既設岸壁・護岸の液状化対策を対象とした 低コスト工法と段階的地震対策の提案

山田 岳峰1·京川 裕之2·石井 健嗣3·鎗田 哲也4·北山 真5

¹正会員 鹿島建設株式会社 土木管理本部土木技術部(〒107-8348 東京都港区赤坂 6-5-11) E-mail:takemine@kajima.com

³正会員 鹿島建設株式会社 技術研究所土質・地盤グループ(〒182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1) E-mail: ishiiken@kajima.com

⁴正会員 鹿島建設株式会社 土木設計本部構造設計部(〒107-8502 東京都港区赤坂 6-5-30) E-mail:yarita@kajima.com

⁵正会員 ケミカルグラウト株式会社 技術本部設計部(〒105-0001 東京都港区虎ノ門 2-2-5) E-mail:m-kitayama@chemicalgrout.co.jp

本研究は、液状化被害が予想されている製油所等の臨海部埋立地に立地する事業所を対象に、岸壁や護岸の液状化対策の合理化策について考察する. 従来技術より対策費を低減できる低置換率格子状固化、側方流動抑制壁を対象に遠心模型実験を実施した. 対策工の性能を評価した結果、これらの技術で、地震時に約4mの変位が発生する岸壁の変位を、1m~2m以内に抑制できることが分かった. これらのコスト低減型の対策技術の他に、構造物や対策工の性能を地震観測等のモニタリングにより評価しながら段階的に地震対策を行う"段階的地震対策"を提案し、実務への展開方法を考察した.

Key Words: Sea-wall, Liquefaction, Cost-effective, Countermeasure, Centrifuge test, Step by Step seismic retrofit

1. はじめに

東日本大震災の教訓の一つとして、震災後の石油製品の供給の継続が挙げられる¹⁾. また、被災した施設の回復力の強化が、事業継続上の経営課題と意識されるようになった. そこで、現在、製油所においては、国の支援のもと、安全性の確保とともに、石油製品の入出荷に必要な施設の使用性を確保するための地震対策が進められている. 施設として、地震時に液状化の発生が予想される埋立地に立地する桟橋、パイプライン、岸壁・護岸、タンク並びに陸上出荷施設等が挙げられる(図-1).

首都直下地震や南海トラフ地震等の各地域で想定される最大級の地震を対象に施設の地震対策を進める場合, 過大な事業費(対策コスト)が課題になる.一方で,東 日本大震災の後に,筆者らが,地盤固化を適用した構造物を対象に約20事例を調査した結果,設計の想定を上 回る地震が作用した場合でも,構造物の被害が発生していなかった.従って,費用対効果を意識した合理的な対 策を検討する際には、対策工の性能や耐震裕度を把握することが重要である。しかし、埋立地盤は土質の種類や物性値のばらつきが大きく、さらに多くの水際構造物は経年変化が著しいことから、計画・設計段階での十分な調査や性能評価を行うことは、コスト的にも精度的にも限界がある。

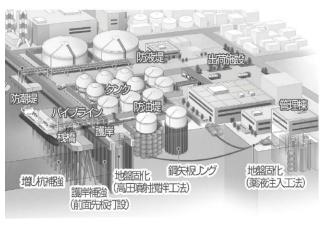


図-1 臨海部に立地する事業所の地震対策のイメージ

また,民間事業者が管理する臨海施設の対策の場合には,企業の BCP 目標を満足する範囲で,ある程度の変形を許容した上でできる限り低コストな対策で,かつ施設を供用しながら施工できる減災技術が求められることが多い.限られた対策用地に構造物が輻輳して立地する条件下での減災技術として,セメント系固化材を用いる高圧噴射攪拌工法等の地盤固化工法が有望である.当該工法であれば,改良地盤の強度が大きく小型の施工機械を用いて狭隘箇所でも近接構造物への影響が小さい状態で施工できる.一方で,低コスト化技術の検討並びに工法の適合性の確認が課題になる.その際,対策工の効果を変形量で評価すること,その工法と評価法の検証と妥当性の確認が必要である.

そこで、筆者らは、岸壁・護岸の液状化対策として、低置換率格子状固化と側方流動抑制壁を対象に、これらの低コスト化技術の有効性を実験並びに数値解析で検証した ^{2) ~5}. さらに、対策工の効果を確認するための変形量評価における解析パラメータの同定の重要性を確認した ⁶. その上で、不均質な地盤、老朽化した施設を対象に対策工の妥当性を確認しながら合理的な対策を進める方法として、地震時の地盤や構造物の応答をモニタリングしながら、段階的に工事を進める段階的地震対策を提案し、実務への展開方法について考察する.

2. 低置換率格子状固化と側方流動抑制壁の液状 化対策効果の検証

鋼矢板式岸壁を対象に、岸壁法線からの施工ヤードが限定される場合の主な液状化対策工法を図-2に示す. 従来技術として、改良率が50%以上の格子状地盤固化や既存の矢板の前面に矢板を打設しグラウンドアンカーで支持する工法が挙げられる. 目標性能を満足しつつ、コスト削減できる減災技術として、従来よりも改良率を減らした低置換率格子状固化(改良率が概ね50%未満が目安)や、岸壁の背後の地盤に側方流動を抑制する地中壁を設置する工法を検討対象とした.

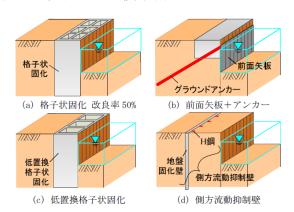
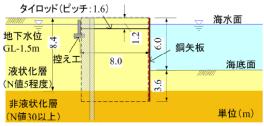


図-2 岸壁の液状化対策工法



備考) 対策工設置個所

[___]: 低置換格子状固化の設置範囲

: 側方流動抑制壁(地盤固化壁+H鋼)の設置範囲

図-3 実験で想定した岸壁と対策工の概要

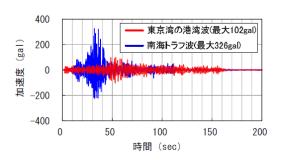
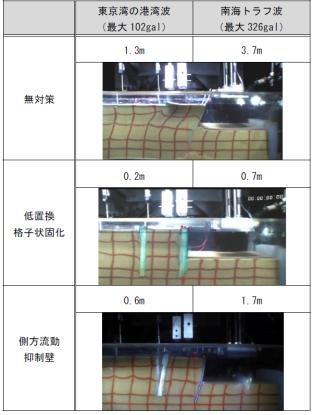


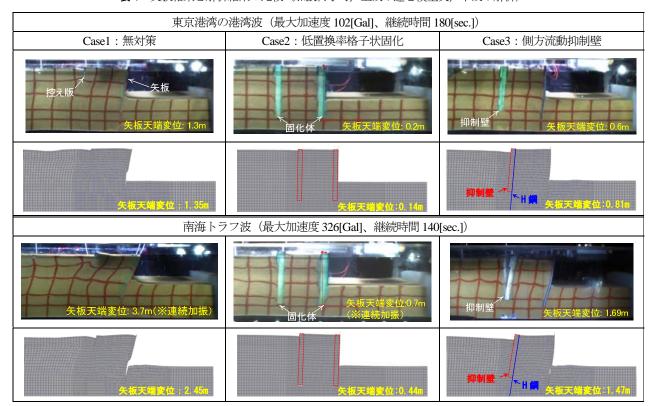
図-4 実験で想定した岸壁と対策工の概要



備考)写真は南海トラフ波入力後の変形状況

図-5 実験結果 (岸壁の最大水平変位量)

東京湾岸の実際の岸壁を参考にしたモデルを対象に、 遠心模型実験を行い、これらのコスト低減技術の有効性 を確認した. 図-3 に実験で想定した岸壁、地盤及び各



対策工の設置範囲を示す. 図-4 に実験で入力した東京湾の港湾波(:L1),伊勢湾の南海トラフ波(:L2)の波形を示す. それぞれの波を入力した時の岸壁の最大水平変位量並びに南海トラフ波入力後の岸壁とその周辺地盤の変形状況を図-5 に示す. 地盤の液状化の発生により,対策無しの場合の岸壁頂部の水平変位は,L1で1.3 m,L2で3.7 mになる.一方,対策した場合の各入力波の水平変位は,低置換率格子状固化で0.2 m,0.7 m,側方流動抑制壁で0.6 m,1.7 mにそれぞれ抑えられることが分かった.

2 次元液状化解析プログラム FLIP^かを用いて,各種対策工(Casel:無対策, Case2:低置換率格子状固化, Case3:側方流動抑制壁)を想定した遠心模型実験の解析を実施した.表-1 に中大規模地震を想定した動的遠心模型実験結果と解析結果の加振終了時の概況をまとめる. 矢板天端の水平変位を見ると,解析値は,無対策でL1:1.3m (実験の1.04倍)とL2:2.45m,低置換率格子状固化で0.14m (実験の0.7倍)とL2:0.44m,側方流動抑制壁でL1:0.81m (実験の1.35倍)とL2:1.47m (実験の0.87倍)であり,対策工によって岸壁変位が抑制される実験結果と整合する.また,材料境界面のジョイントや矢板剛性の非線形性を考慮し,実験条件を忠実に再現することにより,構造物周りの地盤挙動や矢板の変形モードも実験値を概ね捉えていることが分かる.

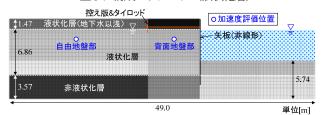
以上,地盤固化を利用した低置換率格子状固化と側方 流動抑制壁により,大規模地震時に約4mの変位が発生 する岸壁の変位を,1m~2m以内に抑制できることを 確認した. 要求性能に応じてこのようなコストを抑えた 新技術を採用することで, 従来技術に比べて対策を合理 化できる可能性があること, 数値解析的にも評価できる ことが分かった.

3. 解析パラメータの検討並びに対策工の妥当性 の確認方法

小規模~大規模地震動のレベルが異なる地震動が作用した時の無対策の実験結果(地震応答)を対象に、実験と解析の応答を比較することで設定した解析パラメータの妥当性を確認した.構成パラメータの設定に関して、動的遠心模型実験で入力する地震動の規模と、FLIPが搭載するマルチスプリングモデルが表現する地盤応答との関係を、小規模地震動(最大加速度 15-30[cm/s²])で弾性応答、中規模地震動(最大加速度 45[cm/s²])で塑性応答、大規模地震動(最大加速度 100[cm/s²]以上)で液状化応答として考える.図表-1 に示されるように、これら小から大の異なる地震動ごとに弾性、塑性、液状化特性パラメータを検証する.

図-6 に示される小規模地震動での自由地盤部と背面地盤部(図表-1参照)の水平加速度フーリエスペクトルより、弾性物性値を検証する. 結果から、解析は実験で観測される 1,2 次振動モードの周波数ならびに振幅を概ね表現できていることが分かる. 解析結果では最大で約 0.1%の軸差ひずみが生じていることから、設定物性値は遠心模型地盤の弾性物性(体積・せん断弾性係数、

図表-1 解析モデルと加速度評価位置、 並びに構成パラメータ(液状化層)



| | マルチスプリングモデル | 単位 | 液状化層 | 地盤応答 | 地震動 |
|----------|----------------------------|------|-------------------------|-----------|-----|
| 変形特性 | 基準せん断剛性: G ma | kPa | 4.104 x 10 ⁴ | 弾性 | 小規模 |
| | 基準体積弾性: Kma | kPa | 1.077 x 10 ⁵ | | |
| | 基準拘束圧: σ′ _{ma} | kPa | 33.7 | | |
| | 拘束圧依存指数: m_G , m_K | - | 0.5 | | |
| | ポアソン比: <i>v</i> | - | 0.33 | | |
| | 内部摩擦角: ϕ_{f} | deg. | 35.91 | | 中規模 |
| | 粘着力: c | kPa | 0.0 | | |
| | 減衰上限値: h max | 1 | 0.24 | | |
| 液状化パラメータ | 変相角: φ _p | deg. | 28.0 | 液状化 特性 | 大規模 |
| | w ₁ | - | 5.0 | | |
| | <i>p</i> ₁ | - | 0.6 | | |
| | p 2 | - | 1.1 | | |
| | c 1 | - | 1.78 | | |
| | S_1 | - | 0.005 | | |

拘束圧依存性パラメータ, ポアソン比) を正しく反映し ていると考えられる. 中規模地震動での水平加速度フー リエスペクトルを図-7に示す. 背面地盤においても同様 に、6Hz でのピークの差異は見られるものの、解析は概 ね実測値を捉えている. また,解析結果では,最大約 1%程度の軸差ひずみが生じていること、過剰間隙水圧 がほぼ発生していないことから、このときの地盤は非液 状化時での塑性応答を示しており,解析では模型地盤の 塑性物性値(内部摩擦角,減衰上限値)が適切に設定さ れていると考えられる. 液状化に関連するパラメータは, 多くの場合、別途実施される液状化試験(非排水繰返し せん断試験)より設定される。今回の検討でも、液状化 試験にフィッティングさせることで液状化パラメータを 設定した.解析結果は前述した表-1に示す通りである. 無対策、対策ともに、岸壁天端の水平変位量および矢板 の変形モードともに、解析は実験を再現できていること が分かる.

経験的な簡易設定法や類似地盤物性の援用,地盤材料の要素挙動を確認する室内試験結果に加えて,本検討のように境界値問題として中小地震観測結果から地盤の動的物性を同定することで,構成パラメータは洗練され,解析精度を向上させることができる.今回の無対策岸壁を既設構造物に置き換えると,既設構造物がこれまでに経験した中小規模の地震で計測されたデータを本検討のように分析,逆解析することにより,構造物が当初想定する大規模地震時の地盤と構造物の変形予測精度を向上させることができる.また,同様の手順により,要素試験だけでなく観測結果からも地震時動的物性を推定・検証できる可能性がある.

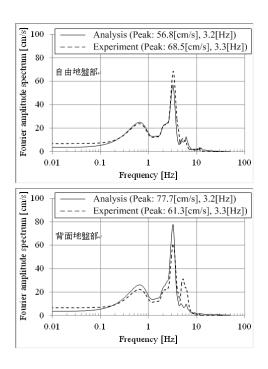


図-6 小規模地震動での水平加速度フーリエスペクトル

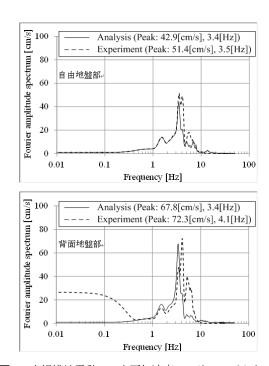


図-7 中規模地震動での水平加速度フーリエスペクトル

埋立地盤は土質の種類や物性値のばらつきが大きく, さらに多くの水際構造物は経年変化が著しい.計画・設 計段階での十分な調査や性能評価を行うことは,コスト 的にも精度的にも限界がある.ここで検討した結果は, 従来の調査に加え,地震観測等で構造物や周辺地盤の実 際の応答をモニタリングすることで,これらの結果から 総合的に構造物や地盤の耐震診断や対策工の有効性を評 価することが,減災技術の妥当性の確認方法として有望 なことを示唆している.

4. 地震観測等のモニタリングを組み合わせた段階的地震対策の提案と考察

以上より,既設岸壁の液状化対策では,精度的に曖昧さが残る耐震診断だけでなく,地震観測等で構造物や周辺地盤の実際の応答をモニタリングし,対策工の設計に反映する方法が有効そうである.そこで,以降,モニタリングによる評価を組み合わせて段階的に行う地震対策について検討する.段階的地震対策として実務に展開するために,本稿では側方流動抑制壁,低置換率格子状固化,従来型格子状固化の段階的対策を対象として,設計段階と供用後の評価,並びに段階的地震対策の効果に関して考察する.

一連の対策工の段階的地震対策の概念図を図-8 に示す. 設計段階では、段階的対策が可能な複数の対策工を対象に、対象地点で想定される大小の様々な想定地震動に対して、数値解析で対策効果を評価する. 評価結果は、系に入力する地震動の累積エネルギー(∑∠W)と構造物の応答(例えば岸壁変位 u)の関係として整理する. 累積エネルギーの尺度の一つとして、例えば、入力地震動の速度 PSI(速度波形の二乗積分値の平方根)を取り上げる. なお、地盤が大変形する時の構造物~地盤系の応答(例えば岸壁変位 u)は、速度 PSI と比例する 8 ことが知られている.

図-9 は、速度 PSI 値と岸壁矢板変位を各対策ケースについてまとめた結果である。速度 PSI 値= 66 cm/s⁰⁵ の地震波では、対象地盤の固有周波数である 3-4Hz での加速度振幅が小さいために岸壁変位は小さくなるが、全体的には PSI 値が大きくなるにつれて岸壁変位は大きくなる。ただし、速度 PSI 値= 70 cm/s⁰⁵ 付近で段になるように、どのケースにおいても矢板変位は速度 PSI 値に対して非線形的に増加しており、低置換率格子状改良、側方流動抑制壁では、無対策での岸壁変位の変遷の傾向はそのままに、その絶対量を抑える効果がある。想定地震動と岸壁変位等の評価パラメータの変遷を把握することにより、対策の効果(要求性能)と対策コストを見比べながら、最初の対策工を合理的に選定・設計することができる。

設計段階における次の評価として、採用した対策工を対象に、大変形時の Σ \angle W (速度 PSI) \sim u の比例関係 (例えば図-10 参照) を用いて、図-11 に示すように速度 PSI と変位の関係が線形となるように K_{DESIGN} \cdot u の K_{DESIGN} を評価する. 結果的に整理される K_{DESIGN} は、設計で想定する系全体の硬さに相当する値であり、 K_{DESIGN} \sim u 関係は u の増加によって右肩下がりの非線形の関係になる(図-12 参照).

最初に採用・施工された対策工の事後の評価として地 震観測を一定期間行う. 通常, 1~2 年の観測で統計的 に分析・判断できる程度の中小地震の発生が期待される.

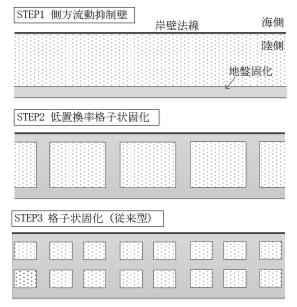


図-8 段階的地震対策の対策ステップの一例

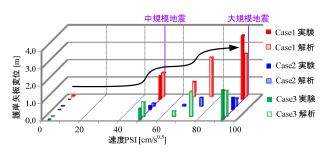
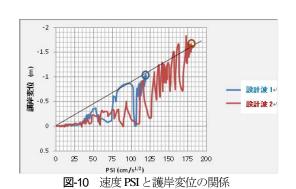


図-9 速度 PSI と護岸変位の関係 (実験と解析)



(重力式岸壁の検討例, 2種類の設計波を入力)

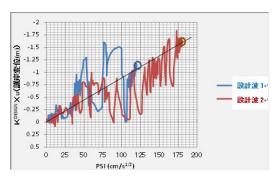


図-11 速度 PSI と護岸変位の関係 (重力式岸壁の検討例,大変形時の応答を基準に直線関係となるように係数 K_{DESIGN}を乗じた場合)

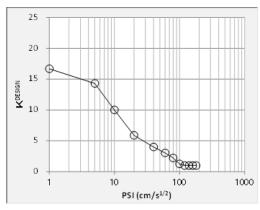


図-12 速度 PSI と K_{DESIGN}の関係(図-10を参照)

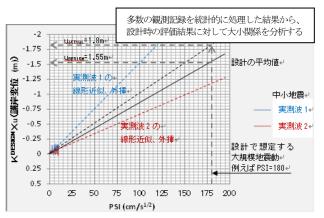


図-13 設計時に想定した結果と地震観測記録から,簡便に実際の護岸の応答を比較し大規模地震の応答を評価する方法

前述した設計時に想定した応答に対して実際の応答を簡

便に比較評価する方法として、次のような評価ができる. 観測した岸壁変位 UACTUAL と、基盤入力波から換算した 速度 PSI_{ACTUAL}から,速度 PSI_{ACTUAL} ~K_{DESIGN}×U_{ACTUAL}関 係をプロットする. 複数の観測記録に対し同様な整理を 行い、設計時の評価結果と比較する. 観測結果から比例 関係で外挿することで、設計で想定する大規模地震動を 対象に、予想される実際の応答を予測することができる (図-13 参照). 以上の検討は、複数の観測記録から、 系に入力する地震動と岸壁変位を関係付ける系の固さが 想定よりも固いか軟らかいかを分析していることになる. 予測された応答値が許容値に収まれば追加の対策は必要 ない. また、超過する場合は必要な対策を追加する. な お, 実際の応答の予測値が許容値を上回り, 詳細な評価 が必要と判断される場合には、検討コストは掛るが、注 目する応答を対象に固有周期の分析や実験計画法等の逆 解析手法を用いて地盤や構造物の物性値を再評価し、地 震応答解析を行い、設計で想定する地震動を対象に応答 を再評価することもできる.

以上,事後評価を行うことで,岸壁・護岸の耐震裕度を予測するとともに,以降の対策工の設計検討に反映することで合理的な対策を実現できる.このような方法が実現できれば,一度に最終形の対策を行う従来方式にか

わり、時間的にも空間的にも、段階的に対策と評価を繰り返し行うことで、対策をさらに合理化できる可能性がある。従来方式に比べて対策期間は長くなるが、中長期的な視点で対策事業費を分散しながら効果的に対策を実施できる利点も考えられる。

5. まとめ

本研究では、不均質な埋立地盤に立地し、老朽化も進む既設岸壁・護岸の液状化対策を対象に、対策の合理化を図るために、低コスト工法を検討するとともに、モニタリングを併用した段階的地震対策について考察した。得られた知見は下記の通りである。今後、段階的地震対策の効果を定量的に評価する予定にしている。

- ・ 実験や観測で、対策工の耐震裕度を明確にする必要がある。
- ・ 低置換率格子状固化や地盤固化を利用した側方流動抑制壁を岸壁背面地盤に造成することで, L2 地震時に約 4m の変位が発生する岸壁の変位を, 1m 以内, 若しくは 2m 以内に抑制できる. これらの対策は, コストを抑えた防災・減災技術として期待できる.
- ・ 既設岸壁・護岸の耐震性を通常の調査だけで診断 する場合,精度的にもコスト的にも限界がある.
- ・ 地震観測等のモニタリングを行いながら、段階的 に地震対策を行い、性能の評価結果を設計にフィ ードバックすることで、さらに合理的な対策を行 える可能性がある。

参考文献

- 1) 石油連盟:東日本大震災における石油業界の対応 と提言,2011.
- 2) 石井健嗣, 小原隆志, 北本幸義, 藤崎勝利, 山田岳峰: 岸壁・護岸を対象とした地盤固化による低コスト液状化対策技術の遠心模型実験, 第70回土木学会年次学術講演会, I-464, pp.927-928, 2015.
- 3) 京川裕之,大谷芳輝,鎗田哲也,田口勝則,山田岳峰:岸壁・護岸を対象とした地盤固化による低コスト液状化対策技術の解析的評価,第70回土木学会年次学術講演会,I-465,pp.929-930,2015.
- 4) 山田岳峰,石井健嗣:岸壁・護岸の合理的な液状化対策に関する考察,第6回インフラ・ライフライン減災対策シンポジウム,2015.
- 5) 京川裕之,大谷芳輝,鎗田哲也,田口勝則,山田岳峰,鎌田敏幸,北山真,澤田叔宏:中大規模地震に対する地盤固化低コスト液状化対策技術の解析的評価,第71回土木学会年次学術講演会,2016.(投稿中)
- 6) 京川裕之,大谷芳輝,鎗田哲也,田口勝則,山田岳峰,澤田叔宏:動的微小変形特性に基づく護岸液状化対策の解析的評価に関する検討,第51回地盤工学研究発表会,2016.(投稿中)

- 7) Iai, S. et al.: Strain space plasticity model for cyclic mobility, Report of the Port and Harbor Research Institute, Vol.29, No.4, pp.27-56, 1990.
- 8) 野津厚, 井合進:岸壁の即時被害推定に用いる地震 動指標に関する一考察,第 28 回土木学会関東支部技

STUDY ON LOW COST COUNTERMEASURES AND STEP BY STEP SEISMIC RETROFIT AGAINST LIQUEFACTION-INDUCED FLOW FOR EXESISTING SEAWALLS

Takemien YAMADA, Hiroyuki KYOKAWA, Kensuke ISHII, Tetsuya YARITA and Makoto KITAYAMA

This study investigated rational countermeasure methods against liquefaction induced damages of refinery at landfill near seacoast and others. Dynamic Centrifugal modeling tests for quays with or without countermeasure methods were conducted and simulated by using 2D FEM. A method was grid form ground improvement with low improvement volume rate and another one was diaphragm wall by soil improvement. As a result, it was clarified these methods were effective enough to decrease deformations of quays against ground liquefaction. Furthermore, combining seismic observation, step by step seismic retrofit using the methods was proposed by the authors.