

ローカルサイトエフェクトを考慮した 設計の現状と今後の方向性

鈴木 猛康¹・三輪 滋²

¹正会員 工博 中央復建コンサルタンツ (〒103-0011 東京都中央区日本橋大伝馬町 2-11)

²正会員 飛鳥建設技術研究所 (〒270-0222 千葉県東葛飾郡関宿町木間ヶ瀬 5472)

ローカルサイト・エフェクトが現行の設計法の中で、どの程度まで反映されているかに関して、いくつかの基準類や研究報告を取り上げて整理した。いわゆる工学的基盤面より上の一次元的な増幅に関しては、どの基準類でも取り上げられているものの、深い地盤構造や表層地盤の不整形性に関しては、一部の基準や指針案で取り上げられ始めているというのが現状である。これらの現状をふまえて、ローカルサイト・エフェクトをどのように設計法に反映させるべきか、ローカルサイト・エフェクトを実務設計で導入するにはどのようなシステムが必要とされるか等、今後の方向性について展望を示した。

Key Words : *Local site effect, design code, irregularly bounded surface ground, site characterization, amplification, prospectives*

1. はじめに

湖沼の埋め立て地盤や旧河川跡ならびに盆地構造の境界部等で局所的に地震被害が集中することは、地震被害調査に基づく周知の事実として古くから知られており、このような特殊な地盤条件下では特別な検討を要することが、現行のほとんどの設計指針の中で詠われている。しかしながら、特殊地盤条件下における具体的な設計法について、記述されている指針類は少なく、取り扱っているローカルサイト・エフェクトは、ほとんどがいわゆる工学的基盤から上での一次元的な地震動増幅の範囲に留まっている。そこで、本稿ではまず、工学的基盤よりも深い地盤構造や不整形性（地形効果、地盤条件急変部といった表現で表されるものも含めて）の影響に着目して、現行の指針類を整理、検討することとした。次に、この検討で得られた現行の設計法におけるローカルサイト・エフェクトの現状を踏まえて、ローカルサイト・エフェクトを実務設計でいかにしたら考慮できるか、あるいはローカルサイト・エフェクトを考慮した設計がいかにしたら可能となるかについて、私見ではあるが今後の方向性について展望の形でまとめることとした。

2. 現行設計法での解釈

表-1 に現行の設計法に見られるローカルサイトエフ

ェクトに関する記述を整理して示す。

現行の設計法において、ローカルサイトエフェクトのうち、設計上の課題として主に認識されているものは、構造物の支持層あるいは S 波速度 400m/s 程度のいわゆる工学的基盤よりも上の地震動とその影響の検討である。なかでも、主にいわゆる工学的基盤（あるいは耐震設計上の基盤面と称される）から上の表層地盤の一次元的な増幅については、程度の違いはあれ各規準に取り入れられている。これについては、地盤分類の違いで震度や応答スペクトルを設定するという方法で古くから考慮されているが、最近の基準類では、それぞれの地点の地盤特性に応じて、出来るだけ詳細な検討として一次元的な増幅に関する動的解析を実施することが推奨されるようになってきている。この背景には、これらの検討に対しては、そのために必要な動的な地盤特性データも、地盤調査、室内試験、既往の調査試験結果のデータベースなどから、ある程度評価可能となっていることがあると考えられる。

一方、地盤の不整形性の影響は、近年の地震被害事例とそれを説明する解析的な研究などから、地震被害の有無に大きな影響をおよぼすことが、明らかとなってきている。しかし、これらの影響の程度に関しては、まだ十分には規準類に反映されている状況ではない。これらは不整形性の影響が、例えば不整形地盤の規模、不整形性の程度、地震動の周期・位相により増幅の場所や程度が変わるなど、様々なパラメータに支配され、簡単な指標で評価できないことに起因していると考えられる。

表-1 各種耐震設計指針とLSEに対する取り組みについて

	発刊	発刊者	入力地震動、地震動増幅に関する取り扱い全般、断層近傍の地震動	不整形地盤に対する取り組み			側方流動・斜面崩壊等	特記事項
				地盤急変部の定義	表層地盤の不整形性、盆地構造、深部構造の記述	LSE特性値の導入状況		
ガス導管耐震設計指針	1983	(社) 日本ガス協会	(1)地域別補正係数を乗じて水平設計震度を設定する。 (2)地盤周期と波長の関係を図示している。	地盤の傾斜角が5%以上の地盤	縮手等の変形収量評価の観点から、埋設条件を4タイプに分類するとともに、埋設条件を構成する具体的な不整形地盤を整理している。	基礎傾斜地盤のひずみ算定式を導入した。ただし、この式は地盤の水平方向の連成効果は無視し、成層地盤を離散化して得たもの。	なし	
共同溝設計指針・同解説	1986	(社) 日本道路協会	(1)国内を3つの地域に区分し、地域に応じた設計応答速度スペクトルを与えている。 (2)地盤種別を地盤の特性値によって4種類に分類しているが、基礎が極めて深く地盤の特性値が決めがたい場合には、沖積層および洪積層の厚さから地盤種別を分類する。	地盤の固有周期が単調に変化し、かつ200m以内で地盤の固有周期が0.3秒以上と厚な地盤	なし	地盤条件急変部では割り増し係数βによって断面力を割り増す。 $\beta = 1.2\sqrt{\Delta T - 0.3} + 1.0$ ここでΔTは地盤の固有周期の差である。	なし	
駐車場設計・施工指針・同解説	1992	(社) 日本道路協会	(1)地域別補正係数、地盤別補正係数ならびに深度別補正係数を乗じて、設計震度を算定する。 (2)設計入力地震動は、耐震設計上の基礎面で設定している。	なし	架橋地点と良く似た地形や地盤条件の地点で観測された強震記録を振幅調整して、入力地震動を設定する。	なし	なし	
道路橋示方書同解説 V 耐震設計編	1996	(社) 日本道路協会	(1)地域別補正係数を設定して設計震度を算定する。 (2)設計入力地震動は、耐震設計上の基礎面で規定。 (3)地盤の特性値によって地盤種別を3種類に分類。 (4)保新法で用いる標準加速度応答スペクトルはプレート境界型の大規模地震を想定したタイプIならびに内陸直下型地震を想定したタイプIIに2分し、さらに地盤種別によって与えている。		架橋地点と良く似た地形や地盤条件の地点で観測された強震記録を振幅調整して、入力地震動を設定する。			タイプ2地震動の加速度応答スペクトルは、兵庫県南部地震の地震記録に基づいている。
水道施設耐震工法指針・解説	1997	(社) 日本水道協会	(1)工学的基礎で規定。 (2)地域係数。 (3)地盤種別で増幅を評価、水平震度、設計用応答スペクトル、地震動最大値に反映。			割り増し係数1.2 (判断基準は示されていない)	液状化による地盤のひずみを護岸近傍域、埋立地や河川流域、傾斜地盤あるいは傾斜した人工改変地盤での液状化にかかわらない地盤のひずみを規定。	液状化による地盤変位と地盤ひずみに関しては、兵庫県南部地震後の調査、研究を取り入れた最新の情報を網羅。
下水道施設の耐震対策指針と解説	1997	(社) 日本下水道協会	工学的基礎で地震動を規定、地域係数を採用。			ガス導管耐震設計指針の基礎傾斜地盤のひずみ算定式に基づき、管の抜けだし量を算定。	・護岸近傍の液状化地盤の永久ひずみ、護岸線より100m以上離れた液状化地盤の永久ひずみは1.2%とする。 ・非液状化の傾斜地盤における永久ひずみを1.3%とする。	永久ひずみの設定については、兵庫県南部地震後の調査、研究を取り入れた。
鉄道構造物等設計標準・同解説(耐震設計)	1999	(財) 鉄道総合技術研究所	(1)工学的基礎で規定。 (2)近傍に活断層がある場合等価震源距離で応答スペクトルを補正。 (3)動的解析で表層の増幅を考慮することを示している。 (4)地盤種別ごとに応答ベクトルを規定。 (5)液状化を考慮した応答ベクトルを規定。		地表面や耐震設計上の基礎面が大きく変化している場合には、地表面設計地震動にこの影響を考慮するとして不整形性の影響を考慮する条件(傾斜角、層厚、高さ)を提示。	スペクトルの補正あるいは3次元動的解析などの不整形性の影響を補正する方法を3つ提示。	・側方流動の影響を側方流動による地盤変位を地盤ばねを介して構造物に作用させることで考慮。 ・変位の求め方も規定。	兵庫県南部地震
港湾施設の技術上の基準・同解説	1999	(社) 日本港湾協会	(1)地域係数。 (2)工学的基礎で規定。 (3)地震動をプレート内地震とプレート境界地震とに区別して設定。 (4)地盤の動的解析で検討。 (5)地盤種別で検討、震度を補正。		解析的に考慮。		判断の指標として事例を表示。	
建築基準法			(1)地域係数。 (2)耐震設計上の基礎面で規定。 (3)振動特性係数。					
設計用入力地震動作成手法技術指針(案)	1992	(財) 日本建築センター	(1)地域係数。 (2)工学的基礎の応答ベクトルとして規定。 (3)増幅特性係数。 (4)液状化補正係数。		盆地構造などの深い構造の影響の補正、地形効果の補正について記述。	やや長周期補正係数。 地形効果補正係数。(具体的な数値は示されていない)		
建設省総合技術開発プロジェクト「大都市地域における地震防災技術の開発」地震動増幅危険度評価(建築)分科会報告書	1998	(財) 国土開発技術センター	なし		地形の不整形性を地表面形状と地層内部の境界面に関する不規則性に二分し、それぞれの代表的なものとして崖地形、沖積谷地形を取り上げその効果を評価する手法を提示。	簡易法、やや精算的手法として ・崖地形補正係数 ・沖積谷補正係数		
研究報告書-相互作用効果の耐震設計への導入	1992	(社) 土木学会耐震工学委員会動的相互作用小委員会	L-1地震動(設計耐震期間中に生じる可能性の高い中規模地震に対応する地震動)の場合、水平成層な地盤に対し表層地盤と基盤層のインピーダンス比の関数として増幅係数を設定。		L-1地震動(設計耐震期間中に生じる可能性の高い中規模地震に対応する地震動)に対して片側傾斜、両側傾斜の不整形地層による局所的な増幅を考慮。	構造物の固有周期、地盤の卓越周期、最大増幅率から構造物周期をパラメータとした局所的な地震動増幅特性の補正係数を設定。		
地下構造物の免震設計マニュアル(案)	1998	建設省土木研究所、他	なし	基礎の傾斜が顕著な地盤、硬質・軟質地盤の境界地盤改良や重量構造物によって地盤の卓越周期が著しく変化する地盤。	不整形表層地盤の地震応答解析を実施することを原則としている。	LSE特性値の算定は、表層地盤の地震応答解析を実施することを原則としている。	とくに記述なし(液状化発生が想定される地盤では免震構造は適用しない)	建設省官民共同研究の研究成果。

地震基盤を基底とするような深い地盤構造の不整形性の影響（工学的基盤より深い部分の盆地構造などの影響）はあまり考慮されていないのが現状である。これは、深い地盤構造が東京や大阪などの大都市およびその周辺でようやく最近明らかになりつつあるという状況で、十分なデータがそろっていないこと、堆積層表面波等の影響は研究的には以前から指摘されていたものの、兵庫県南部地震の震災の帯にみられるような現象が最近になってはじめて広くクローズアップされたのが現状であること、などから個々の事例に対してその影響を詳細に検討する以外には、簡易な方法として評価するのが難しく、まだ規準類に十分に反映されていないためと考えられる。一方で設計手法の（案）の中には、その評価は十分ではないにしても、やや長周期のスペクトル成分を補正するという形でその影響を取り入れる試み¹²⁾も見られる。

表層地盤の地形効果（工学的基盤の傾斜や、地表面の傾斜）、地盤急変部などの浅い地盤の不整形性に関しても、まだ十分に検討手法を示していない規準が多い。これは、影響がどのような条件で生じるのか、あるいは生じないのかが明瞭には示されていないこと、さまざまな形状を簡易な手法で検討するには、その適用範囲が限定されること、解析的な検討にはモデル化や計算時間という面で複雑であること、構造物の建設地点以外では地盤情報が不足していることなどが、その要因と考えられる。ただし、先駆的な規準として鉄道構造物等設計標準・同解説耐震設計⁷⁾には、不整形の影響を補正する方法が示され、また建築分野でも詳細なパラメトリックスタディーから補正方法を提案した研究¹³⁾が見られる。

液状化による側方流動については、その変形が構造物へ与える影響が大きいと、地震動の変化というよりも、側方流動変位として規準に取り入れられている。兵庫県南部地震において沿岸部の液状化による被害が顕著であり、それ後に改訂された基準類⁵⁾⁶⁾⁷⁾においては、これらの変位量などについて兵庫県南部地震後の調査・研究を取り入れてそれを反映したものが多く。

また、地中埋設構造物の基準には、地盤急変部での地震動増幅に注目した補正を示したものが見られる^{1),2),6)}。

3. 実務設計へのローカルサイト・エフェクト導入に関する展望

深い地盤構造や表層地盤の不整形性等ローカルサイトエフェクトの実務設計への導入が必要であることは、これまでの地震被害や被害の発生シミュレーションより明らかである。しかし、ローカルサイト・エフェクトを考慮した実務設計となると、現状では高度な解析技術が必要不可欠となるだけでなく、設計対象構造物の周囲に留まらず、地盤の不整形性の程度によっては極めて広域の

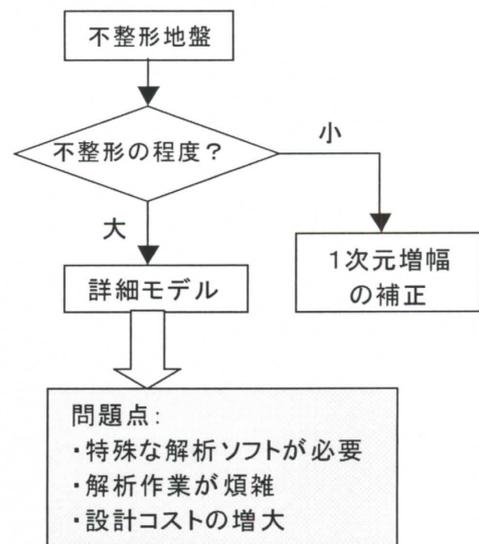


図-1 不整形地盤の設計への導入に関する問題点

地盤を検討対象としなければならないこととなり、高度な解析、地盤調査に見合った設計コストが発生することとなって非現実的な話となる。そこで、当該構造物の設計とは別途、設計に対するローカルサイト・エフェクトの導入を支援するシステム、すなわち当該地域の地盤情報、強いてはローカルサイトエフェクトを考慮した地震動評価システムの構築が必要と考える。

設計に対して不整形地盤の影響を取り入れる際のフローを、図-1に模式的にまとめてみた。まず、不整形地盤であっても、その不整形性の程度が比較的小さい場合には、現行の指針の中でも取り扱われているように、工学的基盤上の表層地盤の1次元増幅の結果を補正する形で、不整形性の影響を評価することが可能と思われる。しかし、不整形性の程度が極めて大きい場合には、1次元増幅の結果に1.1とか1.2の係数をかけるような補正では、その補正係数が導かれた過程、条件を考えると、決して正しい評価とは言えない。したがって、やはり有限要素法、差分法等の詳細モデルを用いて表層地盤をモデル化し、地震応答解析を実施して、その表層地盤中の地下構造物、あるいは表層地盤上の地上構造物の応答を評価することが必要となる。

しかしながら、このような設計上のアプローチを実務で行うことはあまりにも非現実的である。ローカルサイト・エフェクトの解析手法については、近年の解析技術の発展と緻密な地震観測結果を用いた検証によって、かなり整備されてきたと思われる。しかし、これらの解析手法を適用する際の地盤条件は、必ずしも整備されているとは言えない。また、個別の構造物設計のために、地盤調査が行われ、地震応答解析が行われているが、それが別の構造物設計にあまり活かされていないのが現実である。とくに事業者が異なる場合には、データベースの共有はほとんどないはずである。

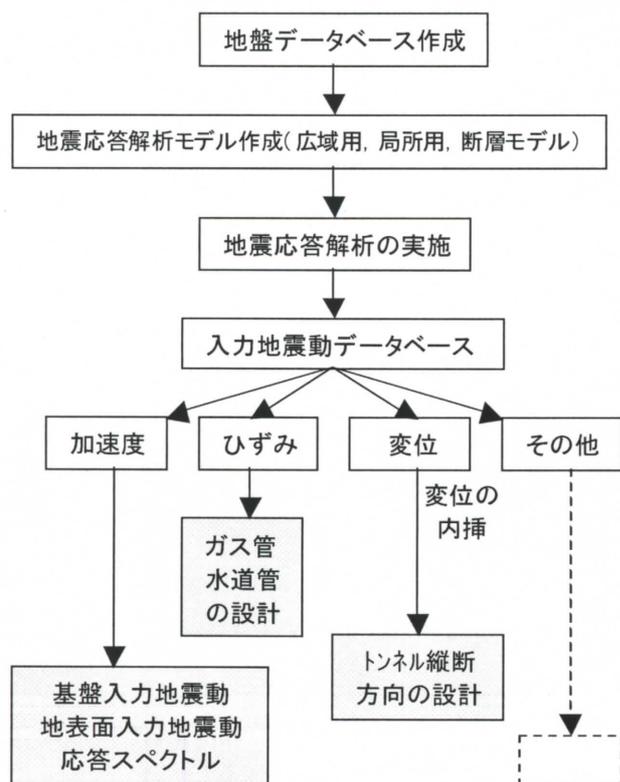


図-2 入力地震動データベース活用のイメージ

図-2はローカルサイト・エフェクトを考慮した設計を実務で可能とするための理想的なフローを示している。すなわち、まずは地盤データを一元管理してデータベース化する。次に、この地盤データベースを用いて、広域モデル（地下深部、広域の領域をモデル化したもの）と局所モデル（領域にして数百m～せいぜい1km四方程度の不整形表層地盤）を構築する。広域、局所それぞれの地盤モデルは、目的とするアウトプットによって多少異なるため、複数必要となると思われる。例えば、比較的面積の狭い構造物の設計では、いわゆる不整形性を考慮した当該地点の入力地震動波形や応答スペクトルが与えられていればよいだろう。したがって、設計で取り扱うべきべき波動の波長を包含できる程度のメッシュ間隔を以って、不整形性を考慮すべき領域をモデル化して地震応答解析を実施し、工学的基盤面や地表面等の応答結果を入力地震動データベースとして保存しておき、必要に応じてこのデータベースから必要な入力地震動を取り出して使用するわけである。このようにすれば、当該構造物の設計の都度、広域の地震応答解析を行う必要はなくなる。近くで地震断層が想定され、この断層破壊による波動の伝播特性より地下深部の不整形構造が重要となるケースでは、モデル化の領域はさらに拡大するであろうし、解析方法も異なってくる。

一方、トンネル等の地中線状構造物のように、トンネル縦断方向に沿った地震時地盤ひずみや応答変位が必要となる場合には、上記データベースより内挿によって

設定した座標の地盤変位等を与えれば、地下構造物の地震応答を評価することが可能である。

設計において不整形地盤として取り扱うべき地域を設定し、上記のようなシステムが自治体等によって整備されれば、ローカルサイト・エフェクトは円滑に実務設計に取り込まれるであろうが、そうでなければ、解析法の開発や地震被害の原因究明等、研究の範囲内に留まり、なかなか実設計へは反映され難いと考えられる。

4. まとめ

いわゆる工学的基盤面より上の一次元的な増幅に関しては、どの基準類でも取り上げられているものの、深い地盤構造や表層地盤の不整形性に関しては、一部の基準や指針案でやっと取り上げられ始められたというのが現状である。これらの現状をふまえて、ローカルサイト・エフェクトの実務設計への導入を円滑に図る方法として、地盤データの一元管理によるデータベース化、それに基づく入力地震動支援システム等、データベースの早期導入を提案した。

参考文献

- 1) (社)日本ガス協会：ガス導管耐震設計指針，1983.
- 2) (社)日本道路協会：共同溝設計指針・同解説，1986.
- 3) (社)日本道路協会：駐車場設計・施工指針・同解説，1992.
- 4) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，1996.
- 5) (社)日本水道協会：水道施設耐震工法指針・解説，1997.
- 6) (社)日本下水道協会：下水道施設の耐震対策指針と解説，1997.
- 7) (財)鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説，1999.
- 8) (社)日本港湾協会：港湾施設の技術上の基準・同解説，1999.
- 9) (社)土木学会耐震工学委員会動的相互作用小委員会：研究報告書-相互作用効果の耐震設計への導入，1992.
- 10) 建設省土木研究所，他：地下構造物の免震設計法マニュアル(案)，1998.
- 11) (財)日本建築センター：建築物の構造規定-建築基準法施行令第3章の解説と運用，1994.
- 12) (財)日本建築センター：設計用入力地震動作成手法技術指針(案)，1992.
- 13) (財)国土開発技術研究センター：建設省総合技術開発プロジェクト「大都市地域における地震防災技術の開発」地震動増幅危険度評価(建築)分科会報告書，1997.