

耐震アセスメント技術の開発

Development of Earthquake Assessment Technology

佐藤 吉孝、中島 晃、井上 尚達

Yoshitaka Sato, Akira Nakashima, Naotatsu Inoue

日揮グローバル株式会社 オイル&ガスプロジェクトカンパニー
デザインエンジニアリング本部 シビルエンジニアリング部

JGC Corporation, Oil & Gas Project Company,
Design Engineering Division, Civil Engineering Department

要旨

相次ぐ震災を受けて、世界の耐震設計基準は米国基準（ASCE 7）を中心に高度化し、社会の関心も高まっている。このようなニーズに応じて耐震アセスメント技術を習得した。その内容は、(1)確率論的地震ハザード評価、(2)地盤応答解析、(3)地盤構造相互作用、(4)液状化評価の4項目に分類される。本稿ではこのうち(1)確率論的地震ハザード評価および(2)地盤応答解析について概説する。

Abstract:

Amid continuous earthquake disasters, seismic design codes are becoming more stringent and complicated following the strengthening of American design codes, e.g., ASCE 7, and are attracting the attention of societies. In response to these market demands, we have developed the seismic assessment engineering capabilities, i.e., PSHA (Probabilistic Seismic Hazard Assessment), SRA (Site Response Analysis), SSI (Soil Structure Interaction) and LA (Liquefaction Assessment). From among these, this report discusses the PSHA and SRA.

1. 背景

相次ぐ震災を受けて、世界の耐震設計基準は米国基準を中心に高度化し、社会の関心も高まっている。既往の地震ハザードマップによると、フィリピン、インドネシア、モザンビークや米国西海岸は強地震地域にあたり、プラント建設においては、地震対策による上部構造や基礎の工事数量増加に加えて、地盤の液状化や斜面安定に講じる対策費用も莫大なものとなる。耐震アセスメント技術を活用し精緻な解を導き出すことは、プラントの信頼性向上へ繋がるとともに、対策の最適化を図ることで CAPEX の最適化を可能にする。そこで、耐震アセスメント技術の開発を実施した。

2. 耐震アセスメントの関連図

一連の耐震アセスメントの関連図を Fig.1 に示す。

- (1) 確率論的地震ハザード評価 (PSHA : Probabilistic Seismic Hazard Assessment)
過去の地震履歴データを基に、確率論的手法を用いて対象地点深部の基盤における応答スペクトルを評価する。
応答スペクトルとは、地震の強度特性であり、Fig.2 に示すように、様々な固有周期を持つ上部構造に対し、どの程度の揺れの強さ(地震加速度)を生じさせるか示すものである。
- (2) 地盤応答解析 (SRA : Site Response Analysis)
基盤の応答スペクトルから対象地点の地盤特有の応答を考慮し、地表面における応答スペクトルを評価する。Fig.2 に示すように、地表面の応答スペクトルは基盤のものに対し増幅する。
- (3) 地盤構造相互作用 (SSI : Soil Structure Interaction)
構造物は地盤に支持されるため、地震時には構造物と地盤の間で力やエネルギーのやり取りが生じる。これを地盤構造相互作用と呼ぶ。通常的设计では、基礎部を固定した簡易モデルにより計算を行ない地盤構造相互作用は無視される。しかしながら大型タンクのような重量構造物では地盤構造相互作用は無視できなくなる。
- (4) 液状化評価 (LA : Liquefaction Assessment)
地表面の地震加速度より地盤の液状化可能性を評価する。液状化可能性がある場合、設備の要求性能に応じて、地盤改良あるいは杭基礎などの対策が必要となる。

上記4項目にはそれぞれ異なるアセスメント技術を必要とする。本稿では以下、新たに開発した、(1)確率論的地震ハザード評価、(2)地盤応答解析について概説する。

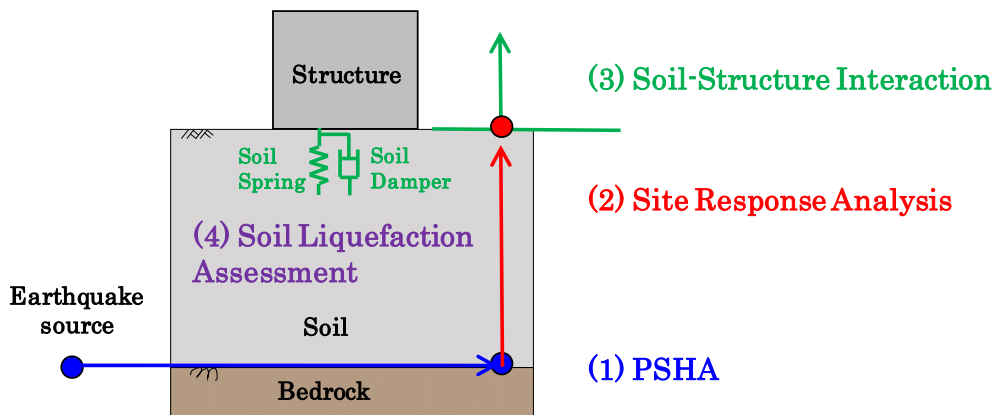


Fig.1 Schematic Flow of Seismic Assessment

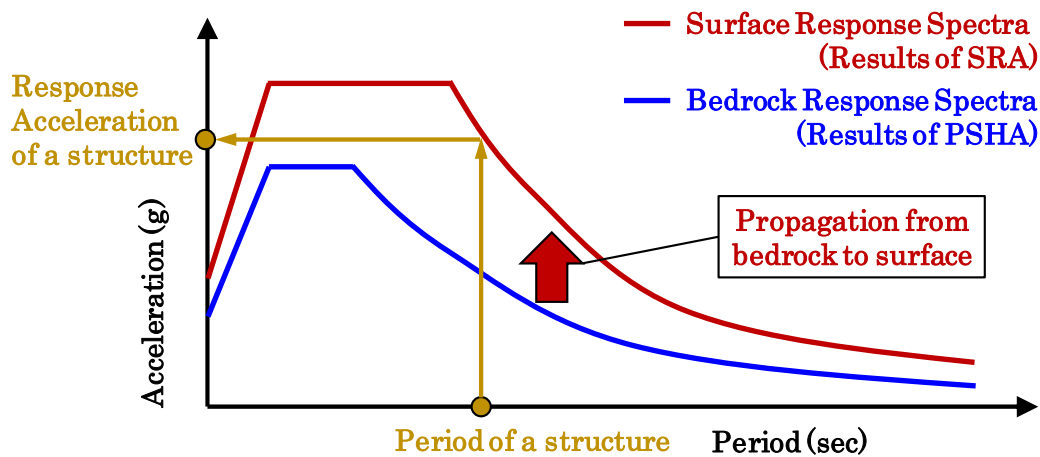


Fig.2 Sample Response Spectra

3. 確率論的地震ハザード評価

地震ハザード評価とは、震源地で発生した地震波が地殻を伝わる過程を解析して、対象地点深部の基盤における応答スペクトルを評価するものである。

地震ハザード評価はプラント施設の耐震設計の根幹をなすものであり、従来は事業者であり操業者であるプラントオーナーが実施し、コントラクターはその評価結果を設計条件として見積りおよびEPCを遂行してきた。しかしながら近年では、コントラクターがPre-FEED、FEEDを請負い、プラントオーナーに代わって地震ハザード評価を行うニーズが増えてきた。このような状況において、当社における地震ハザード評価の強みは、タイトなスケジュールを鑑みた業務遂行や事業採算を見据えた合理的な評価であり、これによりプラントオーナーへ大きな付加価値を提供できる。

地震ハザード評価には、特定の地震源における最大規模の地震による地震強度のみを評価する決定論的手法と、対象地点に対して影響を及ぼしうる全ての地震源と規模を考慮して地震強度を評価する確率論的手法がある。本開発では客観性と難易度の高い確率論的手法に注力した。なお、決定論的手法は確率論的手法の一形態である。

確率論的地震ハザード評価の手順を以下に示す。

(1) 対象地点周辺の地震強度、地質および表層地盤性状に関する文献調査

既往の研究論文を収集、分析する。その結果を用いて、以下(2)(3)(4)(5)の各ステップにおいて比較検証を行ない、我々の評価の妥当性を判断する。これは客先および第三者に説明する際に根拠を示すための準備となる。既往の研究には様々な見解が存在するケースがあり、設計には採択の判断が必要となる。また、最新の知見には常に目を配らなければならない。

(2) 数値情報の入手、分析

米国地質調査所 (USGS) 等が公開している地震データを手入、分析し、地震動評価モデルに反映する。データ処理は OpenQuake Hazard Modeler's Toolkit というオープンソースソフトウェアを用いて行う。

(3) 地震ハザード（震源・地震波伝搬・不確定性）評価モデルの構築

文献調査および地震データ分析結果を踏まえ、地震ハザード評価モデルを **OpenQuake Engine** を用いて構築する。各々の地震データを相関付ける評価モデルには、既往の研究を参照し、複数ある中から合理的なものを選択する。

(4) 対象地点における地震強度計算

対象地点に対して影響を及ぼしうる全ての地震源と規模、不確定性を考慮し、**Fig.3** のような基盤の応答スペクトルを算出する。

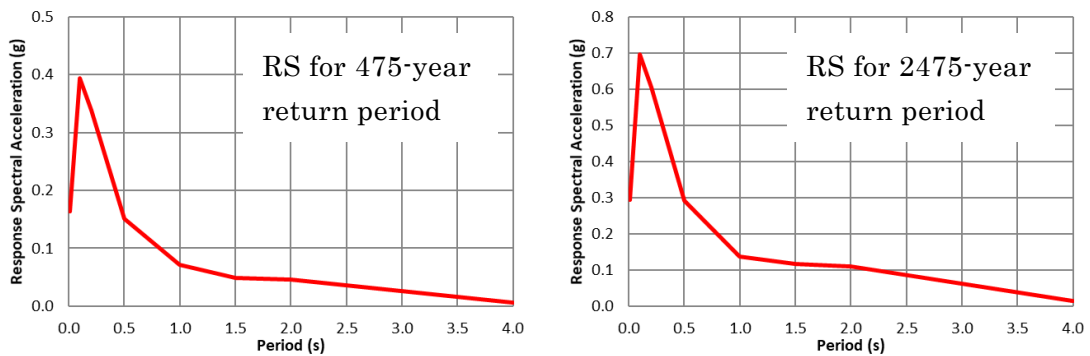


Fig.3 Bedrock Response Spectra at Project Site

(5) 地震源の影響程度の評価分析

対象地点の地震強度に及ぼす各地震源の寄与率を評価分析する。**Fig.4** に分析例を示す。この例で PGA (Peak Ground Acceleration・地表加速度) に対して影響が大きいのは、中規模 (M5.0-M6.5) で近距離 (50 km 未満) の地震源であることを示している。

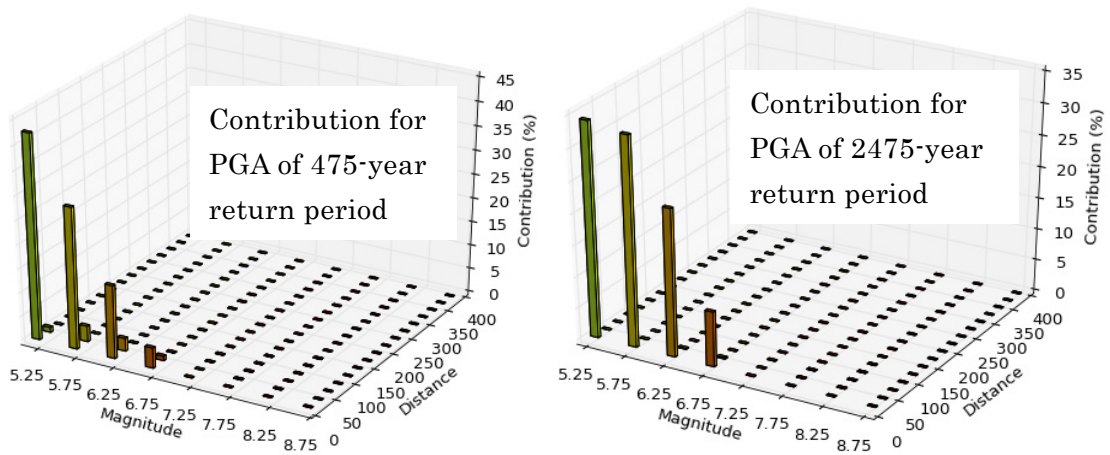


Fig.4 Deaggregation Plot

4. 地盤応答解析

地盤応答解析とは、対象地点深部の基盤に到達した地震波が表層地盤で増幅される過程を解析し、地表面における地震強度を評価するものである。前述の確率論的地震ハザード評価と異

なり、地盤増幅効果の評価はコントラクターが実施してきたが、従来手法では地盤特性を元にコード規定 (ASCE 7) の評価式を用いて簡易的に行なう。これに対し、地盤応答解析では入力された地震波が地盤の影響を受けて増幅されるプロセスをより精緻に評価することが可能となる。解析結果は、上部構造の設計加速度の算出のみならず、地盤の液状化評価にも用いる。

地盤応答解析の手順を Fig.5 および以下に示す。地盤応答解析の条件および解釈は ASCE 7 (2016 年版) Chapter 21 の記載項目に従う。

- (1) 確率論的地震ハザード評価の結果から、過去の類似地震 7 波の時刻歴加速度データを選定し、基盤の応答スペクトルへマッチングして模擬地震波を作成する。これは ASCE 7 では露頭基盤波 (Outcrop Motion) と定義されている。
- (2) 半無限に広がる成層地盤を想定した土層モデルを作り、Fig.6 に示す各土層の地盤材料特性 (剛性-ひずみ、減衰-ひずみ曲線) を設定する。
- (3) 基盤に模擬地震波を入力して地盤応答解析を実施し、地表面における応答を出力する。地盤応答解析には以下 2 つの手法がある。
 - 等価線形地盤モデルに基づく周波数領域解析 (SHAKE)
 - 非線形地盤モデルに基づく時刻歴応答解析

SHAKE の方が簡便で計算時間は早いものの、一般に地盤ひずみが大きく非線形が顕著になる場合は等価線形地盤モデルの精度が落ちるとされ、時刻歴応答解析を必要とする。

- (4) 地表面の加速度出力から応答スペクトルを作成する。ASCE 7-16 には地表面応答スペクトルに対する制限事項があり、これを満足することを確認する。
 構造物の耐震設計においては、対象構造物の固有周期を求め、地表面応答スペクトルを用いて設計加速度を算出する。

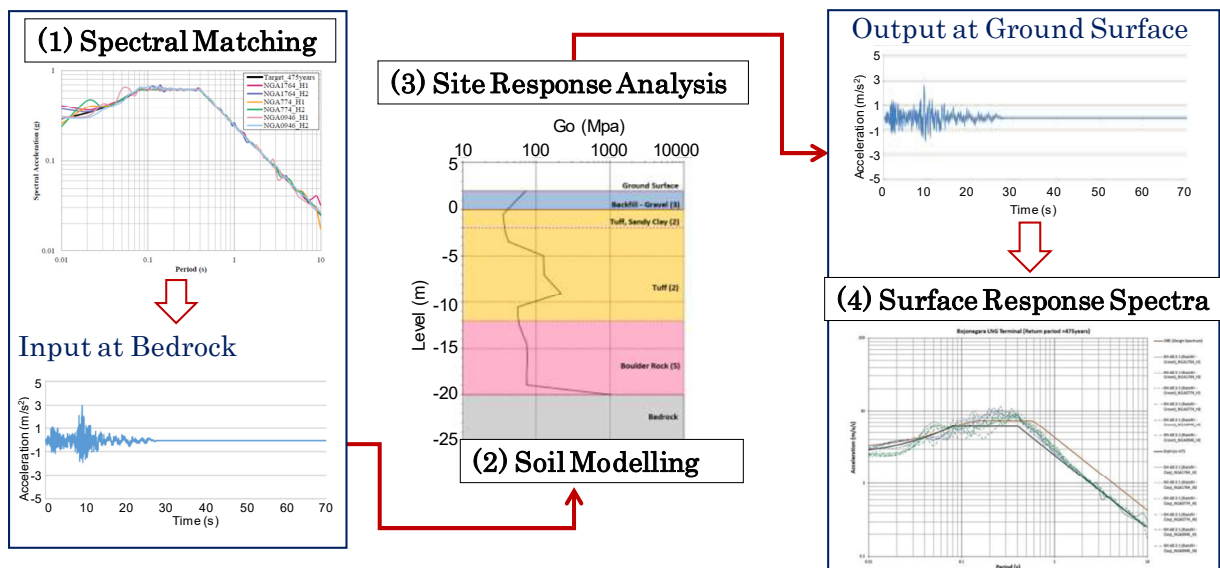


Fig.5 Schematic Flow of Site Response Analysis

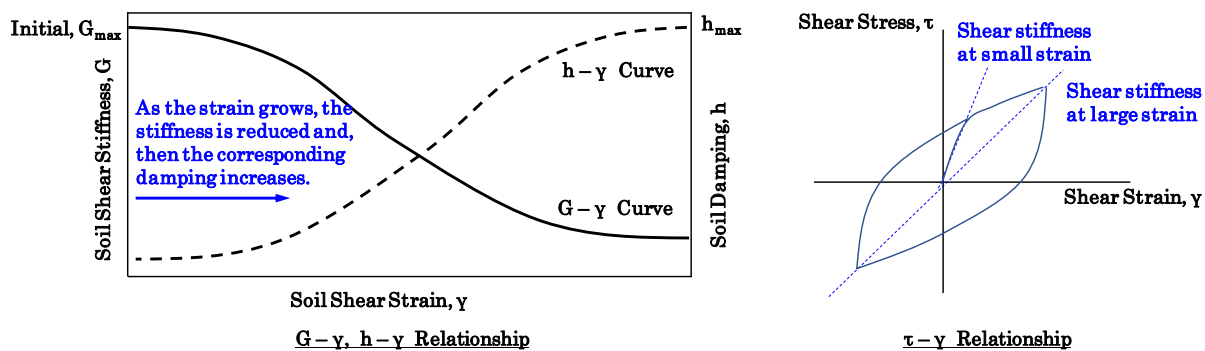


Fig.6 Soil Material Property

5. おわりに

本稿では、当社シビルエンジニアリング部が開発した耐震アセスメント技術 4 分野のうち、確率論的地震ハザード評価と地盤応答解析を紹介した。

このように当社は、EPC 遂行を見据え、理論的に合理的な耐震評価を実施することで、最適な耐震設計を可能としている。

参照：

ASCE 7： Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures, American Society of Civil Engineers