

地盤基礎構造物の耐震性能設計

井合 進

要 旨

本稿は、地中構造物、基礎、擁壁、土構造物などの地盤基礎構造物を対象として、耐震性能設計の概念に基づく新たな設計体系を総括的に展望したものである。この設計体系では、土や地盤が変形するという力学的特徴を考慮して、これらの構造物が地震時に示す変形形態と変形程度に着目する点に地盤工学的な特徴がある。その設計体系は、現在、発展途上にあるが、本稿では原則的な一般事項に杭式栈橋の具体例を追加する形でとりまとめた。

キーワード： 基礎構造物、地震、地盤災害、性能設計、耐震設計

1. はじめに

土構造物や基礎構造物などをはじめとする地盤工学に関わりの深い構造物の耐震設計では、震度法に代表される擬似静的極限釣合いに基づく従来の耐震設計法の限界を改善することをねらって、耐震性能を考慮した設計体系の導入の試みが各方面で行われている (SEAOC, 1995; PIANC, 2001)。この設計体系では、土や地盤が変形するという力学的特徴を考慮して、これらの構造物が地震時に示す変形形態と変形程度に着目する点に地盤工学的な特徴がある。現在、その設計体系は発展途上にあるともいえ、基礎的概念の共通認識、用語の統一などの基本的事項をはじめとして、解決すべき課題も多々残されているようである。本稿では、既往の地震事例に見られる土構造物や基礎の挙動に関して、その力学的ならびに機能上の特徴を再検討し、それらを踏まえて耐震性能を考慮した新たな設計体系を展望した。

本稿は、前報 (井合ほか, 2003) の概括的な内容に杭式栈橋の具体例を拡充する形で作成し、地盤基礎構造物の耐震性能設計の展望とした。

2. 土構造物・基礎の地震被害例とその特徴

土構造物や基礎の地震被害例には種々のものがあるが、その一例として、直杭式栈橋の地震被害例を Fig. 1

に示す。1995 年兵庫県南部地震における神戸

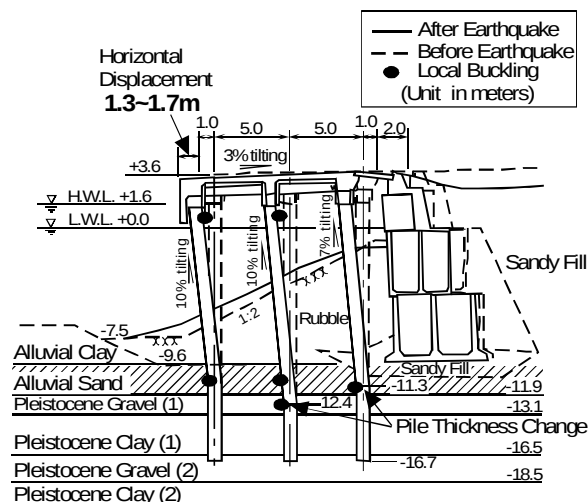


Fig. 1 Damage to a pile-supported wharf at Kobe Port during 1995 Hyogoken-Nambu earthquake

港高浜栈橋の被害である。直杭式栈橋の標準的な設計では、床版に加わる地震時慣性力を杭頭部に擬似静的に作用させ、地中埋設部への地盤反力を考慮して、杭に加わる曲げモーメントの算定などを行う。

地震による地盤変位による作用を無視するという点で、多くの杭基礎の設計とも共通する。1995 年兵庫県南部地震では、地中部にゆるい沖積砂層が存在していたこともあって、標準的な設計で想定しているものとは異なり、杭埋設部に対して地盤変位が新たな外力と

して作用する被害が発生した。

この事例からも理解されたとおり、地盤・構造物系の地震被害は、地盤条件によりその被害形態が著しく異なることが多い。また、土構造物や基礎の地震被害において、工学的観点ないし設計実務上の観点から地震被害とされるのは、著しい変形であって、崩壊ではないことが多い。したがって、このような構造物の耐震設計においては、力の極限釣り合いに基づく従来の設計法よりも、構造物の変位や限界応力状態に基づいて構造物の耐震性能を規定する設計法が適している。

また、構造物の機能面から見た場合には、個々の構造物としての機能に着目するだけでなく、並列システムとして機能する構造物系か、直列システムとして機能する構造物系かについて、大局的な特徴を把握しておくことも重要である。例えば、港湾の岸壁などでは、ある岸壁が被害を受けて使用困難になっても、それに隣接する岸壁の機能が維持されていれば、港湾全体としての物流機能が停止することはない。これは、高架橋で連続する道路や鉄道などの系において、一部区間の地震被害が物流全体系に著しい影響を与えるような直列システム群とは、対照的である。耐震性能設計における性能の規定においては、構造物の機能をこのような大局的なシステムとの関連で性格付けすることも重要である。

3. 耐震性能設計の流れ

以上のとりまとめから明らかとなっており、土構造物や基礎の耐震設計においては、設計における主要な評価対象として、地盤および構造物基礎の変形とこれに伴う構造物の変形および応力状態を設計パラメタとして考慮した設計法の導入が必要である。その際に、設計地震動強さのレベルを適切に定義し、そのレベルに応じた許容被害程度を明確に規定する必要がある。設計地震動強さとしては、以下のような２段階レベルの地震動を設計参照レベルとして導入することが多い：

レベル 1 地震動 (L1)：構造物の設計供用期間中に 1 ～ 2 度発生する確率を有する地震動

レベル 2 地震動 (L2)：構造物の設計供用期間中に発生する確率は低いが、大きな強度を有する地震動

L1 および L2 の両者を用いる 2 段階設計法は、1) L1 に対して設計で規定したレベルの使用性を確保し、2) L2 に対する被害形態および被害程度を明確化することをねらっている。この 2 段階設計法は、L2 に対する被害程度規準を満たすのみでは L1 に対する使用性を確保できない場合、ないしは L1 に対する設計のみでは L2 に対する耐震性能が確保できないなどの状況が想定される場合に有用であり、世界の中では地震活

動度が中ないし高レベルの地域がこれに該当する。わが国もこのような高レベルの地震活動度の地域に属していると考えられる。特に注意したい点として、L2 のように強地震動に対する設計のみでは、これより低いレベルの L1 地震動に対する耐震性能照査において、L2 に対するものよりも厳しく設定した L1 に対する被害程度規準が、自動的に満たされる保証がない点がある。

許容被害程度は、対象施設の利用形態・構造物システム全体としての機能確保などの諸条件を踏まえて規定し、Table 1 に示すように、あらかじめ構造被害と機能被害に分けて検討しておき、最終段階でこれらを総合的に判断して許容被害程度を設定することにより、許容被害程度の意味づけにおける混乱が避けられるものと考えられる。同表における構造被害は被災した構造物の本格復旧に要する費用・労力に直接関係するもので、地震による直接被害とよばれる。機能被害は、本格ないし応急復旧に要する時間や費用に関係するもので、地震による間接被害ともよばれる。構造物の本来の機能のほか、人命・財産の保全、震災復興拠点、危険物取扱い施設の安全確保などが該当する施設もある。これらの機能を果たす施設の場合には、Table 1 に示すものに追加する独立した検討項目の形で、これら該当機能に関する許容被害レベルを考慮しておき、最終段階でこれ

Table 1 Acceptable extent of damage in performance-based design¹

Acceptable extent of damage	Structural	Operational
Degree I : Serviceable	Minor or no damage	Little or no loss of serviceability
Degree II: Repairable	Controlled damage ³	Short-term loss of serviceability ⁴
Degree III: Near collapse	Extensive damage in near collapse	Long-term or complete loss of serviceability
Degree IV: Collapse ²	Complete loss of structure	Complete loss of serviceability

¹ Protection of human life and property, functions as an emergency base for transportation, and protection from the effects of hazardous materials, if applicable, should be considered in defining the damage criteria in addition to those shown in this table.

² Without significant effects on surroundings

³ With limited inelastic response and/or residual deformation

⁴ Structure out of service for extent of repairs generally of short to moderate duration

らずすべてを総合的に判断して許容被害程度を設定することが適当である。

これらの設計地震動レベルおよび許容被害レベルに基づいて、対象構造物に要求される耐震性能のレベルは、Table 2 に定義した耐震性能グレード S, A, B, C により規定することが適当と考えられる。耐震性能設計においては、構造物を、これらの耐震性能グレードの要件を満たすように設計するのである。

Table 2 Performance grades S, A, B, and C

Performance grade	Design earthquake	
	Level 1(L1)	Level 2(L2)
Grade S	Degree I: Serviceable	Degree I: Serviceable
Grade A	Degree I: Serviceable	Degree II: Repairable
Grade B	Degree I: Serviceable	Degree III: Near collapse
Grade C	Degree II: Repairable	Degree IV: Collapse

耐震性能設計における主な手順は Fig. 2 に示すとおりである。

1) 耐震性能グレード S, A, B, C の選定：まず第一段階として、Table 1, 2 を参照し、設計対象施設の利用形態・港湾全体としての機能確保などの諸条件を踏まえて許容被害程度を考慮して、対象構造物に適した耐震性能グレードを選定する。これとは別に、構造物の重要度に基づいて耐震性能グレードを選定してもよい。構造物の重要度は、設計基準類に示されていることが多い。例えば、わが国の港湾施設の基準（運輸省港湾局，1999）を例にとれば、Table 3 に示すとおり対応が考えられる。

利用形態・構造物システム全体としての機能確保などの諸条件によっては、必要に応じて、耐震性能グレード S, A, B, C 以外の耐震性能を導入してもよい。一般に、直列システムとして機能を果たす構造物系の場合には、グレード A ないし B にグレードを揃えた設計が適当な場合が多いと思われるのに対して、並列システムの場合には、グレード S や C のような性能レベルのものも適宜導入していくことにより、全体として合理的な設計が可能となるものと思われる。

2)被害程度規準の設定：許容被害程度を変位，極限応力状態，塑性率などの工学的パラメタにより規定する。これについては、「4.被害程度規準」において解説する。

3)耐震性能照査：耐震性能照査は構造物の地震応答解

析結果として得られる工学的パラメタと先に設定した被害程度規準との比較により行う。仮に解析結果が被害程度規準を満たさない場合には、原設計断面ないし既存構造物を改良する。液状化対策としての地盤改良も、この段階で必要となる。

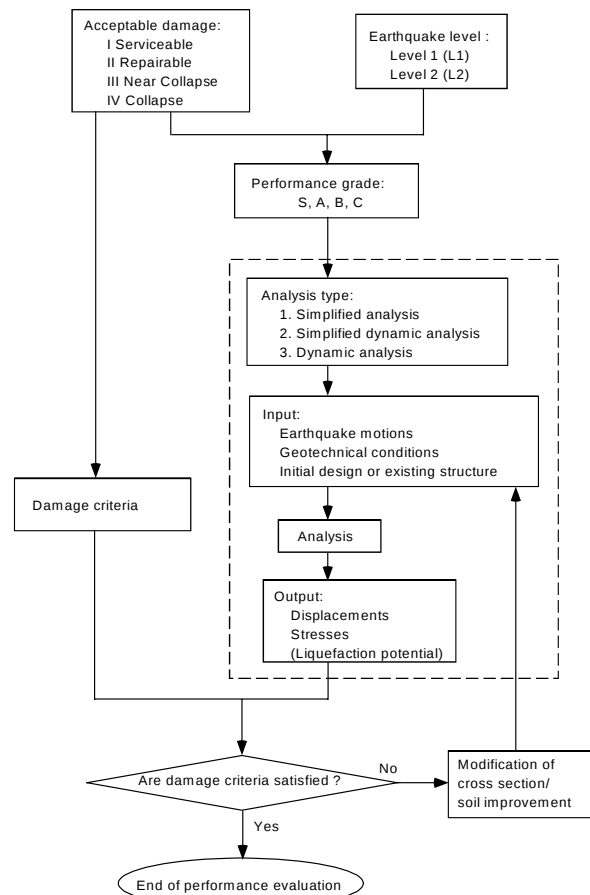


Fig. 2 Flowchart for performance-based design of geotechnical works

4. 被害程度規準

前章で述べたとおり、耐震性能設計においては、許容被害程度を、対象構造物の地震応答特性を考慮して、変位，限界状態応力，ひずみ，塑性率などの工学的パラメタにより規定する。これを被害程度規準という。被害程度規準は、前章に示した Table 1 に基づいて、対象施設の利用形態・構造物群全体としての機能確保などの諸条件も考慮しつつ、主に設計に関して高度の知識・技術を有する専門家が主体となって設定するのがよいであろう。

例えば、Fig. 1 に示した杭式栈橋の被害程度規準の設定においては、Fig. 3 に示すような照査項目を設定

Table 3 Performance grade based on the importance category of port structures

Performance grade	Definition based on seismic effects on structures	Suggested importance category of port structures in Japanese code
Grade S	1) Critical structures that result in extensive loss of human life and property upon seismic damage 2) Key structures that are designed serviceable for recovery from earthquake disaster 3) Critical structures that handle hazardous materials 4) Critical structures that, if disrupted, devastate the economic and social activities of the earthquake damage area	Special Class
Grade A	Primary structures having less serious effects for 1) through 4) than Grade S structures, or 5) Structures that, if damaged, are difficult to restore.	Special Class or Class A
Grade B	Ordinary structures other than those of Grades S, A and C.	Class A or B
Grade C	Small easily restorable structures.	Class B or C

定し、それぞれの項目について、被害程度 I～IV までを設定することとなる。

杭式栈橋は、栈橋本体および土留構造からなる複合構造物であり、栈橋本体も、杭、床板、マウンド、渡板などからなる複合構造物となっている。地震時の被災形態としては、Fig. 3 に示すように、慣性力、地盤の変位、両者の複合による被害がある。特に、Fig.3 (c) に示すように、地盤の変位の影響によって発生する被災形態については、地盤工学的観点からの慎重な検討が必要である。

杭式横栈橋に用いる構造主要部材として、斜杭の使用については、しかるべき構造的配慮が必要となる。斜杭は、係船による牽引力などの水平荷重に対して最も効率的に抵抗する部材であるが、杭の諸元が同様であれば直杭-床版構造系に比べて斜杭-床版構造系は水平荷重に対する剛性が高くなる。この結果、過去の地震被災例（米国）では、コンクリート製の斜杭の杭頭に荷重が集中しせん断破壊が発生している例がある。したがって、地震活動度が高い地域においてコンクリ

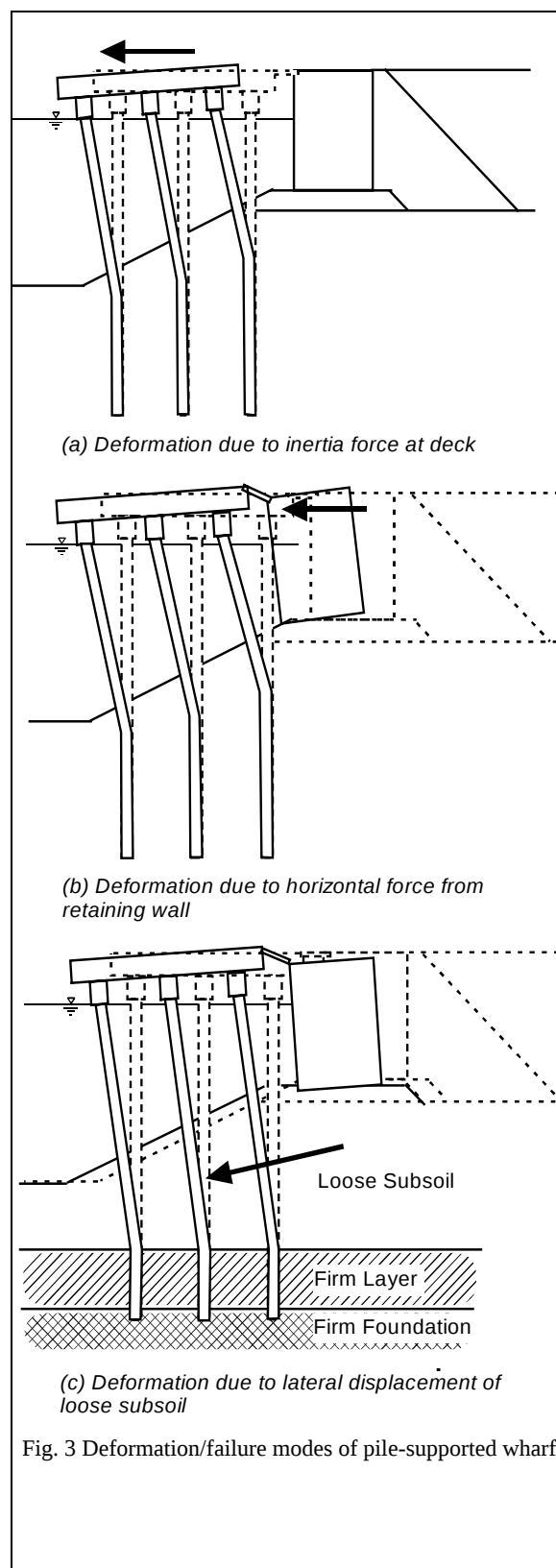


Fig. 3 Deformation/failure modes of pile-supported wharf

ート製の斜杭を用いる場合には、構造系の変位、靱性に関する慎重な検討が必要とされている。このことを反映して、米国の例では、直杭を使用した設計例が増加している。また、斜杭を用いる場合には、滑動機構や耐震ヒューズのような弾塑性的な構造を組込んだ工

夫がなされている例がある。

杭式栈橋は、構造被害の観点からは、変位よりも応力の照査が重要となる。特に、塑性化を許容する部位およびその程度の設定、ならびに終局状態に至る順序の設定が重要である。1995年兵庫県南部地震では種々の被害が発生し、杭の塑性化に伴って海側ないし陸側への変位・傾斜が発生したほか、崩壊に至った例もあるので、特に崩壊限界に対する注意が必要である。

杭式栈橋の被害程度規準を規定する上で、土留め部については、その構造形式に応じて、重力式ないし矢板式岸壁に準じた諸点について、機能被害および構造被害の観点から検討する。ただし、土留め部（ないし栈橋直下の傾斜部分の地盤を含む地盤全体）の変形が栈橋本体に与える影響については、栈橋本体についての照査において考慮する必要がある。

栈橋本体については、機能被害および構造被害の観点から検討する。照査項目としては、Fig. 4に示すように、以下の諸点について照査する必要がある。

・変形照査

構造物本体	沈下、傾斜、法線の出入り
エプロン（床板）	床板と土留め部の段差
床板	傾斜
渡版の落下・破壊	

・応力照査

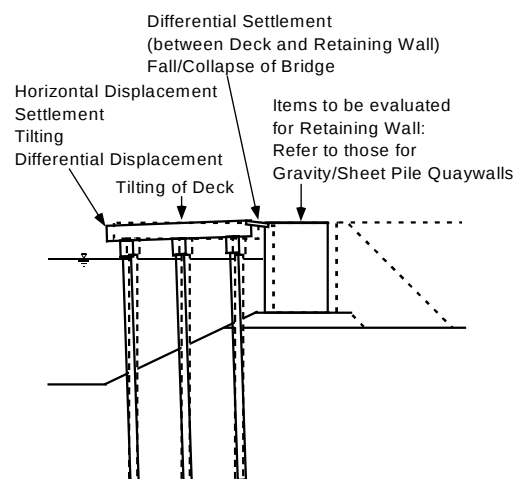
杭（頭部、地中部）
床板（床板本体、杭固定部分）
渡版

耐震性能照査においては、先に述べた機能被害および構造被害の観点からの諸検討項目の一つ一つについて、上に述べた照査項目から該当する項目を拾い出し、それぞれの許容被害程度を設定し、これらを総合化して、対象施設の被害程度規準を設定する。

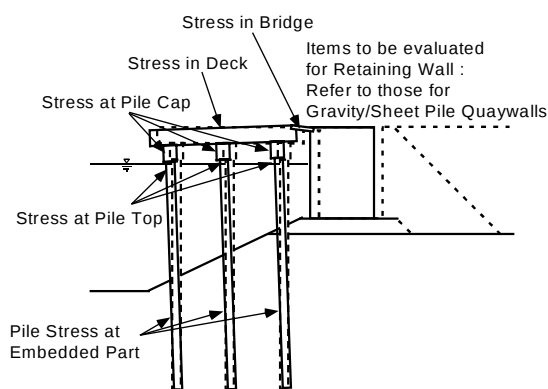
杭式横栈橋の場合、地震荷重レベルに応じて発生する終局状態の順序についても、対象構造物の諸条件に応じて、適切に設定する必要がある。一般には、地震後の復旧の観点も踏まえ、以下の順序が望ましい。

- 1) 床板杭固定部分
- 2) 杭頭
- 3) 床板または杭地中部（ただし、許容塑性率以下）

なお、渡版などの構造（落下防止、または、早期復旧可能な構造）には十分注意し、必要に応じて、土留め部からの変位を吸収できる構造を採用する。さらに、これを発展させ、渡版に代えて、エネルギー吸収特性を持つ免震（減衰）装置を導入することも、検討する価値がある。



(a) With respect to displacements



(b) With respect to stresses

Fig. 4 Parameters for specifying damage criteria for pile-supported wharf

5. 耐震性能照査における解析法種別

耐震性能照査型設計における地震応答解析では、土構造物や基礎の地震時挙動を評価し、その結果が予め設定した被害程度規準（変位、応力、塑性率、ひずみなどで与えられる）を満たすか否かについて照査することを目的とする。解析法の選定においては、それぞれの耐震性能照査に適した解析法を選定する必要があり、一般に、耐震性能グレードが高い施設には高度の解析手法が必要となる。

地震危険度解析、表層地盤の地震応答／液状化解析および土構造物や基礎の地震応答解析には種々のものがある。これらの解析法は、例えば港湾構造物の場合、その難易度および解析能力によって以下のように大別される。

- 1) 簡易解析：滑動限界または弾性応答限界の概略評価、および構造物の残留変位の概略オーダーの評価に適した解析
- 2) 簡易動的解析：より広い適用性があり信頼性もより高い。予め想定した被害形態のもとでの変位、応力、塑性率、ひずみの評価が可能な解析
- 3) 動的解析：最も高度。地震時に発生する被害形態および被害程度（変位、応力、塑性率、ひずみなど）の評価が可能な解析

各耐震性能グレードに対して最も適切と見られる解析法種別を Table 3 に示した。この表においては、耐震性能グレードが高い構造物ほど高度の解析法が必要になるということを基本としている。同表に示すとおり、より難易度の低い解析法も、概略設計段階や世界各地でみた場合に特に地震活動度が低い地域での設計では用いることができる。

解析法の例としては、杭式栈橋の場合には、簡易解析では主に弾性限界を照査することを目的とした応答スペクトル法、簡易動的解析では応答スペクトル法にプッシュオーバー解析を組合せた塑性領域での挙動の概略評価を目的とした解析法、動的解析では地盤・構造物系の動的相互作用を一体的に解析する非線形有限要素法、などがある。

6. おわりに

土構造物や基礎の耐震性能設計は、力の極限釣合いに基づく既往の設計法の限界を改善することをねらったものである。このため、設計における主要な評価対象として、地盤および構造物基礎の変形とこれに伴う構造物の変形および応力状態を設計パラメータとした新たな設計体系を示した。この体系では、許容被害程度の設定において、構造被害と機能被害とをあらかじめ分けた形で検討した上で最終的な

Table 3 Types of analysis related to performance grades

	Performance Grade			
	Grade C	Grade B	Grade A	Grade S
Simplified analysis				
Simplified dynamic analysis				
Dynamic analysis				

Index:

	Standard/final design
	Preliminary design or low level of excitations

被害程度を設定する点、種々の解析法種別を耐震性能グレードなどに関連づけて選定する点、など、土構造物や基礎の耐震設計に適すると思われる要点を盛りこんだ点に特徴がある。

参考文献

- 井合 進・菅野高弘・一井康二：耐震性能設計に向けて、土と基礎，Vol.51, No.2, Ser.No.541, pp.10～12, 2003
- 運輸省港湾局（監修）：港湾の施設の技術上の基準・同解説，日本港湾協会，1999
- PIANC: Seismic design guidelines for port structures, Balkema, 474p., 2001
- SEAOC: Performance based seismic engineering of buildings, Structural Engineers Association of California, Sacramento, California, 1995

Seismic Performance-Based Design of Geotechnical Works

Susumu IAI

Synopsis

An overview of a new design approach based on seismic performance requirements is described with respect to buried structures, foundations, retaining walls, and soil structures. In this design methodology, deformation of soil and ground are used as key parameters in design for defining performance criteria of these geotechnical works. The methodology is evolving and not yet fully established. The paper presents the basic framework along this methodology using an example of a pile-supported wharf.

Keywords: earthquake, geo-disaster, geotechnical work, performance-based design, seismic design