

外 1-18

早稲田大学大学院理工学研究科

## 博 士 論 文 概 要

### 論 文 題 目

東京における入力地震動特性に関する研究

(観測記録に基づく地震動特性および  
1923年関東地震のやや長周期地震動)

申 請 者

横 田 治 彦  
Haruhiko Yokota

平成  
昭和 元年 10月

構造物の耐震設計に当たって設計用地震入力を設定することは、最も基本的かつ重要な事項であり、その構造設計に与える影響も大きい。建設地点の地震活動度の評価、将来発生が予想される地震動の推定、地盤構造による増幅特性の評価、時系列波形の選定等、設計用地震入力を決定する際には多くの要因を考慮する必要がある。近年、高層建物がさらに高層化される傾向が見られ、また免震建物の建設事例も急増し、長周期構造物の設計用入力地震動の再検討が重要な課題となっている。

設計用入力地震動の研究には、地震観測データが非常に重要であるが、充分な観測データを収集するためには長い歳月を要する。さらに、震度5以上の地震動を記録することは希であり、また日本全国の多様な地盤における質、量共に十分な地震動記録を集めるにはさらに長い観測期間を要する。従って、地震観測の結果に基づいて設計用地震動を策定する場合、対象地域を特定せずに地盤種別毎に観測記録を分類して用いているのが現状である。

本研究は、東京の入力地震動を研究対象とし、都心部で約15年間にわたって実施している地中地震観測の結果を用いて、特にやや長周期地震動に着目し、高層建物等の長周期構造物の設計用入力地震動を策定するための基礎的研究を行なったものである。限られた地域を対象として、地中地震観測の結果を適用することにより、地震動の地域的な特徴、特に深い地盤構造の影響を考慮した設計地震動の検討を行なった。さらに、耐震設計上東京において最大級の地震と考えられる1923年関東地震の本震、余震の変位記録の復元ならびにその評価を行ない、上記の検討結果と合わせて東京における入力地震動の定量的検討を行なった。

本論文は全体を6章で構成しており、その要約は次の通りである。

第1章は序論であり、本研究の目的、背景、既往の研究の概要および本論文の構成について述べたものである。

第2章では本研究に適用した地震観測の概要について述べるとともに、表層地盤の増幅特性について検討した。

現在高層建物等の支持地盤（工学的入力基盤）としている東京礫層以浅の地盤の振動特性に概ね支配され、その伝達特性はせん断波の重複反射理論でほぼ説明できること、また、解析において特に問題となる表層地盤の減衰定数は、高次振動モードほど小さくなる高次減少型を示すことを明らかにした。さらに、表層地盤以深の東京礫層および礫層下部に続く泥岩層中( $V_s=500\text{m/s}$ 前後)で観測された加速度およびその速度応答スペクトルは、都心部の各観測地点でほぼ同等の値を示し、これらの値は東京周辺部の軟岩中( $V_s=700\text{m/s}$ )の観測結果とも概略一致することを示した。この硬質地盤中において観測される最大速度振幅、最大加速度振幅、地震動の継続時間と地震のマグニチュード、震源距離の関係についても検討し、その回帰式を提案した。これらの検討結果に基づき、せん断波速度が $500\text{m/s}$ 前後の硬質地盤を工学的入力基盤として設定し、設計用入力地震動を策定する手法について述べた。

以上のように、設計用地震動を $V_s$ が $500\text{m/sec}$ 前後の硬質な地層における地震動と設定できることは、超高層ビルをはじめとして東京に建設される建物のほとんどがこのような地盤を支持層として設計されていること、また、建設前の土質調査、弾性波速度検査などの調査もGL-100m程度までの浅い地盤を対象としていることなどより、建物の実設計面から見ても実用的であると言える。

第3章では工学的入力基盤で観測される地震動特性を、速度応答スペクトルの特性として震源域ごとに検討した。

それぞれのスペクトルは震源別の特性を有していることを明らかにした。その震源域の特性を大別すると短周期成分の卓越する震源域（例えば千葉県北部・中部、東京湾北部、茨城県南西部）とやや長周期成分の卓越する震源域（例えば伊豆半島付近、三宅島近海）があることを示した。さらに、速度応答スペクトルとマグニチュード、震源距離の関係について震源域毎に回帰分析し、その結果および歴史地震のデータを基に各震源地域で想定される最大級の地震を設定した。次に、これらの地震による東京における地震動特性を求め、現在の耐震設計でよく用いられる設計用地震動の特性と比較した。なお、これらのスペクトル特性の検討は水平動成分と上下動成分それぞれについて行なった。この結果、対象構造物によつては上下動成分による応答が無視できない場合もあることが判明した。

第4章では超高層ビル、長大橋、大型貯槽などの大規模・長周期構造物の耐震設計を考える上で重要な、周期約2秒から15秒程度のやや長周期地震動の性質について検討した。

やや長周期地震動は、震源の特性の他に建物建設地周辺の深い地下構造や広範囲の地形の影響を強く受けることが良く知られている。本章では、長周期領域まで計測可能な速度型強震計によって観測された地震記録を用いて、東京の深い地下構造と増幅特性の関係、震源地域とやや長周期地震動の性質の関係について検討した。その結果、マグニチュードが大きい地震の際に、東京で観測された記録では、やや長周期の卓越周期が見られ、これらのやや長周期成分は深い地下構造を考慮したせん断波の重複反射理論の解析結果で説明される。しかしながら、7~8秒の卓越成分は、観測波の軌跡や分散性からみるとラブ波的特性を有しており、4.5秒の卓越成分はレーリー波的特性を有している。これらの成分波は表面波と考えられる。8~10秒の成分の軌跡の主軸直角方向と震源方向は必ずしも一致せず、関東平野周辺部の地形、地質構造が表面波の生成過程に複雑な影響を与えるものと推定される。また、東京の西方から南方に震源を持つ地震において、周期約8秒の表面波が発生する位置は、関東平野西縁部の地質構造の境界付近である。卓越周期8~10秒のスペクトル振幅は、Transverse成分、Radial成分ともに震源方向による顕著な方位依存性を示すとともに、震源深さとの相関も認められ、やや長周期成分を設計に考慮する場合は、その震源依存性を無視することはできないと言える。

第5章では今村式2倍強震計によって観測された1923年関東地震の記録の修復、復元を行ない、関東地震の東京における地動の推定、評価を行なった。

関東地震の本震・余震記録は東京大学の本郷構内で複数の強震計で記録されているが、本震地動は記録可能な振幅を越えたため記録針が外れて波形が欠落したり、飽和した波形となっており完全な記録は存在しない。一方、今村式2倍強震計の記録は振幅の飽和部分が多く、一部に欠落部分があるもののEW成分は約20分間にわたって記録されており、本震地動の全体像を知ることができる唯一の記録である。また、余震記録に関しては数種の地震計で記録されており、工学的な利用が可能な記録も多い。そこで、本論では今村式2倍強震計の本震・余震記録を数値化し、飽和波形を可能な限り修復するとともに地震計の周期特性の補正を行なって、関東地震の際の東京の長周期地震動の特性を推定することを試みた。なお、波形の修復に先立ち今村式強震計の振動試験を行ない、記録波形の飽和の性状を確認し、それに基づき波形の修復方法、信頼性について検討した。その結果、関東地震時の記録波形は2秒から15秒位までの周期範囲で信頼性が高く、数値化記録は工学的な目的に十分利用できることを確認した。

余震記録の解析結果から、記録に見られる7~8秒、4~5秒などの卓越周期は、東京における最近の地震観測結果ともよく対応すること、余震の主要動部分の軌跡は、全体的に南北動が東西動より大きく、最大変位振幅はNS成分がEW成分に比べて平均約1.5倍大きいことがわかった。上記の余震記録を要素波として、半経験的波形合成法により本震地動の推定も行なった。

1923年関東地震の本震EW成分の復元波形は、周期2秒から15秒の帯域において、最大変位14.5cm、最大速度約26cm/s、最大加速度約190cm/s<sup>2</sup>となった。変位波形の振幅はS波初動から約3分間は10cm以上、次の3分間は5~10cm、その後6~10分間は5cm以下である。後半は振幅1cm程度のやや長周期の波が10分近く継続する。このように、やや長周期の波が長時間継続することは、減衰の小さい長周期構造物の耐震設計上注目すべきことである。また、卓越震動の周期は7~8秒、10秒、12秒、14秒などである。特に、関東平野の地下構造による表面波(ラブ波)と考えられる7~8秒の周期成分が顕著に見られ、第4章で検討した最近の地震観測結果ともよく一致する。主要動部分の記録波形が欠落しているNS成分は、余震記録等の検討からEW成分に比較して1.5倍程度大きな地動であったと考えられ、この比率を用いると、NS成分の最大変位は20数cmと推定され、余震記録を要素波とした半経験的波形合成法による本震地動の推定結果とも対応する。

以上述べたように、1923年関東地震の本震地動の復元波形の検討から、耐震設計上有用な知見が明らかになった。

第6章は結論であり、各章で得られた研究成果を要約し本論文の結論を述べたものである。