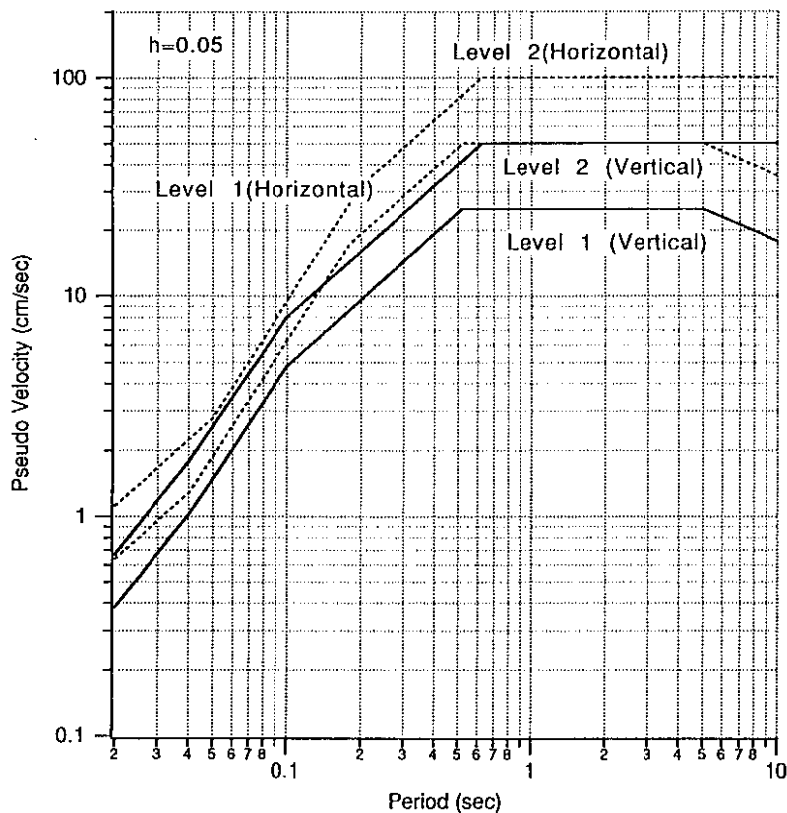
上下動基準応答スペクトル ${}_V B(T)$ は、解放工学的基盤上での上下動応答スペクトル特性で地震動のレベルに応じて表4.3.1-1により定める。

表4.3.1-1 上下動基準応答スペクトル ${}_V B(T)$

地震動レベル	上下動基準応答スペクトル ${}_V B(T)$ (cm/s)							
	T(s)	0.02	0.04	0.1	0.2	$\pi/6$	5	10
レベル1	${}_V B(T)$	0.38	1.02	4.77	9.55	25	25	17.7
	T(s)	0.02	0.04	0.1	0.2	$\pi/5$	10	-
レベル2	${}_V B(T)$	0.67	1.78	7.96	15.9	50	50	-
	T(s)	0.02	0.04	0.1	0.2	$\pi/6$	5	10

解説

各設定周期間における上下動基準応答スペクトル ${}_V B(T)$ は、両対数軸上でスペクトル値を直線補間することにより求める。上下動基準応答スペクトル ${}_V B(T)$ を解図4.3.1-1に示す。



解図4.3.1-1 上下動基準応答スペクトル ${}_V B(T)$

上下動基準応答スペクトル $V_B(T)$ は、水平動基準応答スペクトル $H_B(T)$ に各設定周期における上下動成分係数 $V(T)$ を乗じて算定した。

上下動成分係数 $V(T)$ は、解表4.3.1-1により与えられる。

解表4.3.1-1 上下動成分係数 $V(T)$

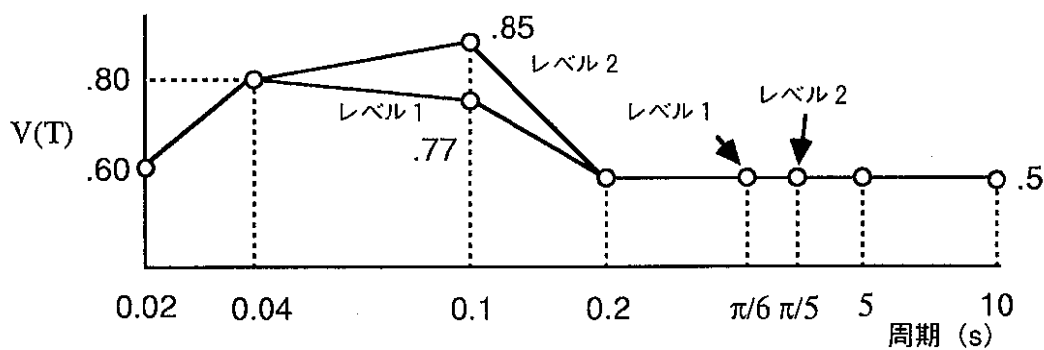
地震動レベル	上下動成分係数 $V(T)$							
	レベル1	T	0.02	0.04	0.1	0.2	$\pi/6$	5
	V(T)	0.6	0.8	0.77	0.5	0.5	0.5	0.5
レベル2	T	0.02	0.04	0.1	0.2	$\pi/5$	10	-
	V(T)	0.6	0.8	.85	0.5	0.5	0.5	-

設定周期間における係数は両対数軸上で直線補間して求める。

工学的基盤における地震動は地盤の非線形性の影響を余り受けないと考えられること、また水平動と上下動の加速度応答スペクトルの比に及ぼすマグニチュードの影響も小さいと認められることから、上下動成分係数 $V(T)$ はレベル1、レベル2によらず同一の形状で表すものとした。

また、震源距離の影響に関しては、近距離地震の応答スペクトル比が中、遠距離地震のものを包絡する傾向にあるため、上下動成分係数 $V(T)$ は近距離地震のスペクトル比で代表させるものとした。

全周期にわたる上下動成分係数の形状は、概ね解図4.3.1-2のようになる。



解図4.3.1-2 工学的基盤での上下動成分係数 $V(T)$

4. 3. 2 上下動やや長周期補正係数 $v_L(T)$

上下動やや長周期補正係数 $v_L(T)$ は、当面水平動やや長周期補正係数 $v_HL(T)$ の値を準用する。すなわち、

$$v_L(T) = v_HL(T) \quad (4.3.2-1)$$

解 説

やや長周期地震動の上下動に関して日本全国の揺れ易さ分布を研究することは今後の課題であるが、平野内で観測されるやや長周期地震動に影響のある堆積層表面波のうちレーリー波を考えた場合は、上下動も水平動と同様の傾向を示すと考えられる。したがって、現状では水平動の補正係数を準用する。

4. 3. 3 上下動増幅特性係数 $v_G(T_i)$

上下動増幅特性係数 $v_G(T_i)$ は、標準的な表層地盤の上下動の増幅特性を表す係数で地震動レベルに応じて表4.3.3-1により定める。

表4.3.3-1 上下動増幅特性係数 $v_G(T_i)$

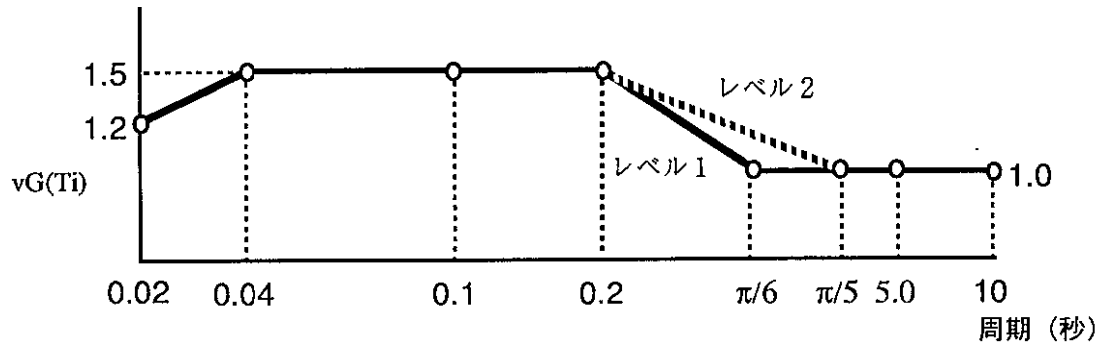
地震動レベル	上下動増幅特性係数 $v_G(T_i)$							
	T(S)	0.02	0.04	0.1	0.2	$\pi/6$	5	10
レベル1	$v_G(T_i)$	1.2	1.5	1.5	1.5	1.0	1.0	1.0
	T(S)	0.02	0.04	0.1	0.2	$\pi/5$	10	-
レベル2	$v_G(T_i)$	1.2	1.5	1.5	1.5	1.0	1.0	-
	T(S)	0.02	0.04	0.1	0.2	$\pi/5$	10	-

解 説

工学的基盤以浅の表層地盤における上下動増幅特性は、水平方向の動特性の違いによらず短周期領域で共通して増幅し、ピーク値のばらつきも比較的少ないことから、地盤の種別によらず単一の増幅特性係数で表すものとする。

また、上下動成分に関しては非線形の影響はあまり大きくないと考えられることから、レベル1、レベル2ともほぼ同様の特性とした。

表層地盤の上下動増幅特性係数 $v_G(T_i)$ の全周期領域にわたる形状を解図4.3.3-1に示す。



解図4.3.3-1 表層地盤の上下動増幅特性係数 $vG(T)$

4. 3. 4 上下動液状化補正係数 $vP(T)$

上下動液状化補正係数 $vP(T)$ は、地盤の液状化が上下動に与える影響を考慮するための係数で、液状化の程度に応じて定める。

解 説

上下動の主要動部分はP波あるいはS波（SH波、SV波）から形成される。P波の場合には、地盤にせん断変形は生じないため発生した間隙水圧は残留せず、増幅特性に過剰間隙水圧の影響を考慮する必要はないと考えられる。SV波の場合には、水平動と同様に間隙水圧の蓄積が起こると予想され、増幅特性に影響をおよぼすものと考えられる。この場合、水平動と同様の補正を行なうことが考えられる。

しかし、この問題については現時点では不明な点も多いため、本指針（案）では当面 $vP(T) = 1.0$ と考えることとする。

4. 3. 5 上下動地形効果補正係数 $vI(T)$

上下動地形効果補正係数 $vI(T)$ は、地盤構造の不整形性が上下動に与える影響を考慮するための係数で、不整形の程度に応じて定める。

解 説

地形や地盤構造の不整形性が地震動の上下動成分に与える影響については十分解明されていないのが現状である。

本指針（案）では当面、 $vI(T) = 1.0$ とするが、類似の地盤条件に関する既往の数値解析結果や地震動、常時微動などの測定結果などを参考に、あるいは当該地盤を適切にモデル化して数値解析を行ない、その結果に基づいて補正係数を設定する方法もある。

5. 設計用入力地震動時刻歴

設計用入力地震動時刻歴波形は、各レベルの地震動に対応した周期特性と振幅の経時変化を考慮して作成する。

5.1 時刻歴波形の作成

時刻歴波形は、その周期特性が設計用応答スペクトルに適合するように作成する。

解説

動的解析においては、スペクトルモーダル解析などの略算法を用いることもあるが、複雑な建築物の応答解析や、非線形応答解析においては、地震動波形を用いる時刻歴解析が一般的である。設計用入力地震動時刻歴波形は、設計用応答スペクトルに適合するスペクトルを有する模擬地震動として作成する。

(1) 作成方法

(i) 正弦波合成法

時刻歴波形の作成法にはいろいろの方法が提案されているが、一例として、正弦波の重ね合わせによって目標とする応答スペクトルに適合させる方法を示す。

すなわち、加速度時刻歴 $y(t)$ を振幅および振動数の異なる複数個の正弦波からなるものとして、下式で定義する。この方法では、 i 番目の成分の位相角 ϕ_i に一様乱数を用いることが多い。

$$y(t) = e(t) \sum_{i=1}^N A_i \cos(\omega_i t + \phi_i) \quad (\text{解5.1-1})$$

ここに、

N ：成分個数

$e(t)$ ：非定常性を与える包絡関数

A_i ： i 成分の振幅

ω_i ： i 成分の円振動数

ϕ_i ： i 成分の位相角

(ii) 実地震動波形を用いる方法

その他の方法として、上式において包絡関数 $e(t)$ を用いず、 i 番目の成分の位相角 ϕ_i に実地震動波形の位相特性を用いる方法や、実地震動波形にスペクトル適合のための微小な補正波を付加する方法^{1),2)}などがある。この場合に用いる地震動波形としては、マグニチュードの小さいものや、継続時間の小さいものは避けることが望ましい。

(2) 作成結果の評価

模擬地震動として作成された加速度波形について、擬似速度応答スペクトルが設計用応

答スペクトルに良好に適合していること、十分な数の振動数成分を含んでいること、さらに最大速度、最大変位振幅が適切な値であることを確認する必要がある。

(i) 応答スペクトルの適合条件

擬似速度応答スペクトル（減衰定数5%）の適合度は、以下に示す条件を満足することが望ましい。

① 最小応答スペクトル比

$$\varepsilon_{min} = \left\{ \frac{S_{psv}(T_i, 0.05)}{DS_{psv}(T_i, 0.05)} \right\}_{min} \geq 0.85 \quad (\text{解5.1-2})$$

② 目標設計用応答スペクトルからの変動係数（ ν : COV）

$$\nu \leq 0.05 \quad (\text{解5.1-3})$$

③ 平均値の誤差

$$|1 - \varepsilon_{ave}| \leq 0.02 \quad (\text{解5.1-4})$$

ただし、

S_{psv} : 擬似速度応答スペクトル

DS_{psv} : 設計用応答スペクトル

T_i : 誤差を判定する周期

$$\nu = \sqrt{\frac{\sum (\varepsilon_i - 1.0)^2}{N}}$$

$$\varepsilon_{ave} = \frac{\sum \varepsilon_i}{N}$$

$$\varepsilon_i = \frac{S_{psv}(T_i, 0.05)}{DS_{psv}(T_i, 0.05)}$$

なお、上記の評価において、誤差を判定する周期ポイント数は、設計用応答スペクトルの設定周期範囲内で200から300点を目安とする。誤差を判定する周期ポイントは正弦波重ね合わせ法で模擬地震動を作成する場合の重ね合わせ周期ポイントとは一致しないほうがよい。

(ii) 速度、変位振幅

時刻歴波形は加速度時刻歴波形を作成するものであり、作成された波形を適切な方法により積分し、速度波形および変位波形を示すこと、また、用いたフィルター特性についても示すことが望ましい。

(3) 多成分時刻歴波形の作成方法

2次元や3次元の詳細な解析で、水平2成分や、水平・上下3成分の時刻歴を必要とす

る場合、以下のようにする。

地震動そのものの最大値は、3成分ともほぼ近接した時間で生じること、ただし、応答の最大値は広い範囲の固有周期において、成分間の時間的相関性の小さいランダムな時間で生じることが指摘されている。したがって、位相として一様乱数を用いる場合は包絡形は5.2の方法で求め、乱数発生のための初期値を変えることにより、各成分間の最大応答発生時刻の無相関性を実現する。

実地震動波形を利用して時刻歴を作成する場合は、3成分時間軸の揃った記録を用いる。

なお、用いる設計用応答スペクトルは、各成分に対して各々、4.で定めたスペクトルとする。

上記の方法の根拠を以下に述べる。

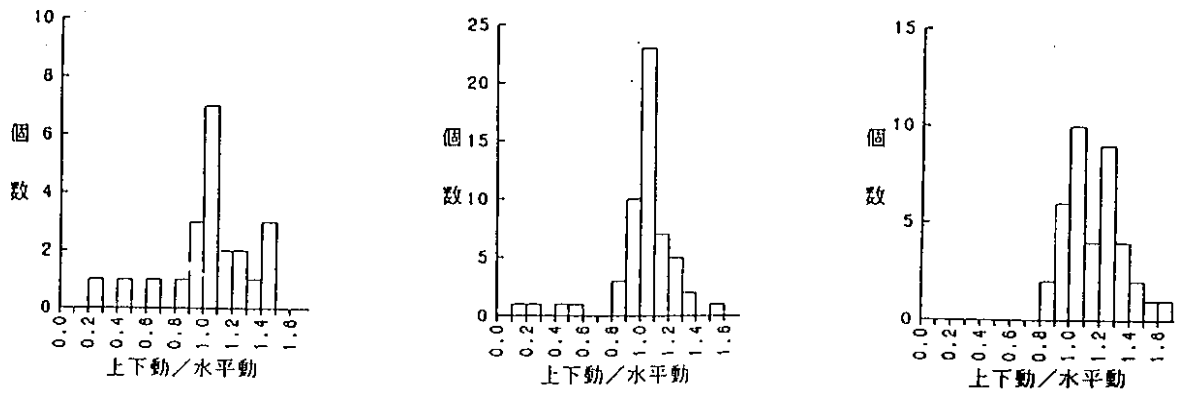
解図5.1-1³⁾によれば、加速度波形の水平動の最大値（ただし、水平2方向の時間ステップ毎のベクトル和の最大値）の発生時刻と、上下方向の最大値の発生時刻の比は、1.0前後の記録が多いことが指摘されている。したがって、時刻歴作成の際の地震動の主要動区間は、各成分に対して同じにして良いと思われる。

また、解図5.1-2a)は、エルセントロ1940の記録の3成分の擬似速度応答の最大値の発生時刻を周期に対して示したものである。これによると、各成分の最大値の発生時刻はランダムで、成分間の相関性は小さいといえる。一方、解図5.1-2b)は、水平各1方向の応答スペクトルの各周期における大きいほうの値：(NS, EW成分の最大値)に対する水平2次元応答スペクトル（水平各1方向の応答値の時間ステップ毎のベクトル和の最大値）の比である。これによればその比は、1.0～1.3倍程度、平均して約1.1倍である。

これに対して、解図5.1-3は本指針に基づき、位相として一様乱数を用いて作成した3成分の模擬地震動の同様の特性である（ただし、設計用応答スペクトルは本指針（案）とは異なる）。同図a)によれば、水平1方向の応答スペクトルの大きい方の値に対する水平2次元応答スペクトルの比は1.0～1.3程度、平均値で約1.1である。これらの値は、いずれも前述したエルセントロ1940の場合と調和的である。

（参考文献）

- 1) Kaul, M.K. "Spectrum Consistent Time History Generation", ASCE, EM4, August, 1978
- 2) Hirasawa, M., Watabe, M., "Generation of Simulated Earthquake Motions Compatible with Multi-Damping Response Spectra," Proc. 10th WCEE, Vol.2, 1992
- 3) 高崎芳夫、平澤光春：仙台地域における水平動と上下動の特性、日本建築学会大会、pp.255～256、1990.10

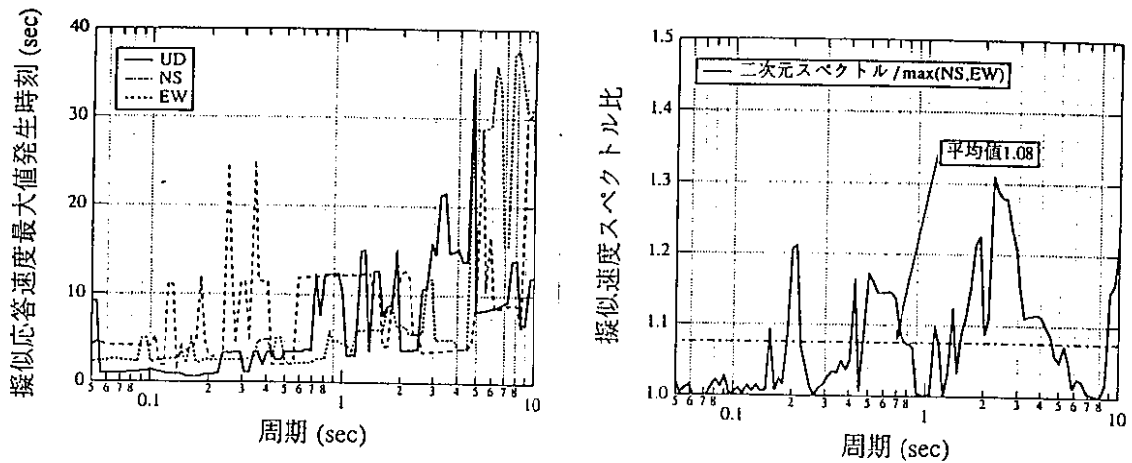


a) $90 \leq V_s(\text{m/sec}) \leq 130$

b) $500 \leq V_s(\text{m/sec}) \leq 700$

c) $820 \leq V_s(\text{m/sec}) \leq 1400$

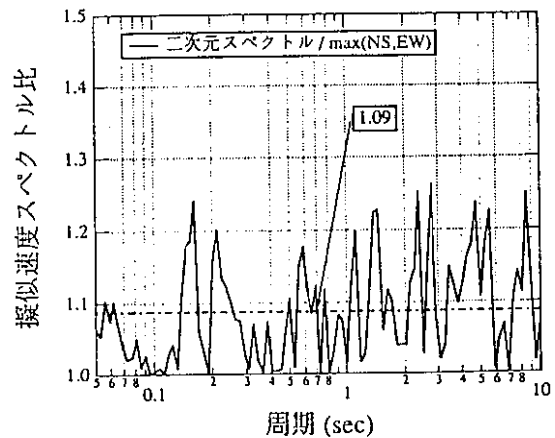
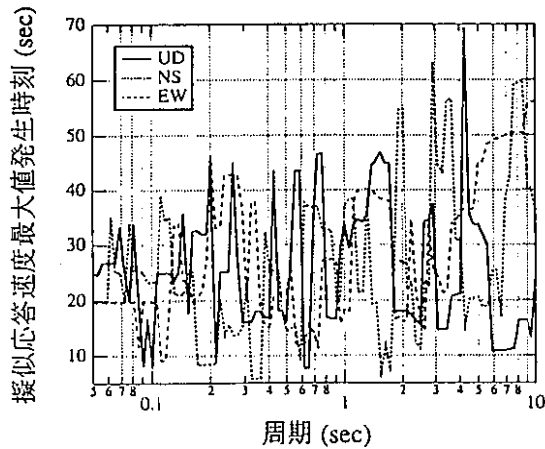
解図5.1-1 水平動と上下動の最大値発生時刻の比と頻度分布



a) 3成分の疑似速度応答の最大値の発生時刻

b) 水平各1方向スペクトルの大きい方の値に対する水平2次元応答スペクトルの比

解図5.1-2 エルセントロ1940の特性



a) 3成分の擬似速度応答の最大値の発生時刻

b) 水平各1方向スペクトルの大きい方の値に対する水平2次元応答スペクトルの比

解図5.1-3 模擬地震動の特性

5.2 時刻歴波形の継続時間と包絡関数

時刻歴波形の経時変化は継続時間と包絡関数で定める。

解説

地震動の継続時間、包絡関数は以下の理由に基づき地震動強さのレベルに応じて解表5.2-1および解図5.2-1に示す2種類を設定する。

- i) 地震動の継続時間、包絡関数は、地震断層の破壊現象に強く依存することがいわれている。ここでは、レベル1については、マグニチュードを7、レベル2については8程度に想定している。
- ii) レベル1地震動は、主として許容応力度設計に用いられることから、各周期において最大応答を示すに十分な継続時間を有すれば良いと考えられる。これに建築物の塑性化などを考え地震動のコーダ部分（終わりの部分）を考慮する必要がある。

ここで継続時間についての研究例3)~7)を本指針と比較し、解表5.2-2に示す。なお、既往研究の継続時間は若干定義の異なるものであるので、備考欄に略記した。

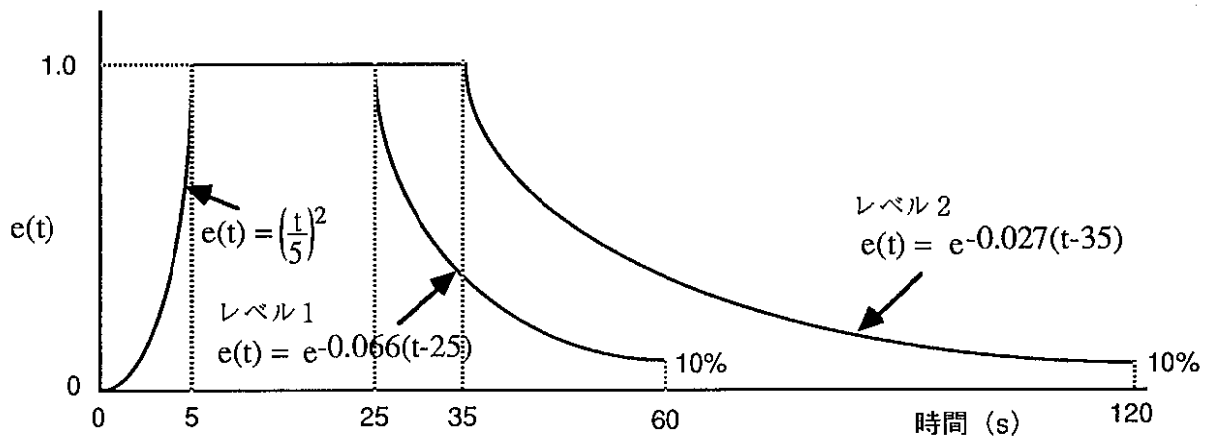
これをみると、本指針の値はレベル1 (M=7)、レベル2 (M=8) とともに、Jenningsによるものに近く、他の既往研究の結果の上限値に相当している。しかし、比較的低減衰での長周期の構造物も対象とした設計用地震動であることを考慮すれば、対象建築物が励起されるのに十分な継続時間を有することが必要となる。また、この様に地震動の継続時間が長くても、比較的早い時刻で最大応答値が生ずる建築物に対しては、適切な継続時間で

解析を打ち切ることも可能である。

なお、最近の観測例では、200秒を越える継続時間（ただし速度記録）を有するものも報告されている。しかし、これをも考慮してより長い継続時間を一律に与えることは設計手法上現実的ではないので、この種の地震動を考慮する必要のある建築物に対しては、別途的確な検討を行なう必要がある。

解表5.2-1 時刻歴作成に用いる包絡関数

	継続時間	包絡関数
レベル1	60秒	$e(t) = \left(\frac{t}{5}\right)^2$ $0 \leq t < 5$ $e(t) = 1$ $5 \leq t < 25$ $e(t) = \exp\{-0.066(t-25)\}$ $25 \leq t \leq 60$
レベル2	120秒	$e(t) = \left(\frac{t}{5}\right)^2$ $0 \leq t < 5$ $e(t) = 1$ $5 \leq t < 35$ $e(t) = \exp\{-0.027(t-35)\}$ $35 \leq t \leq 120$



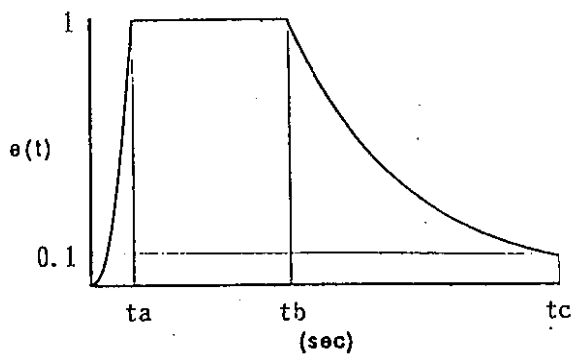
解図5.2-1 時刻歴作成に用いる包絡関数（レベル1、レベル2）

解表5.2-2 継続時間に関する既往研究との比較

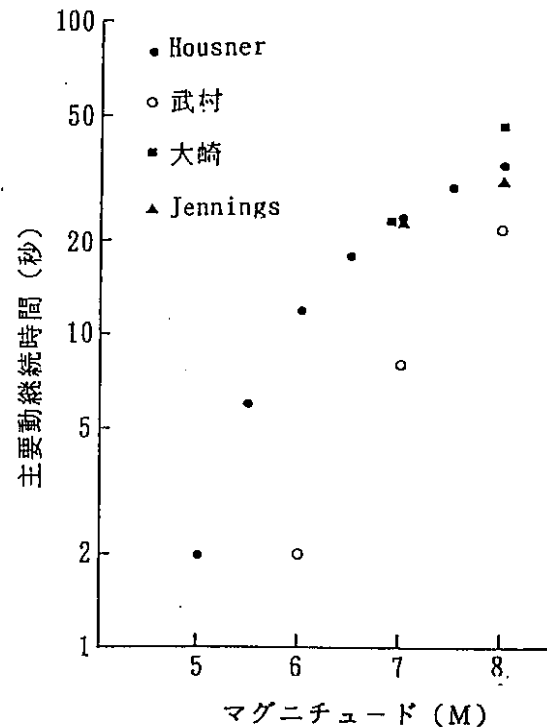
	レベル1 (M=7)	レベル2 (M=8)	備考
本指針	60	120	
久田・安藤 ³⁾	25	51	
小林 ⁴⁾	26	83	t_{30}
Jennings ⁵⁾	50	120	
Ambrasey ⁶⁾	28	39	t_{30}
Bolt ⁷⁾	27	35	t_{50}

注) t_{30} 、 t_{50} は、各々30gal、50gal以上の継続時間を示す。その他は本指針と同じ(単位:秒)。

次に、解図5.2-2における t_a から t_b までの区間を主要動継続時間と定義し、主要動継続時間に関する既往の研究結果を整理し、解図5.2-3に示す。Housner⁹⁾と武村¹⁰⁾では、本指針(案)に対応する主要動継続時間が示されているので直接参照できる。大崎¹¹⁾やJennings⁵⁾では、有効継続時間比(解図5.2-2において $(t_b - t_a)/t_c$ で定義される)が与えられるので、レベル1の地震動(M=7)に対しては $t_c=60$ 秒、レベル2の地震動(M=8)に対しては $t_c=120$ 秒として主要動継続時間を換算した。各研究例によって提案値に幅があるが、M=7で20秒程度、M=8で30秒程度の主要動継続時間が必要であると考えられる。



解図5.2-2 Jennings型の包絡関数



解図5.2-3 主要動継続時間に関する既往研究

(参考文献)

- 1) H.Tsuchida et al.; Standard Processing of Strong-motion records by Port Harbor Research Institute, Japan, Workshop of Processing of Seismic Strong Motion Records, Pre XIX General Assembly, I.U.G.G., Vancouver, B.C., Canada, 1987.8.8
- 2) 国立防災科学技術センター；強震記録数値集（4）1987年12月千葉県東方沖地震、第144号、1990
- 3) 安藤治彦他；模擬地震波作成のための地震動の最大速度と最大加速度の関係ならびに主要動部の継続時間、鹿島技術研究所年報、第24号、1976
- 4) 小林啓美他；地震動の強さを評価する簡便な尺度としての地震動最大振幅、日本建築学会論文報告集、第181号、1971
- 5) P.C. Jennings et al.; Simulated Earthquake Motions, E.E.R.L., Pasadena, 1968
- 6) N.N.Ambraseys et al.; The Response of Earth Dam to Strong Earthquake, Geotechnique, Vol.17, 1967
- 7) B.A.Bolt; Duration of Strong Ground Motion, 5WCEE, 1973
- 8) 丹羽正徳他；東京湾臨海部の地震動特性に関する研究（その1）、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造I、1990
- 9) G.W.Housner; Intensity of earthquake ground motion shaking near the causative fault. 3WCEE, 1965
- 10) 武村雅之他；模擬地震動による地震動シミュレーション（その1）、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造I、1988
- 11) 大崎順彦；原子力発電所設計用の基準地震動評価に関するガイドライン、ORI研究報告84-01、1984

6. 設計用入力地震動の用い方

6.1 減衰定数に応じた設計用応答スペクトルの補正

スペクトルモーダル解析法を用いた動的解析においては、各モードの減衰定数に応じて設計用応答スペクトルを補正する。

解 説

建築物各モードの最大値を応答スペクトルを用いて求め、これらの値の重ね合わせにより系全体の最大応答値や断面力の分布などを略算する方法がスペクトルモーダル解析である。本指針（案）での設計用応答スペクトルは5%の減衰定数に対して定めたものであり、モード減衰定数が異なればスペクトル値を補正する必要がある。

減衰定数5%以外の構造物に対する設計用応答スペクトルはモード減衰定数 h_i に応じて補正するものとし、モード減衰定数 h_i が2%から20%の範囲内では次式の補正係数 C_{Di} を用いることができる。

$$C_{Di} = 1 - \left[\frac{15.5h_i - 0.77}{33h_i + 1} \right] \cdot t_i \quad (\text{解6.1-1})$$

ここに、

C_{Di} : i 次モード減衰定数による補正係数

h_i : i 次モード減衰定数

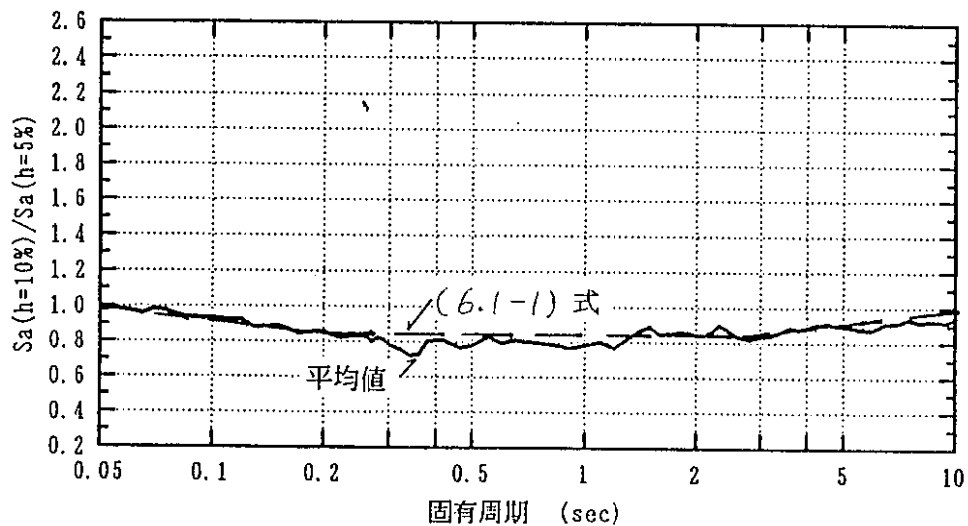
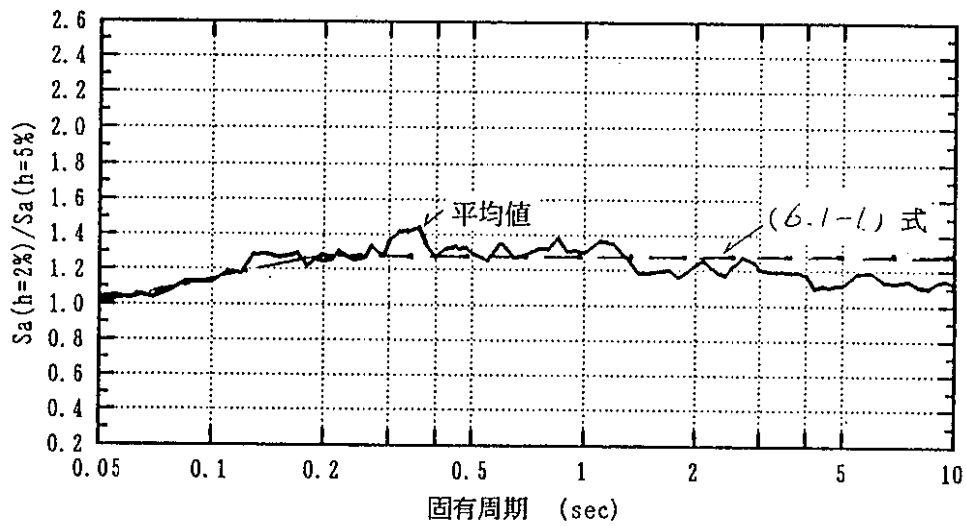
t_i : 固有周期 T_i (秒) による補正係数で下式による。

	$T_i \leq 0.05$	$t_i = 0$
	$0.05 < T_i \leq 0.2$	$t_i = (\log T_i + 1.30)/0.6$
h_i が5%以上の場合	$0.2 < T_i \leq 2.5$	$t_i = 1$
	$2.5 < T_i \leq 10.0$	$t_i = (1 - \log T_i)/0.6$
	$10.0 < T_i$	$t_i = 0$
h_i が5%未満の場合	$0.2 \leq T_i$	$t_i = 1$

解図6.1-1に解6.1-1式と、既往地震波の1/2成分の減衰定数の違いによる応答スペクトル比の平均値を、減衰定数2%と10%の場合について比較して示す。同図より解6.1-1式により、減衰定数が5%以外の設計用応答スペクトルの補正が可能であることがわかる。

注) 既往の地震波としては

- ①EL-CENTRO(1940)のNS、EW成分
 - ②TAFT (1952)のNS、EW成分
 - ③TOKYO 101 (1956)のNS成分
 - ④TH030-1FL (1978)のNS、EW成分
 - ⑤HACHINOHE (1968)のNS、EW成分
 - ⑥OSAKA 205 (1963)のNS成分
 - ⑦AKASHI 804(1963)のEW成分
 - ⑧SENDAI 501 (1962)のEW成分
- の 8 地震 1 2 成分とした。



解図6.1-1 (6.1-1) 式と既往地震動の応答スペクトル比の平均値の比較

6.2 入力位置に応じた設計用地震動の設定

動的解析において、地中での入力地震動を設定する必要がある場合には、表層地盤モデルを用いた応答解析により、入力位置に応じた設計用入力地震動を定める。

解 説

(1) 入力地震動の設定方法

本指針(案)で定める工学的基盤での設計用入力地震動の地盤での位置関係は、解図6.2-1に示すごとくである。動的解析において設計用入力地震動を用いる場合には、具体的には以下のようにする。

- ① 地表面の基礎のように、地表面を支持点とし、基礎固定モデル、あるいはスウェイロッキングモデルで解析する場合は、入力地震動として設計用地震動、すなわち設計用応答スペクトルあるいはそれに応じて作成した時刻歴波形を用いる。
- ② 埋め込み直接基礎や杭基礎などの解析において、地中での地震動が必要な場合は、先ず、基準応答スペクトルに地域係数とやや長周期補正係数を乗じた応答スペクトルから時刻歴波形($2E_0$)を作成する。この地震動を表層地盤の解析モデルに入力して、必要位置での応答波($E_i+F_i, i=1, \dots, n$, 解図6.2-2参照)を求め、これを建築物あるいは地盤-建築物系の解析モデルに入力する。なお、特別な場合として、 $i=1$ は地表面の地震動、 $i=n$ の場合は工学的基盤面での地震動となる。

ここで、表層地盤の解析モデルへの入力地震動の大きさは、モデルの下方境界の設定に応じて2種類考えられる。すなわち、ひとつは解図6.2-2a)のように、一次元波動伝播解析モデルのごとく逸散波 F_0 を考慮できる場合で、この場合の入力は E_0 、すなわち作成した時刻歴波形の半分である。他のひとつは同図b)のごとく逸散波を支持点のダッシュポットにより考慮する場合で、この場合の入力は $2E_0$ 、すなわち作成した時刻歴波形そのものである。この両者のモデルは、波動論的には等価である。

(2) 地盤・建築物の相互作用解析に用いる入力地震動

主として上部建築物の応答を対象とする場合の代表的な相互作用解析モデルの例について、入力地震動の設定に関する留意事項を以下に述べる。なお、ここで述べる以外にも各種の方法が提案されており、それぞれの解析方法の特徴により入力地震動の扱いは異なるので、十分な注意が必要である。

①スウェイロッキングモデル

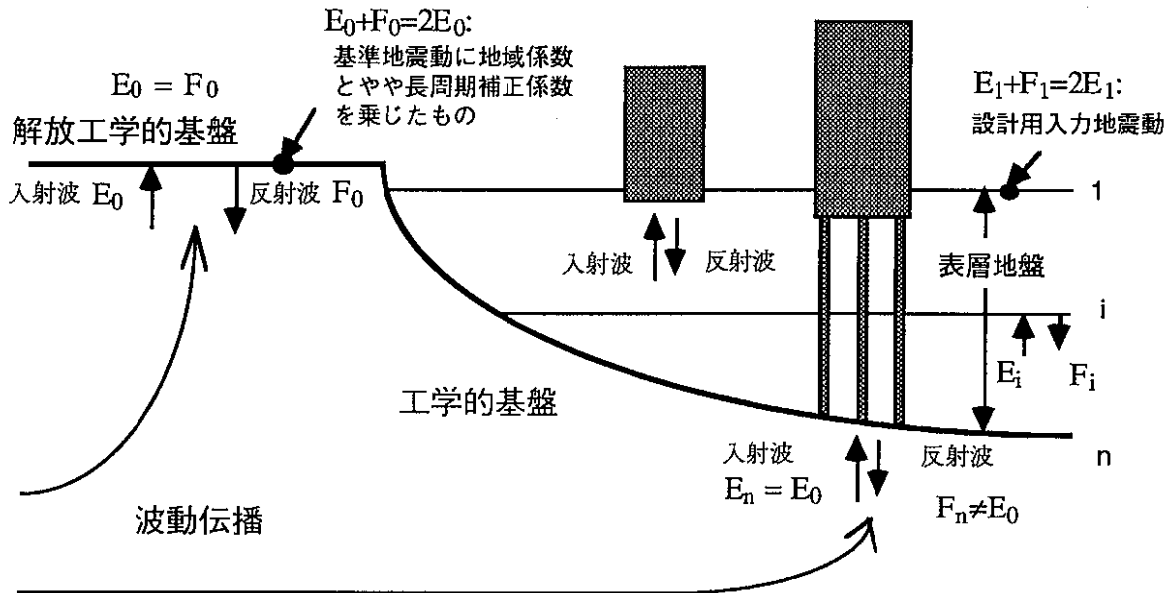
基礎底面のみに入力する場合、(1)項で述べた方法で計算した地震動を用いる。根入れ部分が深い場合には、地下側面に複数のスウェイばねとダッシュポットを設け、このばねとダッシュポットを介して入力する場合もある。この場合には、スウェイばねとダッシュポットの位置での自由地盤の加速度、速度および変位の各応答波を、入力地震動とする。

②Penzienモデル

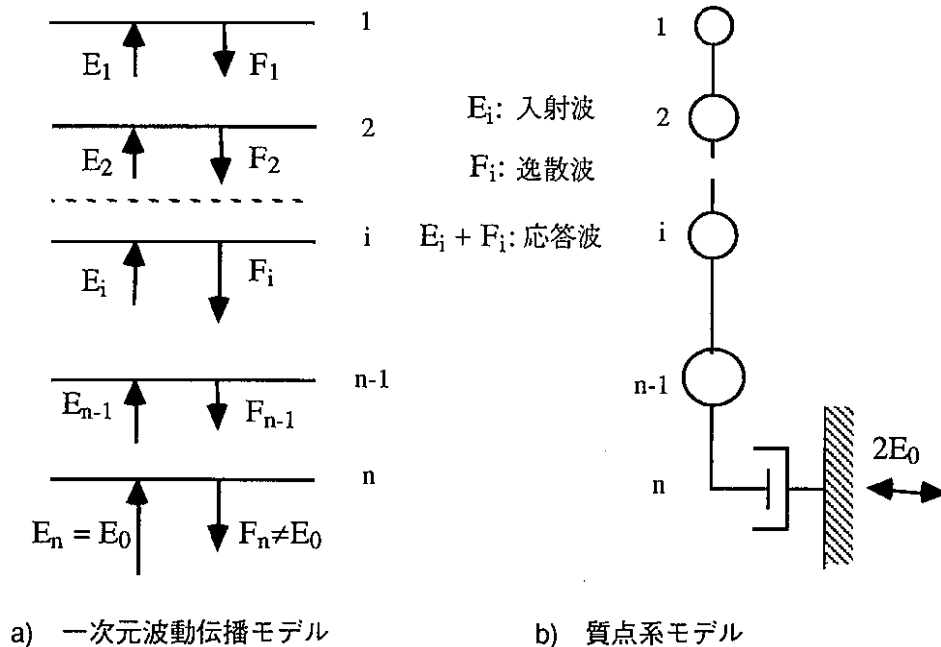
Penzienモデルの場合には、通常、杭先端が入力位置となる。この場合、杭先端位置での自由地盤の加速度応答波を求め、これを入力地震動とする。なお、杭先端が工学的基盤となる場合においても同様である。

③FEMモデルおよび格子型モデル

この場合建築物から支持地盤（解析モデル支持端）までの地盤をあわせてモデル化し、全体を一括して解析することが可能となる。入力地震動は下方境界の取り扱いにより異なる。下方境界を固定境界とする場合には、境界位置での自由地盤の応答波を入力地震動とし、ダッシュポット境界とする場合には自由地盤の入射波の2倍の地震動を入力地震動とする。



解図6.2-1 設計用入力地震動の位置関係



a) 一次元波動伝播モデル

b) 質点系モデル

解図6.2-2 表層地盤の解析モデルと入力地震動

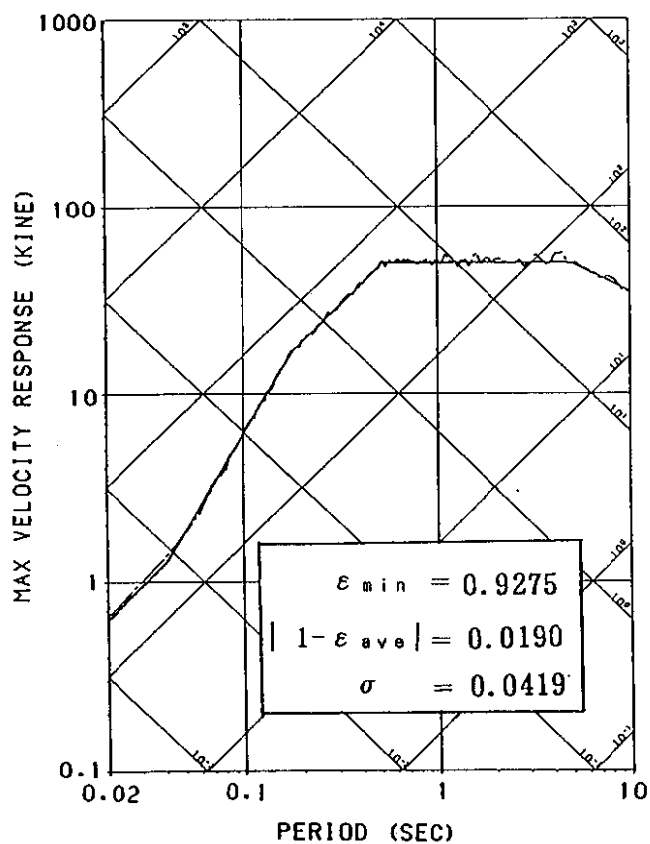
付 録

付録1 設計用応答スペクトルの算定例と設計用入力地震動時刻歴波形の作成例

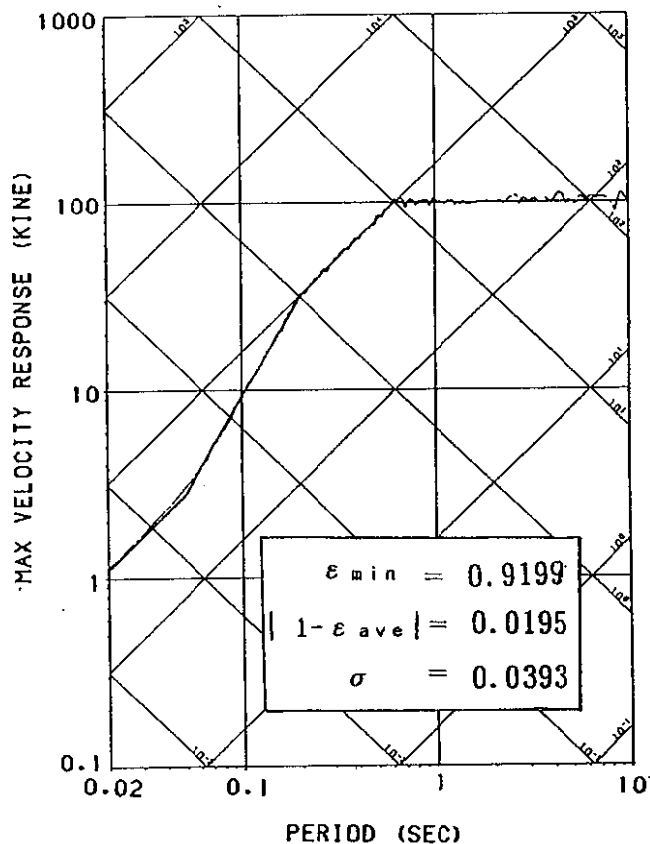
本指針（案）で提案された設計用応答スペクトルに基づいて、加速度時刻歴波形の作成を行なう。波形の作成は、正弦波合成法によって行ない、位相は乱数、包絡関数は前に示されたものを用いた。正弦波の重ね合わせの周期ポイントは、0.02秒から、10秒を200点に等比分割して求めた。

加速度時刻歴波形は、工学的基盤を想定し、レベル1、レベル2の2種類を作成した。付図1および付図2に、作成した波形の応答スペクトルと目標スペクトルの適合度を示す。また付図3、4にはそれぞれの加速度、速度、変位波形を示す。

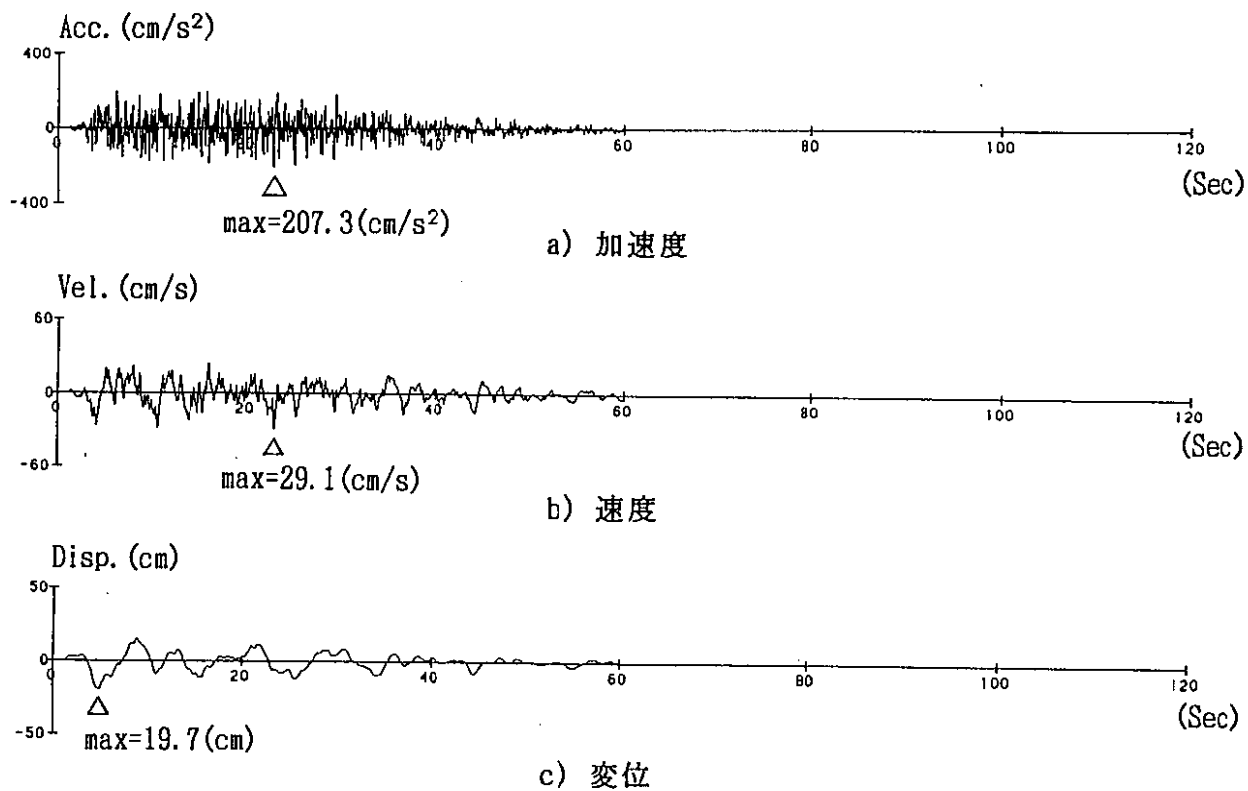
最大加速度値はレベル1で207.3cm/s²、レベル2で355.7cm/s²、最大速度値はレベル1で29.1cm/s、レベル2で57.4cm/s、となっている。なお、加速度波形から速度および変位波形を求める際のフィルター特性は、考慮されていない。



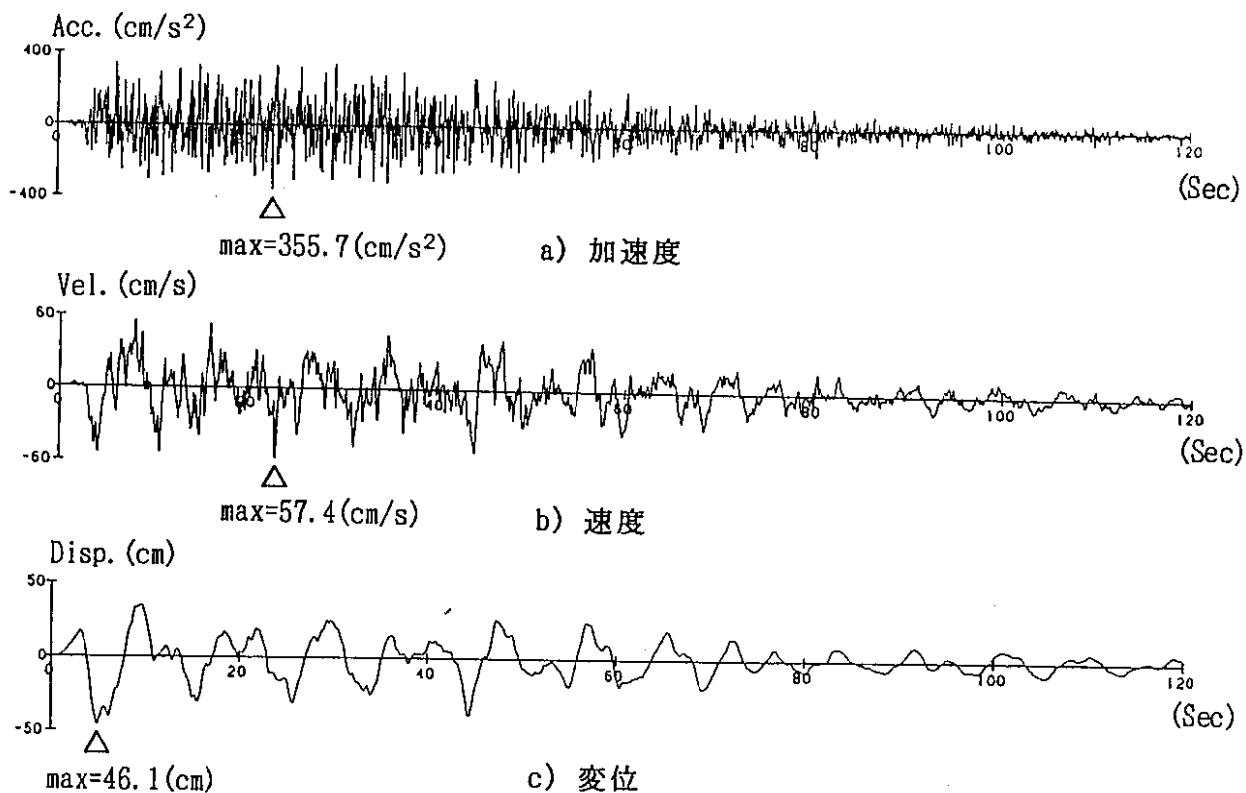
付図1 試作波と目標スペクトルとの適合性
($H_B(T)$ 、レベル1)



付図2 試作波と目標スペクトルとの適合性
($H_B(T)$ 、レベル2)



付図3 試作波の時刻歴波形 (μ B(T)、レベル1)



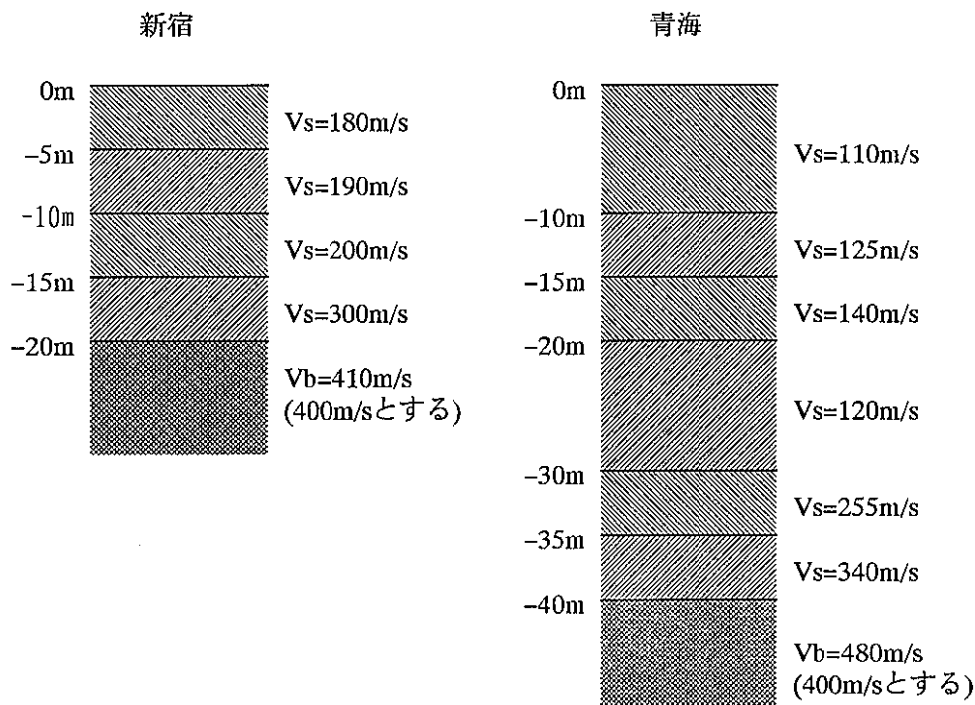
付図4 試作波の時刻歴波形 (μ B(T)、レベル2)

付録2 水平動設計用応答スペクトルの作成例

ここでは表層地盤を2例取り上げ、水平動設計用応答スペクトル $h_S(T)$ を試作する。対象とする地盤は東京都の新宿及び青海で、表層地盤のせん断波速度分布を付図5のように単純化して取り扱った。また地震活動度係数 ξ は1.0とし、やや長周期補正係数 $L(T)$ は地域1に対するものを用いた。このせん断波速度分布を用いると、水平動表層地盤増幅特性係数 $h_G(T_i)$ を算定するための各定数は付表1のようになる。

付表1 $h_G(T_i)$ 算定のための係数

	新宿	青海
表層地盤の平均せん断波速度: V_e (m/s)	217.5	165
表層地盤の1次固有周期: T_g (s)	0.368	0.970
V_e/V_b	0.544	0.413
表層地盤のせん断波速度のばらつき: ΔV (m/s)	41.25	66.25
$\Delta V/V_e$	0.190	0.402
表層地盤の地盤分類	均質型	不均質型
短周期側増幅率(レベル1): α	1.32	1.03
短周期側増幅率(レベル2): α	0.85	0.63
最大増幅率(レベル1): β	1.73	2.29
最大増幅率(レベル2): β	1.64	2.12



付図5 表層地盤のせん断波速度分布

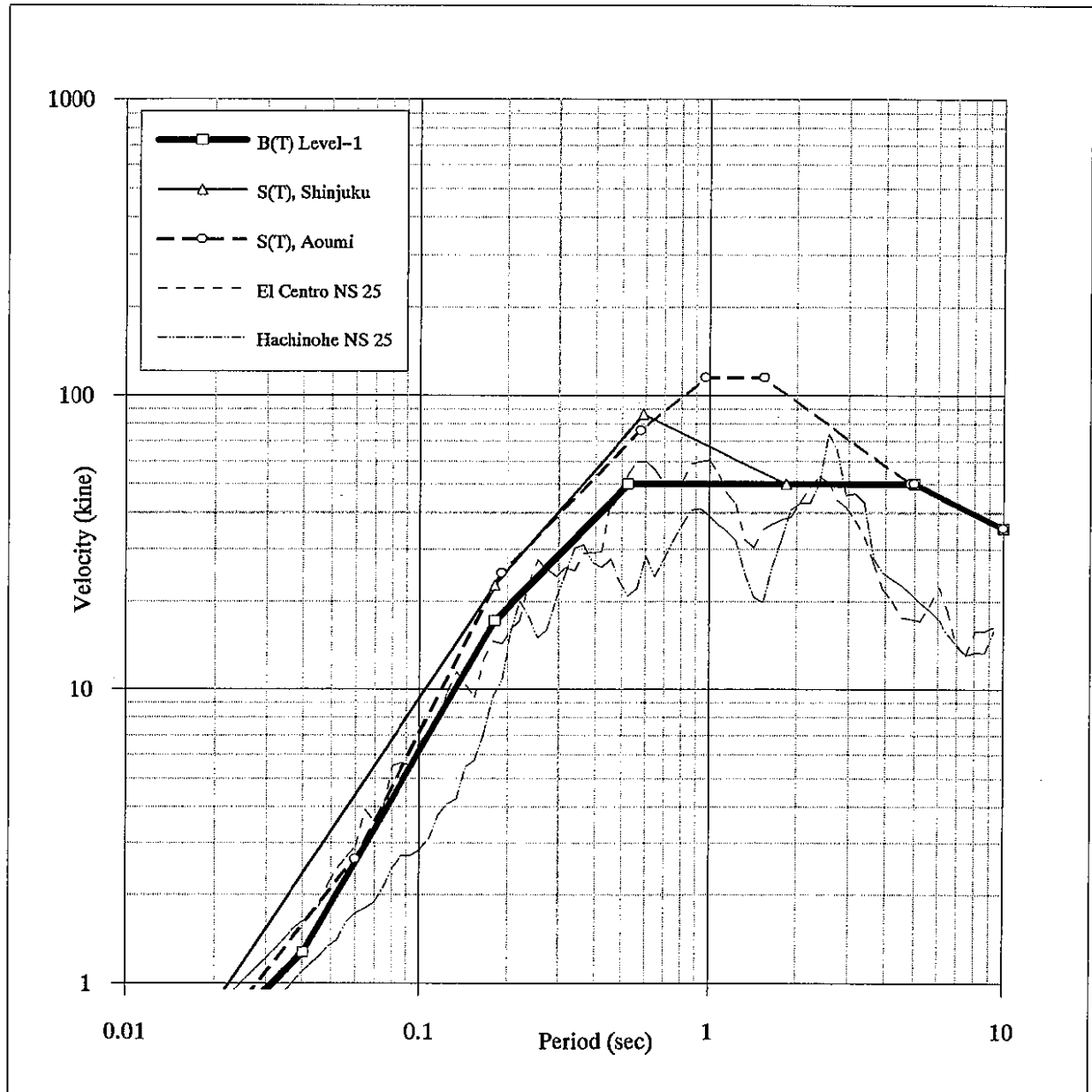
得られた水平動設計用応答スペクトルを $hB(T)$ とともに付図6～7に示す。付図6はレベル1に、付図7はレベル2に対応する。この場合 $hB(T)$ は解放工学的基盤の $hS(T)$ と一致する。

また図中には耐震設計に標準的に使われている、1940 El Centro NS成分及び1968 Hachinohe NS成分の地震動の5%疑似速度応答スペクトルを併せて記した。このとき各地震動はその最大速度を、レベル1で25cm/sに、レベル2で50cm/sに基準化している。

付図8はレベル2の $hB(T)$ と、建設省総合技術開発プロジェクトの「鉄筋コンクリート建造物の超軽量・超高層化技術の開発」¹⁾(図中総プロと称す)及び「臨海部における大規模建築物群の総合的な構造安全性に関する検討」²⁾(図中臨海部と称す)で提案されている設計用スペクトルを比較したものである。これらはいずれも5%の疑似速度応答スペクトルの形で表現されている。また図中二点鎖線は建築基準法の2次設計用荷重を応答スペクトルに換算したものである($C_0=1.0$ 、一種地盤、 $Z=1.0$)。これら4つの応答スペクトルを比べると、0.2秒から2秒の領域ではほぼ同一の大きさとなっており、0.2秒以下の短周期側と2秒以上の長周期側で形状が異なっている。ただし、「鉄筋コンクリート建造物の～」及び「臨海部における～」はそれぞれ検討対象及び想定地域が限定されており、直接的な比較には制約がある。また建築基準法の設計荷重は階高が60m以下の建築物に適用されるもので、2～3秒以上の周期領域は対象としていないことに留意する必要がある。

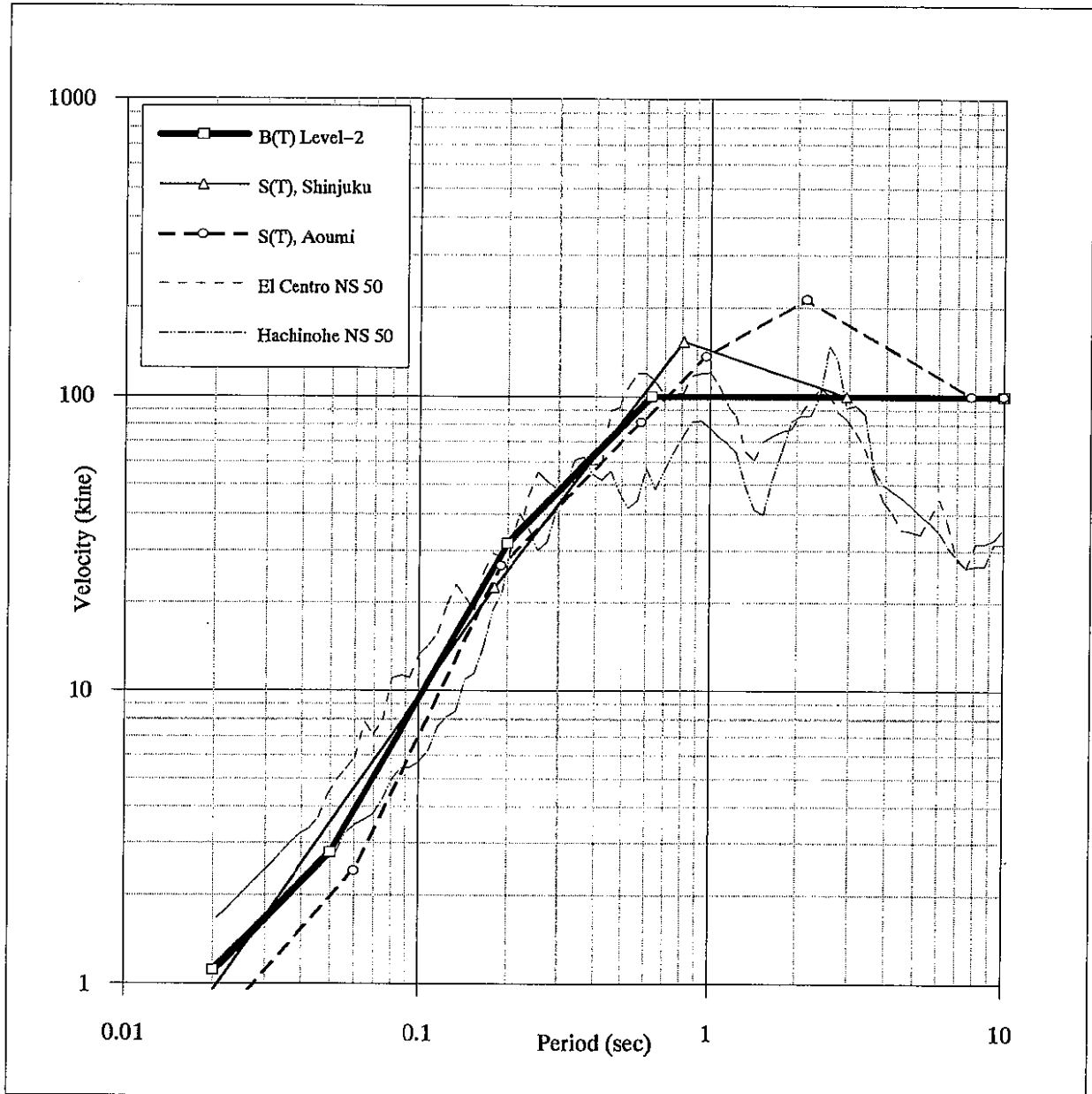
(参考文献)

- 1) 建設省：建設省総合技術開発プロジェクト平成2年度研究開発概要報告書[鉄筋コンクリート建造物の超軽量・超高層化技術の開発]、平成3年3月
- 2) 臨海部構造安全委員会入力地震動部会：臨海部における大規模建築物群の総合的な構造安全性に関する検討のうち動的設計用入力地震動の設定に関する検討、平成4年3月、日本建築防災協会



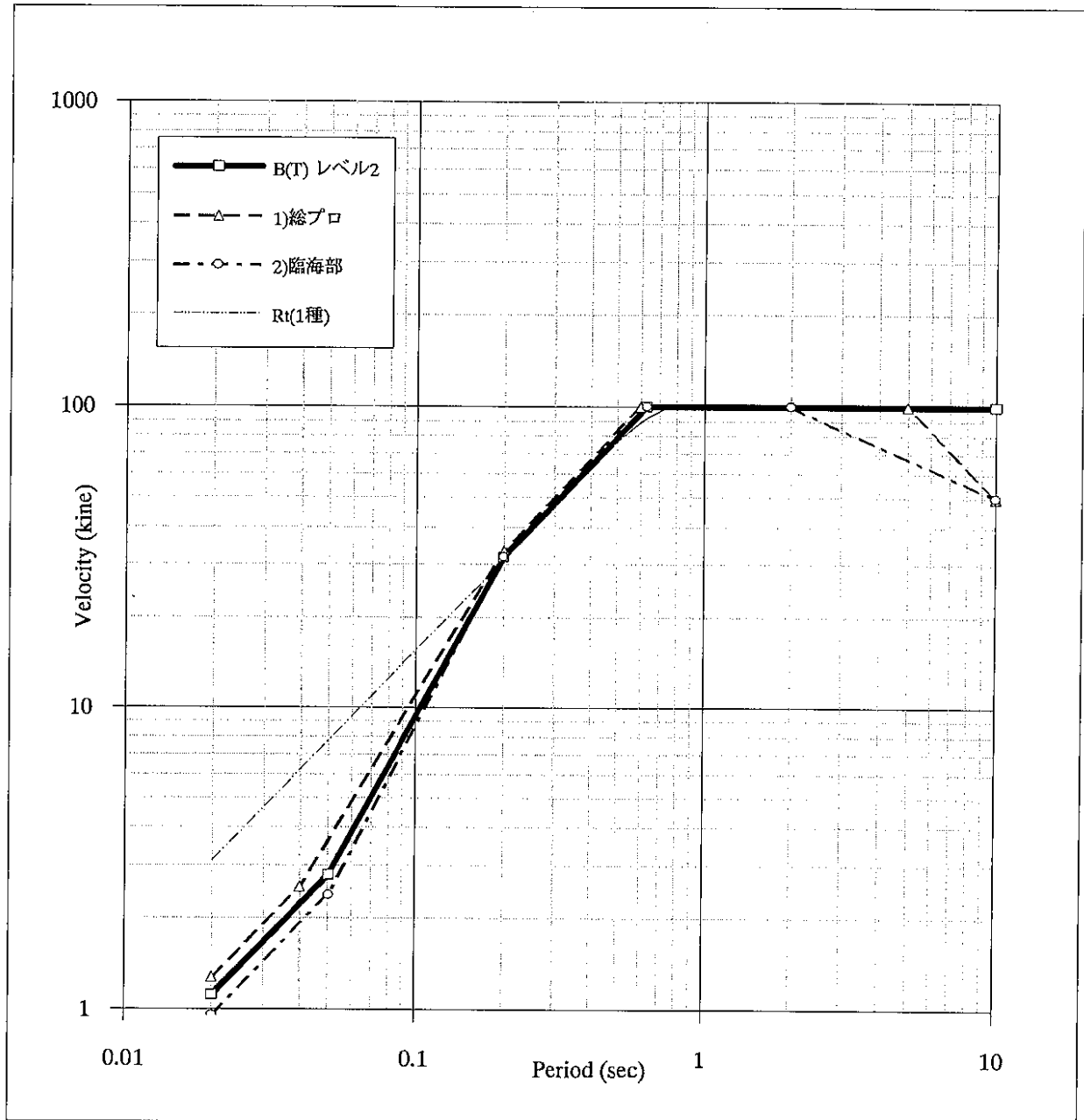
付図6 設計用応答スペクトル(レベル1)

Level-1		Shinjuku $T_g=0.368\text{sec}$, $V_e/V_b=0.544$				Aoumi, $T_g=0.970\text{sec}$, $V_e/V_b=0.413$			
T (sec)	B(T)(kine)		G(Ti)	S(T) (kine)	Sa(gal)	Ti (sec)	G(Ti)	S(T) (kine)	Sa(gal)
0.02	0.63662	0.02	1.32	0.840338	264	0.02	1.03	0.655718	206
0.04	1.27324	0.18	1.32	22.68913	792	0.06	1.03	2.645207	277.0054
0.18	17.18873	0.59	1.73	86.5	921.1789	0.19	2.29	24.9173	824
0.523599	50	1.84	1	50	170.7387	0.58	1.60	76.06333	824
5	50	5	1	50	62.83185	0.97	2.29	114.5	741.675
10	35.35534	10	1	35.35534	22.21441	1.55	2.29	114.5	464.145
						4.85	1	50	64.77511
						5	1	50	62.83185
						10	1	35.35534	22.21441



付図7 設計用応答スペクトル(レベル2)

Level-2		Shinjuku $T_g=0.368\text{sec}$, $V_e/V_b=0.544$				Aoumi, $T_g=0.970\text{sec}$, $V_e/V_b=0.413$			
T(sec)	B(T)(kine)	Ti(sec)	G(Ti)	S(T)(kine)	Sa(gal)	Ti(sec)	G(Ti)	S(T)(kine)	Sa(gal)
0.02	1.114085	0.02	0.85	0.946972	297.5	0.02	0.63	0.701873	220.5
0.05	2.785212	0.18	0.85	22.4833	784.8152	0.06	0.63	2.417369	253.1462
0.2	31.83099	0.81	1.64	153.4094	1190	0.19	2.12	26.67119	882
0.628319	100	2.94	1	100	213.7138	0.58	1.48	81.4173	882
10	100	10	1	100	62.83185	0.97	2.12	136.1634	882
						2.14	2.12	212	622.4464
						7.76	1	100	80.96888
						10	1	100	62.83185



付図8 各種設計用スペクトルの比較(レベル2)

B(T)		1) 総プロ			2) 臨海部		
T(sec)	B(T)(kine)	T(sec)	Sv	Sa	T(sec)	Sv	Sa
0.02	1.114085	0.02	1.27324	400	0.02	0.95493	300
0.05	2.785212	0.04	2.546479	400	0.05	2.387324	300
0.2	31.83099	0.2	33.33333	1047.198	0.2	31.83099	1000
0.628319	100	0.6	100	1047.198	0.628319	100	1000
10	100	5	100	125.6637	2	100	314.1593
		10	50	31.41593	10	50	31.41593