

鉛直地震動が地震時主働土圧に 及ぼす影響について

蔣 景彩¹・中野 晋²

¹正会員 徳島大学准教授 大学院ソシオテクノサイエンス研究部（〒770-8506 徳島市南常三島町2-1）

E-mail: jiang@ce.tokushima-u.ac.jp

²正会員 徳島大学教授 大学院ソシオテクノサイエンス研究部（〒770-8506 徳島市南常三島町2-1）

E-mail: nakano@ce.tokushima-u.ac.jp

従来の地震時擁壁における主働土圧の算定は、震度法に基づく物部・岡部式を代表するクーロン土圧式を用いてきた。しかし、物部・岡部式は土楔の応答加速度が地盤加速度と一致する（相対変位を生じない）という仮定に基づいているため、大きい地震動が発生する場合には土圧を過大評価する問題点が指摘されている。この問題点を克服するため、水平地震動に対してある程度の滑動変位を認めた上での土圧算定式がいくつか提案されている。

しかし、近年では新潟中越地震や岩手・宮城内陸地震・兵庫県南部地震など、鉛直方向における大きな地震動が観測されていて、こうした鉛直地震動の影響を考慮した地震時土圧に関する研究は少ない。そこで、本研究では既存の理論式を参考に、地盤－擁壁－土楔の動的相互作用を考慮した地震時主働土圧の算定方法を提案し、鉛直地震動が地震時主働土圧に及ぼす影響を調べたので、ここで報告する。

Key Words : earthquake, earth pressure, vertical seismic acceleration,

1. はじめに

擁壁の耐震設計においては、地震時土圧の評価が最も重要である。なぜなら擁壁は地震時に作用する動土圧に耐えられるように設計されるからである。地震時の土圧評価は、通常主働状態での土圧（主働土圧）について行われる。これは、主働状態では擁壁にも外側（盛土の反対側）方向に慣性力が作用していて、「擁壁+盛土系」は最も不安定状態にあるからである¹⁾。

従来の地震時擁壁における主働土圧の算定は、震動法に基づく物部・岡部式を代表するクーロン土圧式を用いてきた。この手法は道路土工指針などにおいても地震時土圧の算定式として指定されている。しかし、物部・岡部式は土楔の応答加速度が地盤加速度と一致する（相対変位を生じない）という仮定に基づいているため、大きい地震動が発生する場合には土圧を過大評価する問題点がある。この問題点を克服するため、水平地震動に対してある程度の滑動変位を認めた上での土圧算定式がいくつか提案されている。しかし、近年では新潟中越地震や岩手・宮城内陸地震・兵庫県南部地震など、鉛直方向における大きな地震動が観測されていて、こうした鉛直地

震動の影響を考慮した地震時土圧に関する研究は少ない。そこで、本研究では既存の理論式を参考に、地盤－擁壁－土楔の動的相互作用を考慮した擁壁の耐震設計法を構築すべく、水平・鉛直地震動の両方を受ける擁壁に作用する地震時主働土圧の算定方法を提案した。そして様々な適用事例を通して鉛直地震動が主働土圧に及ぼす影響について検討した。

2. 鉛直地震動を考慮した地震時主働土圧評価法

過去の地震による擁壁の被害事例を調べた結果、地震時の擁壁の運動モードは滑動モードと回転モードに大別できる。そこで本研究では、まず擁壁の運動モードを滑動に限定した上で、動的相互作用を考慮した擁壁及び土楔の運動方程式から地震時主働土圧の算定式を誘導する。その際、右城の論文²⁾を参考に、擁壁及び背面の土楔に作用する慣性力に地盤の鉛直加速度を考慮する。なお、擁壁の回転モードを想定した場合の地震時主働土圧については、紙幅の関係上、別の機会で報告したい。

地盤加速度がある限界を超えて大きくなると擁壁は滑動する。地盤が絶対速度 $\dot{X}$ で右方向（擁壁後方）かつ絶

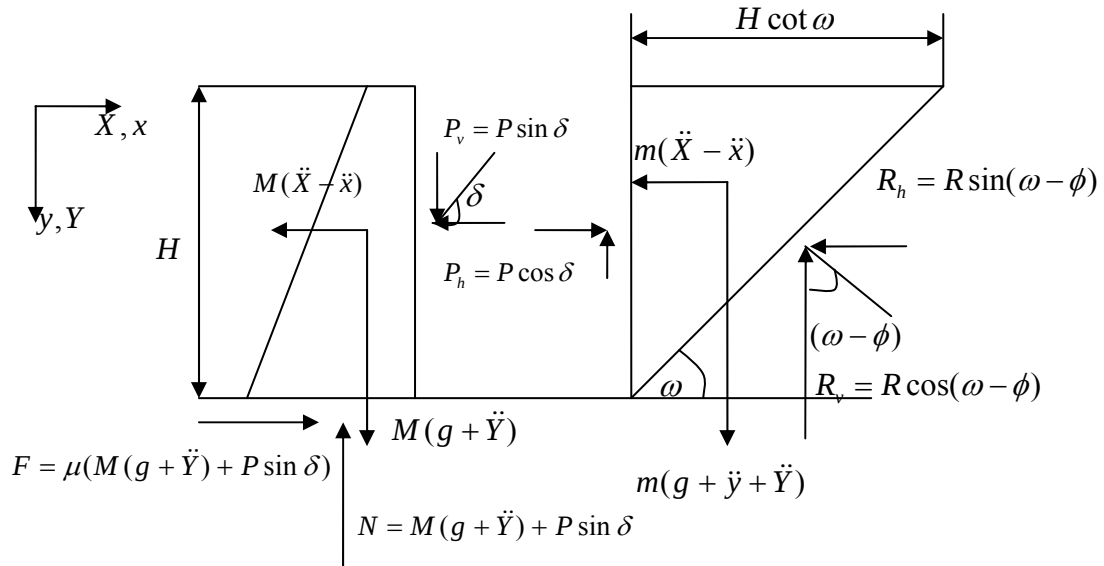


図-1 擁壁と土楔に作用する力(擁壁が滑動する場合)

対速度 $\dot{Y}$ で上方向に運動したとき、擁壁および背後の土楔も相対速度 $\dot{x}$ と $\dot{y}$ で運動するものとする。この場合、擁壁と土楔には図-1に示す力が作用する。すなわち、擁壁には自重 $M(g + \ddot{Y})$ 、水平方向慣性力 $M(\ddot{X} - \ddot{x})$ 、土圧 P (水平成分 $P \sin \delta$ 、鉛直成分 $P \cos \delta$)、地盤からの垂直抗力 $N = M(g + \ddot{Y}) + P \sin \delta$ 、摩擦力 $F = \mu N$ が作用する。土楔には、土圧 P 、鉛直方向慣性力 $m(g + \ddot{y} + \ddot{Y})$ 、水平方向慣性力 $m(\ddot{X} - \ddot{x})$ 、すべり面からの抗力 R (水平成分 $R \sin(\omega - \phi)$ 、鉛直成分 $R \cos(\omega - \phi)$) が作用する。ただし、 $\ddot{X}$ 、 $\ddot{Y}$ は地盤の水平と鉛直方向の絶対加速度、 $\ddot{x}$ は擁壁と背後土楔の水平方向の相対加速度、 $\ddot{y}$ は土楔の鉛直方向の相対加速度、 δ は壁面摩擦角、 μ は擁壁底面の摩擦係数、 M は擁壁の質量、 m は土楔の質量である。

擁壁に作用する水平方向の力の釣り合い条件から次式が誘導される。

$$M(\ddot{X} + \ddot{x}) = \mu(Mg + P \sin \delta) - P \cos \delta \quad (1)$$

土楔に作用する力の釣り合い条件と変位の適合条件を考えると次のようになる。

水平方向：

$$m(\ddot{X} + \ddot{x}) = -R \sin(\omega - \phi) + P \cos \delta \quad (2)$$

鉛直方向：

$$m(g + \ddot{y} + \ddot{Y}) = R \cos(\omega - \phi) + P \sin \delta \quad (3)$$

$$\text{土楔の変位の適合条件： } y = x \tan \omega \quad (4)$$

便宜上、鉛直方向の地盤加速度は水平加速度の割合で以下のように表現した： $\ddot{Y} = \lambda \ddot{X}$ 。

式(1)～式(4)を連立させて解けば、土圧を求めることができる。

$$P = \frac{Mm(A\ddot{X} + Bg)}{M \cos(\omega - \phi - \delta) + m(\mu \sin \delta - \cos \delta)C} \quad (5)$$

ここで

$$A = \lambda \{ \mu \cos(\omega - \phi) + \sin(\omega - \phi) - \mu \tan \omega \sin(\omega - \phi) \} + \tan \omega \sin(\omega - \phi)$$

$$B = \mu \cos(\omega - \phi) + \sin(\omega - \phi) - \mu \tan(\omega - \phi) \sin(\omega - \phi)$$

$$C = \tan \omega \sin(\omega - \phi) - \cos(\omega - \phi)$$

3. 検討事例

(1) 事例 1

既往の文献²⁾に掲載されている事例について地震時の土圧を計算する。計算条件は図-2に示す。ただし、壁面摩擦角は0とする。

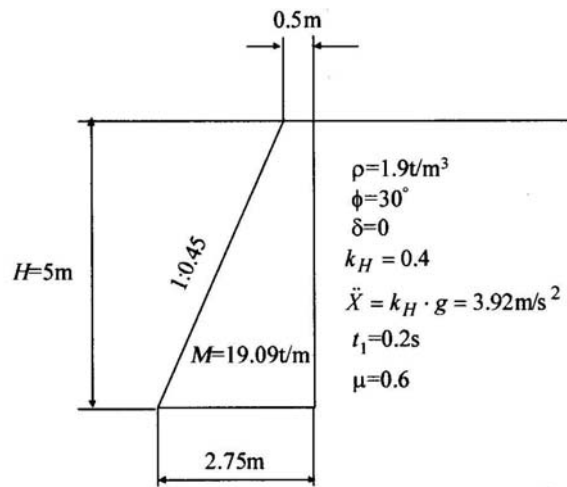


図-2 事例 1 の計算条件²⁾

以下の5ケースについて地震時土圧の計算を行った：
 水平加速度のみ（鉛直加速度=0），鉛直加速度を水平加速度の（1/3, 1/2, 1.0, 2.0）倍とする。各ケースについて、すべり面の傾斜角度 ω を25°から1°刻みで変化させ、それぞれの土圧を計算した。その結果を図-3に示す。図-3からわかるように、鉛直地震動の増加につれ、各ケースの土圧の最大値である主働土圧は大きくなり、背後土楔のすべり面の傾斜角度も大きくなる。

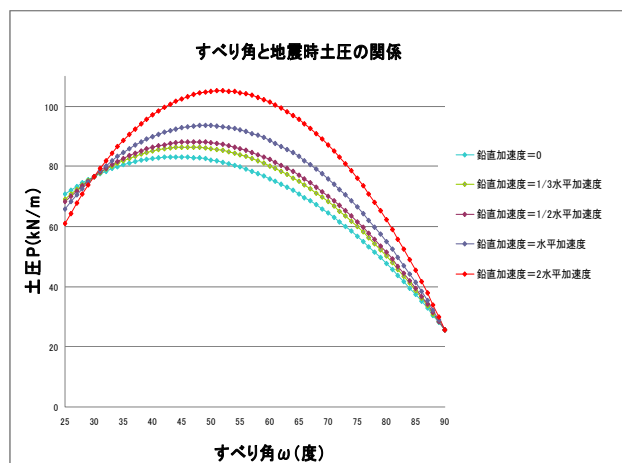


図-3 すべり面角度と土圧の関係

(2) 事例 2

松尾ら³⁾は重力式擁壁模型を用いた動的遠心载荷実験を行い、彼らの提案式の妥当性を検証している。実験に用いた擁壁断面図を図-4に示す。実験は遠心加速度30gの下で行っており、図-4の断面は実物換算値である。支持地盤と裏込め土には気乾状態の豊浦砂（相対密度86%）が用いられている。三軸試験による最大ピーク摩擦角は41°，残留内部摩擦角は35°であった。

鉛直地震度を水平地震動の1/3, 1/2, 1.0倍とし、それぞれ異なる震度のもとで主働土圧を計算した。結果は図-5に示す。

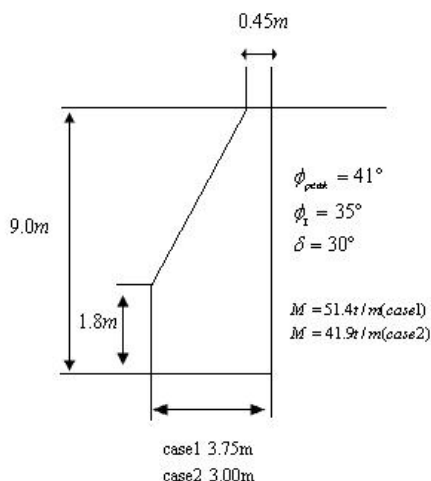
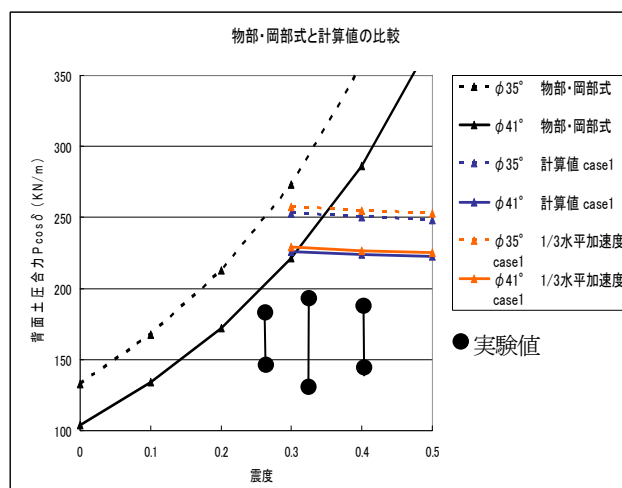
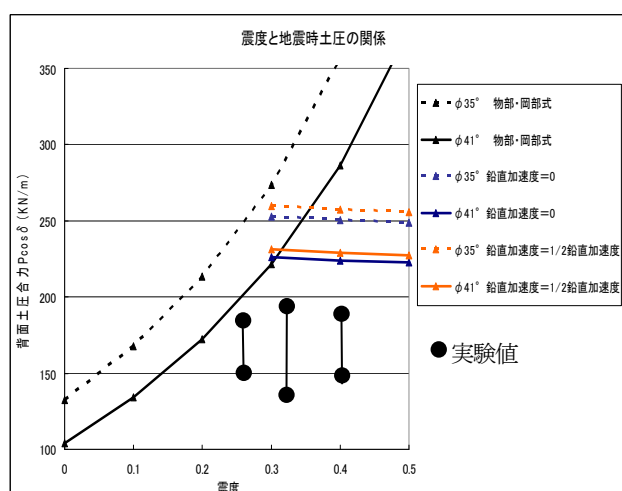


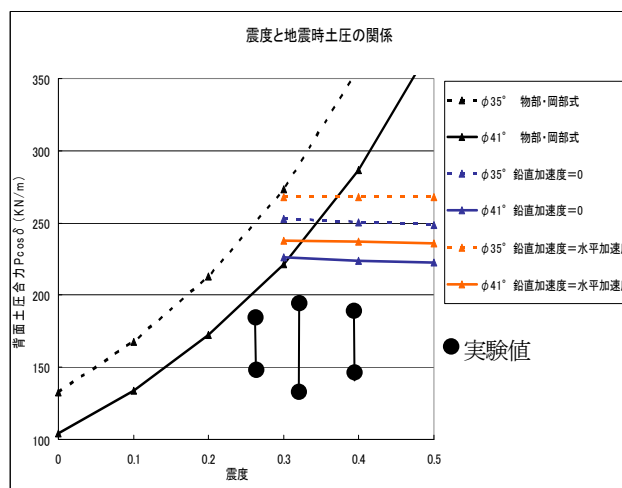
図-4 模型実験に用いた擁壁断面（実物換算値）



(a) 鉛直加速度=1/3水平加速度



(b) 鉛直加速度=1/2水平加速度



(c) 鉛直加速度=水平加速度

図-5 土圧の計算値と松尾ら³⁾の実験値との比較

図-5の結果から以下の2点が分かった：1) 実験条件と同様、水平地震動のみの場合、土圧の計算値は傾向が実験値とほぼ同じであるが、計算値は実験値より大きい；2) 土圧は鉛直地震動の増加につれ大きくなっている。

(3) 事例3

古関ら⁴⁾は図-6に示すような1/10スケールの模型を作成し、傾斜実験および振動台実験を行い、実験値と理論値による土圧の比較検討を行っている。

振動台実験では、神戸海洋気象台の地震波記録のNS成分（卓越周波数5Hz）を用い、最大加速度を100galずつ増加させる段階水平加振を加えている。その結果、500gal加振後に1本のすべり面が発生し、900gal加振後に2本のすべり面が発生した（図-7）。水平地震動のみとして計算された土圧結果は図-8に示す。2本目のすべり面による計算は残留強度を用いた。

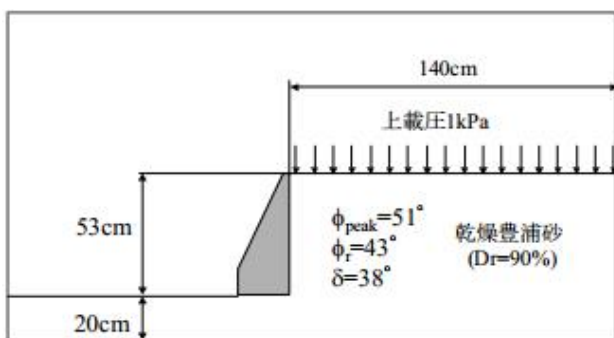


図-6 古関ら⁴⁾の模型擁壁



図-7 古関ら⁴⁾の遠心模型実験結果

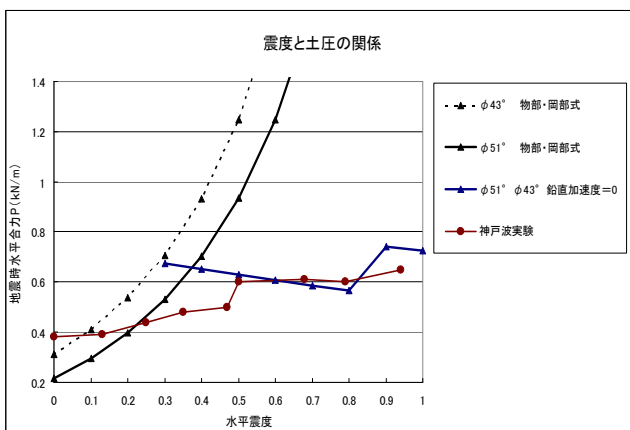


図-8 計算結果と古関ら⁴⁾の実験結果との比較

(4) 事例4

本提案法を1999年台湾集集地震による擁壁の崩壊現場に適用してみた。擁壁の断面図を図-9に示す。計算用のパラメータは文献⁵⁾から引用した：擁壁の質量 $M=14.3t/m$ 、擁壁底面の摩擦係数 $\mu=0.65$ 、粘着力 $c=0$ 、内部摩擦角 $\phi=40^\circ$ 、壁面摩擦角 $\delta=20^\circ$ 、裏込め土の密度 $\rho=1.88t/m^3$ 、単位体積重量 $\gamma=18.8kN/m^3$ 。

集集地震は台湾時間の1999年9月21日1時47分18秒（日本時間2時47分18秒）に、台湾中部の南投県集集鎮付近を震源として発生した $M_w7.6$ の地震である。この地震では水平最大加速度は984gal、最大鉛直加速度は335galと記録されている。そのため、本研究では鉛直加速度を水平加速度の1/3倍として、土圧の計算を行った。結果を図-10に示す。

物部岡部式で計算された土圧は震度と共に大きくなっているが、本提案法で算出された土圧の大きさは震度と共に減少する傾向にある。また鉛直加速度を考慮した場合の土圧は、考慮しない場合に比べ約3.0-12.0%高くなっている。この擁壁の高さが5mと低いため、耐震設計は行われていないと思われる。擁壁設計に用いられたと思われるクーロン土圧式を適用すると、主働土圧係数 $=0.22$ が計算された。

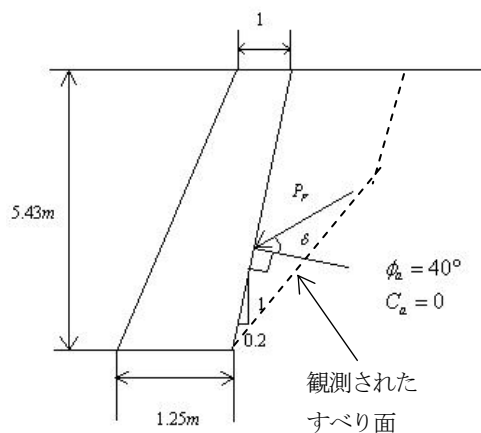


図-9 擁壁断面⁵⁾

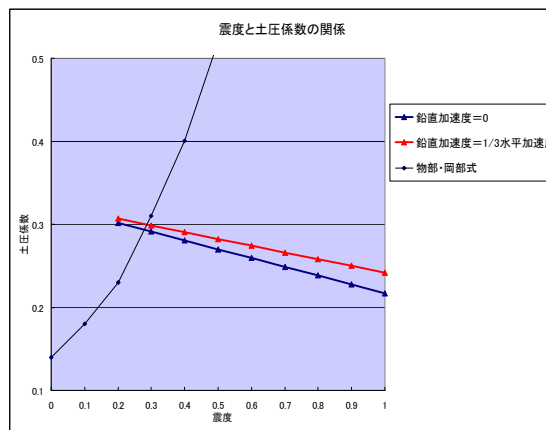


図-10 地震時土圧の計算結果

(5) 事例5

本提案法を岩手・宮城内陸地震⁵⁾による擁壁の崩壊現場（図-11）に適用してみた。この擁壁崩壊は宮城県栗原市鶯沢工業高校キャンパスの盛土崩壊に伴い発生したものである。

擁壁の断面図を図-12に示す。地盤工学会・2008年岩手・宮城内陸地震災害調査委員会報告書⁶⁾および既往文献⁷⁾を参考に、計算用のパラメータは以下のように決めた。擁壁の質量 $M=10.8\text{t/m}$ 、土楔の質量 $m=56.5\text{t/m}$ 、擁壁底面の摩擦係数 $\mu=0.65$ 、内部摩擦角 $\phi=36.9^\circ$ 、壁面摩擦角 $\delta=24.6^\circ$ 、裏込め土の密度 $\rho=2.6\text{t/m}^3$ （単位体積重量 $\gamma=25.5\text{kN/m}^3$ ）、すべり面傾斜角度 $\omega=38^\circ$ 。

鉛直地震度を水平地震動の1/3, 1/2, 1.0倍とし、それぞれ異なる水平震度のもとで主働土圧を計算した。結果は図-5に示す。

岩手・宮城内陸地震は、2008年（平成20年）6月14日（土）午前8時43分頃に発生したM7.2の地震であり、宮城県栗原市で最大水平加速度689.3gal、最大鉛直加速度280.7galが観測された。これを参考に図-12の断面に鉛直加速度を水平加速度の1/2倍とした。計算された土圧を図-13に示す。物部・岡部式で計算された土圧と逆に、本提案式で算出された土圧の大きさは震度の増加と共にやや減少する傾向にあることが分かった。鉛直加速度を考慮した場合の土圧値は、考慮しない場合に比べて約2%高くなっている。因みに、クローン土圧式による静的主働土圧係数は0.25であった。

実務では擁壁の高さが8mを超えない場合、耐震設計は行われないとされる。しかし、今回のように擁壁自身の高さが8mを超えていないものの、背後の盛土は8.0mを超えているため、擁壁が盛土の崩壊と共に破壊したと推測される。したがって、擁壁のみではなく、背後盛土の高さなどをも勘案して、擁壁・盛土耐震設計の有無を決めるべきである。



図-11 鶯沢工業高校の盛土・擁壁崩壊

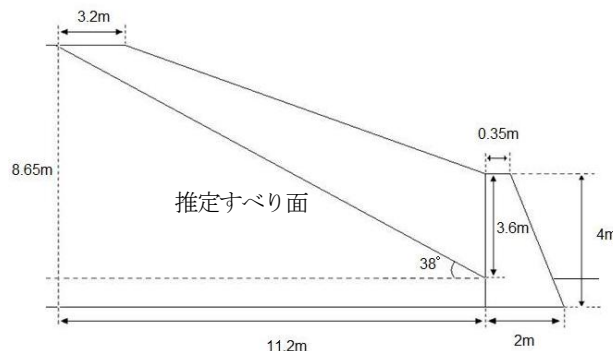


図-12 擁壁および背後盛土の断面

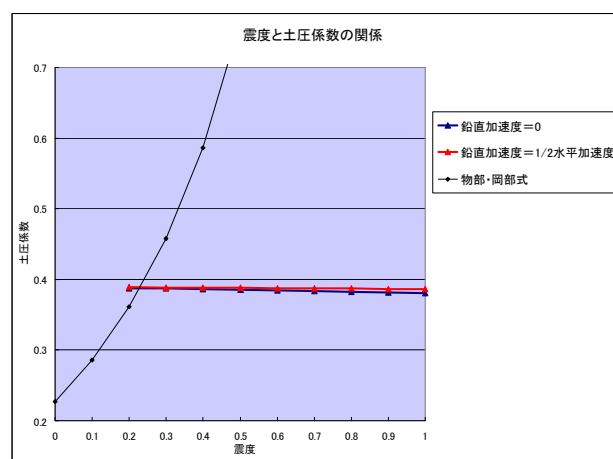


図-13 擁壁および背後盛土の断面

4. おわりに

本研究では既存の理論式を参考に、水平・鉛直地震動の両方を受ける擁壁に作用する地震時主働土圧の算定式を誘導した。そして様々な適用事例を通して鉛直地震動が主働土圧に及ぼす影響について検討した。その結果、以下のことが分かった。

1) 遠心模型実験との比較・検討を行った結果、震度が大きくなるにつれて、本提案式による土圧が上昇傾向にあった。これは実験結果と一致したが、算出された地震時の主働土圧の値は実験結果より少々大きくなった。

2) 地震によって破壊した実際擁壁の事例に本提案式を適用した結果、鉛直加速度が大きくなるほど算出される土圧は大きくなることがわかった。また、算出された土圧は水平震度の増加と共に減少する傾向も見られた。

今後、提案式を様々な事例に適用してさらに検討すると共に、擁壁の回転運動を考慮した場合の土圧式を提案していくつもりである。

参考文献

1) 龍岡 文夫, 古関 潤一: 第5回 地震時土圧 (その

- 1) , 基礎工, pp.104~107, 2010.
- 2) 右城 猛：擁壁に作用する地震時主働土圧に関する考察, 右城の研究室ホームページ.
- 3) 松尾 修, 斉藤由紀子, 岡村未村：擁壁に作用する地震時主働土圧に関する考察および比較計算, 第26回地震工学研究発表会, 2001.
- 4) 渡辺健治, 古関潤一, 館山勝, 小島謙一：地震時擁壁土圧に関する物部岡部式の妥当性の検討, 第55回土木学会年次学術講演会, 2000..
- 5) Ching-Chuan Huang ,Yu-Hong Chen: Seismic stability of soil retaining walls situated on slopes, J. Geotech. Geoenviron. Eng., 130 (1), pp. 45-57, 2004.
- 6) 地盤工学会：2008年岩手・宮城内陸地震災害調査委員会報告書, 2009.

Seismic earth pressure evaluation of retaining walls considering vertical earthquake motion

Jing-Cai JIANG and Susumu Nakano

A simple method is presented to evaluate earth pressure of retaining walls considering vertical earthquake motion. The method was applied to a number examples including two actual failed retaining walls due to earthquakes. It was shown that vertical earthquake motion usually results in an increase of active seismic earth pressures.