

## 土木技術に魅せられて

—問題解決への取り組み—

第一コンサルタント 代表取締役社長 右城猛

### 1. まえがき

私は昭和 45 年に高知工業高校土木科を卒業し、1 年間は地元の建設会社や町役場で働いた。その後の 45 年間は建設コンサルタント会社で勤務してきた。

私が建設コンサルタント会社に就職したのは、プレートガーダー橋やアーチ橋、トラス橋などの橋梁設計に憧れたためである。ところがコンサルタントに入社すると、私の想像とは違っていた。上部工の設計は、その多くを橋梁メーカーに頼んでおり、自社で設計する機会は少なかった。私が任された仕事は、主に下部工や基礎工の設計であった。

30 歳前後から落石防護工や擁壁など道路構造物の設計もするようになった。研究や技術開発をするようになったのは、40 代に入ってからである。57 歳で現職に就任してからは、会社経営や協会の充て職の仕事が多くなり、研究や技術開発に費やせる時間が少なくなっている。

これまでを振り返って見ると、自分の意志で仕事を選択したことはなかった。上司から指示されたことや顧客から依頼されたことを自分の仕事としてきたに過ぎない。

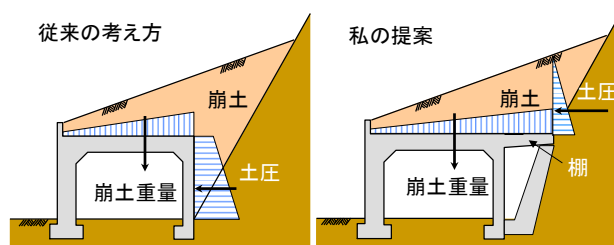
仕事をしているといろいろな問題が発生する。目の前に起きた問題を解決するのに精一杯取り組んできた。そうすると、落石対策や擁壁設計の専門家と世間から評価されるようになっていた。

本稿では、落石対策に関する話題に絞って、問題解決に取り組んできた事例を紹介する。

### 2. 国道 33 号柳谷洞門の設計



柳谷洞門



洞門に作用する土圧

柳谷洞門は高知県と愛媛県との県境付近において、一般国道 33 号が通過する地点に計画された落石覆工(ロックシェッド)である。

昭和 52 年に建設省四国地方建設局松山工事事務所(現・国土交通省四国地方整備局松山河川国道事務所)から発注された設計業務を私が担当することになった。

鉄筋コンクリート造の門形ラーメン形式として設計することが決まった。構造解析は、これを参考にするようにと大手コンサルタントの成果報告書を渡された。

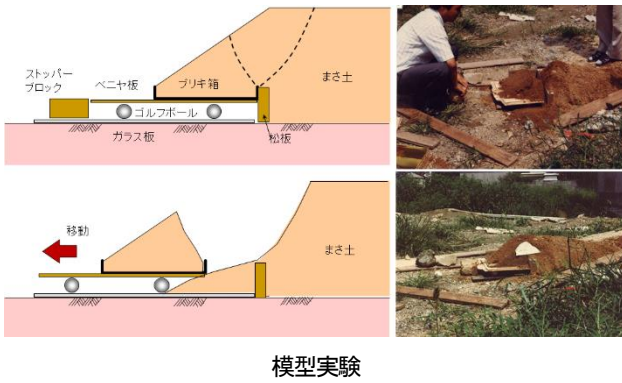
これまでの設計では、洞門と山側の擁壁の間に土を詰める方式が採られていた。しかし、このようにすると詰めた土によって大きな土圧が発生する。構造上好ましくないと考え、洞門の山側に片持ち式の棚を付けることを提案した。そのとき、堆積する崩土によって洞門頂版に水平土圧が作用するかどうかの問題になった。

私は、水平土圧が発生すると主張したが、過去の設計例では洞門頂版上の崩土を鉛直荷重としてのみ取り扱っていたこともあり、発注者に私の考えを理解してもらえなかった。

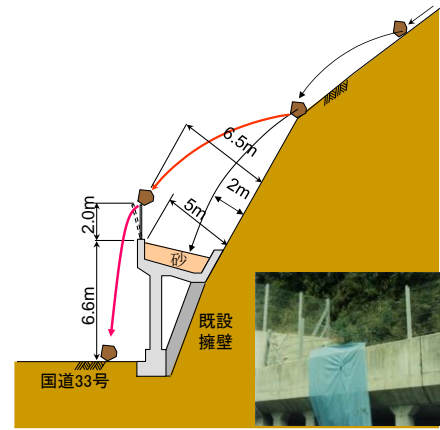
そのとき私が思いついたのは実証実験であった。ガラス板の上にゴルフボールを並べ、その上にブリキの菓子箱を載せ、洞門に見立てた台車を作り、土を山の形に盛った後に台車の前のストッパーをはずすと、台車が前方へ走り出すことを確認し、水平土圧が洞門に作用することを証明した。

土を山形に盛ることができるのは、洞門の頂版と土の間に摩擦があるためである。摩擦があるということは、水平力(摩擦力)が洞門に伝達されるというのが私の主張であった。

台車が前方へ動くと 2 種類のすべり面が形成された。この現象は、私の脳裏に深く刻み込まれており、後に改良試行くさび法という土圧計算法を考案するヒントになった。



模型実験



棚式落石防護工

### 3. 棚式落石防護工の設計

柳谷では、棚式落石防護工の設計もした。崩土の恐れがある箇所は洞門としなければならないが、落石対策のみでよい箇所は経済的に有利な棚式落石防護工を提案させてもらった。

設計にあたっては、落石が棚部のサンドクッションに当たってバウンドしても道路に飛び出さないようにする必要があった。落石の最大跳躍量は 2m というのが定説になっていたが、過去の実験では突起に衝突してジャンプしたり、割れたりして 5m まで跳躍したという観測データがあった。そこで、5m までならサンドクッションを敷いた棚部で受け止められる構造にした。

ところが、完成から半年後に落石が棚部の先端に設置してあった落石防護柵を跳び越えて本線部に落下する事故が発生した。落石跳躍量は 6.5m であった。

この事故以来、落石の運動に関する研究が必要と感じていた。落石の挙動を解明するために家の中でテーブルを傾け、消しゴムを転がして実験をしていたのであるが、実際の斜面でやってみたくなった。

鳴門市郊外に落石実験に適した斜面を見つけた。採石場内の切土のり面である。休日であれば貸して貰えることになったので、会社の同僚や部下、それに測量を手伝ってもらっている会社に協力してもらって、落石実験をすることにした。

採石場内で切り出された岩塊をペンキで白く着色し、体重計に載せて重さを量ってから斜面の上まで運び、そこから転がして落石の運動を観察した。ビデオカメラはまだ高価なため一般の家庭には普及していなかったが、部下の一人が持っていたので、それで撮影してもらった。

実験結果は、「落石の飛跳高の推定」と題する論文にし、昭和 58 年 7 月に金沢大学で開催された「第 1 回落石の衝撃力およびロックシェッドの設計に関するシンポジウム」で発表させていただいた。

落石実験で、落石は回転しながら飛行と衝突を繰り返して落下すること、斜面に衝突するとエネルギー損失が大きいこと、斜面のわずかな凹凸で飛び出しの方向が変わることなどがわかった。

いろいろと考えている内に、反発係数などの運動パラメータを確率密度関数として与え、落石が斜面と衝突する毎に乱数を発生させてパラメータを変化させて計算することを思いついた。モンテカルロ法を用いた数値シミュレーションを行えば、落石の速度や跳躍量をうまく計算できると思ったのである。

ヒントになったのは、正月休みに故郷に帰っていたときに、航空自衛隊に勤務していた幼なじみの先輩から酒を酌み交わしながら聞いた話であった。

航空自衛隊では、日本の領空に敵機が侵入してくることを想定し、それを撃墜するシミュレーションをコンピュータで行っている。それには、モンテカルロ法を用いている、という話である。

私の考案した数値シミュレーション手法は、「落石対策便覧に関する参考資料—落石シミュレートレベション手法の調査研究資料—」(日本道路協会)、「落石対策工の設計法と計算例」(地盤工学会)などで紹介されている。

### 4. 落石防護柵基礎の設計法の研究

#### ・標準図集の作成

平成 5 年に、建設省四国地方建設局土佐国道工事事務所(現・土佐国道事務所)から依頼されて落石防護柵基礎の標準図集を作った。従来は経験的に防護柵基礎の断面が決まっていたが、それでは会計検査で説明ができない。理論的な根拠を示す必要があったのである。

設計すると、従来よりも 2 倍程度大きな断面にしないと安定性を確保できないという結果になった。落石荷重は瞬間的に作用する衝撃力である。それにも関わらず、防護柵の中間支柱の降伏力を静的に作用させて設計していたためである。

明らかに過大設計であるが、標準図集は落石対策便覧に基づいて設計するという指示を受けていたので、この時点ではどうすることもできなかった。技術者にとって納得しないまま仕事することほど、嫌なことはないのである。



落石防護擁壁の模型実験

### ・ 模型実験

力学的に合理性のある設計手法について研究したいと思い、社団法人四国建設弘済会(現・一般社団法人建設クリエイティブ四国)が募集していた平成 11 年度の研究助成金に応募したところ、幸いにも採択された。

当時、わが国では、平成 9 年 4 月に決定された「公共工事コスト縮減対策に関する行動指針」に取り組んでおり、四国地方整備局でもコスト縮減の目標達成が大きな課題になっていたのである。

コンクリート製の擁壁模型を作り、これに鉛玉を衝突させて擁壁の応答を観察した。擁壁の応答は、剛体力学の運動で説明できることが分かった。

この成果を「落石防護柵基礎の合理的な設計法に関する研究」と題する論文にまとめた。私の提案式を用いれば従来の方法で設計したよりもコストを 2 分の 1 から 3 分の 1 に低減できるという内容である。

平成 13 年 11 月に高松メッセで開催された四国建設技術官民懇談会主催の新技术発表会で研究成果を発表したところ、四国技術事務所から、「右城さんの理論を実物大実験で検証したいので実験計画書を提出して下さい」という要請をいただいた。

### ・ 実物大実験

提案していた落石防護柵の重錘衝突実験が予算化され、平成 13 年 12 月から約 1 年半かけて実験と解析が行われることに決まった。

高さ 1m、幅 0.5m で、長さは 4.5m、7.5m、9m の 3 種類のコンクリート基礎に実物の落石防護柵を設置し、それに重さ 0.5t の重錘を衝突させ、基礎の応答を測定することにした。

衝撃力の作用時間は、0.05～0.1 秒と短いため、1/5,000 秒刻みでデータを測定する必要がある。四国内には、落石衝撃力に関する研究者がいなく、実験に使用する計測機器がなかった。重錘や重錘離脱装置を新たに製作しようとすれば膨大な費用がかかる。とても予算内では実施できない。

そこで、砺波市にある(株)エイ・シー・デイの藤井



落石防護柵基礎の実物大実験

智弘社長にお願いし、測定機器は金沢大学の前川幸次先生、重錘と離脱装置は福井の前田工織(株)から借りてもらうことにした。

擁壁は日本興業(株)が材料代のみで製作してくれた。実験の準備や計測は藤井社長、それに高松工業高等専門学校教授の長友克寛先生、日本興業(株)の松山哲也部長をはじめ社員の皆様が協力してくれた。実験方法や解析に関しては、国土交通省総合政策技術研究所の松尾修研究官、金沢大学名誉教授の吉田博先生、愛媛大学教授の矢田部龍一先生などから貴重な助言をいただいた。

実験をするには、事前に衝突速度を決める必要がある。私の考えた理論式を用いて基礎が転倒する限界速度を予測したが、実験前夜は本当に計算通り転倒してくれるのだろうかという不安でほとんど眠れなかった。

実験当日は国土交通省の職員をはじめ、多くの方が目に来られる。もしも予想通り転倒しなければ計測データを収集することができなくなる。再実験が必要になれば予算をオーバーするだけでなく、関係者に多大な迷惑をかけることになる。失敗は許されない。私の人生でこのときほどプレッシャーを感じたことはなかった。

結果は、私の計算通りで、無事に実験を終えることができた。しかし、計測された加速度から基礎の角速度や回転角を求めたところ、計算値とかなり開きがあることがわかった。

この原因は容易には、わからなかった。計測データとにらめっこをしながら解析モデルを修正し、運動方程式を解くという日々を 1 ヶ月くらい続けた。その結果、①基礎に伝達される衝撃力は、重錘衝撃力より小さい。②回転に伴って基礎のアームが減少し、自重によるモーメントが低下する。ということに気が付いた。

気が付けばコロンブスの卵と同じで、当たり前のことなのである。このことを考慮して当初の理論式を修正したところ、実験結果とピッタリ一致した。



防護柵の性能

落石の衝突後に、防護柵の基礎は予想通りに応答することが確認できた。しかしながら防護柵自体のエネルギー吸収性能は、これまでに想定されていた値よりもはるかに小さいことが明らかになった。

実験に使用した防護柵であれば、金網によって 25kJ、ワイヤロープで 7kJ、合計 32kJ のエネルギーを吸収できる計算であった。ところが、実験では、23kJ の運動エネルギーで重錘が防護柵を突き破った。

金網で 25kJ のエネルギーを吸収するには、重錘が衝突したときに金網は前方へ 1.2m ほどはらみ出す必要があるのだが、上下方向に 0.3m 間隔で張られたワイヤロープが金網を拘束しているので、金網は 0.3m 程度しかはらみ出すことができず、吸収エネルギーが小さくなっていることがわかった。

既存の落石防護柵は、斜面からの落石を阻止し、期待通りの性能を発揮していることが経験的に確認されている。このことは、落石の運動エネルギーも落石防護柵の性能も両方とも過大評価してきた可能性がある。ラッキーハーモニーを保っていたと考えられた。

私のこの仮説を証明するには、現場実験を行い、斜面を転がる落石の運動エネルギーが落石対策便覧の式で推定される値よりも小さいことを明らかにする必要があった。

## 5. 実斜面での落石実験

落石の運動エネルギーの推定には、等価摩擦係数法による経験的手法が一般的に用いられていた。斜面を落石がすべり落ちるとしたモデルである。この方法で計算すると実際よりも落石の速度を過大に評価すると考えられた。そこで、落石速度や運動エネルギーを正確に把握するために、実際の斜面で落石実験を行うことになった。

四国技術事務所の技術課長と一緒に落石実験に適する斜面を探して四国内を回った結果、愛媛県土居町にある碎石場の敷地内の斜面を借りることにした。

斜面の高さは 40m 以上、斜面上部の投石位置まで重機が進入可能、落石の観察が容易という私が求めている条件をすべて満たしていた。また、基礎的な実験を行うための人工斜面を作るにも適していた。



実斜面での落石実験

トラッククレーンやダンプトラック、ショベルカー、落石をつかんで運搬するためのフォークなど実験に必要な重機が現場にそろっていたのは好都合であった。何よりも良かったのは、碎石場の社長が物理学に詳しく、落石実験にたいへん興味を持っておられ、全面的な協力を約束してくれたことであった。

大がかりな現場実験には、大勢の優秀なスタッフが必要で、そのスタッフを集めるのがたいへんある。実験をすることが決まった直後、ラッキーなことに楠本雅博氏が第一コンサルタントに入社し、実験を手伝ってくれることになった。

楠本氏は、四国建設コンサルタントの社長であった楠本博之氏のご長男で、最近までその会社の社長をされていたのであるが、事情があって退任されていた。若くして技術士の資格も取得している優秀な技術者である。百万人の味方を得た思いがした。

実験は楠本氏に加え、情報処理に滅法詳しい社員の篠原昌二君、来春に入社が決まっていた徳島大学大学院生の大西一賢君と田中宏和君、落石の運動の研究をされておられる松江高専助教授の河原荘一郎先生と二人の学生、信州大学大学院の松岡みどりさん、日本興業(株)の渡辺君をはじめ多数の方々に手伝ってもらった。松岡さんは、卒論のテーマが落石の運動に関するものであったので、私の意見を求めて長野からはるばるたずねて来られたことがあり、その際に実験を手伝ってくれるという約束ももらっていたのである。

この実験も防護柵基礎の実験のときと同様に学識経験者による技術検討会が組織されることになったので、日頃懇意にさせていただいている愛媛大学教授の矢田部龍一先生、小野田ケミコ(株)の古賀泰之氏、土木研究所耐震研究グループ長の松尾修氏の各氏に委員になっていただき、実験方法や解析に関するアドバイスをいただいた。

古賀泰之氏は土木研究所の動土質研究所長や部長を歴任された方で、日本道路協会の落石防護施設小委員会「落石シミュレーション手法検討ワーキンググループ」、

地盤工学会の連載講座「落石対策」の執筆会議などで一緒にさせていただいていた。

落石対策便覧の初版(昭和 58 年版)は古賀氏が、平成 12 年の改訂版は松尾氏がそれぞれ指導的役割を果たされている。今回の実験には、日本における落石の権威のお二人に加わっていただいたことになる。

実験には碎石場から切り出した 120kg~2,060kg の砂岩、コンクリートで製造した立方体(520kg)と球(200kg)の模擬落石を用いた。模擬落石は日本興業に依頼して、衝撃で破壊することがないように 60MPa の高強度コンクリートで製造してもらった。模擬落石には三軸方向の衝撃加速度を測定するため、加速度センサーとデータロガーを内蔵することにし、その設計と製造を曙ブレーキ工業に依頼した。模擬落石と加速度センサーの製作費だけで約 700 万円を要した。

この落石実験に関する最後の技術検討会で、松尾氏よ「この研究は世界的に見ても第一級のものだと思います。国土交通省でこのように費用をかけた大規模な落石実験は、二度とできないでしょう」というコメントをいただいた。

研究成果は四国地方整備局の木下賢司企画部長との連名で土木学会論文集に投稿する一方、日本道路会議、ネパールのカトマンズで開催された国際シンポジウムなどで発表した。また、落石防護柵基礎の重錘衝突実験を含めた一連の研究成果、測定データ、ビデオ画像は DVD2 枚に収録して、落石対策の研究をしている国内の大学や研究所に配布させていただいた。

## 6. 緩衝金具付き落石防護ネットの開発

### ・研究開発の経緯

平成 18 年 11 月に、田中工業(株)の田中登志夫会長が会社に来られた。

「特許を取っているポケット式落石防護ネットがある。これを販売促進するには理論的な裏付けがあるので協力してもらえないか」という相談であった。

四国は地形が急峻である。道路の山側は切り立っていて道路幅員に余裕がない。こうしたことから、ポケット

式落石防護ネットを落石対策として多用している。斜面の法線方向に鋼材を 3m 間隔で建て、それから金網をカーテンのように垂らすことで、落石を受け止め、金網に沿って下方へ誘導させる工法である。

最近では、支柱を 30m 離して設置し、その間にワイヤロープを張り、それから金網を吊すタイプのポケット式落石防護ネットが開発され、施工実績を伸ばしている。田中社長の特許は、この工法の現場作業を容易にするために改良したものであった。

施工性が良くて喜ぶのは施工会社だけである。発注者やコンサルタントは関心を示さない。エネルギー吸収性能を高め、コストパフォーマンスの高い商品を提案しなければ売れない。横ロープや吊りロープに吉田博先生が開発した緩衝金具を取り付けることを提案させていただいた。

1 ヶ月後に、田中会長と連れだって小矢部市の吉田先生のご自宅を訪問し、田中会長が考案した新しいポケット式落石防護ネットに、吉田先生が特許を取って商品化している緩衝金具を装着することを承諾していただいた。

この新しいポケット式落石防護ネットの商品名称は、「ロングスパン」と呼ぶことにした。

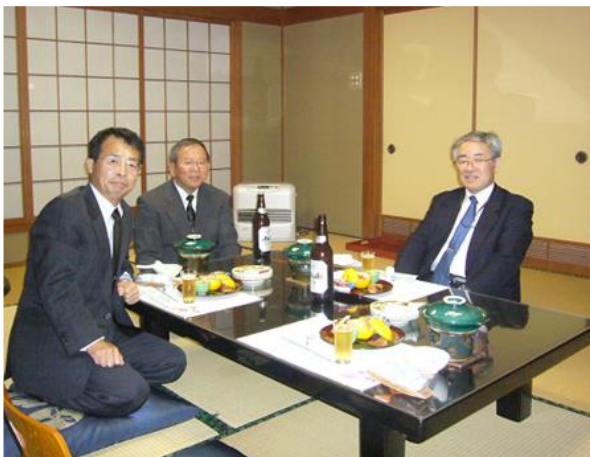
ロングスパンを商品化するには、技術的課題がたくさんあった。とても私一人の力では手に負えないと思えたので、愛媛大学の矢田部龍一先生に相談し、平成 19 年 7 月に「地盤工学会四国支部地盤災害研究委員会落石対策研究会」を立ち上げてもらった。委員長には矢田部先生になっていただき、委員には吉田博先生をはじめ産官学から 15 名の技術者に参加していただいた。この研究開発に対しては、高知県から「頑張る企業総合支援事業費補助金」、社団法人四国建設弘済会から「技術開発支援制度」の助成金を受けた。

### ・公開現場実験

現場実験は、愛媛大学、(株)ビー・セーフ、日本プロテクト(株)の協力を得て、南国市岡豊にある田中工業(株)の資材置き場で平成 19 年 12 月から 1 年間かけて 10 回実施した。この内の 3 回は公開実験とした。

第 1 回目の公開実験は、平成 20 年 5 月 27 日に実施した。このような大規模実験を公開するのは本邦初であったことから、全国の大学、国土交通省、地方自治体、建設コンサルタント、施工会社、材料メーカーから約 300 名の研究者や技術者が参加した。テレビ局や新聞社など報道関係者も大勢詰めかけた。

この日の実験では、支柱間隔 15m、高さ 10m のロングスパンに、重さ 0.7t と 1.0t のコンクリート塊をそれぞれ秒速 17m の速度で衝突させた。運動エネルギーは、100kJ と 150kJ である。レール上を滑落させるためコンクリート塊の底面に取り付けであった車輪が、金網をひっかけて局所的な穴を開けるといったトラブルはあつ



写真右より吉田先生、田中会長、筆者



ロングスパンの公開実験

たものの、コンクリート塊を受け止めることができた。一応は成功したと言える。

第 2 回目の公開実験は、平成 20 年の 10 月 10 日に実施した。支柱間隔は 30m、高さ 10m のロングスパンに、重さ 2t のコンクリート塊を秒速 19.5m で衝突させた。運動エネルギーは 380kJ である。金網には前回の実験で使用した通常のものよりも素線強度が 3.3 倍強いものを使用した。

実験には、約 100 名の見学者に参加していただいていた。その目の前で、まったく予想していないことが起きた。コンクリート塊が金網に衝突すると、金網がコンクリート塊を巻き込んだまま速度を落とすことなく大きく変形したのである。一瞬、何が起きたのか理解できず、体が凍り付いた。

原因は 2 つあった。金網が落石によって前方へ飛び出すのを抑止するため、3 段に横方向を張って斜面へ固定してあったワイヤロープのうち、2 段目のワイヤロープが外れたのである。ワイヤロープを止めるのに落石防護ネットの工事で一般的に使用されている「巻き付けグリップ」を使用していたのであるが、それが衝撃の影響で緩み、はずれたのが原因であった。

メーカーのカタログには、「ワイヤロープの破断荷重と同等の保持力があります。また、グリップの取付けが簡単で、作業条件による影響が少ないため安定した強度が得られます」と書かれている。

巻き付けグリップは、157kN 以上の力に耐えられるようになっていたが、ワイヤロープには 83kN の力しか作用していなかった。

もう一つは、メインロープを支えるために斜面に立っていた 2 本の柱のうち、右側の柱が地盤の中にめり込んだのである。柱の下端からは土煙が立ち上がった。落石が衝突した際、柱を押し込む力が作用し、それによって地盤がせん断破壊したのが原因であった。

#### ・ピンチをチャンスに

わが国には、失敗を恥と考えて隠そうとする文化がある。今回は公開実験であったので、マスコミ関係者も取

材にきていた。ライバル会社も開発の状況を探りにきていた。失敗することなど少しも予想していなかったのに、一瞬間が真っ白になり「万事休す」と思ったが、直ぐに頭を切り替えて、

「実験の失敗については早急に調査をし、原因を明らかにした上で皆様にご報告いたします。また、どうすれば落石を安全に受け止められるようにできるか改善策を考え、次には 400kJ の実験を行いますので、是非また見学会にご参加下さい」

と参加者に説明をさせていただいた。

実験をしたことによって、はじめて気がついたことがいくつかある。それらの課題を見学者と共有し、課題を解決した結果を理解していただくことで、見学者にロングスパンのファンになっていただこうと考えたのである。

第 3 回目の公開実験は、それから 2 ヶ月後の 12 月 8 日に実施した。ロングスパンの寸法は第 2 回目と同じであるが、横ロープは 2 本増やして 5 段にした。金網と斜面の間には、コンクリート塊をキャッチするためのポケットを取り付けた。

コンクリート塊の重さは 2.1t である。落差 20m、斜度 45 度のレール上を滑走させてネットに衝突させた。衝突速度は秒速 19.5m、運動エネルギーは 400kJ である。コンクリート塊を見事にキャッチし、ネット裾部からこぼれ落ちないことを確認できた。また、ネットは塑性変形したものの破網などの損傷は見られなかった。

実験は実に 10 回を数えていた。実験によって、

- ① 横ロープを地盤に固定するアンカーボルトに大きな衝撃力が発生し、緩衝金具を装着しないと簡単に破断する。
- ② ワイヤロープの接続用として巻き付けグリップが一般的に採用されているが、衝撃によって緩んではずれする。
- ③ 落石が衝突すると、金網全体が大きく変形し、振動を伴う。これは、現行の設計で想定しているものとはまったく異なる。

などの数多くの有用な知見を得ることができた。

実験をするたびに改良を重ね、当初は、70kJ の落石エネルギーでもアンカーボルトが破断していたものが、400kJ までエネルギー吸収性能を上げることに成功した。

#### ・国土交通大臣賞を受賞

財団法人国土技術研究センターが主催する「第 12 回国土技術開発賞」に応募したところ、国土交通大臣表彰である地域技術貢献賞に選ばれた。表彰式が平成 22 年 7 月 7 日に東京国際フォーラムであり、共同開発者である日本プロテクト(株)の加賀山肇社長、東京にいる私の娘夫婦にも出席してもらった。



400kJの重錘を補足したロングスパン工法



東京国際フォーラムDホールで表彰式(平成 27 年 7 月 7 日)

会場の正面の壇上には、甲村国交省技監、藤田国交省技術総括審議官をはじめとする建設産業に関係する主たる機関の長が席を並べていた。このような権威ある表彰式に立ち、身が引き締まる思いがした。

技術開発者である田中氏と私、応募者である田中工業と第一コンサルタンツにそれぞれ国土交通大臣前原誠司の直筆のサイン入り表彰状をいただいた。表彰状はB3サイズ。国土建設週間の局長表彰よりも一回り大きくて格調高い。田中工業と第一コンサルタンツには、それぞれ副賞として記念の盾もいただいた。

## 7. 緩衝金具付き落石防護柵の開発

### ・日本テレビからの電話

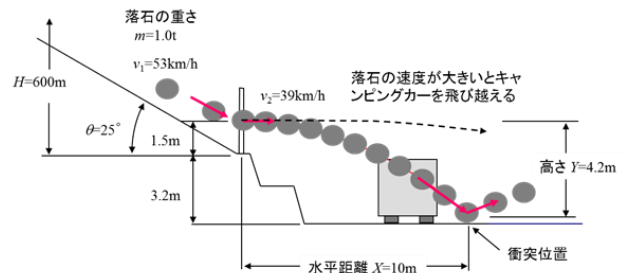
平成 21 年 7 月 14 日の午後、日本テレビの番記者より電話が入った。前日の 20 時に富士山登山道の新五合目駐車場で起きた落石事故を実験によって検証できないかという相談であった。

実験をするには最低でも落石の質量、防護柵に衝突したときの速度、落石防護柵の種類が分かっていたいなければならない。

落石は、事故発生直後には直径 1.2m、重さ約 3t と報道されていたが、その後測定した結果によれば約 1t ということであった。落石は、標高 3,000m 付近から約 600m 下の駐車場までバウンドしながら約 1.5km の距離を転がり落ち、落石防護柵を突破してキャンプカ



富士山落石事故



落石事故現場の状況

ーを直撃している。斜面の勾配は 20~30 度。落石防護柵は、一般的な高さ 3m のものである。

現時点で分かっているのはこれだけである。このような状況でありながら、

「5 日後のバンキシャ！で放映するので、実験は 3 日後の 17 日に行いたい」という要望であった。

常識的には考えられない話である。「盲、蛇に怖じず」とは、このようなことを言うのだろうと思った。偶然にも既存の落石防護柵の性能を向上させる研究するために、高さ 1.5m の落石防護柵を設置して、コンクリート塊を衝突させる準備をしていた。それを利用すれば実験を行うことが可能であった。

高エネルギー吸収型の落石防護柵では実験が行われているものの、従来型の落石防護柵に対しては本格的な実験は行われていない。実験を行えば、従来型の防護柵のエネルギー吸収性能を明らかにできる。このようなことも期待できたので落石実験を引き受けた。

### ・富士山の落石速度

落石の速度を推定する方法には、落石の運動をすべり運動と見なした「そりモデル」(等価摩擦係数法による方法)、コンピュータで数値シミュレーションする方法がある。落石対策の実務では「そりモデル」がよく使われているが、算定される速度の精度は低い。数値シミュレーションを行うには、落石発生源から防護柵の位置までの地形データが必要である。地形を測量する時間的余裕はない。

この現場の場合、斜面の末端に高さ約 3m の擁壁があ

り、その前が駐車場になっている。擁壁の上に設置されていた防護柵を落石が突破してキャンピングカーを直撃し、貫通して路面に落下した後、バウンドして前方の車に衝突している。防護柵の穴の位置、落石が路面に衝突した位置の座標が分かれば落石の飛行軌跡を推定することができ、軌跡から理論的に落石の速度や運動エネルギーが計算できる。防護柵の穴の位置と落石が路面に衝突した位置の座標を現地にいる番記者に測定してもらって私に教えて欲しいとお願いした。

教えてもらった情報を元に防護柵突破後の初速度を計算すると時速 39km となった。落石の運動エネルギーは 58kJ である。

落石は 52kJ の運動エネルギーに耐えられる防護柵を突破していることから防護柵に持ち込まれた運動エネルギーは 110kJ で、防護柵に衝突する直前の落石の速度は自動車の速度並の時速 53km と推定された。

TBSテレビの「みのもんたの朝ズバッ！」で、某大学教授が、「車に衝突したときの速度は時速 200～360km」とコメントされていた。私が計算で導き出した値の 5～9 倍である。

日テレの番記者も、いろいろな専門家から速度や運動エネルギーについて取材をしたそうであるが、私の出した推定値よりはるかに大きかったようである。

円柱の転がり運動として算定すると、速度は時速 319km となる。設計の実務で行われているように等価摩擦係数 0.35 のすべり運動として速度を算定すると、時速 195km となる。

マスコミから取材を受けた学識経験者は、このような計算結果をよりどころとして速度や運動エネルギーについてコメントされたと思われる。

落石の運動は、転がりやすべりではない。飛行と衝突を繰り返すバウンドである。飛行している時は加速されるが、衝突するとエネルギーを消費して減速する。このため、落石の速度は円筒の転がり速度よりもはるかに遅くなる。

もしも落石の速度が、学識経験者が言われるように新幹線並であれば、落石はキャンピングカーを直撃するのではなく、頭上を飛び越えていたはずである。この私の仮説に対して、「右城さんは、防護柵を突破した後の落石の飛び出し方向を水平としているがその根拠がない。斜め下向きに飛び出せば速度が大きくてもキャンピングカーを直撃することになりますよ」との意見があった。落石は、キャンピングカーを突破してから約 10m 離れた展望広場まで転がって停止している。速度が速ければここで停止するはずがない。

後に、応用地質(株)が現地を詳細に測量し、落石による痕跡を調べ、それを基にして速度を秒速 20m と推定している。時速に換算すれば 72km である。私の推定値に比較的近い値であった。



第 1 回目(平成 21 年 7 月 17 日)の実験

#### ・防護柵の検証実験

富士山の事故現場で使用されていた防護柵は、高さ 3m、延長 30m である。実験に使用したのは高さ 1.5m、延長 9m である。寸法は異なるが、エネルギー吸収性能を技術基準書の落石対策便覧で算定すると、両者ともほぼ同じ約 50kJ となる。これには安全余裕が見込まれているので、実際にはこの 3 倍程度の性能があるとされていた。

実験は、重さ 2t のコンクリート塊を事故現場と同じ運動エネルギーで衝突させることにした。測定した衝突速度から求めたエネルギーは、88kJ であった。

重錘を衝突させると、柵端部の端末支柱と斜材を連結しているボルトが破断し、端末支柱が座屈破壊してしまった。コンクリート塊は地面に尻もちをついてしまい、落石事故の再現にはほど遠いものになってしまった。

端末支柱を補強するとともに、コンクリート塊が地面に当たらないように溝を掘るなどの工夫をして、翌日の 18 日の午後から再度実験を行った。スピードガンで測定した速度から求めたコンクリート塊の運動エネルギーは 100kJ であった。コンクリート塊は期待したように、防護柵を突き破って前方へ大きく飛び出した。コンクリート塊が突破したのは、ワイヤロープがはずれたためである。ワイヤロープは端部でワイヤチャックと呼ばれる金具で留めていた。くさび効果を利用したものであるが、衝撃によってくさびが緩んだことが原因と考えられる。

実験を録画したデータは、この日の夕方の航空便でテ



テレビ局に送られた。

3 日間テレビ局の記者とお付き合いさせていただき、いろいろと勉強になった。

7 月 16 日の午後、わが社で打ち合わせをする約束をしていたので、落石の運動のメカニズムや運動エネルギーを推定した根拠を分かりやすく説明した資料を準備していた。いざ説明すると、私の言っていることがほとんど通じないのである。

「エネルギーとは何ですか」「エネルギーが大きいと力がい大きいということですか」「キロジュールとは何ですか」「速度を秒速に直すといくらになりますか」などのあまりにも初歩的な質問をされて、どのように答えれば良いのか戸惑ってしまった。

実験の結果は、7 月 19 日の 18 時からの「真相報道バンキシャ！」で約 10 分間にわたって放送された。コンクリート塊が防護柵を直撃する場面が繰り返し映し出された。私が取材を受けて話したコメントが紹介されたのは、

「このフェンスは、1 トンの自動車が時速 40km で衝突しても大丈夫なものです」の一言だけであった。

専門的なことにはまったく関心がないようであった。視聴者に落石の脅威を訴えるには、実際の現象を見せるのが効果的であることを思い知らされた。

彼らをプロだと感じたのは、カメラアングルである。同じ現象でもアングルで迫力はまったく異なる。もう一点は、ビデオ編集の素早さである。土曜日の夕方の航空便で送ったデータを放映 10 分間に編集し、翌日の夕方の番組に間に合わせたのには驚いた。

#### ・緩衝金具付き防護柵の実験

わが国ではエネルギー吸収性能が 50kJ 程度の従来型防護柵が標準的に採用されているが、富士山の事故のように落石が防護柵を突破する事故が稀に発生している。従来型防護柵の性能を現在の 2 倍程度に向上させた防護柵を開発すれば、需要は多いと思われる。

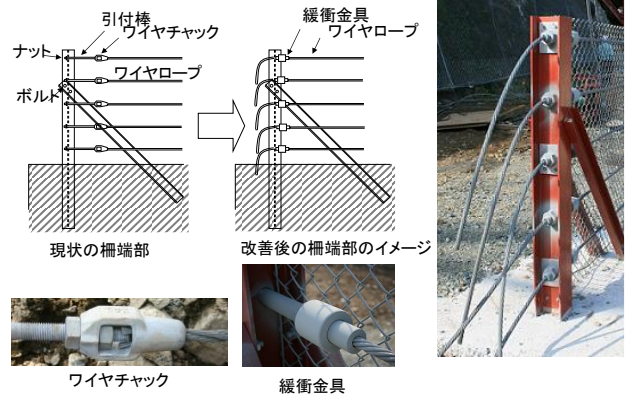
そこで、従来型防護柵の末端支柱に緩衝金具を装着して、その効果を確認する実験を行った。

実験は斜面に設置したレールの上を重さ 2t のコンクリート塊を滑走させ、レールの前方に設置した防護柵に衝突させ、防護柵の損傷を観察した。

レールの傾斜角は 45 度であるが、下端は 23 度になっている。コンクリート塊の落下高さは 8m とした。

これは、富士山落石事故の検証実験で行った第 2 回目の実験と同じであり、防護柵に衝突する速度は秒速 10m、運動エネルギーは 100kJ である。

金網は  $\phi 3.2 \times 50$  の菱形金網で一般的に使用されているものと同じである。ワイヤロープには  $7 \times 19A/Z \phi 18$  を使用した。19 本の小さい径の素線で編んだ 7 本のストランドをより合わせて作られているので、一般の落石防護柵に使用されている  $3 \times 7G/O \phi 18$  よりもロープ



緩衝金具付き防護柵の実験

の断面が真円に近い。破断荷重は 200kN である。 $3 \times 7G/O \phi 18$  よりも 1.25 倍強い。

端末支柱に装着する緩衝金具には、金沢大学名誉教授の吉田博先生が考案したものをを使用した。ワイヤロープに 50kN の力が作用すると、柵端金具の中をワイヤロープがスリップし、エネルギーを吸収する仕組みになっている。

コンクリート塊を衝突させると、2 本の中間支柱は座屈変形したが、エネルギー 100kJ の重錘を見事に受け止めることができた。防護柵によるエネルギーの負担割合は、緩衝金具が 65%、金網 2%、中間支柱 13%、その他 20% となった。

緩衝金具によるエネルギー吸収効果を確認することができた。

#### 8. 私が心掛けてきたこと

私がこれまで心掛けてきたことがいくつかある。

1 つは、「頼まれた仕事は基本的に断らない」ことである。失敗を恐れては何もできない。「やれば何とかなる」という気持ちで取り組んできた。難しい仕事をしたときほど成長できたように思う。

2 つ目は、「マニュアルを鵜呑みにしない」ようにしてきた。

もしも、マニュアルに書かれていることと現場で実際に起きている現象が異なっていれば専門書や文献で調べ、それでも分からなければ実験をして確認するようしてきた。

また、マニュアルなどに書かれている数式を使うときには自分自身で誘導し、数式が作られた前提条件を理解するように努めてきた。

最近パソコンと市販の設計ソフトが普及したこと

で、理論や数式を理解している技術者が少なくなっているように思う。

拙著の読者から、私が誘導した数式の間違いを指摘されることがたまにある。間違いなく私よりも高齢の方である。中には 80 歳を過ぎた方もいた。

3 つ目は、「成果は形にして残す」ことを心掛けてきた。自分の意見は、新聞や雑誌、会報などへ積極的に投稿するようにしてきた。業務や研究などで得られた知見は、論文、著書などに発表するように努めてきた。

家族や友人と一緒に余暇を楽しむ時間はほとんどなくなるが、自分を成長させる上では効果があった。また、私が実力以上に評価されているのは、これまで発表してきた文献が多いためと思われる。

## 9. 振り返って見て気がついたこと

### ・心の財

私はこれまでに多くの人と出会い、食事をし、語り合ってきた。その中で、人間として、技術者として、経営者として大切なことを教えていただいた。

これまでの人生には、「万事休す」と思ったときが何度かあった。そのような時に助けてくれたのが日頃懇意にしている友人や知人であった。

日蓮が弟子の四条金吾に出した手紙の中に、次の言葉がある。

「蔵の財(たから)よりも身の財すぐれたり 身の財よりも心の財第一なり」

世の中で成功している人は、間違いなく「心の財」をたくさん蓄えている。心の財を蓄えるには、「出会い」の機会を多く持ち、人との交わりを大切にし、その中で人間性を磨くことである。

若いときは、個人の能力が占めるウエイトが高い。しかし、歳を重ね部下が多くなるに連れて重要になるのは人間性であり、情熱・謙虚・誠実であると思う。情熱・謙虚・誠実は、百年以上の歴史を持つ老舗企業の経営方針に共通している言葉と言われている。

### ・運・鈍・根

私は疑問に思ったことに対して納得できないと次のステップに進めない不器用な人間である。頭の回転も遅い。一つのことを理解するのに他人の数倍の時間を必要とする。

人並みより少し上を目指そうとすれば、やることを絞り、時間をかけるしかなかった。気がついたら擁壁と落石問題に取り組んで 30 年以上の歳月が経っていた。

私の周りにはゴルフを楽しむ人が多いが、私にはそのような時間的余裕がなく、休日もほとんど自宅に閉じこもって文献を読んだり論文を書いたりしてきた。たまに家族と遊びに行っても頭の中は仕事のことばかり

り考えていた。

擁壁と落石の問題に根気よく愚直に取り組んできたことが今日の成果につながっているとしか思えない。

「運・鈍・根」という言葉がある。一つのことを根気よく愚直に続けていれば、必ず運が巡ってきて成功するという意味である。格言の中でこれほどの的を射たものはないように思う。

### ・ピンチがチャンス

私が第一コンサルタンツへ就職したのは、昭和 61 年 4 月である。36 歳になる年であった。入社して気がつくと、借金もつれで倒産寸前の会社であった。6~8%の金利で年間の売上高に近い借金をしていた。正直、倒産する以外にないと思った。

ところが幸いなことに、入社直後から大規模開発の仕事が増えて 3 年後には利益が出るまでに回復した。

私が社長に就任したのは、平成 19 年 6 月である。わが国の公共事業予算は毎年削減され、ピークであった平成 10 年の 1/2 まで落ち込んでいた。第一コンサルタンの受注額もピーク時の 1/2 に減って、営業損がでるまで経営状態は悪化していた。高知県では、地元を代表するような建設会社が次々と倒産していた。

この時も幸いなことに、平成 20 年を底にコンサルタンツ業務が徐々に増え、平成 24 年 12 月の笹子トンネル天井板崩落事故を契機に橋梁やトンネルの全国一斉点検が始まり、仕事が一気に増えた。

振り返って見れば、私が大きく成長できたのは、追い詰められて必死に努力したピンチの時であった。過去の二度の大きなピンチがなければ、私が第一コンサルタンの社長に就任することもなかった。ピンチだからこそ社員が一丸となって頑張ることができた。そして、吹き始めたホローの風に上手く乗って会社の業績を急成長させることができたように思う。

## 10. あとがき

本稿は、平成 25 年に理工図書から出版した拙著「土木技術に魅せられて～若手技術者に伝えたいこと～」の中から、落石対策技術に関する部分を抜粋し、それに修正・加筆したものである。

私の経験が少しでも皆様の参考になれば幸いである。