展　望

補強土が思いのほか強いのは、本当のところ何故なのだろうか

中央大学　太田　秀樹

１．はなしの発端

西本願寺境内の御影堂という大きなお堂のなかに、親鸞聖人の御真影（木像）がおまつりしてあるという。つい先日のNHKテレビで知ったのであるが、お堂が火事になったときに備えて防火壁が設置されているとのことであった。お堂の前（表側）から見れば普通のお寺に見えるのだが、お堂の裏側に行ってみると後ろ半分が厚い土壁で覆ってある。壁の内側に安置してある御像を、火事のときに持ち出すための時間をかせぐための工夫だとの説明であった。

この土壁の材料となる土をつくるのに、３年かかったという。土に混ぜ込んだワラが醗酵・分解してこまかな繊維になり、まんべんなく土のなかに分散するまでに３年かかったということであろう。土がいやな腐臭を発するので、壁塗り作業が大変だったそうだ。壁塗りをする左官職の方々の劣悪な作業環境に同情を感じはするけれども、作業環境を犠牲にしてまでもワラが腐って分解するまで待って使うという点に、とても興味を感じた。均等かつランダムな方向性をもって、繊維が土に混ざっている。これが何より大事なのだと、左官作業の責任者がトコトン拘ったのであろう。

ワラの繊維が補強材として機能する。これに異論はない。しかし補強材が補強材としての機能を100%発揮するためには、補強材がまんべんなく均等に入っていることが譲れない条件である（と左官職がガンコにこだわっている）らしい。３年という長期間にわたる悪臭ふんぷんたるストックヤードの確保と、わるい作業環境に起因する作業効率の低下・工費増大を、絶対に譲れない条件として発注者に要求した強烈なコダワり。なぜそこまで、こだわらなければならなかったのだろうか？ここのところに興味を感じたのである。

２．補強土の不可思議な強度発現メカニズム（事例１）

平成７年（1995年）兵庫県南部地震で阪神・淡路大震災が発生してから、もう15年になろうとしている。神戸を中心として大変な被害を受けたという事実が、記録として残っている。大変な地震が来たのだ、ということは明白である。しかしながら、設計法の妥当性検証という視点から見れば重要な情報が、実際の地震記録に多くは残されていなかったと筆者は思っている。被災地域の全域にわたって、どの地点にどのような地震波が来たのかが、意外と記録されていなかったと思う。実に残念なことだが、自動記録で稼働していた地震計の数が、思いのほか少なかったということなのだろう。

構造物の設計上想定されている地震外力とくらべて、どの地点では到達地震外力が想定より大きく、どの地点では小さかったのかがわかっていない。したがって、どの構造物が壊れるべくして壊れたのか、どの構造物が壊れるべきでないのに壊れたのか、どの構造物が壊れるはずなのに壊れなかったのか、という疑問に対する答えが、推定の域を出ないのが実情ではないかと筆者は想像している。

信じられないような大被害が神戸のあちこちで出ていたなかで、補強土構造物が軒並みに健在だったことが鮮烈な記憶としてのこっている。理科大の龍岡先生が、ご講演のなかでたびたび写真付きで紹介なさるから、憶えておいでの読者諸兄も多いことと思われる。周りの構造物が無残に壊れているにもかかわらず、補強土構造物が健気にも無傷で生き残っている、といった印象であった。どうして補強土構造物がそんなに強いのだろうか。土と補強材が一体化して強度を発揮するメカニズムがあるのであろうが、そのメカニズムを明快にイメージ化することができないでいるのが、筆者の現状である。

３．補強土の不可思議な強度発現メカニズム（事例２）

明治・大正時代に建てられたレンガ造りのビル。せいぜい２，３階建ての低層ビルが多く壁が結構厚いので、単位土地面積当たりの利用可能床面積が極端に小さい。これでは時代の要請に合わないとして、筆者が学生のころ一斉に取り壊しがおこなわれた。壊したあと単に捨ててしまうのでは勿体ないということで、移設先として明治村が開村したのもこの頃である。こういうレンガ建てビルを撤去してみると、下からカラマツの群杭が出てくる。地下水汲み上げで地下水位が低下していたころであるから、杭頭が地下水位より上になり腐ってしまっていたそうである。つまり杭と建物とが縁切れ状態になっていた。

上部構造の荷重が杭頭に伝えられ、杭の周面摩擦や先端支持力でこれを支える。これが杭の設計思想である。ところが杭と建物とが縁切れ状態になっているものだから、建物荷重が杭に直接伝わるはずがない。杭の設計思想の基本的な前提がくずれていたわけである。それにも拘わらず、建物の沈下が目立つような事例がほとんどなかったと聞いている。カラマツの杭が何十何百と入っている軟弱粘土の直方体ブロック全体が、根入れのある深いフーチング基礎として機能していたのであろうと筆者は想像している。

このブロックを、一種の補強土（基礎）構造物として看做すことが設計上許されるようになれば、ビルの基礎が安くできるのではないかと筆者は期待するのであるが、補強土ブロックがどうして一体化した基礎として機能するのかというメカニズムを明快にイメージ化できないため、それ以上考えが前に進まないでいる。既存の考え方にとらわれない柔軟な頭脳の持ち主が、いずれ見事なアイデアを出してくださる時が来るだろうと思っている。

４．補強土の不可思議な強度発現メカニズム（事例３）

トンネルでロックボルトを使用することは、もはや常識であると言ってよいほどである。

NATM 工法が日本に紹介されたころ、ロックボルトの効果を具体的に示す事例が日本になかったから、専門家のなかで効果についての議論があったのだろうと想像している。筆者の記憶が正しければ、山陽新幹線の相生トンネルがごく初期の実施例だったと思う。相生トンネルは地山がよかったため、ロックボルトの打設効果が明瞭に表れたわけではなかった。

そのあと試用されたのが、上越新幹線の中山トンネルであった。先進導坑の直径が半分に縮まるという大変な膨張性地山であったが、試しにロックボルトを打設してみたところ劇的な効果が表れた。信じられないぐらい効いたのである。そこで NATM 理論で使われているのと同じ論理をつかって、ロックボルトの効果を逆算してみたところ、なんと土被り圧そのもの（2000kPa か 5000kPa のどちらかだったと思う）がロックボルトで支えられている勘定になった。

計算に使った理論式が自作のものであったため結果に確信がもてず、トンネルの専門家であるケンブリッジ大学のロバート・メイヤー先生に相談してみた。彼の意見では「結構面白いから、イギリスで発行しているトンネルの専門誌に投稿してみたら」ということであったが、結局英語でチャンと書くのが大変なため日本の学会で発表するにとどまってしまった。

ロックボルトの効果を計算する普通の計算方法ではとても出てこないような劇的な効果が、筆者の計算式から逆算値として出てきたのであるが、ロックボルトの効果発現のメカニズムが分からなくても計算できる逆解析であるから、メカニズム解明の直截的な助けにはならない。効果発現・強度発現のメカニズムを明快にイメージできないことが、現象解明の最大の障害になっている。既存の考え方にとらわれない柔軟な頭脳の出現が、待ち望まれるところである。

５．補強土の不可思議な強度発現メカニズム（事例４）

自然斜面の安定性が危ぶまれるときに、よく使われる方法が鉄筋挿入法である。それほど長くない鉄筋を地山にたくさん打ち込むだけの、きわめてお手軽な補強工法だと言ってよいであろうか。この簡単な工法が、よく効くという評判である。計算も何もしないで使われるケースが多いのかもしれないが、筆者もよく効くという実感をもっている。見た感じだけに頼った感覚的な判断なので、定量的検証とは違う世界であるが、実例が山ほどあるのでそれなりに信頼できると思う。

この工法がなぜ効くのか。実のところ、筆者は不思議に思っている。単純な方法で計算すればそんなに効くことにならないと思われるのに、現場をたくさん見た目からの経験的な感覚ではよく効いていると感じる。なんども繰り返すようで恐縮だが、既存の考え方にとらわれない柔軟な頭脳のお出ましが待ち望まれる。

６．補強土の強度発現メカニズムの従来型計算法

構造物の安全を保障する。これが設計の役割（のひとつ）である。想定される外力に対して構造物が十分な抵抗力を持っていることを確認するのが、設計の基本的な役割（のひとつ）である。しかしながら外力を想定するといっても、想定できる外力には不確定・予測困難な部分が残ってしまう。同時に、外力に対する構造物の抵抗力にしても、未解明な部分が残っている。

分らないから設計しないという訳にゆかないから、分からない部分があることを承知の上で設計する。分らない部分・予測困難な部分・未解明な部分を、分からない・予測困難・未解明なままでカバーする必要があるから、設計計算は常に安全側を旨として執り行われる。安全率が必要とされる所以である。分らなくても分からないなりにやらなければならないのが工学の本質であって、そこのところが、分かるまで絶対に妥協してはならない理学と根底的に違う思想である。

話を補強土にもどそう。土や地山のなかに、人工的な補強材を混ぜ込んだり埋め込んだりする。これが補強土の基本的なアイデアである。全体的な強度を算定するに当たっては、土や地山の強度と補強材の強度を、断面中に占める面積比で計算する。鉄筋コンクリートの設計と、本質的に同じ思想である。

補強材の占める断面積は、土や地山の断面積に対して通常きわめて小さいから、いくら強い補強材であっても、強度上の貢献度がそれほど大きくなるはずがない。限定的な貢献度しか計算されてこないわけである。つまり、補強材の効果がびっくりするほど大きい、という計算結果にはな

らない。これまでに列挙してきた事例から分かるように、実際には補強材の効果は計算値よりはるかに大きいことが多い。計算結果が事実と相違するとしても、設計の視点からみれば、不確定・未解明な部分をカバーする安全側の対処として工学的に容認される。しかしできることならば、不確定・未解明な部分を確定・解明して、補強材の効果をもっと積極的に評価した方が合理的かつ経済的になる。

７．新しい設計理論誕生への期待

土や地山の強度と補強材の強度を、断面中に占める面積比で計算する。従来型のこのような考え方は、土や地山の強度と補強材の強度がそれぞれ別個のものであって、たがいに関係なく独立に発現されるという前提に立っている。実際には相乗効果のようなものが存在することが予想されるが、それが如何ほどのものかを計算することが困難なので、相乗効果がないものとして計算するわけである。補強土の強度発現メカニズムの従来型計算法は、言い過ぎかもしれないが、相当安全側になっていると筆者は感じている。

土や地山のように基本的に粒状性をもつものの中に、補強材のような引張りもしくは曲げに抵抗する部材を混入・敷設・挿入すると、粒状性物質の粒子が自由に相対移動することを妨げる一種の拘束効果をもたらす。このため外力に対する抵抗性・強度が増加するのであるが、これを定量的に評価・算定することが容易でない。ここのところがネックになっている。くどいようだが、土や地山と補強材との相互作用に起因する相乗効果の発現メカニズムを明快にイメージできないことが、現象解明の最大の障害となっている。この障害をブレークスルーするには、ゆたかな想像力とすぐれた創造力の両方が必要である。

相乗効果発現のメカニズムは、これまでに列挙してきた補強土構造物・群杭・ロックボルト・鉄筋挿入のどれにも共通する、包括的なメカニズムであるはずだと筆者は考えている。補強土構造物・群杭・ロックボルト・鉄筋挿入のなかのひとつだけにしか適用できない相乗効果発現メカニズムが提案されても困るわけではないが、共通のメカニズムが提案されれば消え去ってしまう一時的な理論にしかなりえないと思う。こういうことを書くと差別的だとお咎めを受けるかもしれないが、戦後に始まった国土整備最重要時代に、従来の設計思想を延長・拡大しながら新しい工法の取り入れに努めてきた世代には、従来の設計思想を全面的に変えてしまうような新しい概念を生み出すことが困難である（と筆者は感じる）。既存の考え方にとらわれない、柔軟で想像力と創造力にあふれる若い頭脳の出現が、待ち望まれる所以である。

８．補強土の施工方法

これまでメカニズムの話を中心に進めてきたが、ここで補強土の施工方法について考えていることを述べてみたい。補強土工法の信用と将来の発展にかかわる、社会的に対応を迫られそうな差し迫った問題だからである。

冒頭に土壁の材料づくりの話を書いたが、ワラの繊維など近代的な補強材とくらべれば大して強いものではあるまい。それほど強くはないワラ繊維に最大限の補強効果を持たせるために、どうしても必要なのが繊維の混ざり具合の均一性とランダム性なのではなかろうか。繊維と土の相互作用にもとづく相乗効果を、最大限に生かすために絶対必要な工夫なのではなかろうか。左官職の方々が持っておられるらしい材料に関するこだわりが、どういう理由なのか聞いてみたい気

がする。筆者としては実に興味津々なのであるが、今のところ想像する他ない。

補強材と土や地山の相互作用にもとづく相乗効果を理論的に定量化するためには、従来型の計算方法ではムリだろうと筆者が考えているのは前述したとおりである。相乗効果の発現メカニズムを明快にイメージできないことが、現象解明の最大の障害である。補強材と土や地山との間の相互作用として、いったいどんな現象が起こっているのか掴みきれなくて、メカニズムの具体的なイメージが湧かないようでは、話にならないと思うからである。

土や地山のように基本的に粒状性をもつものの中に、補強材のような引張りもしくは曲げに抵抗する部材を混入・敷設・挿入すると、粒状性物質の粒子が自由に相対移動することを妨げる一種の拘束効果をもたらす。このため外力に対する抵抗性と強度が増加するのである。これを定量的に評価・算定することが難しいとしても、「施工をチャンとやれば、やらない時とくらべてどのような違いが出てくるか」くらいはある程度想像できる。きちっと施工すれば、粒状性物質の粒子が自由に相対移動することを妨げる効果が大きいだろうくらいのことは想像できる。

補強土を例にとってみよう。補強材と補強材の間に、土がキチッ締まった状態で規則正しく入っていなければ、相乗効果が著しく損なわれるだろうという想像は、筆者の感覚ではおそらく正しいのではなかろうかと思われる。土がゆるゆるの状態で、補強材の設置が整然としていなければ、おそらく信頼性に欠ける補強土ができあがるであろう。粒状性物質の粒子が、比較的自由に相対移動する余地を与えてしまうからである。

丁寧な施工でつくられた補強土と雑な施工でつくられた補強土とが、驚くほどの違いを持っていることを、もっと深く認識するべきであると筆者は考えている。すぐれた耐震性をもつことが実証された補強土が、今後さらに広く使われてゆくためには丁寧な施工が必須である。冒頭に述べた左官職の方々のこだわりをお手本として、丁寧な施工を心がけるべきであろう。

９．結びに代えて補強土の補修方法について

大地震や豪雨で補強土が被災することがある。これを修復する方法について考えてみたい。補強土の修復で大きな問題となるのが、修復に全撤去が必要となる場合である。修復工事費が新設工事費より高額になる可能性がでてくるため、経済的合理性を損なう場合がありうる。全撤去をしないでも、被災した補強土を修復できる方法がないものか。補強材と土との間の相互作用を復活させ、あらたに相乗効果を発現させる修復工法の開発が望まれる。何かいいアイデアがないものかと、若い柔軟な頭脳の出現を心待ちにしている。

以上