

Dynamic Behavior of a Submerged Tunnel during Earthquakes

田村 重 四 郎 (東京大学教授)

本論文は従来明らかでなかった沈埋トンネルの地震時の挙動を、実在する沈埋トンネルの地震観測ならびに模型実験によって実証的に捉え、その結果に基づいて地震応答解析用モデルを作成し、このモデルを用いて沈埋トンネルの耐震性に関わる構造上の諸問題を検討するとともに合理的な耐震構造設計を行うための資料を提供したものである。

地震観測：地震観測は、沈埋トンネル区間の長さが480 mの羽田沈埋トンネル(日本国有鉄道)で行われた。トンネル内軸線上に205 mの測線を設定し、2点に通常の加速度型地震計を設置したほか、4点でトンネルの左右壁にひずみ計を設置して、地震加速度と地震時に発生するトンネル軸方向のひずみを同時に測定した。30個以上の地震の記録を分析した結果、地震ごとに得られた最大加速度と最大ひずみの関係、最大ひずみと震央距離とマグニチュードとの関係が明らかにされた。最大ひずみは最大加速度の増加に伴って増加するが、表層地盤の振動特性と地震動のスペクトルの性質—マグニチュードとも関連する—との関係に著しく影響を受けること、比較的小さいマグニチュードの大きい地震では表層地盤の低次の卓越振動がひずみ波形に卓越してあらわれ、さらに各測点のひずみ記録の間にはほとんど位相差がなく波形が幾何学的に類似していることなどが認められた。

模型振動実験：地盤およびトンネル本体をそれぞれゼラチン、シリコンゴムで製作した沈埋トンネルの3次元模型を振動台上で振動させ、地盤とトンネルの挙動およびそれらの相互作用を検討した。その結果、この種類の振動実験が、立坑・換気塔部、取付部を含んで複雑な構造系である沈埋トンネルの動的挙動の研究には有力な手段であること、トンネル本体自身の固有振動は発生せずトンネルの質量は無視し得るし、通常的地盤ではトンネルの存在は地盤の卓越振動数にほとんど影響を与えないので、地震時のトンネルの挙動は、トンネル本体に作用する加速度ではなくトンネル軸線に沿う地盤の変位の分布に依存していること、地盤の振動特性が変化する部分でトンネルに大きなひずみが発生することなどが明らかにされた。

地震応答解析用モデル：地震観測結果と模型振動実験結果に基づいて、地震時に発生するトンネル壁の軸方向の応力またはひずみを求めるための解析用モデル

を実用性をも考慮して構成した。マグニチュードの大きい地震では表層地盤にはせん断基本振動が卓越するものとし、表層地盤をトンネル軸に直交する面で分割し、それぞれ等価な一質点ばね系で表わして、地盤全体を、トンネル軸上にばねを介して連なった多質点系モデルに置換し、基盤より地震波動を入力して表層地盤の応答を求め、次いで地盤にばねで接続してあるトンネルの変形を静力学的に算定している。このモデルでは地盤の高次振動が算入されていないため、このモデルで得られる地震応答加速度はかなり小さい値を示すことになる。

解析用モデルを用いた解析：解析用モデルを使用し、沈埋トンネルの動的解析を行った結果、トンネル軸線に沿うトンネルの応答断面力の分布は、地震によらず、定性的に、地盤の動特性の変化する部分で大きな値を取ることが分った。また沈埋トンネルの耐震性に大きな関連をもつ立坑・換気塔部とトンネル部との接合方法、エレメント間の接合方法等のトンネルの断面力に及ぼす影響が検討され、適切な接合方法と接合位置、箇所数を適当にとればトンネルの断面力を低下させるのに有効であることを示した。トンネルと地盤を結ぶばねを bi-linear 型と想定して、トンネル周辺の土の非線形的性質のトンネルの挙動に対する影響も検討されている。

耐震設計のための資料：以上のべたように沈埋トンネルの地震時の挙動は、埋設地盤の変位によることが明らかになったため、沈埋トンネルの耐震設計にあたって、地盤の変位に基づいた新しい耐震設計用の資料が必要である。この資料を得るため、本論文では、表層地盤の動特性の変化する部位でトンネルに大きな応答断面力が発生することに対応して、各種のモデル地盤を想定して実地震波形に対する応答計算を行った。入力地震波は1968年十勝沖地震における八戸での記録、1940年 El Centro NS 及び1952年 Taft EW の3種であり、モデル地盤は層厚の異なる2種類の表層地盤が層厚を漸変して接続している場合であって、表層地盤の基本振動周期、接続部分の斜面の長さ及び斜面の形状を可変量として、種々の地盤状態を想定し解析の対象とした。また地盤とトンネルとの間のばねとトンネルの変形に対する剛性との関係がトンネルの応答断面力に及ぼす影響、エレメント間の接合がトンネルの応力に及ぼす効果等も検討された。計算結果は2種類の表層地盤の応答変位の和で除したトンネルの応力度の形で表わされ、実用し易いようになっている。

開水路流の乱流構造に関する研究 (総合題目)

中川 博次 (京都大学教授)・祢津 家久 (京都大学助手)

乱流は「自由乱れ」と「壁面乱れ」とに大別されるが、後者は固体境界面に拘束されるために著しく歪まされたいわゆるせん断乱流場となっており、その理論的・実験的取扱いは、前者に比べてはるかに困難であり、その本格的な研究がみられたのは1950年代のNACAグループによる風洞実験で熱線流速計が実用化されて以後のことである。しかし、これらの実験的研究のほとんどは滑面管路流や境界層流を対象とした航空工学等の分野におけるものであって、水工学上の問題にみられる粗面乱流とりわけ開水路せん断乱流の研究は数少ない。一方、フルード数やレイノルズ数などの水理要素および等価粗度等で代表される壁面の性質によって開水路における乱流の構造がいかなる影響を受け、またそれがどのような物理機構に基づくものかを知ることは、現象自体もまた実用上からも興味ある課題である。乱流構造を解明するには、乱れの発生、輸送および熱逸散の機構や乱れエネルギーの収支を明らかにしなければならず、レイノルズ応力等の直接計測が必須となってくる。

これらの点を考慮して、本研究ではまず2成分熱膜流速計の較正方法を確立し、その実用化をはかったのち、これを用いて滑面乱流、粗面乱流、さらに浸透流を有するポーラス乱流と、水路床条件を実河川の条件に順次近づけて乱れ特性の系統的な計測を行い、その内部機構を明らかにするとともに、水理諸要素の影響について統一した考察を加えようとしたものである。特に、従来のこの分野の研究でややもすると看過されていた乱流諸現象の物理的解釈に研究の主眼をおき、現象論的な乱流モデルによって実験から得られた新たな知見をより定量的に説明することに努めた。

滑面乱流と粗面乱流の特性 (論文報告集 第241号)

水理要素をほぼ一定に保ち、壁面粗度が乱流構造に及ぼす影響を実験により系統的に考察した。まず、開水路せん断乱流の基本と考えられる滑面乱流の特性を詳しく測定し、気体乱流に関する従来の実験結果と比較検討して新たな知見を得た。すなわち、乱流場全体にわたる乱れ強度の各成分の変化特性が明らかにされ、その波数スペクトルに一貫した物理的考察が加えられた。波数空間の慣性領域から評価される乱れエネルギー逸散率を用いて、乱れエネルギーの収支関係を考察した結果、壁面近傍は乱れの発生が熱逸散より卓

越した乱れエネルギーの過剰な領域であり、逆に自由水面近傍は乱れエネルギーの不足な領域であって、両領域間には前者から後者へと乱れエネルギーが輸送される動的な平衡状態が存在し、乱流構造がそれぞれ壁面領域、自由水面領域および平衡領域に区分されることを明らかにした。

粗面乱流では、壁面領域の平均渦径が減少し、主流方向の乱れ強度も減少して、滑面乱流に比べて等方性志向が強く、乱れの発生機構も異なってくるが示された。さらに、乱れエネルギー式に立脚して、各領域での乱れ特性量の関係を明らかにするとともに、乱れエネルギーの収支関係に立脚した新たな平均流速分布式を導いて従来のものと比較検討した。

透水性開水路乱流における主流と浸透流との相互作用 (論文報告集 第244号)

壁面の状態が粗面乱流の場合よりさらにゆるくなると主流と浸透流との間の運動量の交換が活発になり、付加的な応力が発生する。この場合、主流の圧力変動によって浸透流に攪乱が誘起され、そのフィード・バックとして浸透流の乱れが主流に付加応力を発生させるものと考えた。浸透流の基礎方程式を導いたのち、風波の発生理論をせん断乱流場へ拡張したPhillipsの理論をこのポーラス乱流場に適用して付加応力の予測式を誘導し、実測結果と比較した結果、ここに展開されたモデルによって主流と浸透流との動的相互作用を十分満足に説明しうることが確かめられた。

せん断乱流の渦モデル (論文報告集 第231号)

上述のように壁面領域の乱流構造は境界面の条件にきわめて敏感であり、しかも乱れの発生に寄与するbursting現象が顕著であるから、周囲からエネルギーを吸収して渦回転および渦スケールを増大していく成長段階にあって複雑な特性を示すが、平衡領域以上では渦はほぼ完全に発達して渦度保存則等が成立する。この領域での渦運動を流下方向に傾斜した渦系内での楕円回転による主運動とvortex stretchingによる擾乱を副次運動とするII型渦モデルによって定式化し、乱れの強度およびスケールの特性を定量的に評価して、実験事実によってその乱流モデルの妥当性を確かめた。

この一連の研究で提示された理論展開や乱れ計測にはさらに検討を要する点も残されているが、従来難解といわれてきたせん断乱流の構造を解明する糸口を与え、より高度な乱流モデルの展開とその水工学への応用にいささかでも寄与したものと考える。