

令和 6 年 5 月 26 日現在

機関番号：12601

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2022～2023

課題番号：22K20443

研究課題名（和文）腐食劣化した既設プレストレス構造物のデジタルツインによる性能評価

研究課題名（英文）Performance evaluation of corroded prestressed concrete structures by digital twin technology

研究代表者

栗原 遼大（Kurihara, Ryota）

東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・助教

研究者番号：60964640

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、内部鋼材が腐食劣化した既設プレストレストコンクリート(PC)構造物の残存構造的な性能に対する数値解析手法を高度化すること、既設PC構造物のデジタルツインにより、現場での点検結果と数値解析の情報を相互に活用するスキームを示すことを目的とする。現在あまり研究がなされていない鋼材の破断といった不均一な応力状態の精緻な追跡とモデル化、フルスケール適用のための簡素化が主な課題であり、要素実験に基づく鋼材破断時の鋼材すべり挙動のモデル化、部材スケールの解析、フルスケール解析を通して腐食劣化したPC構造物の数値解析による性能評価に基づく維持管理スキームを構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

劣化した既設PC構造物をありのままに再現したモデルを用いた数値解析により、様々なシナリオや補修・補強の効果を定量的に評価できる。適切な補修・補強工法を選択することができるのみならず、重点的に点検すべき箇所を絞り込みや点検手法の効率化により既設PC構造物のメンテナンスコストの削減に資する。

研究成果の概要（英文）：The objectives of this study are to advance numerical analysis methods for the residual structural performance of existing prestressed concrete (PC) structures with corroded PC tendon, and to make a scheme of maintenance based on an utilization of combined information of on-site inspection and numerical analysis through digital twin technology. The main issues are the tracking of non-uniform stress conditions such as localized corrosion and rupture, and simplification for full-scale application. Through modeling of steel slip behavior at steel rupture based on a new experiment method, member-scale analysis, and full-scale analysis, a maintenance management scheme based on the performance evaluation of corroded PC structures by numerical analysis was developed.

研究分野：数値解析、構造性能評価

キーワード：プレストレストコンクリート PC鋼材 破断 再定着 より線 デジタルツイン

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

社会基盤構造物の劣化が進行し、限られた予算内で効率的な維持管理が求められ、構造物の高精度な残存構性能評価およびその将来予測には高い社会的要請があると言える。現在、既設の土木構造物では、非破壊検査や目視点検による半定量的な性能評価を中心としており、数値解析による定量的な評価手法を確立できれば、劣化した既設構造物に対する措置の効果を仮想空間上で試行でき、より高効率な維持管理戦略の策定に大きく資する。プレストレストコンクリート(PC)構造物は、ひび割れを許容せず、高剛性高耐久な構造形式として重要な橋梁等に用いられているが、部材に圧縮力を与える役割を果たす PC 鋼材の著しい腐食による破断といった、安全性に重大な懸念をもたらす事象が確認されており、これを再現する数値解析手法は未だ確立されておらず、構造物全体系としての定量的な性能評価に結びついていないのが現状であった。

2. 研究の目的

研究目的は、既設 PC 構造物の数値解析による性能評価手法を確立することである。解決すべき課題は大きく 2 つあり、PC 鋼材の破断による応力再分配の挙動の追跡、フルスケール解析を用いた維持管理スキームへの展開である。

3. 研究の方法

課題「PC 鋼材の腐食劣化時の挙動追跡」は、単線やより線の破断時の再定着挙動の把握、破断により引張力の再分配といった現象を正確に捉えることを目標とし、鋼材破断時の定着挙動を直接的に計測する実験と、PC 鋼材とその周囲のグラウト、シース管を詳細に再現した有限要素モデルを用いた解析を行う。PC 鋼材とグラウトモルタルとの境界の応力伝達をまずは直接的にモデル化することで、PC より線内や複数鋼線の一部破断や鋼材同士の応力再分配を精緻に追跡し、部材スケールでの構造応答についても解析的検討を行った。

課題「フルスケールでの解析モデル」は、課題での検討を踏まえフルスケールモデルへの適用を行う。腐食劣化を理由に供用を終了し、撤去された実橋梁を対象に、これまでの点検結果を解析に取り込んだ上で、載荷試験を再現する。フルスケールモデルを用いて補強効果の評価や劣化が進行した仮定のもとで様々な状況を想定した解析を行い、優先して着目すべき劣化箇所の特定による点検省力化などのデジタルツインの活用法及び実例を示す。

4. 研究成果

(1)課題 PC 鋼材の腐食劣化時の挙動追跡

PC 部材では鋼材がグラウト、シース管、コンクリートに覆われていることから、破断時の現象を観察することが難しい。そこで、図 1 に示す通り、鉄製のフレームを用いて PC 鋼材とグラウト、シース管のみの試験装置を作製した。PC 鋼材は両端で鋼製フレームに定着しており、緊張、グラウトモルタル充填後もグラウトには圧縮力がかからない。フレーム端部に PC 鋼材を露出させた区間を設け、この位置で PC 鋼材を切断し、その前後でのグラウトのひずみ変化を測定した。

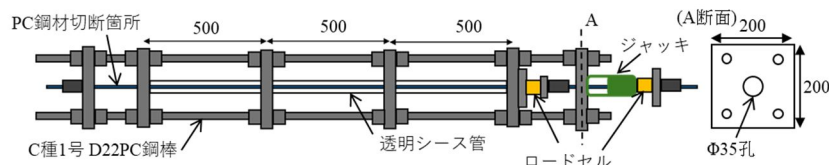


図 1 PC 鋼材切断実験用フレーム概要

PC 鋼材の種類と緊張力をパラメータとして実験を行い、実験ケースの一部を表 1 に示す。PC 鋼材はインデント単線とより線の 2 種類とした。鋼材の切断により、フレームのプレストレスが解放され、鋼材が再定着されればグラウトに圧縮ひずみが導入されることになる。結果として、グラウトのひずみはシース管端部から離れるにしたがって増加し、応力が伝達され破断位置付近で線形的にひずみが変化する領域と、急激にプレストレスが伝達される領域に分けられた。緊張力が小さい場合、端部から最短位置のゲージよりも短い区間でのみすべりが発生した。

大きな緊張力を導入したとき、単線のケースで鋼材のすべり領域がより線の 2 倍以上となった。より線の解燃による影響と考えられる。単線ではいずれのケースもグラウトに損傷はなかったが、より線ではグラウトに割裂ひび割れが生じ、一方、損傷の入った領域は限定的で、またシース管にグラウトが拘束されることで鋼材とグラウトの界面には強い摩擦力が発生したと考えられる。再定着後のプレストレス伝達の傾きは、単線では緊張力によらずに概ね一定であったが、より線では緊張力に応じてより急激にひずみが増加した。

微細メッシュを用いた数値解析によって現象理解の更なる深化を試みた。鋼材、グラウト、コンクリート、シース管はすべて 3 次元ソリッド要素とし、鋼材とグラウト間には 2 次元境界要素を設定した。解析には 3 次元非線形有限要素法解析 COM3¹⁾を用い、プレストレス導入、グラ

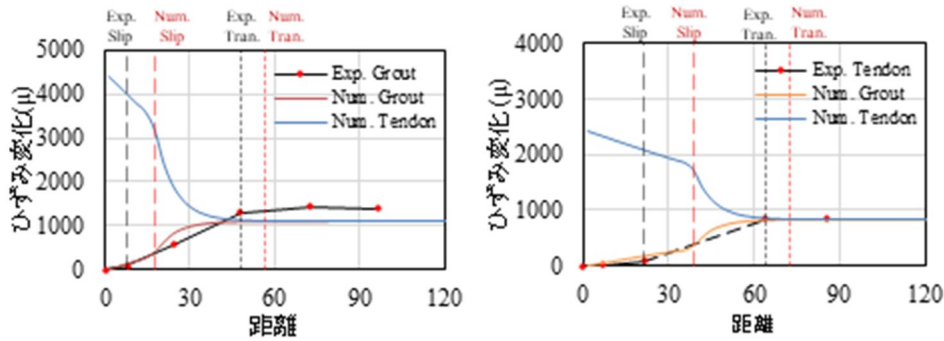


図3 ひずみ変化に関する解析と実験の比較 (左：単線、右：より線)

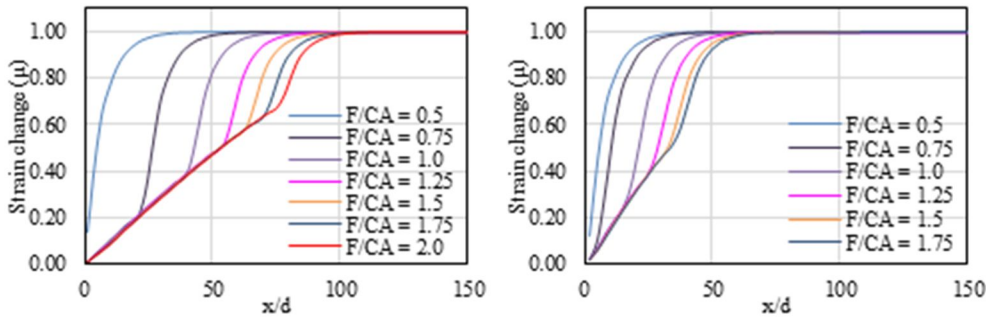


図4 緊張力の感度解析結果 (左：単線、右：より線)

ウト充填，鋼材破断のそれぞれの挙動を順に追跡するため，それぞれのステップを再現した．鋼材が自由に変形する状態で鋼材にプレストレスを導入し，緊張後にグラウト要素および境界要素を考慮することで，緊張によって鋼材やはりが変形したのちにグラウトを充填する状況を再現した．その後，ある箇所のPC鋼材要素を破断させることで，鋼材破断時の挙動を模擬した．PC鋼材とグラウト間の境界要素には，初期付着強度を考慮し，剥離後はモール・クーロンの線形摩擦則を適用した．異形PC鋼線とグラウト間のせん断方向の付着強度および摩擦係数は，fib model code 2010 から算出し，より線についてはよりによるかみ合わせとねじれの効果を摩擦係数とせん断強度を見かけ上2倍とすることで再現した．PC鋼材切断試験の再現解析結果の一部を図3に示す．PC鋼材切断時のひずみ分布を概ねよく再現できていることがわかる．本モデルで初期プレストレスやグラウト強度をパラメータに感度解析を行い，グラウト強度の感度解析結果を図4に示す．すべり長さ内の応力伝達の勾配は，単線、素線ともに初期プレストレスの大きさにかかわらずほぼ一定であり，再定着長は初期プレストレスに概ね比例関係で整理できた．再定着長は F/CA (緊張力とグラウト鋼材の接触面積比) が0.25増加するごとに，単線では約13d，より線では，約8d増加しており，PC鋼材の形状によって再定着長の変化挙動に差があることが示された．

鋼材の破断したPC部材の挙動を既往の研究による静的載荷試験²⁾を対象として，数値解析による再現解析および破断本数や破断位置による感度解析を行った．図3に解析メッシュ及び再現解析の結果を示す．破断位置は共通してはり中央であり，破断本数が異なるものである．数値解析が実験の結果をよく追跡できており，鋼材破断を有する本解析モデルのPCはりの曲げ性状に関する妥当性が確認された．破断本数の増加に応じて，最大耐力および曲げ靱性が低下したが，いずれも鋼材破断部に引張ひずみが集中し，健全な鋼材が局所的に降伏したのち，はり中央部上縁部コンクリートの圧縮破壊に至った．鋼材が破断しているため，部材内の補強材が損失した状況と等価であるが，破断位置からある程度離ればPC鋼材が健全に機能しているため，破断位置へ損傷が局所化したものと考えられる．

鋼材破断位置が曲げ性状変化に与える影響を検討するため，図6のように破断位置をスパン中央，載荷点直下，はり端部とした解析を比較した．破断位置の影響が顕著に現れるよう，断面内のPC鋼材3本すべてを破断させた．はり中央部が破断したケースでは損傷の集中により，はりが中央で折れ曲がる様な変形を起こしたが，載荷点直下が破断したケースでは，破断位置へ損傷の局所化はあるものの，鋼材が健全である側の載荷付近にも損傷が分散した．また，健全なケースでははり中央部の圧縮縁の圧壊であった破壊モードが破断位置の圧縮縁の破壊となった．一方，はり端部で鋼材が破断しているケースでは，荷重 変位関係，ひずみ分布ともに健全なものとほとんど変わらない挙動をとった．破断位置から支点までの区間で，おおむね完全にプレストレスが回復しており，載荷スパン内ではほぼ健全な状態となったためと考えられる．

(2)課題 フルスケール解析

竣工後約50年が経過した4径間連続PC箱桁橋を対象とした。過去の点検により、PC鋼材の腐食、破断、およびシース管内のグラウトの未充填部が確認されている³⁾。2022年に対象橋梁に対して行われた載荷試験の結果⁴⁾をもとに数値解析モデルの妥当性を検証し、主に静的耐力の

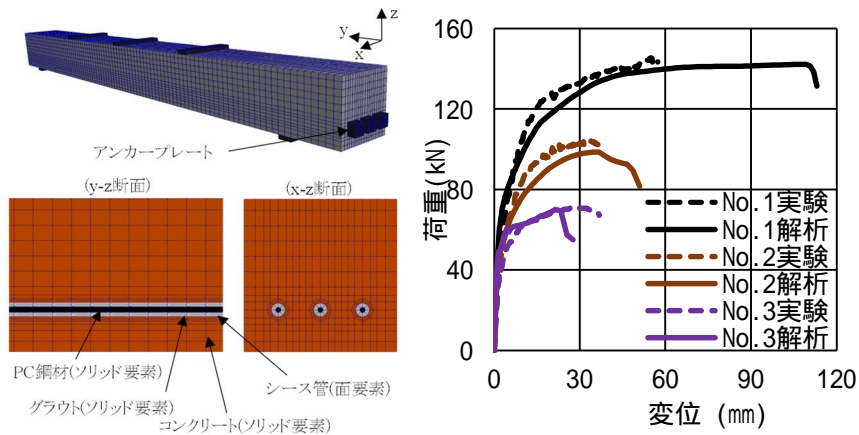


図5 PCはり解析メッシュと再現解析結果

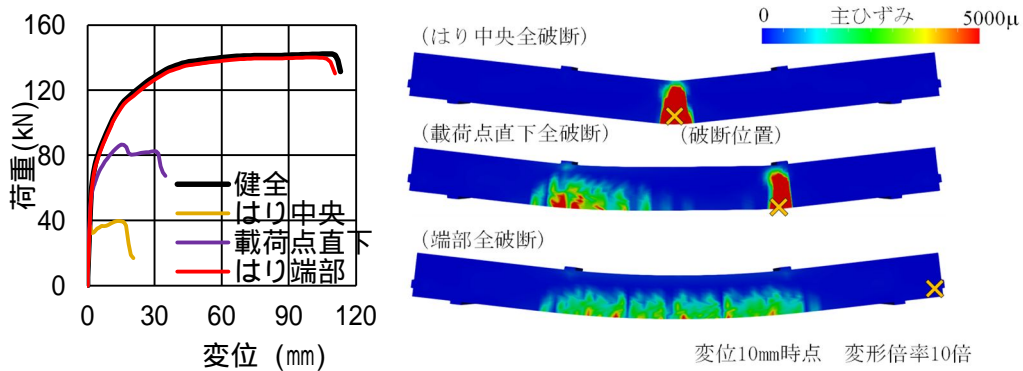


図6 鋼材破断位置の影響の検討結果

観点から外ケーブル設置といった補強対策の効果や塩害劣化が更に進行したシナリオについて構造的な定量的評価を行った。図7に解析メッシュの概要を示す。対象橋梁の設計図書に基づき、上部工の4径間3次元フルスケールメッシュを作成した。コンクリート部にはすべてソリッド要素を用いた。第1径間から第2径間にかかる連続用PC鋼材、張出用PC鋼材については1次元線要素を用いて再現した。対象橋梁の竣工から腐食劣化、破断、補強までの過程を追跡するため、図-3のようにそれぞれの状態を段階的に再現した。鋼材の腐食や破断は自重を作用させている状態でPC鋼材要素の断面積を低減させ、または無効化することで再現した。対象橋梁において載荷試験が実施された2022年時点では、グラウト充填不良が確認された鋼材28本のうち半数程度が破断しているものと想定されており、計14本破断した状況とした。

対象橋梁に対して行われた載荷試験の再現解析を行った。荷重-たわみ関係、橋梁上床版の橋軸方向の変位分布について載荷試験の結果と解析結果の比較を図8に示す。解析結果は、載荷開始から終了(1900kN)まで、概ね載荷試験の応答を再現できた。載荷初期においては、たわみの解析値が実験値よりも大きく、荷重の増加とともに解析値と実験値が漸近する傾向となった。これは、載荷試験の初期においては舗装等が変形を吸収していた影響と考えられる。解析において、荷重1040kNにおいて、第8セグメントの下床版における引張主ひずみが300 μ 程度発生しており、ひび割れが生じたと判断できる。また、解析において、荷重1210kN時のひずみ分布は載荷試験において荷重1200kN時で測定されたひび割れ分布と整合する。このことから、本解析モデルでひび割れ発生やひび割れ分布についても精度よく再現できたと考えられる。

本メッシュを用いて、竣工時の構造的な性能を基準として、腐食劣化した状態や補強を行った状態の構造的な性能を評価するため、健全なケース、PC鋼材が腐食、破断し無補強のケース、外ケーブル補強が施されたケース(対象橋梁の状態)、外ケーブルを2倍量設置し補強したケースの計4ケースを解析によって比較した。無補強のケースでは、載荷位置がスパン中央であるにもかかわらず、鋼材破断部に損傷が集中し、健全状態に比べて最大荷重が40%となった。外部ケーブル補強は初期剛性を健全時と同程度まで向上させ、最大耐力を20%向上させる効果があった。PC鋼

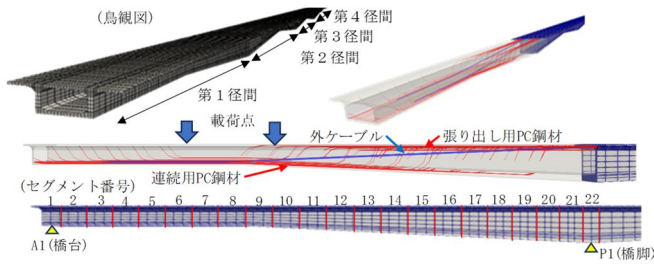


図7 フルスケールメッシュ概要

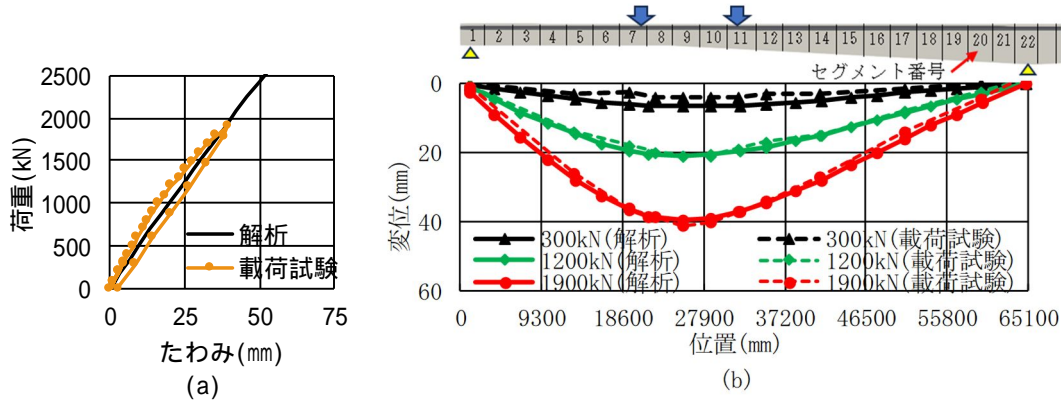


図8 载荷試験結果と解析の比較 (a)荷重 たわみ関係, (b)変位分布

材破断領域へ損傷が集中しているが、外ケーブルによって一部は分散している。一方、外ケーブルを2倍量としても補強の効果に明確な向上はなく、外ケーブル補強を施したケースは補強量にかかわらずほぼ同じ挙動をとった。PC鋼材が多く破断している以上、性能を健全な状態と同等とするまで補強することは困難であるが、対象橋梁に対して行われた外ケーブルの設置は緊急措置として有効であったと考えられる。補強を行わず、PC鋼材の腐食が更に進行した状態を想定した解析を行った。対象橋梁では、下床版側の連続用PC鋼材のうち14本が破断していたと考えられ、橋軸直角方向の片側に集中していた。この14本を含み少なくとも28本のPC鋼材でグラウト充填不良が確認されていたため、さらに多くの鋼材が破断するシナリオが想定される。連続用PC鋼材のうち28本の鋼材が破断した状況で、破断したPC鋼材の位置によって2種類の解析ケースを設定した。PC鋼材の破断が片側へ集中したケースは、最大耐力が著しく低下し、14本が片側に集中破断したケースのおよそ60%となった。これは本ケースでのみ顕著な水平変位が発生したことからわかるように、PC鋼材の破断が片側に集中していることで生じたねじり変形による。一方、均一に28本破断したケースでは、片側に集中して14本破断したケースと比較して、剛性は低いものの、最大耐力はほぼ同等であった。PC鋼材の破断が極端に片側に集中している場合、交通荷重等により不均一な変形が進行する可能性があり、均一に破断したケースと不均一に破断したケースとの構造挙動の差は更に拡大する可能性がある。このような不均一な変形はPC鋼材の残存率といった指標のみでは評価できず、3次元解析が有用である。

本研究を通して、PC鋼材破断時の再定着挙動を精緻に捕捉した上で数値解析モデルを構築し、フルスケール解析の適用事例を示した。再定着挙動については、グラウトの不完全な充填状況の影響や、曲げ上げ部の影響について更に現象理解を深化させる必要がある。また、今後、数値解析を活用した維持管理の一般化のために、評価対象とする現象や求められる精度に対して必要十分なデータの精度や種類、モデルの精度の整理を行う必要がある。

参考文献

- 1) Maekawa, K., Okamura, H., Pimanmas, A.: Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete, SponPress, 2003
- 2) 横田敏広, 睦好宏史, Wijayawardane, I.: PC鋼材が破断したPC桁の力学的性状に関する研究, コンクリート工学年次論文集 Vol. 38, No. 2, pp. 487-492, 2016.
- 3) 武田健太, 田中泰司, 伊藤裕章, 大谷拓矢, 登石清隆, 樋口徳男: 鋼材の腐食劣化が進行したPC連続箱桁橋の構造性能評価, 構造工学論文集, Vol. 66A, pp. 712-724, 2020
- 4) 寺尾 静夏, 田中 泰司, 新井 崇裕, 登石 清隆: 塩害腐食が進行した4径間連続PC箱桁橋の载荷試験とモニタリングによる安全性評価の検討, 構造工学論文集A, Vol. 70A, pp. 762-773, 2024

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 栗原遼大、土屋智史、石田哲也	4. 巻 23
2. 論文標題 鋼材の破断したPCはりの数値解析による曲げ性状の評価	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集	6. 最初と最後の頁 NO.15
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 栗原遼大
2. 発表標題 鋼材の破断したPCはりの数値解析による曲げ性状の評価
3. 学会等名 第23回 コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレードシンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 栗原遼大
2. 発表標題 PC鋼材破断時の再定着挙動に関する実験的検討
3. 学会等名 令和6年度土木学会全国大会 第79回年次学術講演会
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------