ケンブリッジ大学における研究活動（BOTDR光センサー）

堀地　紀行
HORICHI　Noriyuki
国士舘大学理工学部教授

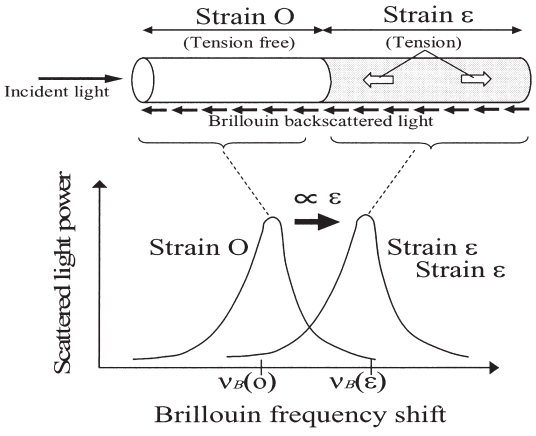
1．ケンブリッジ大学における光ファイバー計測技術の研究

ケンブリッジ大学はご承知のとおり，あのニュートンや現在まで81名にのぼるノーベル賞受賞者を輩出したことでも有名な世界屈指の研究・教育実績を有する大学である。ケンブリッジ大学おける土木工学分野での光ファイバー計測技術に関する研究は，工学部とその付属機関であるスコフィールドセンターの地盤工学分野で実施されており，工学部には日本人の曽我教授が活躍されている。そこでは，トンネル，斜面監視，杭の変位などの地盤系の他に，コンクリート構造の梁などの計測にも展開を図っている。

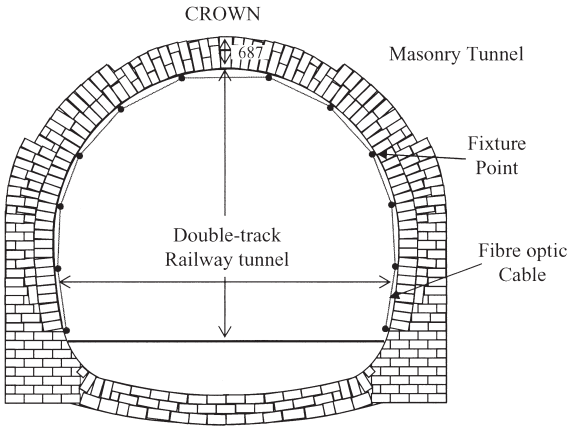
対象構造物がトンネルや土構造が主体であることから，計測値としてmmオーダーの変位レベルの値を求める事例が多いため，光ファイバー計測技術としては，BOTDRを主体とした研究が進められている。BOTDRの計測原理は，光ファイバーケーブルに露光されたレーザー光の反射光が，光ケーブルに生じたひずみに比例してその反射光の波長をシフトさせるという特性を利用し，その値を測測することによって，固定された光ファイバーケーブルの区間内における変位を測定するもので，概念図を（図－1）に示す。

また計測事例として，BOTDRを用いたトンネル断面の変位計測事例を以下に紹介する。

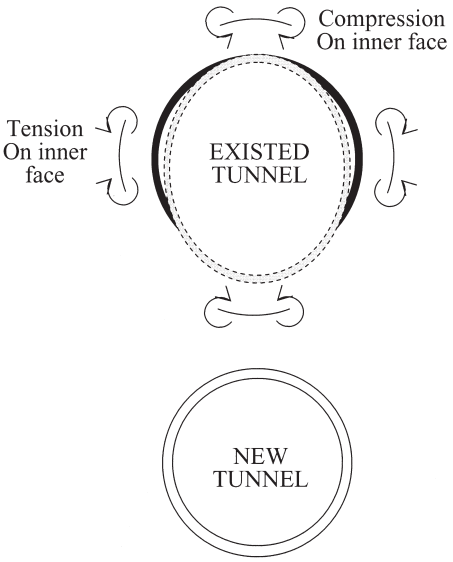
現在，ロンドン市内で100年ほど経過したレンガ造りのテムズリンク鉄道複線断面トンネルの極めて近接した下部の地下空間に，現行ウォータールー駅からセントパンクラス駅にターミナルを移設するに伴い，ドーバーを渡ってパリ，ブリューセルと連絡しているユーロスターのロンドン市内の地下新線が建設されている。図－2は，レンガ造りのトンネル内空に光ファイバーケーブルを内接多角形のように折れ線状に配置した様子である。図－3は，既設トンネルの下部に，新トンネルが建設され，既設トンネル下部の地山が緩められ，その影響による既設トンネルの変位挙動を示す概念図で，トンネルの天端で負の曲げモーメントによるものと同じ変形モードが発生している。これは，老朽化し，所々クラックの入った石積みに近いレンガ構造であるため，曲げモーメントとトンネル内空側へ働くせん断力に起因したずれなどが，天端ドーム部の曲率半径の収縮の主な原因と考えられる。またトンネルの側壁部分では正の曲げモーメントもしくは，底盤の沈下などによる側壁の曲率半径が伸びる変形モードが発生し，それらの変位に対して，配置した光ファイ



図－1　BOTDRの測定原理の概念図



図－2　レンガ造りの鉄道トンネルと計測状況



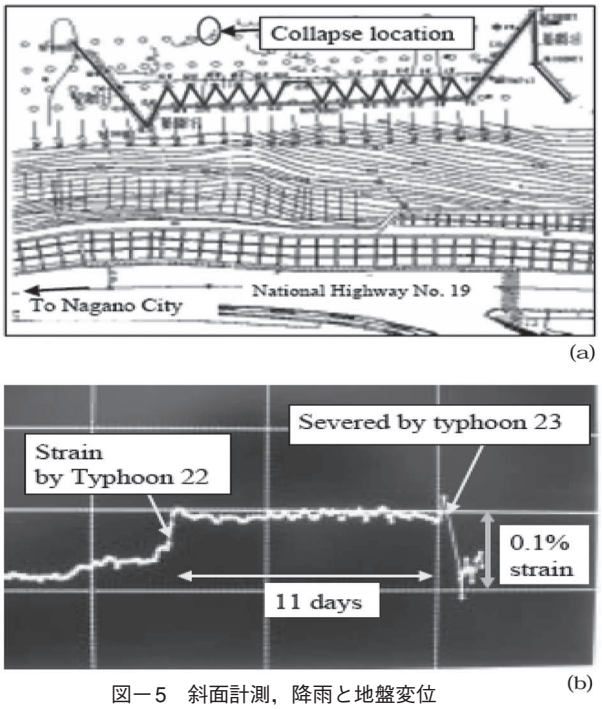
図－3　下部新設トンネル建設時の既設トンネルへの影響

バーケーブルの伸びと縮みで，変位を良好に測定している。レンガ造りのトンネルの場合，レンガ間のモルタルの剥離やレンガ相互のずれなども考えられ，材料の連続性や微小変形の仮定の設定が困難なため，曲げモーメントによる変形か，せん断力によるものか，またはクラックによるヒンジの形成にともなう回転やずれ変形かの判定は難しく，断面力を把握することは困難であるが，内空変位を指標として，近接施工における安全管理の重要なファクターの役割を果たしていることには相違ない。

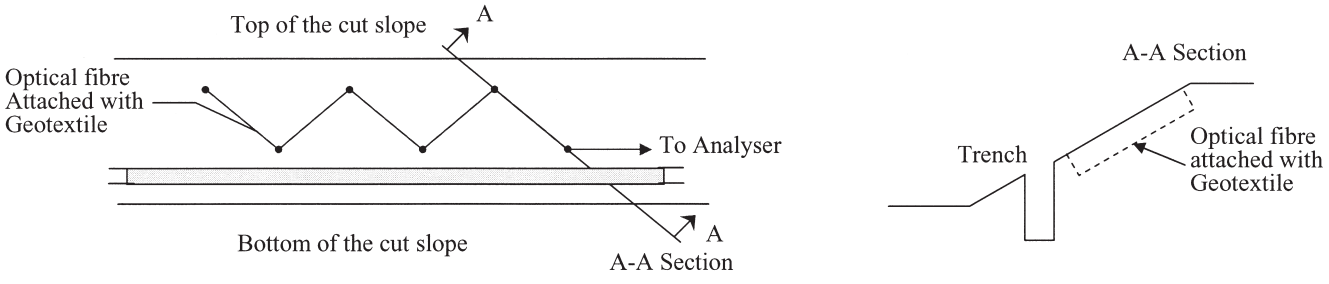
次の計測事例として，BOTDRを用いた斜面の変位計測事例を紹介する。高速道路沿いの斜面において，近接施工に伴う斜面の変位挙動や，降雨時の斜面監視を目的とした研究を行っている。ケーブルを補強し，地山の動きとの一体化の目的で，ジオグリッドを設置基材として利用している。光ファイバーケーブルをジオグリッド表面に接着剤で添接し，斜面に種々のパターンを設定して，地中に敷設し，のり尻を開削して斜面に強制的に変位を与え，設置パターンの違いによる値の出方の変化などについて分析を行っている。この高速道路の斜面の現場計測には筆者の一人も同行し測定に加わった。その時の状況を（写真－1）と（図－4）に示す。斜面測定で，ジオグリッドと土は必ずしも一体として挙動はしないため，地山の変位の絶対値を把握することは難しい。

また，別の斜面計測現場のデータではあるが，大量の降雨による斜面の大きな地盤変形を捉えたグラフを（図－5）に示す。

写真－1　BOTDRを用いた斜面計測状況



図－5　斜面計測，降雨と地盤変位
（ケンブリッジ大学より提供）



図－4　BOTDRの斜面の変位計測への適用例

2. まとめ

ケンブリッジ大学の土木構造物に関する挙動計測の研究事例として，BOTDRによるトンネルと斜面の計測例を紹介した。トンネルの計測例は，覆工がレンガ構造のため計測された変位から断面力の変化を算定することは難しいが，仮にシールドトンネルのように，断面が鋼製やコンクリート製の円形セグメントリングのなどの場合は，シールドトンネルを骨組み構造として扱えるため，計測された変位と照合しながら断面力の変化を把握することも比較的容易であり，国内ではNTTや通信土木系の会社などがシールドトンネルの近接施工の計測について実績を重ねつつある。ケンブリッジの研究例でも見られる光ファイバーケーブルを内接多角形的な折れ線で配置することは，車両の通過を目的とした自動車，鉄道などのトンネルにとっては，効果的なケーブル敷設方法と考えられる。また，斜面計測で，地山挙動を絶対値として把握することは，ケーブルと地山の動きの一体性を保つという点では，かなり難しく，むしろ斜面崩壊の予兆を地山の小さな動きから把握するといった，危険予知のシグナルの役割として活用いる方法も考えられ，今後の研究・開発テーマと考えられる。

さらに，光ファイバー計測技術の展開が期待される分野としては，光ファイバー網が構築されつつある現在，都市や地方の面的，線状を問わず，広範囲な土木，建築構造物への展開が期待され，特に電気的な測定器には不向きな多湿地域の構造物や，人的な作業が困難な環境の構造物などへの適用が考えられる。地盤系構造物としては，斜面，トンネルを始め，さらには沈埋トンネルや海洋構造物，長大な海底トンネルなどへの展開が期待される。

2006年の4月より約6ヶ月間イギリスに滞在し，欧州の研究に接し，英国在住の日本人の方々やイギリス人の知己を得るなど，貴重な財産を得ることができ感謝している次第である。

〈イギリスの大学散歩〉

写真－1は，11世紀の中ごろから講義が始まったとされるオックスフォード大学の著名なカレッジ，モードリン・カレッジです。また，写真－2は13世紀初頭に開学したケンブリッジ大学の代表的なカレッジのキングス・カレッジで，両大学とも開学当初から近世にいたるまで，王族や貴族，聖職者などのごく少数の子弟が，神学，哲学，ラテン語，数学，天文学，医学などを学んでいたようです。カレッジは，あちらの方々の発音ではコレッジと聞こえます。市民階級の子弟に大学が始めて門戸を開いたのは，イギリスにあっては1836年のロンドン大学（写真－3はカレッジの一つ）の創立を待たなければなりません。日本では幕末の緒方洪庵が大阪に開いた医学の適塾が1838年で，これと近い年代です。ロンドン市立大学の創立は1894年ですが，前回号でご紹介したので詳細は省きます。写真－4は，オックスフォードとケンブリッジの対校ボートレース（レガッタ）が毎年行われるテムズ上流のヘンリーの様子で，ロンドンからわずか60kmほどですが，イングランドの美しい景観が楽しめます。

写真－1　モードリン・カレッジ

写真－2　キングス・カレッジ

写真－3　ロンドン大学

写真－4　テムズ上流のヘンリー