

平成21年 6月10日現在

研究種目：若手研究（B）
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19760309
 研究課題名（和文）RC構造物および立地地盤の損傷・変状評価と修復計画策定支援システムの構築
 研究課題名（英文）Development of Supporting Systems for Damage Assessment of RC Structure - Soil System and Recovery Planning
 研究代表者
 牧 剛史（MAKI TAKESHI）
 埼玉大学・大学院理工学研究科・准教授
 研究者番号：60292645

研究成果の概要：地震を受けるコンクリート構造物の損傷と立地地盤変状を精度よく予測し、設計における耐震性評価と損傷構造物の復旧計画策定を支援する解析システムの開発を目的とした。構造物の損傷状態を定量評価する数値指標を提案し、樹脂注入工法を用いた修復による性能回復程度を明らかにした。また、構造物-地盤全体系の地震時挙動解析に用いるモデル化手法について検討し、地盤変状予測のための地盤材料モデルおよび対策工としての地盤改良を対象に改良体モデルを提案した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,200,000	0	2,200,000
2008年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度	0	0	0
年度	0	0	0
年度	0	0	0
総計	3,300,000	330,000	3,630,000

研究分野：鉄筋コンクリート耐震構造学

科研費の分科・細目：土木工学／構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：RC構造物、損傷評価指標、修復効果、地盤、材料構成則、連成地震応答解析、地盤改良、有限要素解析

1. 研究開始当初の背景

(1) コンクリート構造物に代表される社会基盤構造物は、その使用期間中に荷重作用や地震作用、環境作用下に曝されることから、これらの外的作用による性能低下を時空間的に精度良く予測し、適切かつ計画的な補修・修復によって機能を維持する手法の確立が緊急課題である。

(2) 構造物と地盤を一体モデル化し、工学的

基盤面に地震波を入力する応答解析による耐震性能照査法(連成解析)は、一般新設構造物の設計実務で用いられる事例はまだ多くはないが、既設地中構造物や基礎構造物の耐震診断や補強計画策定の検討で適用されるケースが急速に増大している。しかし、構成部材の破壊判定に設計用の耐力式が用いられるため、連成解析の実施によって必ずしも合理化されていない現状がある。よって、構造物単体の診断に適用するケースも含め、詳細な要素情報(ひずみや応力)が得られる FEM

のメリットを生かし、耐力式に代わる合理的な力学的損傷指標を確立することが急務である。現状では部材の復元力モデルに基づいた部材単位での評価であり、細かな修復計画の策定は高度な工学的判断を要する。したがって、診断結果に基づく補修補強あるいは地震後の修復計画の策定の点からも、損傷の程度とその空間分布が明確になる FEM のメリットは大きい。さらに力学的損傷指標を例えば樹脂注入量などの工学指標に置換する手法を開発すれば、想定地震動を受けた後の修復コストの算定も可能であり、その波及効果は大きい。

(3) 一方、特に超軟弱地盤においては、地盤改良によって所定の構造性能を確保するケースも近年増加しているが、構造条件と地盤条件に応じて、地盤改良深さや広さを合理的に決定する手法は未だ確立されていない。構造物構築に際する地盤改良効果の検討は本質的に連成問題であり、FEM に基づく連成解析は威力を発揮しうる。そのためには、液状化に代表される超軟弱地盤の強非線形特性を、間隙水の挙動との連成を含めて精度よく追跡しうる地盤の材料構成則が不可欠である。地盤改良については最近数年間で実験的研究の事例が急増しているものの、3次元連成 FEM 解析によって改良後の構造耐震性評価まで行った研究は他に例を見ない。

2. 研究の目的

(1) 本研究は、特に地震作用を対象として、地中構造物や基礎構造物を含めたコンクリート構造物の損傷と、液状化など周辺地盤の変状とを精度よく予測し、新設構造設計における耐震性能照査手法としてのみならず、地震後の修復計画や地盤改良などの対策工法の策定にも適用可能なトータルシミュレーションシステムの開発を目的とする。

(2) 3次元 FEM による連成動的解析の適用を前提としたシステム構築のための個別検討課題として、以下の項目が挙げられる。

- ①要素情報に基づく力学的損傷指標の開発
- ②修復計画策定に資する工学指標の開発と修復による性能回復効果の解明
- ③超軟弱地盤の非線形材料構成則の開発と連成解析手法への組み込み
- ④効果的な地盤改良範囲の決定方法の開発と地盤改良後の耐震性能評価

3. 研究の方法

(1) 鉄筋コンクリート構造物およびそれを

構成する鉄筋コンクリート構造棒部材を対象として、①FEM から得られる要素ひずみの空間平均値に基づく力学的損傷指標の提案、②修復行為による構造部材の力学性能の回復効果の解明、③損傷を生じた構造部材の修復工法および修復量に基づく工学指標の提案、を行う。

(2) 構造物が立地する地盤を対象として、① FEM を用いた構造物-地盤連成地震応答解析におけるモデル化手法の検討、②地盤の液状化を再現し得る地盤構成則の開発と FEM への導入、③実構造物のケーススタディによる適切な地盤改良範囲の検討と耐震性能改善効果の解明、を行い、(1)と合わせてトータルシミュレーションシステムのフレームワークを構築する。

4. 研究成果

(1) 鉄筋コンクリート梁部材を対象として、特にそのせん断損傷に着目し、有限要素解析 (FEM) から得られる要素ひずみを空間平均化することによって、斜めひび割れの発生およびせん断破壊点を判定しうる力学的損傷指標を提案した。

具体的には、せん断損傷程度に影響を及ぼすと考えられる有効高さ、軸方向鉄筋量とその配置、せん断スパン比、コンクリート強度、せん断補強筋量が広範囲に分布するように、既往の載荷実験ケースを 13 ケース選定した。さらに、ケース数が不十分と思われた梁の寸法およびせん断補強筋量に着目し、これらを任意に変化させた 27 ケースの仮定の梁を選定し、合計 40 ケースの RC 梁を対象とした FEM 解析を実施した。全解析結果について、要素のガウス点におけるひずみの空間平均値 (応答値) と、斜めひび割れ発生荷重およびせん断補強筋降伏という二つの限界状態に対する限界値について詳細検討を行った。

検討の結果、斜めひび割れ発生に対しては、せん断スパン内要素群における偏差ひずみ第 2 不変量の平均値が、力学的損傷指標となりうることを示され、その限界値として 200・という具体的な数値が提案された。また、せん断補強筋降伏に対しては、同じ要素群におけるせん断補強筋方向の直ひずみの平均値が力学的損傷指標となりうることを示され、その限界値として材料強度から決定される RC 要素の降伏ひずみが適用可能であることが示された。以上の力学的損傷指標 (応答値) とその限界値の組み合わせを照査に用いることによって、少なくとも現行設計基準で用いられているせん断耐力評価式と同程度のせん断損傷評価が可能であることが明らかとなった。

その妥当性を実構造物の地震応答解析に適用することによって検証した。具体的には、全く同一の諸元を持ち、せん断補強量のみを変化させることによって最終破壊形式をせん断破壊と曲げ破壊の2種類に変化させたRC橋脚を設定し、これに対してFEMによる地震応答解析を行い、力学的損傷指標と限界値の組み合わせの適用性について検討を行った。その結果、せん断補強量が少ないケースでは、力学的損傷指標の値が限界値を上回る、すなわち地震時にせん断破壊を生じるのに対し、せん断補強量を増加させたケースでは、力学的損傷指標の値が限界値を下回る、すなわちせん断破壊を生じないことが明らかとなった。

(2) 異なるせん断損傷履歴を受けた柱部材に樹脂注入を施すことによる力学性能の回復効果を解明することを目的とした荷重実験を行った。具体的には、曲げ降伏後にせん断破壊を生じるような試験体を3体作製し、それぞれに異なる変形レベルまで正負交番荷重を施した後に、部材に生じた斜めひび割れに樹脂注入を行って再荷重を施した。

実験の結果、軽微な損傷を与えた試験体に比べ、より重度の損傷を与えた試験体の方が、修復後の力学性能の回復程度が高いことが明らかとなった。特に、今回対象とした樹脂注入工法による修復行為では、力学性能の回復程度が既に生じているひび割れ幅の大きさに大きく依存することが明らかとなった。この結果を、前述した損傷指標と関連づけることによって、被災後の修復効果までを定量評価可能な工学指標へ昇華させることが可能となると言える。

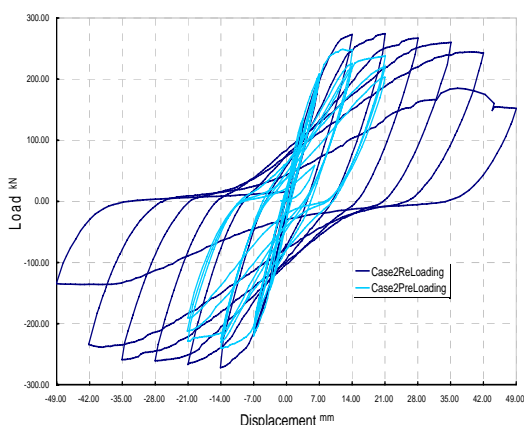


図-1 樹脂注入による性能回復

(3) 上記(1)(2)の結果を踏まえ、損傷を生じた部材の修復量に基づく工学指標の提案を試みた。すなわち、修復工法として樹脂注入工法を対象とし、その修復効果がひび割れ幅に依存することから、ひび割れに着目した工

学指標を提案することを目指した。

具体的には、最終破壊形式が曲げ破壊、曲げ降伏後のせん断破壊、せん断破壊となる計3体のRC柱試験体を作製し、これらに正負交番荷重を施しつつ、各荷重レベルにおいて生じた全てのひび割れ幅を計測し、これを部材全域で積分することによって得られるひび割れ空隙容積を指標として検討した。なお、このひび割れ空隙容積は、樹脂注入工法を適用する際には、樹脂注入量としてそのまま適用することが可能であり、工学指標となりうるものと考えられる。

実験の結果、破壊形式がせん断破壊のものは比較的小さい変形レベルからひび割れ指標が急激に増大し、これが柱容積の3%程度に達したときにせん断破壊を生じた。これに対し、曲げ降伏後にせん断破壊を生じるように設計された試験体では、比較的大きな変形レベルまでひび割れ指標は増大せず、柱容積の2%を超過した後の変位サイクルにおいてせん断破壊を生じた。以上の結果から、ひび割れ空隙容積あるいはそれを柱容積で除したひび割れ空隙率は、せん断損傷程度を定量的に評価する指標となりうると思われる。

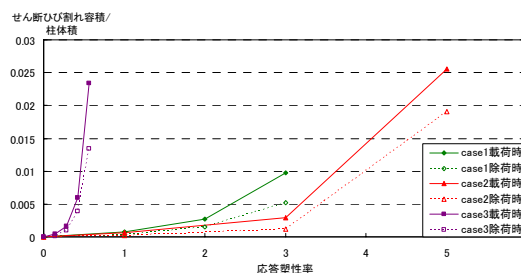


図-2 経験最大変形とひび割れ容積の関係

さらに、実際に被災した構造物の修復費用の積算に資することを念頭に、荷重時のみならず除荷時にも同様のひび割れ計測を行い、除荷時のひび割れ空隙容積も併せて算出した。その結果、地震力が作用していない状態では、最大経験損傷（最大経験ひび割れ空隙容積）の70%程度の損傷が目視で確認できることが明らかとなった。このことは、日債構造物の復旧を行う際に、構造物が地震時に経験した最大損傷を地震後に推定する上で、非常に有用な情報となるものと考えられ、復旧性能の定量評価に貢献する目安となると考えられる。

(4) 以上(1)~(3)の検討により、地震を受けるRC構造物の損傷評価の点から、樹脂注入量あるいはひび割れ空隙容積に基づく工学指標、FEM解析から得られる要素ひずみの空間平均値に基づく力学的損傷指標およびそれに対応する限界値のセットが提案できた。これにより、地震後の復旧性の定量評価、復

旧費用の算定、既設構造物の耐震診断などがより合理的に行われるものと考えられる。今後は、部材中に配置された鉄筋の損傷評価指標についても検討する必要がある。

(5) FEM を用いた構造物—地盤連成地震応答解析におけるモデル化手法の検討として、完全3次元FEMモデルによる詳細な地震応答解析、および実務上の取扱いを念頭に置いた2次元FEM解析におけるモデル化について検討を行った。

具体的には、実地盤中に設置した実台コンクリート杭の水平載荷試験を対象とした解析を行うとともに、実在する場所打ちRC杭基礎で支持された道路橋橋台を対象として、周囲の地盤も含めて構造系全てを3次元立体要素でモデル化し、工学的基盤面に照査用地震動を入力することによって、対象構造物の地震応答性状について詳細な検討を行った。その際、杭基礎と地盤間の局所的な滑り・剥離を、ジョイント要素を挟むことによって表現し、かつ地震エネルギーの逸散を考慮するために粘性境界を配したモデルとした。また、これと並行してほぼ同様のモデル化を行った2次元FEMモデルを作成し、同様に地震応答解析を行った。その際、地盤の奥行きを如何に設定するかが解析結果に大きく影響を及ぼすと考えられたことから、ここでは地盤奥行きをパラメータとして数ケースの解析を実施した。

解析の結果、3次元FEMによる地震応答解析は、橋台のマクロな応答性状および杭体の損傷レベルと損傷分布などの観点から、妥当な解を与えることが示された。併せて、完全3次元FEMを用いた連成地震応答解析を行う際のモデル化方法のモデルケースが示されたものと考えられる。

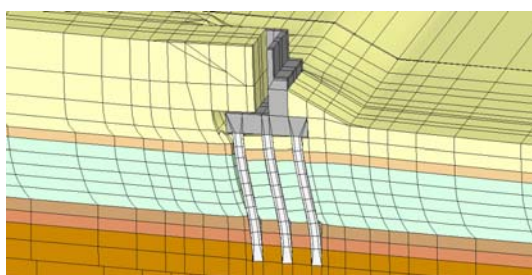


図-3 3次元FEM解析による杭基礎の変形

また、これをベースとして行った2次元地震応答解析では、橋台のマクロな応答は地盤奥行きの設定によらずほぼ同等となるのに対し、杭体の損傷レベルの観点からは大きな差異を与えることが明らかとなった。このことは、構造物の地震応答に伴う損傷程度を、単に構造物のマクロな応答変位によって評価しようとする、構造物の損傷の程度を見

誤る恐れがあることを示唆するものであり、現状の耐震照査に対しても大きく貢献する知見であると考えられる。なお、橋台自体のマクロな応答変位レベルと、杭基礎の損傷レベルの両方が3次元解析と同等となる地盤奥行きは、本ケースにおいてはフーチング幅程度であり、これは入力する地震動レベルを変化させても同じであった。今回の検討はケース数が少ないため、普遍的な結論を得るには至らないが、2次元解析で設定する地盤奥行き幅は、3次元解析と等価な解を与える幅が構造諸元毎に存在し、これを適切に設定することが肝要であることが示された。

(6) (5)で用いた構造物—地盤系の連成地震応答解析を、液状化危険度判定照査および液状化地盤における構造物の耐震安全性評価へ適用するために、飽和砂地盤の土粒子骨格と間隙水との連成を考慮した有効応力に基づく地盤材料構成則を構築し、3次元FEMに組み込んだ。その際、地盤のせん断強度に及ぼす拘束圧依存性と、繰り返しせん断変形履歴に伴う正負ダイレイタンスーとを適切に考慮した。さらに、せん断土槽を用いた既往の砂地盤—RC杭基礎系の液状化実験結果を利用して、導入した地盤材料構成則の検証を行うと共に、構造物—地盤連成解析への適用性について検証を行った。その結果、実験結果と解析結果との差異はそれほど小さくないものの、総じて基礎応答のマクロな傾向は解析によって再現できることが明らかとなった。詳細については今後の検討課題であり、特に構造物と地盤の境界付近で生じる局所的な地盤変形と水圧との連動の観点で、用いる地盤構成則にさらなる改良が必要であることが示唆された。しかしながら、上記で開発した解析手法を用いることで、構造物のみならず地盤の詳細な挙動をも解析的に追跡することが可能となり、地盤変状評価およびそれが構造応答に及ぼす影響の評価への進展が期待される。

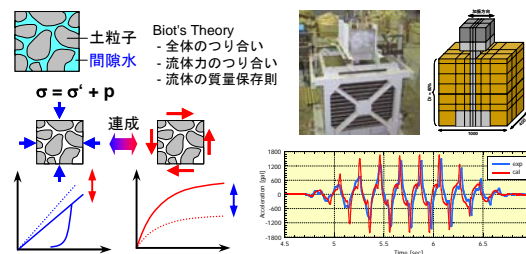


図-4 超軟弱地盤の非線形材料構成則

(7) 液状化を生じる可能性の高い地盤に対して、構造物を構築する前に地盤改良を施工工法が、近年適用されつつある。すなわち、地盤改良は地盤変状に対する対策工法の一

つとして位置づけられることから、地盤改良についても検討を行った。地盤改良工法は様々提案されているが、今回はセメント系固化材を用いた地盤改良を念頭に置き、改良体を含む構造物—地盤系の地震応答性状および地盤改良による耐震性向上効果の評価のための解析手法の確立を目的として、セメント改良砂の材料試験を実施し、改良体に適用する材料構成則の検討を行った。具体的には、セメントとベントナイトを混入したモルタル試験体を作製し、圧縮強度・曲げ引張強度・弾性係数の測定を行った。その結果、通常のコンクリートと同様、高水セメント比のセメント改良砂においても、引張強度や弾性係数が一軸圧縮強度の関数として表しうることが明らかとなった。さらに、既存のコンクリート用構成則を拡張して適用することを念頭に置き、セメント改良砂試験体の繰返し圧縮試験を行い、除荷剛性と塑性ひずみの推移を測定した。その結果、既往のコンクリート構成則における塑性ひずみパラメータを微修正することによって、基本的に同形式の構成則が適用可能であることが示された。ここでは、圧縮応力下のモデルについてのみ検討を行ったが、実際にはセメントを混入して固化させることで、引張応力下でひび割れを生じる可能性が考えられることから、ひび割れを含む改良体要素の圧縮特性についても検討を行う必要があるものと考えられる。

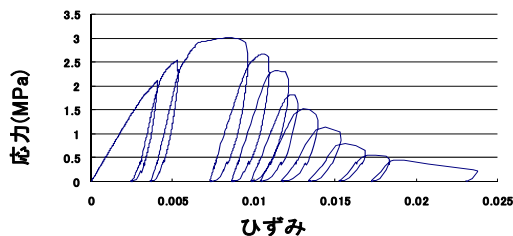


図-5 セメント改良砂の応力—ひずみ関係

(8) 以上(5)～(7)の検討により、液状化を生じるような超軟弱地盤に立地する構造物の設計あるいは既設構造物の耐震照査手法を確立する道筋をつけることができたと言える。また、単に液状化危険度や構造応答への影響を評価するだけでなく、その対策工法としての地盤改良についても検討を行い、開発した解析手法に組み込むことによって、地盤改良が及ぼす耐震安全性向上効果、さらには耐震性向上の観点から最適な地盤改良範囲の設定が可能なシステムへの昇華が可能なレベルに達したものと考えられる。ここで構築した解析手法は、既に(1)～(4)の検討に用いられたものであることから、最終的には本解析手法を以て、構造物—地盤系のトータルシステムとできるものと考えている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計4件)

- ① 牧 剛史, 土屋智史, 渡辺忠朋, 前川宏一, 3次元非線形有限要素法を用いたRC杭基礎—地盤系の連成地震応答解析, 土木学会論文集A, Vol.64, No.2, 192-207, 2008, 査読有
- ② Tuladhar, R., Maki, T., Mutsuyoshi, H., Cyclic behavior of laterally loaded concrete piles embedded into cohesive soil, EARTHQUAKE ENGINEERING AND STRUCTURAL DYNAMICS, Volume 37, Issue 1, 43-59, 2008, 査読有
- ③ 牧 剛史, 睦好宏史, Rabin TULADHAR, 醍醐 宏治, 実地盤中に設置された実大コンクリート杭の杭頭水平復元力特性と変形状, 土木学会論文集E, Vol.63, No.3, 396-409, 2007, 査読有
- ④ 牧 剛史, 土屋智史, 渡辺忠朋, 前川宏一, 3次元FEMを用いたRC杭基礎—地盤系の連成地震応答解析, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.3, 841-846, 2007, 査読有

〔学会発表〕(計1件)

- ① Maki, T., Tsuchiya, S., Watanabe, T. and Maekawa, K.: Seismic Response Analysis of Pile Foundation using Finite Element Method, Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China, Oct. 12-17, 2008

6. 研究組織

(1) 研究代表者

牧 剛史 (MAKIN TAKESHI)

埼玉大学・大学院理工学研究科・准教授
研究者番号：60292645

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし