

地盤安定に影響する地震動についての考察

(財) 沿岸開発技術研究センター 土田 肇*

兵庫県南部地震により神戸港の岸壁は多くの被害を受けた。また、三陸はるか沖地震では八戸港の岸壁が被害を受けた。両港で記録された地震動の最大加速度を比較すると、八戸港の最大加速度が大きいのに、被害の程度は八戸港の岸壁の被害が神戸港の被害よりも軽かった。このことは構造物の被害や地盤の安定が地震動の様々な特性に影響されていることを示唆している。そこで、構造物の特性や地盤安定の検討事項ごとに、地震動のどのような特性が影響力が大きいかを考察した。たとえば、累積損傷度理論による液状化の検討では、地震動波形の1波1波の振幅が影響し、周期は影響しないと考察される。これらの整理考察により、耐震設計における地震動波形の適切な選定の一助とすることを試みた。

1. はじめに

兵庫県南部地震により多数の構造物が被害を受け、これを契機として耐震設計法についても多くの議論がなされている。耐震設計において基本となる事項の一つに、設計で考慮する地震動がある。従来、耐震設計で考慮する地震動の条件は、設計震度という数値で与えられることが多かった。

また、地震動そのものについても、その最大加速度という単一の数値に注目することが多かった。しかし、構造物の被害の大小とその被害をもたらした地震動の最大加速度の大小が対応していない場合も少なくない。では、地震動のどのような値、あるいは地震動波形のどの部分が構造物の被害と対応しているのであろうか。この点について知見を整理し、関係者の議論に供したい。なを、ここでは地盤の安定の検討および岸壁や盛土など地盤との関連性の高い構造物の安定の検討を念頭におく。ただし、地盤安定に影響する地震動の特性を明確にするため、単純な一般構造物の場合も考察に加えることとする。

2. 最大加速度と地震被害

最初に、最大加速度の大きさと被害の程度が対

キーワード：地震動、地盤安定、地震被害

* (財) 沿岸開発技術研究センター、03-3234-5861

応していない事例を示す。

図-1は、兵庫県南部地震で被害を受けた神戸港六甲アイランド コンテナパース(RC1)の岸壁(以後、六甲岸壁)の標準断面図である。¹⁾ この岸壁は地震動により、最大1.98m海側へ移動し、最大0.80m沈下した。図においては、点線により被害の状況を示している。

図-2は、1994年三陸はるか沖地震(発震年月日：平成6年12月28日、マグニチュード：7.5)により被害を受けた八戸港八太郎地区P岸壁(以後、八戸岸壁)の標準断面図である。²⁾ この岸壁は地震動により最大0.41m海側へ移動し、約0.14m沈下した。図においては、点線により被害の状況を示している。

これら二つの岸壁が受けた最大加速度を表-1に示す。³⁾ 表中、「記録水平成分最大加速度」は、強震計で記録された水平2成分の最大加速度の内の大きいものを指す。「水平最大加速度」は、記録された2成分の水平加速度を時間ごとに合成し、それらの最大を求めたものを指す。強震計の成分の方向と関係なく、水平面内の最大加速度である。「岸壁延長直交最大加速度」は、岸壁の延長方向と直交する水平方向の最大加速度を指す。この方向は、岸壁に海陸方向の地震力を作用させる方向であり、地震動のこの方向の成分が岸壁の安定に最も影響すると考えられる。

図-1、2に示した二つの岸壁はその大きさがほぼ同じである。作用した地震動については、表-1

に示した3種類の最大加速度の何れをとっても、八戸岸壁に関するものが六甲岸壁に対するものよりも大きい。しかし、被害はその逆で、図に見られるように六甲岸壁の被害が八戸岸壁の被害よりも顕著に大きい。八戸岸壁の背後の地盤で岸壁に近い部分では、噴砂など液状化の発生を示す痕跡は見いだされていない。他方、六甲アイランドでは地盤の液状化が発生したという見解が多い。岸壁の被害が液状化の影響によりどの程度大きくなったかは明確ではないが、支配的ではなかったとの見解もある。このようなことから、ここに示した二つの岸壁の被害が全て直接に地震動により生じたものではない部分を含んでいることには留意する必要がある。しかし、被害の程度の差も考えれば、ここに示した事例は被害の程度が最大加速度の大きさのみでは説明できない場合のあることを示していると考えられる。

被害の程度は最大速度の大きさと対応するとの見解もある。ここでは詳しい議論を行わないが、前記の最大加速度に対応する速度を表-1に併せて示す。

3. 各種モデル構造物と地震動

ここでは、単純化された構造物モデルについて、その被害が地震動のどの部分により大きな影響を受けるかを考察する。

(1) 弾性構造物

図-3 (a) が構造物の断面で、(b) がその復元力特性とする。荷重が降伏荷重 (F_{y1}) に達すると、そこで破断が発生するものとする。実際には、このような極端な構造物は存在しないであろうが、それに近いものを想定すると、その剛性は非常に大きいと考えられる。

このような構造物では、応答変位は大きくないから、地震動の加速度に対応する慣性力が作用し、それが降伏荷重に達した途端に破壊が生ずる。したがって、この構造物の被害は地震動の最大加速度のみに依存すると考えられる。

(2) パイリニア構造物

図-4 (a) が構造物の断面で、(b) がその復元力特性とする。一般的には、このような性格の復

元力特性を有する構造物に近似できる構造物が多いであろう。この構造物に作用する慣性力は応答加速度に対応しているので、地震動の加速度のみから、どの部分の影響が大きいと指摘することはできない。応答が大きくなると残留変位すなわち被害が発生するから、その観点からは、構造物の固有周期に近い周期の成分の振幅が大きな影響を有すると言える。構造物の慣性力が降伏荷重 (F_{y2}) を超えない範囲の応答を発生させる地震動は、被害とは関係しない。

(3) 剛塑性構造物

図-5 (a) が構造物の断面で、(b) がその復元力特性とする。平坦な岩盤上に置かれた剛な壁体や柱状体がこれに相当する。片方からのみ土圧が作用している点を除けば、ケーソンを用いた重力式岸壁は、このような構造物であろう。剛塑性構造物では、慣性力が降伏荷重 (F_{y3}) を超える場合に滑動が発生する。滑動が発生していない状態では、構造物に作用する慣性力は地震動と対応している。この構造物の残留変位量は、図-6に示すように、降伏荷重に対応する加速度を超える部分の面積の大きい地震動が大きな被害をもたらすと考えられる。地震動のうち降伏荷重以下の慣性力しか発生させない波は被害と無関係である。(厳密には、静摩擦係数と動摩擦係数の相違や構造物が滑動を開始してから停止するまでのことを考えなければならない) 滑動は、両方向に発生するが、模型実験等によれば、多くの場合、片方向に滑動による地盤と構造物の相対変位が累積するようである。⁴⁾

4. 液状化と地震動

液状化がどのような過程をたどって発生していくかは、多くの議論があるところであろう。液状化の発生についての考え方の一つは、累積損傷度理論が適用できるとする考え方である。この考え方では、繰り返し三軸試験等により、図-7に例示するようなせん断応力の振幅とそのせん断応力が繰り返し作用して液状化が発生するまでの波数の関係を求めておく。実際には、せん断応力の代わりにせん断応力と上載圧拘束圧との比(せん断応力比)を用いることが多い。図-7は、神戸港のポートアイランドの

埋土についてのものである。⁵⁾

累積損傷度理論を適用する場合は、たとえば、10波で液状化が発生するような振幅のせん断応力が2波作用した場合には液状化に向かって現象が20%進行すると考える。⁶⁾ このような考え方を繰り返し応力のすべてに適用し、その総和が100%に達すれば完全液状化が発生すると考える。繰り返し応力の周期の長短は、その応力の液状化の進行に対する影響度には関係しないとする考え方が多い。地震時に地表付近の地盤に発生するせん断応力は地表の地震動とほぼ一致するであろう。

以上のことから、液状化の発生に関しては、原理的には地震動波形のなかの1波1波のほぼすべてが影響力を有することになる。そうして、それらの波の周期は影響を持たないと考えられる。実際には、地震動波形を構成する波の数は限られているので、ある程度以下の振幅の波は無視することができる。

累積損傷度理論以外にも液状化の発生を予測する方法がある。たとえば、石原は最大せん断応力が発生する以前にその60%以上の振幅を有する波が何波あるかにより、地震動によるせん断応力の波形を衝撃型と振動型に分類し、液状化の予測を行う方法を提案している。これによれば、液状化の予測に係る部分は地震動波形のうちの一部となる。⁷⁾

5. 地盤の滑り

地震動により斜面を含む地盤で、斜面に沿った滑りや円弧滑りが発生することがある。この解析で、滑り面を境界として剛体が接している状況を想定し、滑り量を推定することがある。この場合に地震動のどの部分が影響するかは、先の剛塑性モデルとほぼ同じと考えられる。

図-8に見られるような地盤で、B層が液状化し、C層が地震動を継続していても、A層はB層の上に乗ってほぼ静止している状態が発生する可能性も否定できない。もし、そのような状態が発生したら、図中の柱状または壁状の構造物はC層の変位によりA層に押し込まれて状態となる。その場合には、A層から構造物が受ける力は、C層の最大変位に大きく関係すると思われる。

地盤に傾斜があり、B層の液状化によりA層が滑

る場合にも構造物はA層から力を受ける。また、B層自体が完全に液状化しておらず、なにがしかのせん断抵抗を残していれば、B層もまた構造物に力を及ぼすこととなる。この場合の構造物が受ける力はC層の変位とA層B層の変位とに関係するであろう。なを、この時に構造物が受ける力の大きさについては今後多くの研究が必要であろう。地盤が構造物を押すのであるから非常に大きな力が作用する可能性も考えられるが、地盤が滑ると言うことは地盤が軟らかくなった結果として生じているので、その分は作用する力が小さくなっているはずである。

新潟地震の際には、信濃川兩岸の地盤が滑り、川幅が小さくなった。^{8, 9)} しかし、万代橋のところでは川幅が変わらなかったため護岸線が曲線状にくぼんでいる。このことは、万代橋が地盤の滑りに抵抗し得たことを示していると思う。

6. まとめ

今回の講演会は発表対象として論説的なものも含むとされているので、立証された事実というよりは、問題の提起という観点からこの報告をまとめた。

すでに示したように、地震動のどのような特性が構造物の被害や地盤の変状に影響するかは、構造物の種類や検討項目により異なる。強地震動の記録の数が限られていた時代には選択の幅が小さく、最大加速度の大きな記録に注目をせざるを得なかった。しかし、強震記録の蓄積も進んでいるので、検討内容にふさわしい地震動記録を選定することにより多くの注意を払うべき時期がきていると思う。また、地震動とは少し異なるが、液状化に起因する地盤の滑りが構造物に及ぼす影響については積極的研究が望まれる。

参考文献

- 1) 運輸省港湾局・他：阪神・淡路大震災による港湾施設等調査報告書、平成7年5月
- 2) 運輸省第二港湾建設局・同港湾技術研究所：三陸はるか沖地震現地調査報告書、平成7年1月
- 3) 宮田正史・佐藤幸博・井合 進：兵庫県南部地震による港湾施設の被害考察（その1）強震記

録、港湾技研資料

- 4) 上部達生・檜垣典弘：水中の剛構造物の地震時滑動と動水圧の実験的研究、港湾技術研究所報告、Vol.23、No.3、1984年9月、pp.153-186.
- 5) 地震対策に関する港湾技術セミナーテキスト、(財)沿岸開発技術研究センター、平成7年10月.
- 6) 運輸省港湾局監修：埋立地の液状化対策ハンドブック、(財)沿岸開発技術研究センター、平成5年3月、pp.283-285.
- 7) 石原研而：土質動力学の基礎、鹿島出版会、昭和57年5月、pp.265-279.
- 8) 浜田政則・他：液状化による地盤の永久変位の測定と考察、土木学会論文集376号/Ⅲ-6、1986年12月、pp.211-220.
- 9) 土田 肇・井合 進：建設技術者のための耐震工学、山海堂、平成3年5月、p.141.

表-1 最大加速度および最大速度

	最大加速度 (gal)		最大速度 (kine)	
	六甲岸壁	八戸岸壁	六甲岸壁	八戸岸壁
記録水平成分	502	545		
最大水平	538	751	122.4	50.5
岸壁延長直交水平	255	270*	27*	23*

* 図上から読みとった概略値である

注) 記録はSMAC-B2強震計による。記録水平成分最大加速度は計器特性無補正、他は計器特性補正

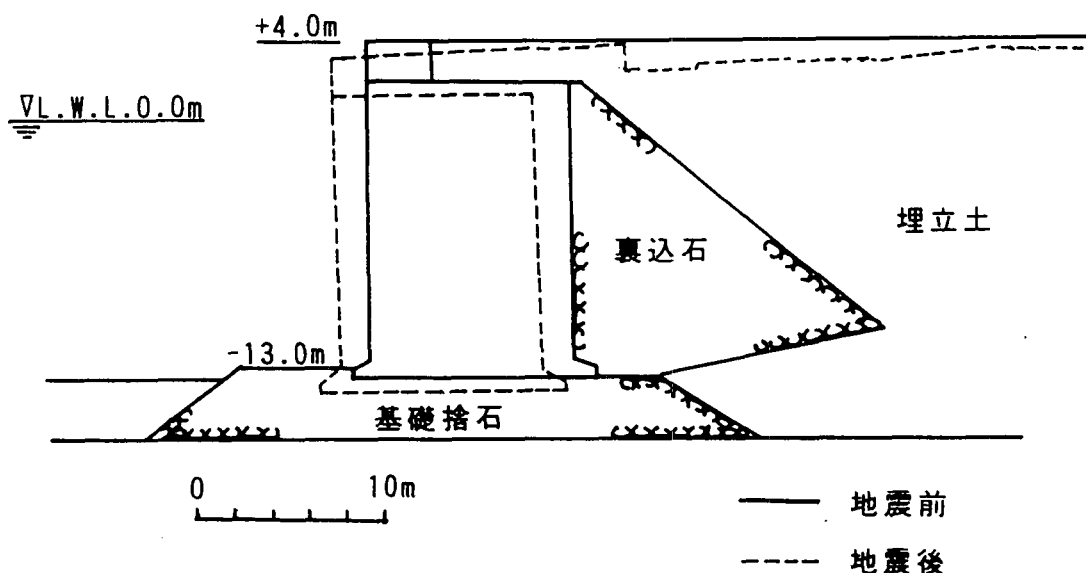


図-1 神戸港六甲アイランド コンテナ パース (RC1)

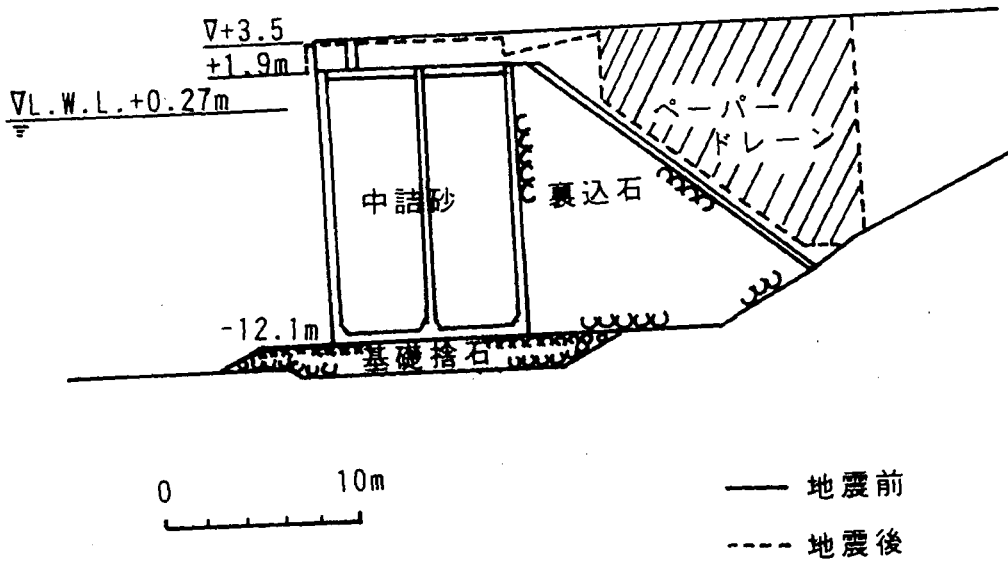


図-2 八戸港八太郎地区P岸壁

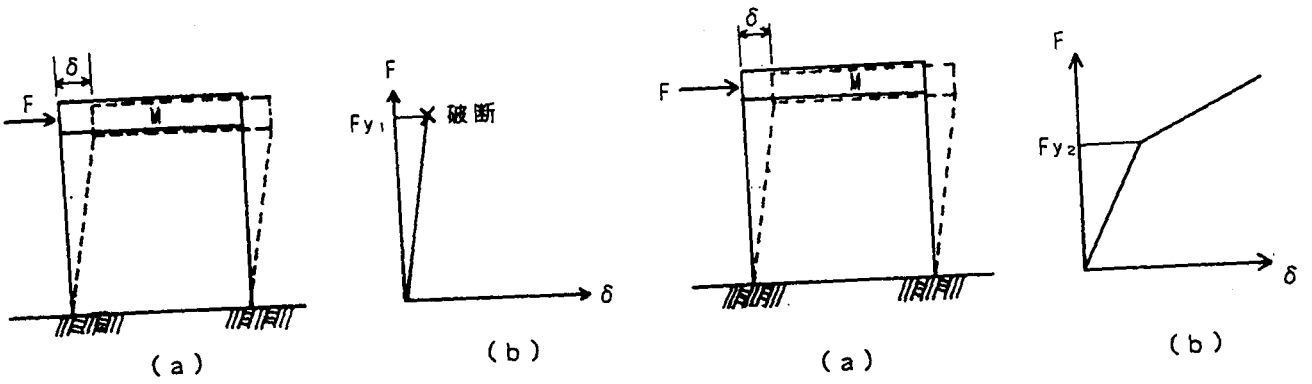


図-3 弾性構造物

図-4 バイリニア構造物

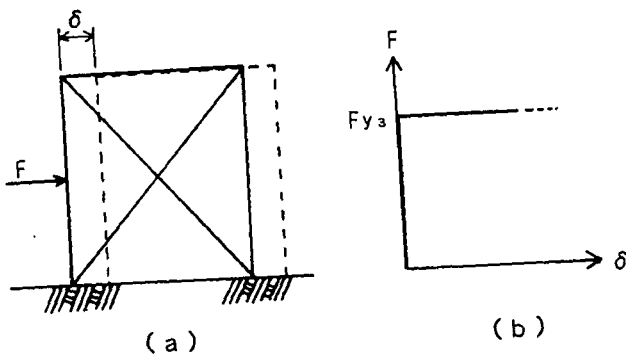


図-5 剛塑性構造物

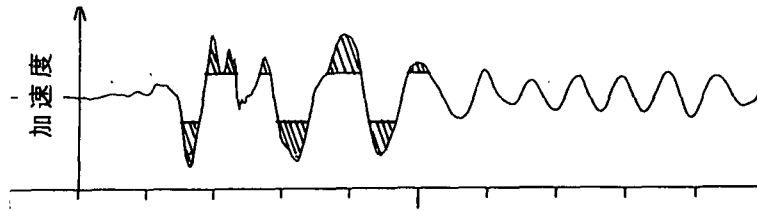


図-6 地震動加速度のうち滑動に影響する部分

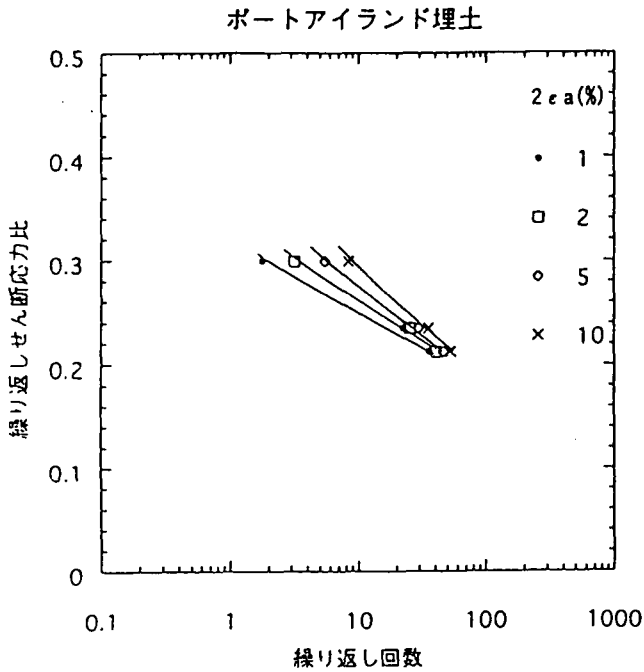


図-7 液状化強度比と液状化波数の関係

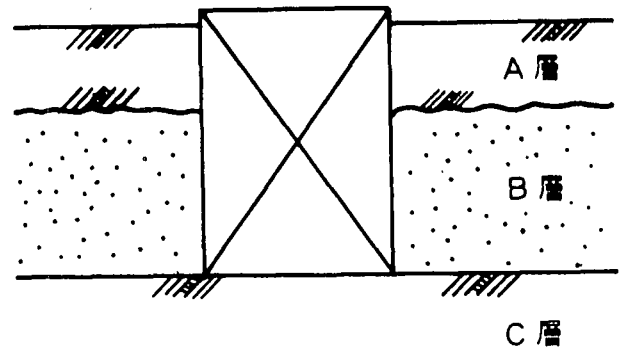


図-8 地盤断面と柱状・壁状構造物

CHARACTERISTICS OF EARTHQUAKE MOTIONS
AFFECTING
STABILITIES OF GROUNDS AND EARTH STRUCTURES

Hajime Tsuchida

There is evidence that maximum accelerations of earthquake ground motions are not sufficient indications of their destructiveness. An example showing the insufficiency is presented. Then, discussion is made which characteristics of earthquake ground motions are mainly affecting stability of structures with emphasis on grounds and earth structures.