

## 論文の内容の要旨

論文題目：大地震荷重下における擁壁の動的応答及び

背面地盤のひずみの局所化が地震時土圧に及ぼす影響

氏名：渡邊健治

過去の大地震において、擁壁などの抗土圧構造物に多くの被害が報告されている。1995年の兵庫県南部地震においては、重力式、もたれ式、L型擁壁等の従来型擁壁は大きな被害を受けたのに対して、剛壁面を有する補強土擁壁の被害は軽微であった。

地震時に擁壁には地震時土圧および慣性力が作用し、それらの外力に対して従来型擁壁はフーチング底面での支持力、補強土擁壁は補強材張力で抵抗するが、擁壁の地震時挙動や地震時土圧の発現メカニズムについては十分には明らかになっていない。

従来の低震度を想定した多くの耐震設計基準において地震時土圧算定のためには物部岡部式が用いられてきた。従来の設計では、地震時土圧算定の際に残留強度相当の低めの強度定数( $\phi$ )が用いられ安全側評価になっていたことや、既往の実験的研究において低震度(200gal程度)では地震時土圧の実測値と物部岡部式が概ね一致する結果が得られていたことなどから、兵庫県南部地震以前に地震時土圧算定法が実務上問題となることはなかった。兵庫県南部地震以降、大震度を想定した耐震設計が導入されたが、L2地震動のような大地震動の最大加速度から換算した水平震度をそのまま物部岡部式に用いると、計算不能となる場合や、すべり面が深くなりすぎる場合などの不合理な点が生じた。そのため、土のひずみ軟化特性やひずみの局所化を考慮できる修正物部岡部式が提案され、鉄道基準や道路基準に採用された。しかしながら、大震度において実際に作用する土圧は、地震動の特性や擁壁の動的応答の影響を受けると考えられる。既往の模型実験では、大震度においては物部岡部式や修正物部岡部式よりも小さな土圧しか作用しない結果も得られていた。そのため、既設擁壁の耐震性能照査や新設擁壁の耐震設計のために、大震

度における地震時土圧を合理的に算定する手法の確立が望まれていた。

過去に擁壁の地震時挙動や地震時土圧算定法に関して多くの研究がなされているが、兵庫県南部地震レベルの大地震動を想定した研究、異なる擁壁タイプの地震時挙動を評価した研究、背面地盤の変形状況（すべり面の発生、発達）と地震時土圧の関係に着目した研究は少ない。

このような背景から、本研究では大震度における擁壁の耐震設計のさらなる合理化を図るために、「大地震荷重下における地震時土圧および擁壁の地震時挙動の解明と、これらの合理的評価手法の提案」を目的とし、系統的な模型実験（傾斜実験、振動実験）を実施した。実験は3種類の従来型擁壁模型と3種類の補強土擁壁模型を用い、擁壁に作用する力（外力、抵抗力）を精緻に計測し、擁壁の地震時挙動や地震時土圧の特性を多角的に評価した。特に重力式擁壁については、模型作成直後に大きい加速度で加振する一発加振実験や卓越周波数を変化させた実験など様々な加振方法で行い、さらには新たに導入した画像解析システムを用いてすべり面の発生・発達特性について定量的に評価し、地震時土圧の発現特性との比較を行った。これらの模型実験から得られた結果、知見は以下の通りである。

#### (1) 擁壁の地震時挙動について

##### ・異なる擁壁タイプの地震時挙動の比較

従来型擁壁では、一旦変位すると、変位が急速に進展したが、補強土擁壁では変位は急速に進展せず、変位に対する靱性を示した。これは各擁壁の外力に対する抵抗メカニズムの違いに起因しており、兵庫県南部地震での擁壁の被害事例と定性的に合致する現象であった。特に補強土擁壁の場合は、上層の補強材を延長すると延長補強材がすべり面の発生を抑制するため、効率的に耐震性を向上できることが分かった。

##### ・異なる加振条件のもとでの擁壁の地震時挙動の比較

擁壁タイプによらず、大変位に至る水平震度は傾斜実験<正弦波加振実験<不規則波加振実験の順に大きくなった。これは大きな水平慣性力の作用する回数と継続時間の違いに起因していた。卓越周波数を変化させた不規則波加振実験でも同様の傾向が見られた。

#### (2) 背面地盤の動的応答および変形特性（すべり面の発生特性）について

##### ・背面地盤の動的応答について

背面地盤の応答加速度は、すべり面の発生位置、すべり面発生の度合い、加振周波数に大きく依存する。さらに、すべり土塊の内部であっても、場所によって応答加速度の大きさ・位相が異なり、必ずしもクーロンの主働土圧理論で仮定されているような剛体挙動ではなかった。

##### ・すべり面の発生特性について

重力式擁壁やもたれ式擁壁の振動実験では1本目のすべり面が発生した後、2本目のすべり面が1本目よりさらに深い位置で発生し、修正物部岡部式と定性的に合致する現象が得られた。画像解析システムを用いてすべり面の発生過程を詳細に調べた結果、すべり面は

進行的に発生すること、すべり面は加速度が最大となった時ではなく、加速度が上昇する過程において既に発生し始めることが分かった。また、すべり面の発達程度は、擁壁の変位量・変位モードの影響を大きく受け、加振周波数の影響は少なかった。

### (3) 地震時土圧の大きさ、すべり面角度の実験値と物部岡部式の比較

#### ・大地震荷重下において擁壁に作用する地震時土圧について

地震時土圧の大きさや位相特性は擁壁の支持条件（固定度）の影響を大きく受け、固定度が低い擁壁の場合、擁壁の有する抵抗力以上の地震時土圧は作用しなかった。これらの結果は、擁壁の耐震設計においては擁壁の支持条件を十分に考慮する必要があることを示唆している。

#### ・実験値と物部岡部式の比較

傾斜実験では、地震時土圧の大きさ・すべり面角度は物部岡部式と概ね一致した。これは、傾斜実験が物部岡部式の想定している状況に近い条件下で行われているからであった。一方、振動実験において従来型擁壁に作用する地震時土圧は物部岡部式よりも小さく、すべり面角度は物部岡部式よりも大きかった。この傾向は大震度において特に顕著であった。この原因としては、すべり土塊の応答加速度が振動台加速度と異なること、物部岡部式よりも小さいすべり土塊で地震時土圧が決定されていること、などが挙げられた。

以上の実験結果を踏まえ、すべり土塊の大きさ・応答特性、すべり面上で発揮されるせん断強度を考慮し、すべり土塊の力のつりあいから地震時土圧を算定した。その結果、特に大震度において計算値と実験値は合致しなかった。この原因としては、① $\phi_{mob}$ のひずみ加速度依存性、②擁壁の地震時挙動（外力に対する抵抗特性）、の影響が挙げられた。

#### ・すべり面で発揮されるせん断強度（ $\phi_{mob}$ ）の逆算値

地震時土圧の実測値から、すべり面上で発揮されるせん断強度（ $\phi_{mob}$ ）を逆算した。この結果と画像解析により算出したすべり面周辺の地盤のひずみ加速度を比較した結果、逆算された $\phi_{mob}$ は、特にピーク状態付近におけるひずみ加速度の増加により大きく増加している可能性があった。この影響を評価するためには、非常に速いひずみ速度で三軸試験を追加実施し、ピーク状態からポストピーク状態におけるひずみ加速度依存性について考慮する必要がある。

### (4) 擁壁に作用する外力と抵抗力

#### 外力と抵抗力の関係

振動実験において、重力式擁壁に作用する外力（地震時土圧、慣性力）および抵抗力の最大値（最大摩擦力）を比較した結果、作用外力は抵抗力の最大値に達した時に頭打ちとなり、さらに加速度が増加してもそれ以上の外力は作用しなかった。

#### 擁壁変位の累積性

擁壁の変位は作用外力が抵抗力の最大値に達して頭打ちとなっている時間帯に進展して

おり、その継続時間が長いほど変位量が大きくなることが分かった。

## (5) 大地震荷重下における擁壁の耐震設計手法について

### 耐震設計のために考慮すべき事柄

地震時土圧については、①地盤の強度定数、②擁壁の固定度（外力に対する抵抗特性）、③すべり面の発生位置、を適切に考慮する必要があることが分かった。また、擁壁の残留変位量については、①ポテンシャル外力の大きさ、②その作用継続時間、を適切に考慮する必要があることが分かった。

### 地震時土圧・すべり面角度の算定

地震時土圧およびすべり面角度は、擁壁に作用するポテンシャル外力が抵抗力を上回る時刻（ $F_s=1$  となる時刻）における水平震度（限界震度）を物部岡部式に適用することによって算定できる。この土圧が擁壁に作用する最大の土圧であり、その後地震動が増加しても土圧は増加しない。

### 擁壁の変位量算定

擁壁の変位量は Newmark 法によって算定できる。Newmark 法を用いる際のしきい値は、上記の手法で算出した限界震度を用いる。また、背面地盤のひずみ軟化挙動を考慮することにより、より合理的に擁壁の変位量を算定することが可能となる。

### 既往の提案手法との比較

既往の研究で提案されている地震時土圧算定法と比較した結果、本研究の提案手法は簡便に地震時土圧を算定でき、さらには擁壁の変位量算定の際に背面地盤のひずみ軟化挙動を考慮できる点に特徴がある。

本研究では系統的に実施した振動実験結果を踏まえ、大地震荷重下における地震時土圧の大きさ、擁壁変位量に影響を及ぼす因子を整理した。これを考慮すれば、大地震荷重下における地震時土圧を合理的に評価することが可能となり、新設擁壁の耐震設計や既設擁壁の耐震診断を合理的に行うことが可能となると考えられる。