



## 巻頭言

# ジオテキ道楽のつどい

金沢大学工学部教授 太田 秀樹

ロックボルト、ジオテキ、ミニパイル、鉄筋挿入、などといった工法が、ある一定の効果をもつことを計算でしめす。厳密な論理性や、極端な精度を求めなければ、これはそれほど難しいことではない。ところが、次のような問題がある。計算で得られた「補強の効果」が、実際に現場で発揮される「本当の補強効果」よりもかなり小さい、のではなかろうか、という感じがして仕方がないのである。「計算上の補強効果」がひかえめすぎる。これが、私が長年感じてきた印象である。証拠がほとんどない、のであるが、ロックボルト・ジオテキ・ミニパイル・鉄筋挿入などの工法が、実際には計算よりずっと効いている、ように感じられてならない。膨張性地山トンネルのロックボルトや、軟弱地盤に打ち込むミニパイルなどが、とくにそう感じさせる。

ある膨張性の地山にトンネルを掘ったところ、どんどん山が押してきて、導坑の直径が、半分にまで縮んでしまった。止むを得ず、縫い返しをして、もとの直径に拡げ直した。そこで、ものは試し、とロックボルトをうった。すると、ピタリと山がおとなしくなったのである。数字になおして、どれぐらいロックボルトが効いたか？今でいう、逆解析をやってみた。地山の応力-ひずみ関係が、コンドナーの双曲線モデルであるとして、逆解析をやった。平米あたり、たしか500トン、を、ロックボルトで補強された地山がうけもって支えている、という結果になったように（ぼんやりと）記憶している。これは、実のところ、ロックボルトのひっぱり強さで受け持てる限度を、はるかにこえている。ロックボルトだけでは、これだけの荷重に耐えられない。地山とH鋼支保工だけでも、やはり耐えられない。これは、そのまえの現場の状況からみて、自明である。ところが、地山とロックボルトとH鋼の支保工が一体となると、耐えるのである。相乗効果、とでもいべき補強効果が、生まれる。この例の、数値的な確からしさについては、私は自信がない。計算上の仮定などにも、問題がなかった、とは言えないかもしれない。しかし、そういった誤差を考慮にいれても、とても大きな相乗効果である。あたりまえの順解析で推定される働きよりも、はるかによくロックボルトが効いていた、と私は思っている。

明治・大正にたてられた、レンガ建てなどの、古いビル。そんな古いビルの撤去工事のはなしを時々聞く。ビルを撤去してみると、ビルの下には松杭がたくさん打ってある。長年の乾湿のせいで、松杭の杭頭はとっくに腐ってしまっている。ビルと杭とは、もはや直接つながってはいない、にもかかわらず、ビルがまったく沈下していない。こういう例がたくさんある、と聞く。もともと地盤がよくて、杭など必要でなかった？ そうではない。もとは、必要だったのである。こういう現象を、杭の設計理論で説明しようとしても、うまくゆかない。杭の設計理論で想定している現象と、杭頭を欠いた松杭が実際にはたらいっている現象とは、まったく違う現象である、といってもよいからである。松杭がたくさん打ち込まれ、基礎地盤全体が、一種の補強土塊のよ

うになっている。相乗効果のおかげで、この補強土塊の剛性が、おもいのほか大きい。だから、全体として、重いビルを支え続けることができた。杭頭の腐食があってもなくても、そんなことにかかわりなく、ビルは沈下しなかった、のだろう。こんなところが、実態だったのではないかな、と私は想像している。

杭にしろ、ロックボルトにしろ、設計計算は順解析である。（ラム先生のいうクラスA, B, Cのいずれであるにしても）将来生起するであろう事象・現象を、事前に予測しようとする立場でつくられた解析手法である。予測のための計算が、実際の地盤-補強材の相互作用をシミュレートし切れていない。ある程度はシミュレートできているのだが、土と補強材との相互作用から発揮される、相乗的な補強効果をフルに評価し切れていない。なにか、とても重要な機構・メカニズムが現実にはたらいっているのに、私たちがそれに気付かず見逃している、のではないか。なにか、大事な支配的要素を忘れている、のではないか。こんな、印象を、（証拠が薄弱なのだが、）私は長年にわたって持っていた。

土中になんらかの異物をいれて、土を補強する。土がもともと持っている強さ、が存在するところに、異物の強度が加わって、補強する。こんなイメージが補強土であろうか。1 + 1 = 2、である。発想が素直であるから、受け入れやすい。伝統的な考え方のうえに新しい要素をつみあげる、という解析手順が使えるから、計算式もつくりやすい。理屈のうえで、私は、それなりになっとくする。しかし、いろいろな現場での、いろいろな補強工のパフォーマンスを見てきて、私の直感がなっとくしないのである。計算で示されるよりも、ずっと強いように私は感じる。計算に入っていないなにか、があるのではないか。土のつよさと補強材のつよさ、の和ではなく、土と補強材との相互作用からでてくる相乗効果、があるのではないかと感じる。1 + 1 = 3、のように感じられてならないのである。私の直感が間違っている、のかもしれないと思う。補強材が入らない場合の土のつよさ、これを、現場で（目にみえるかたちで）確認できる機会は多くない。結果として、土だけのつよさに対する現場での視覚的実感を、私はすこししか、持つことができなかつた。土だけでも、（私になんとなく期待しているよりは、はるかに）強いのが実態であるのに、私が自分勝手に土は弱いものだ、と思い込んでいるものだから、補強材を入れた土の強さを現場で見せられて、私が補強土のつよさを、感覚的に過大評価する。これが、私の「美しい誤解」の原因かもしれない、とも、思う・・・。しかし、それでもなお、納得できないのである。

それでは、その「相乗効果」とはどんなものか。締め固めた土をせん断すると、一般に体積がふえようとする。ダイレイタンシーである。ところが、まわりに補強材があると、自由な体積膨張が妨げられる。まわりの補強材が土を締めつける、といってもよい。まわりから締めつけられると、土は強くなる。ロメオとジュリエットとおなじで、まわりの圧力が大きいほど、内部では深くむすばれる。土のせん断抵抗が、増加するわけである。相乗効果のおおもとがダイレイタンシーにある、のじゃないか、という考えは、土の専門家の意見としては妥当といえよう。補強土に対して、補強材の拘束効果がある、と最初にいいたのが誰か。調べたことがないので、よく知らないのだが、相当以前に龍岡文夫先生が主張していらしたから、ひょっとすると龍岡先生が、「いいだしべえ」かもしれない。その後、何人かの人と同じ主張をしている。

「自然界では、土に関して、なにかよく分からない現象が起きることがある。それが何だかよ

く分からないものだから、いろいろな方が質問にこられる。そんなとき、君もよく分からない、というのであれば、分からないと答えればよい。ところが状況によっては、分かりません、ではすまないことがある。そういう時に、君はどう答えるかネ」と柴田徹先生に尋ねられたことがある。「土の土たる所以は、結局のところダイラタンシーにある。一見不可思議にみえる現象でも、そのほとんどがダイラタンシーに起因する、といっても過言ではないくらいだ。だから、原因はダイラタンシーだろうと思います、といっておけば、結果オーライになることが多い。いつか役に立つこともあろうから、これを憶えておきなさい。……サ、遠慮せずに、飲んでよろしい」、と自問自答でおっしゃったのを、私は今でも憶えている。一見不可思議にみえる現象、として話題になった例のひとつが、砂の液状化だ、とついでに教えてくださった。当時は、ダイレイタンシーと呼ぶべし、と学会で決めていなかったから、ダイラタンシー、とわれわれは呼んでいた。そんなことが、なつかしく感じられる今日このごろであるが、今から思えば、当時の先生方は、ずいぶん難しい質問をなされたものだ。柴田先生の教えにしたがうならば、土と補強材の相乗効果の掘って来たるべき所以は、ダイレイタンシーだろう、ということになる。せん断にともなう体積膨張、すなわちダイレイタンシー。これをうまくモデル化すれば、相乗効果のシミュレーションは、現場の現象とかなり合うに違いない？

柴田先生のお言葉は、ふしぎな力をもっていた。呪術のごとく、聞くものを金縛りにする。たくさんギセイシャがいる。いまだに金縛りになったまま、身動きもならずダイラタンシー神話の世界から抜け出せないひともある。神話の世界を天翔ける、かがやける神がみのおひとりが、軽部大蔵先生ではなかろうか、と私は思っている。私自身も、ダイラタンシー神話の世界のかたすみに、身を寄せさせて頂いたまま、いまだに抜け出せないでいる。だから私にとって、ダイレイタンシーのモデル化は生涯の課題である。……「そこまで決めているのなら、サッサとダイレイタンシーのモデル化を、やればいいではないか」、と読者諸賢はお考えであろう。この巻頭言を書かせて頂く何年もまえから、私だってそう考えていた。しかし、なかなか易しくないのである。なぜ易しくないのか？すこし説明させて頂きたい。

ダイレイタンシーをはじめて「発見」したのは、レイノルズ数で有名なレイノルズである、とされている。砂がせん断変形をすると、粒子がたがいに乗り越えあって、全体的に体積が膨張する、といった概念であったらしい。膨張するという意味で、ダイレイトという言葉が使われている。粒子が密に詰まった状態の土に、よく見られるのがダイレイタンシー（体積膨張）である、といわれている。例えばセル圧一定・軸圧増加といったふつうの方法で、3軸（排水）試験をすると、たしかに体積が膨張するので、そういわれる。しかし、いつでも体積膨張するわけではなく、密な砂でも、セル圧・側圧ともに増加するようにしてせん断すると、体積が収縮（コントラクト）する。ジオテキを層状に入れた補強土地盤をつくり、その上にフーティングをつくって、荷重をかけたとしよう。フーティングの真下の土は、荷重がのってせん断されると、体積収縮する可能性がある。体積が膨張するか、収縮するかは、土の締め固めの度合いと、フーティングから伝わってくる応力の強さとのかねあい决定的。フーティングからの荷重が大きいと体積収縮を起こすだろうから、ジオテキの拘束効果は期待できないだろう。つまり、短絡的に理屈だけをこねるとすれば、フーティングの真下のジオテキは、「相乗効果」を発揮しないだろう、ということになる。せん断にともなう体積膨張・収縮といった力学特性は、つまるところ、思ったほど

単純明快ではない、のである。

(ふつうなら)ダイレイトするような、よく締まった土をせん断すると、かなり小さいひずみレベルで、せん断抵抗がピークに達する。ちょっと、変形させただけで、すぐピーク強度がでてしまう。さらに変形させると、ガタッと急にせん断抵抗が減る。これがひずみ軟化である。ひずみ軟化のあと、ある一定のせん断抵抗を発揮しながら、ズルズルとすべりが続いてゆく。ピーク以後の挙動をひずみ軟化と呼ぶのは、ピーク後にせん断抵抗が減って、弱くなってゆくからである。締まった土だけでなく、硬くて脆い物質ならなんでも、たとえば岩でもコンクリートでも、ピーク後にひずみ軟化をおこす。土特有の性質ではない。土と補強材との相互作用などといった現象を、解析的にシミュレートしたいのであれば、ふつうは有限要素法をつかう。宇宙ロケット・戦闘機・潜水艦などの、最先端ハイテク兵器の設計にも、有限要素法がつかわれている(に違いないと思う)。ところが、有限要素法のプログラムのなかに、ひずみ軟化のための、チャンとした理論を組み入れることが、最近までできなかったのである。この科学がすすんだ時代に、信じられないことだが、ほんとうのことである。日本の地盤工学の分野では、小林正樹さんがはじめて使った仮想粘性法という手法が、あることはある。私の同僚の飯塚敦先生と私とは、小林さんに教えて頂いて、小林さんの方法を使っている。ひずみ軟化のもつ理論的な難点を、数値解析上巧みに処理する方法である。しかし、最近、理論的にもスッキリした考え方がでてきた。浅岡顕先生と中野正樹さん・野田利弘さんの師弟コンビが、ひずみ軟化の判定基準を、純理論的に作り上げられたのだが、これを関口秀雄先生が、わかり易く紹介している。古い力学理論の枠組みから大脱皮をして、未踏の地平を指し示すような、概念上の革命ともいべき発見である。これで懸案のひずみ軟化の数値解析が、飛躍的に進むだろう、と私は思っている。補強土の数値シミュレーションも、苦勞の末にやっとあかりが見えてきた、といえようか。

補強土といえば、ジオテキを敷き込んだ締め固め土を、たいていの人にはイメージに描くだろう。つまり、不飽和土を思い起こす。不飽和土で問題になるのが、有効応力の定義である。補強土の数値シミュレーションは、おそらく有効応力表示のものが、将来の主流になるであろう、と私は思っている。つまり、土/水連成解析である。だから、有効応力の定義を、あいまいなままで、いつまでも放っておくわけにはゆかない。ところが、とても一筋縄では片付きそうもないから、やっかいだ。あまりにも難しいので、この問題によっつにに取り組んでいるひとが、とても少ない。ましてや、寄り切ろう、ということになると、たいへんな力量が要る。この分野の大御所が、さきにすこし触れさせて頂いた軽部大蔵先生である。実力派の中堅どころとして、向後雄二さんが意欲的な仕事を展開している。

手をだしたくても、簡単に私が手をだせなかった事情を、ご賢察いただけたらだろうか。土と補強材との相互作用にもとづく「相乗効果」は、理論的・解析技術的には、超高度な最先端トピックスである、と私は考えている。補強土相手の実戦に役立つレベルにまで、解析技術の高度化をはかるべく、飯塚敦先生と私もそれなりの努力をかさねている。しかし、近道などあろうはずもなく、ひとつひとつの積み重ねに、多大の労力と時間を費やしているのが、実状である。迷路をさまよいあるくような、こういった準備の日々のなかで、あるとき、補強土の現場実験をやろうじゃないか、という話がもちあがった。石川・福井両県の、大学・ジオシンセティックス・メーカー・建設会社、が共同でやる、という案だ。

北陸の経済的基盤が、必ずしも強力とはいいいかねる、というのは虚偽ではない。北陸地方が、出稼ぎ労働力の供給源、のひとつであった、ということも否定し難い。大手建設会社のいくつか、もともと北陸出身であることから、これはうなずかざるを得ない。下請け業務を黙々とこなす。こういう仕事を、北陸地方のひとつの多くが受け入れてきた。下請け仕事とは、なにか。それは、自分の仕事の価格を、ひとさまに決めて頂く、自分では決められない、決めることを許されない、という条件で引き受ける仕事のことだ、と私は思っている。そんな定義は間違っている、そんな契約などありえない、のかもしれないが、そういう状況というものが、現実にあった。そういう状況を克服して、北陸の存在を、ささやかながら誇示してみたい。こういった気持ちもあって、1992年の夏に、現場実験を実施した。題して、「土で橋をつくろう」。ジオテキを敷き込んだ砂質土で、橋をつくろう。その橋のスパンを次第に拡げて、どこまで崩れないでもつか、見てやろう。こういう実験であった。学生さん達、若い社員さん達、が労働力を提供した。ひとつきほどかかって、土の橋をつくりあげた。参加者一同、おおいにそのプロセスを楽しんだ。私も、まことに、楽しかった。

実験はそれなりに完了したのだが、万事うまくいった、という訳ではなかった。なんとか、よい工夫がないものか、と私はこだわって考えるようになった。仙台で学会があったときに、たまたま、東大の龍岡文夫先生と雑談をした。「なにかいい考えはありませんか」と聞いてみたところ、「太田さん、もうすこし複雑なことを、考えてみてはどうですか」とのご返事であった。

「そうか、おれのオツムは、そんなに単細胞に見えるのか」、とショックだったが、「よし、それじゃ、すこし複雑なことを、考えてやろうじゃないか」と私は意地になった。翌1993年に、再度、現場実験に挑戦した。前年と同じく、石川・福井両県の、大学・ジオシンセティックス・メーカー・建設会社、が共同でやった。「土で断崖絶壁をつくろう」と題して、ジオテキ補強土で、オーバーハングの絶壁をつくった。やってみたら、なんと、オーバーハングの絶壁が、みごとにそそり立った。ほとんど変形もない。ジオテキの効果を誇示するのに、これほどよいPRはない、といった感じの実験になった。

あまりにうまくいきすぎて、変形とか破壊についての情報が、全然得られない。これでは面白くない、ということで、翌1994年にまたまた挑戦した。相も変わらず、「北陸ジオテキ道楽？」のメンバーでやった。題して、「極限への挑戦」。前年とおなじく逆勾配の斜面をつくるのだが、すこし工夫をした。建設省土木研究所の、マネをしたのである。オーバーハングの絶壁が立ち上がったあと、盛土のなかでジオテキを切断する。三木博史さんから、入れ智恵をさずかって、やったのだが、これはじつにうまくいった。次第に崩壊してくる補強土の絶壁、これは迫力があつた。斜面の崩壊プロセスについて、とても貴重なデータが得られた。しかし、相変わらず、チョンボもある。一番イタかったのは、変形の進行を順次写しとったフィルムを、カメラから取り出すときに、誤って感光させてしまったことである。涙もでないような失敗であるが、覆水盆にかえらず、だ。

おおいに張り切ってやってきた、ジオテキ現場実験である。「ジオテキ道楽」といわれても仕方がないような、失敗の積み重ねでもあった。おかげで、いまだに、チャンとしたデータがそろっていない。理論も難しい、実験も難しい、のが実情である。しかし、このままやめたのでは、「男がすたる」。ということで、本年秋頃に、決定版の現場実験をやろう、と決めた。ジオテキ

道楽のつどい、も、北陸にこだわらず、その輪をひろげた。多くの専門家の助言をいただいて、こんどこそ、立派な実験をやろう、と決めている。龍岡文夫先生、鉄道総研の村田修さん、館山勝さんたちのアイデアをいただいて、補強土にプレストレスを入れよう、と考えている。実験の日取りが未定であるが、9月末か10月始めを予定している。興味のある方は、住所・氏名を書いて、私までお問い合わせ頂きたい。実験に関する情報を、定期的にお伝えするつもりである。こんどこそは、うまくいくことを、願っている。

