

既設構造物の基礎と地盤の耐震補強

Reinforcement against Earthquake for Foundations and Grounds of Existing Structures

安 田 進 (やすだ すすむ)

東京電機大学教授 理工学部

1. はじめに

耐震設計基準類が整備されてきた我が国では、ほとんどの構造物を建設する際に耐震設計が行われるようになってきた。ところが、古くから建設されてきた構造物には耐震設計を行っていないものもあり、また、行っても現状の耐震設計に適合しないものも多く存在する。これらに対して耐震補強をすることが望まれる。地上にあるコンクリートや鋼の部材では比較的簡単に補強が行える。例えば1995年兵庫県南部地震後、橋脚や、地下鉄の中柱の補強などが多く行われてきた。これに対し、構造物基礎や地盤、土構造物の補強は一部しか行われてきていない。その理由は基礎や地盤の補強方法が難しいことや、補強の必要性についての認識が低かったことなどであろう。東南海地震・首都直下地震などの襲来が懸念されている折、地震に襲われる前に補強が進められる必要がある。

本特集号では地震に対する「既設構造物の基礎・地盤補強」に関して各構造物の取り組みや事例の紹介などが行われる。その総論として、ここでは耐震補強が必要となるケースやこれまでに行われてきた事例、さらに、補強を実施するまでの手順と今後の課題に関して述べてみる。

2. 耐震補強が必要となるケース

既設構造物の基礎や地盤で耐震補強が必要になるケースを挙げてみると以下のようなものがある。

(1) 耐震設計を行っていない構造物が耐震性を求められるようになった場合

古くから建設されてきた構造物には耐震設計を特に行っていないものがある。例えば河川堤防や道路盛土がそうである。これは経験に基づいて設計・施工していれば間接的に耐震設計を行ってあることになっている事や、土構造物の場合は被災しても復旧がしやすいといった事情による。ところが、最近、一部の構造物で地震時にも越水しないことや緊急輸送路を確保するといった性能が必要となり、耐震性が求められるようになってきた。また、造成宅地盛土は一部の造成盛土しか耐震設計が行われてきていないが、平成18年に宅地造成等規制法が改訂になり地震時に災害の発生のおそれ大きい大規模盛土造成地について「造成宅地防災区域」と指定されることになった。そして、耐震点検や補強を行う必要性が出

てきた。

これらのように、従来耐震設計が行われていなかった構造物において、耐震性を確保するため補強が必要となってきた構造物が増えてきている。これは、最近構造物の設計が性能設計に移ってきており、地震時の性能に関しても確保すべき性能が明示されるようになってきたこととも関係していると言えよう。

(2) 設計用地震動が変更され厳しくなった場合

設計用の地震動は大地震のたびに見直され、次第に大きくなってきている。近年では1995年兵庫県南部地震で非常に強い地震動を受けたことを契機に、我が国の多くの設計基準類でレベル2地震動を導入することになった。設計地震動が大きくなると、それまでに造られた構造物は耐震設計を行ってあったとしても、「既存不適格な構造物」になってしまい、新しい地震動で被害を受けないかどうか見直して、必要に応じて補強しなければならない。そのため、特に兵庫県南部地震後にレベル2地震動に対して補強する構造物が増えてきている。

最近ではレベル2地震動に加えて、長周期地震動や、東海・東南海・南海の三つの地震が連動して発生した場合のように地震波数が多い地震動も問題となってきている。

(3) 想定されていない新しい被害が提起された場合

液状化による被害が広く認識されるようになったのは40年あまり前で、さらに液状化による地盤の流動が定量的に把握されるようになってきたのは20年あまり前である。これらを契機に液状化や流動が設計基準類に取り入れられるようになった。ところがそれ以前に造られた構造物では液状化の事が考慮されていなく、点検や補強が必要となっている。

例えば、石油タンクでは1977年の基準の改定で液状化を考慮するようになった。これは新設のタンクを対象にしたものであったが、それ以前に造られた「旧法タンク」はこの基準が施行されて十数年を経ても全タンクの80%以上を占めており、防災上問題があることが懸念された。そこで、1994年に旧法タンクに適用される新基準が定められ、所要の経過期間内に適合することが義務付けられた。そして、これに従って旧法タンクの補強対策が進められている。

地震時の地盤災害はまだすべての現象が認識されてきているわけではない。例えば、1999年トルコ・コジャエリ地震の際にイズミット湾沿岸で発生した海岸のすべ

総 説

りや広域な地盤の沈降は、まだ、広く認識されるようになっていない。我が国のどこで起きやすいかなど、まだ研究も十分に行われていない。また、断層変位による構造物の被害や、海底すべりといった地盤変状に対しても構造物に与える影響がまだあまり分かっていない。将来このような地盤変状も考慮して耐震補強が行われることになるであろう。

さらに、地盤変状に関係した二次災害に関しても考慮が不足しているものがある。例えば、地盤沈下によって生じたゼロメートル地帯を守っている護岸や堤防では、それ自身の破壊だけでなく、それによって受ける“地震水害”の被害が懸念される。埋立地のコンビナートでは、液状化によって発生するタンク等の被害だけでなく、それによる火災や有害ガスの発生が問題である。2004年新潟県中越地震の際には下水マンホールが液状化により浮き上がって路面から突出し、そこに乗用車が衝突する事故も発生した。これらの地盤災害に関係した各種の二次災害の影響を考慮して、一次災害が生じないように構造物を耐震補強しておくことも大切である。

(4) 地震で被災した構造物が再度被災しないようにする場合

構造物が地震で被災した場合、かつては被災前の形に復旧する“原形復旧”が主であった。ところが、これでは同様の地震動に再度襲われた場合、また被災してしまう。そこで、1983年日本海中部地震頃から、同様な地震に再度襲われても被災しないように、耐震性を考慮して補強対策をしつつ復旧することが行われるようになってきた。そして、1995年兵庫県南部地震では道路橋、鉄道橋、岸壁、地下鉄、建築物、斜面崩壊、高压ガス施設、下水処理場と数多くの構造物が被災したが、これらに対し補強対策をして復旧することが多く行われた。最近では復旧時に補強することが一般的になってきている。

3. 耐震補強事例

耐震補強を行う場合、被災の原因を考えてそれに対して被災しないように補強することが必要である。被災の原因となる主な地盤変状には、①液状化やそれに伴う流動、②盛土法面のすべりや沈下、③断層があり、また④強い地震動もある。これらのうち、①に関しては最近補強が多く行われるようになってきた。④に対しても事例が増えてきている。そこで、まず①の事例を挙げ、④の事例も付け加えてみる。

(1) 液状化やそれに伴う流動に対する補強事例

地盤工学会から1993年に「液状化対策の調査から設計まで」¹⁾が発刊されたが、そこに示された事例は新設構造物に対するものがほとんどであった。これに対し、10年後に改訂された本²⁾には既設構造物に対する対策も多く紹介されている。これは適用が難しいと考えられていた地盤改良による“液状化を抑制する工法”にも適用可能な新しい工法が開発されたことも関係している。また、1995年兵庫県南部地震以降に導入されたレベル2地震動によって、それまで液状化しないと判定していた

地盤も液状化し、対策を施す必要性が出てきたこともある。これらの本やその他の資料をもとに既設構造物に対する液状化対策事例を拾い上げて模式的に示すと図—1となる。

まず直接基礎の構造物に対してはタンクヤード全体の地下水を下げるのが約20年前に行われた¹⁾。この方法だと敷地全体の対策がとれる。個々の構造物ではその下の地盤を液状化させないことが最も効果がある。そこで床に孔をあけそこから地盤を固化することが行われるようになってきた。米国でも同様の方法が行われた事例がある³⁾。一方、構造物内からの地盤改良が困難な場合には、周囲から斜めに孔をあけ固化することも行われている²⁾。また、構造物周囲を鋼矢板などで囲むことも行われている²⁾。こうすると、液状化の発生をさせ難くすると同時に、構造物下の地盤が液状化しても側方に押し出されないため、構造物の沈下量が少なくなる。木造家屋のように重くないものでは、周囲に杭を打ちそれで支えることも行われている。

杭基礎ではフーチングを広げ増し杭をして補強することがよく行われる¹⁾。高張力マイクロパイルを周囲に打設して補強することもある²⁾。兵庫県南部地震で被災した高架橋基礎に対して周囲の地盤を改良して補強することも行われている²⁾。

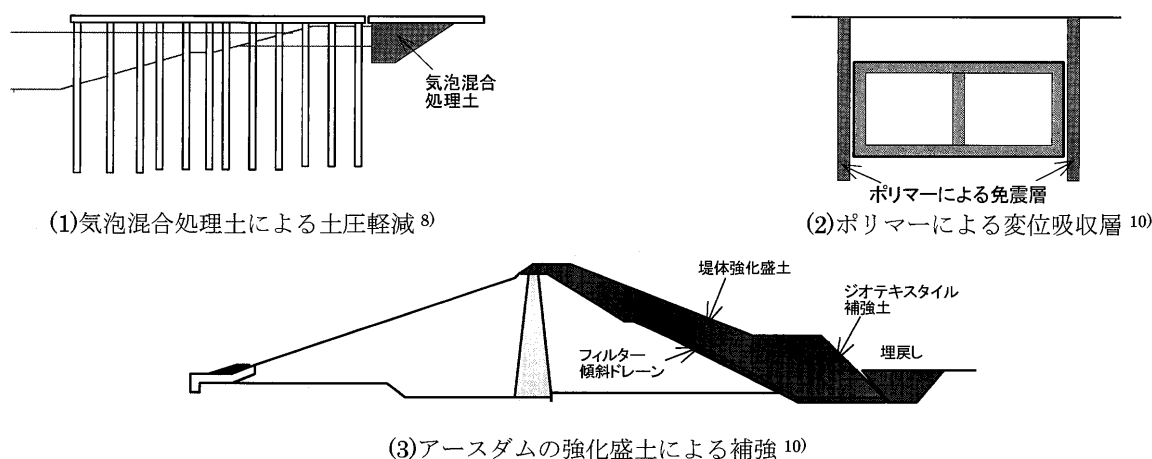
土構造物では、東海道新幹線の盛土の法尻にシートパイルを打ちタイロッドで結んだ¹⁾のが、対策を施した最初であろう。直接基礎の沈下と同様に、土構造物下の地盤が液状化したとしても、側方へ押し出されるのを防ぐと沈下量も減少できる。最近では河川堤防でもシートパイルを打設して側方への変形を抑えることが行われ²⁾、また、法尻部の地盤を締め固めたり¹⁾、固化することも行われている。その他、八郎潟干拓堤防では1983年日本海中部地震の復旧にあたって、止水矢板と排水溝によって地下水位を下げるが行われた¹⁾。また、十勝川堤防では2003年十勝沖地震の復旧にあたって法尻にドレーンとふとん簞を設け、地下水位を下げるが行われている²⁾。

岸壁・護岸では背後地盤の改良²⁾や、兵庫県南部地震の復旧時に事前混合処理工法等で裏込めすること²⁾が行われてきている。背後地盤の改良の場合は岸壁に影響を与えない地盤改良工法が選定されている。このためグラベルドレーンが良く用いられているが、控え工などが複雑に配置されている場合には薬液注入固化が有効とされている²⁾。一方、東京の内部護岸ではゼロメートル地帯の地震水害を防ぐために、前面に鋼管矢板を新設し、根固めも施して補強する対策¹⁾が実施されつつある。

地中構造物が液状化によって被災するパターンはいくつかあって複雑であるが、そのうちの浮上りはメカニズムが明らかなので対策がとられるようになってきている。共同溝では両側にシートパイルを打設することが行われている¹⁾。このようにすると、直接基礎の沈下と同様のメカニズムで、液状化した土が構造物下に回り込むことができなくなり、その結果として浮上り量を小さく抑え



総 説



図—2 強い地震動に対する補強事例

梁の改善, iii) 基礎底面下の地耐力不足対策が行われた⁷⁾。i) では増加した設計水平荷重に対しボルトの本数を増やしたり, ペDESTALの補強が行われた。ii) ではペDESTAL部の拡幅やフーチング部の拡幅, つなぎ梁部拡幅が行われた。iii) では直接基礎に対してフーチングを拡幅したり, 杭基礎に対して増し杭が行われた。

③ 岸壁の耐震補強事例

既存の岸壁を強化して, 大震災時においても地震直後から機能を果たすことを目的とした耐震強化岸壁にするために, 背後地盤の土圧を低減する方法や, 岸壁法線を前に出して栈橋構造とすることがよく行われてきている。このうち土圧低減工法によって耐震強化した例として石狩湾新港や東京港大井埠頭, 横浜港中央地区岸壁がある。これらでは裏込め土を気泡混合処理土で置き換えることが行われた (図—2 の(1))⁸⁾。

千葉港の岸壁のうち12 m 岸壁の耐震性の検討が行われた結果, 設計震度を上げると所定の安定性を確保できなかったため, 耐震強化が行われた。ここには鋼管矢板の既設岸壁があったが, その前面に鋼管杭が打設され, 栈橋杭水平連結方式による耐震補強が行われた⁹⁾。

④ 地中構造物の耐震補強事例

横浜市の中川駅では地震時に既設開削トンネルに作用する地震力を低減する対策が行われた。このためにトンネル側面部にポリビニルアルコール系ポリマー剤で構築した変位吸収層を設けトンネルの免震化が図られた (図—2 の(2))¹⁰⁾。

⑤ 土構造物の耐震補強事例

東京都水道局では兵庫県南部地震を契機に水道施設の信頼性向上の重要施策に位置づけ, 既設水道施設の耐震化工事が進められている¹¹⁾。水道用ダムである山口貯水池では1998年から2000年にかけて耐震補強された。さらに隣接する村山貯水池でも2003年から堤体の耐震強化工事が進められた。この堤体は昭和2年に築造されたゾーン型アースダムであり, 0.2の設計震度のもとで円形すべり面法ですべり安全率を求めたところ1.2を下回る結果となった。そこで堤体の上下流に強化盛土を配置し既設盛土との間にドレーンとフィルターを設けて堤体内水位を低下する工法が採用された (図—2 の(3))。

そして, 動的解析によりすべり安定性と残留変形が照査され所要の耐震性を満足することが確認された。

4. 耐震点検から補強までの手順と課題

上述したように, 耐震補強が必要となるケースはいくつかあり, また, 構造物ごとに周辺環境など事情が異なるため, 耐震点検から補強を行うまでの手順や方法も多種多様である。したがって大まかな言い方しかできないが手順を示してみる。

(1) 地震時に不安定な箇所の把握

我が国では戦後の高度成長期頃から都市周辺に造成宅地が多く造られてきたが, どこに土が盛られているか分からなくなっている所が多い。造成盛土は一般に地震時に変状を生じやすい。そこで, 造成宅地盛土に対しては盛土施工箇所およびその厚さを推測することから始める必要がある。この推定には新・旧航空写真や地形図をもとに抽出を行う方法があり¹²⁾, 現在, 一部の地域で推定が行われ始めたところである。全国の造成宅地盛土が早く把握され, 耐震補強が行われることが望まれる。

次に, このような造成盛土地や, その他, 存在が分かっている面的, 線的に広がった構造物 (例えば河川堤防, 道路, ライフライン) について, 地震時に特に注意すべき箇所を抽出することになる。抽出にあたっては, 液状化しやすい箇所や, 揺れが大きい箇所, 盛土高が高い所などを抽出することになる。このためには平面的な微地形分類図や表層地質図に加えて, 深さ方向の地層構成を知る必要がある。高速道路のように建設時の地盤調査が行われデータも保存されている場合には良いが, その他の構造物では既往地盤調査資料が見つからないことが多い。現在, 各地で地盤データベースが整えられてきつつあり¹³⁾, 早く全国で整備されることが望まれる。

(2) 耐震点検

面的・線的に広がった構造物については, 上記のように抽出された箇所に対して耐震点検が行われる, 一方, 個々の構造物に対しても, 同様に耐震点検が行われる。これらの場合, 構造物の設計資料や地盤データが存在すると定量的な点検は行いやすい。ところが面的・線的に広がった構造物では, ほとんどの場合その構造や地盤状

況は分からない。個々の構造物でも古い構造物では資料が保存されていない事が多い。地盤内に設置されている基礎は目視できないので推定も難しい。

このため、設計資料や地盤データがない場合における耐震点検方法も開発していく必要がある。例えば高圧ガス施設に対しては、現在、点検方法が作成されている¹³⁾。

(3) 耐震性能の照査

耐震点検の結果問題がありそうと判断された構造物については、耐震性能を照査することになる。基礎や地盤関係では地震応答、液状化、法面の安定、擁壁の安定性などが構造物へ与える影響を検討する。この場合、従来から耐震設計で行ってきている液状化の判定や円弧すべり面法による法面の安定性の評価方法を用いると、手取り早い。ただし、補強対策を考えた場合、構造物直下の地盤を改良して液状化し難くするといったことは容易ではない。それに対し、構造物や地盤の変形量をもとに性能が規定してあれば、それを軽減出来る工法は種々ある。そこで、変形量をもとにした性能設計の導入が耐震補強の場合には重要であり、現在、その方向に向かっている。ただし、構造物や地盤の変形量を推定する手法自体がまだ確立されているとは言えないので、この研究を進める必要がある。

(4) 補強方法の選定および効果の定量的な評価

耐震性能を照査した結果耐震性能が不足していると補強を行うことになる。補強工法を選定するにあたって、いくつかの工法を比較検討することになるが、新設の場合に比べて次のような事を考慮して選定する必要がある。

① 既設構造物を使用しながら施工できること。

② タンクヤードや住宅地などでは他の構造物が近接しているため、他の構造物に影響を与えずに施工できること。

③ 構造物のライフサイクルコストや地震時の事業継続計画（BCP）、復旧計画などとの関連性。

選定した補強工法の効果に関しては(3)と同様の方法で照査することになる。まだあまり確立されていない工法に関しては、解析だけでなく模型実験や現場実験も行っ

て効果を確認することが望まれる。

5. あとがき

既設構造物の基礎と地盤の耐震補強に関して、その必要性や事例、検討手順、今後の課題を述べてみた。地上の構造物に比較して基礎や土構造物では補強し難いこともあり、まだ、耐震補強が一部しか行われていない。これを促進するためにも安価で簡易に施工できる補強工法の開発が望まれる。また、補強効果を検証するために地震計や間隙水圧計などを設置し、補強後も地震時の挙動を観測しデータの蓄積をはかることも望まれる。

参 考 文 献

- 1) 地盤工学会：液状化の調査・設計から施工まで，1993.
- 2) 地盤工学会：液状化対策工法，2004.
- 3) TC4, ISSMGE: Case histories of post-liquefaction remediation, JGS, 2001.
- 4) 加藤康司・瀬川信弘・稲川浩一：杭基礎の耐震設計・補強事例 In-Cap 工法，基礎工，Vol. 35, No. 2, pp. 54～56, 2007.
- 5) 福井次郎・天野 明・河野洋一・山根 大：多柱式パイルベント基礎の耐震補強，基礎工，Vol. 35, No. 2, pp. 72～75, 2007.
- 6) 中谷昌一・白戸真太：道路橋基礎の耐震補強の現状および展望，基礎工，Vol. 35, No. 2, pp. 25～29, 2007.
- 7) 池田雅俊・前 孝一：高圧ガス施設の耐震設計・補強事例，基礎工，Vol. 35, No. 3, pp. 81～83, 2007.
- 8) 土田 孝：土圧低減工法，基礎工，Vol. 31, No. 5, pp. 23～25, 2003.
- 9) 岩波光保：既存岸壁の耐震補強を兼ねた耐震強化岸壁の整備，基礎工，Vol. 35, No. 3, pp. 61～64, 2007.
- 10) 室野剛隆・館山 勝・桐生郷史・小林正介：ポリマー免震壁による既設開削トンネルの補強，基礎工，Vol. 35, No. 3, pp. 69～71, 2007.
- 11) 田村聡志・村山 眞：既設アースダムの耐震強化事例，基礎工，Vol. 35, No. 3, pp. 94～97, 2007.
- 12) 地盤工学会関東支部：造成宅地における耐震調査・検討・対策の手引き―地震から既存の住宅を守るために―，地盤工学会，2007.
- 13) 地盤工学会表層地盤のデータベース連携に関する研究委員会：平成18年度「統合化地下構造データベースの構築」サブテーマ2 データベース連携・統合化のための分散管理型システムの開発表層地盤のデータベース連携に関する研究報告書，2007. (<http://www.jiban.or.jp/organibu/chousabu/jibandatabaseH18.pdf>)
- 14) 池田雅俊・安田 進：高圧ガス施設の耐震設計・補強の歴史，現状および展望，基礎工，Vol. 35, No. 3, pp. 41～45, 2007.

(原稿受理 2007.11.19)