

令和 3 年 6 月 22 日現在

機関番号：82627

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17H03308

研究課題名(和文) 時間スケールの異なる海面変化が護岸の高波による地盤不安定化に与える影響評価

研究課題名(英文) Effect of sea-level change on ground instability of seawalls due to high waves

研究代表者

高橋 英紀 (Takahashi, Hidenori)

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・港湾空港技術研究所・グループ長

研究者番号：60371762

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 10,000,000円

研究成果の概要(和文)：高波で被災する護岸について、遠心模型実験やFEM・DEMといった数値解析を利用して、地盤に起因する護岸の被災メカニズムを検討した。また、海面上昇に影響を受ける地盤内の水位が地盤の不安定化に及ぼす影響を評価した。その結果、地盤内に間隙水を保持した状態で引き波が発生することで地盤が不安定化すること、地盤内の水位が高いと地盤の安定性は低下すること、地盤内の浸透力は地盤の不安定化の要因であり、その変動は地盤のゆるみを生む可能性を示した。さらに、地盤の不安定化メカニズムを踏まえて、対策手法を検討した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

護岸の不安定化メカニズムや海面上昇の影響については、海岸護岸内部の地盤の安定性を評価する上で重要な情報となり、地盤の安定性を考慮した設計法の構築につながる。また、対策方法の提案は信頼性の高い護岸の構築を可能とする。

研究成果の概要(英文)：Centrifuge model tests and numerical analyses, such as FEM and DEM, were utilized to investigate the mechanism of damage to seawalls caused by high waves. The influence of the water level in the ground, which is affected by the sea level rise, on the destabilization of the ground was also evaluated. As a result, it was clarified that the backwash destabilized the ground when the pore water was retained in the ground and the water level in the ground was high. Additionally, the seepage force in the ground was a factor of the ground destabilization, and the fluctuation of the seepage force might cause the loosening of the ground. Furthermore, based on the mechanism of ground instability, the countermeasure methods were proposed.

研究分野：地盤工学

キーワード：護岸 地盤 破壊 遠心模型実験 波浪

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 波による土地の侵食を防ぎ、居住地域を護るため、我が国の沿岸域には多くの護岸が築造されている。護岸では、波から地盤を保護するためにコンクリート壁やブロック、石材などで被覆されている。しかしながら、被覆された護岸であっても、台風や低気圧で発生した高波や高潮によって多くの被災が発生している。昨今、台風の頻度や規模が増しており、発生する被害も拡大している。さらに、地球温暖化に伴う海面上昇も護岸の安定性に影響を与えることが予想される。このような気候変動に対応することも鑑みて、護岸の被災メカニズムを解明し、耐力が不足する護岸においては効果的な対策を施すことが必要となっていた。

(2) 護岸の被災形態としては、被覆工が直接被害を受ける場合も多いが、内部の地盤に被害が生じることも多い。地盤の被災メカニズムとしては、被覆工の飛散後の波による洗掘や、引き波時の護岸内部からの土の吸出し、被覆工前面の洗掘による斜面全体の崩壊などが一般的に考えられてきた。一方、繰り返し来襲する高波や海面上昇の影響による地盤自体の不安定化に着目した研究は、国内外においてほぼ成されていなかった。地盤内の水位と護岸前面の水位の変動や、地盤の飽和化、地盤内に発生する浸透力は、護岸内部の地盤を不安定化させるはずであるが、現象は解明されていなかった。

2. 研究の目的

波に起因する護岸での地盤の不安定化メカニズムを明らかにすることを目的とした。遠心模型実験によって現象を物理モデル化しつつ、その挙動を解析的に解明する手法として、波の検討には流体解析、地盤全体の安定性検討には有限要素解析 (FEM)、地盤のゆるみの検討には個別要素解析 (DEM) を用いた。また、海面上昇が地盤の不安定化に与える影響も明らかにすることも目的とした。これは、水位は地盤内の浸透力や飽和化に大きな影響を与えるためである。特に、台風等による高潮と地球温暖化による海面上昇のように、時間スケールの異なる海面上昇の影響を検討した。さらに、地盤の不安定化メカニズムなどが不安定化に与える影響を加味して、対策手法を検討した。

3. 研究の方法

(1) 大型の遠心模型実験装置 (有効回転半径 3.8m) に、遠心力場で波と流れを同時に発生できる装置を設置して実験を行った。この装置では、油圧で作動する造波板によって任意の波形を作り出せるだけでなく、流れを起こすことで長さに限りがある試料容器内においても海側と陸側での水位を任意の高さに保てる。通常重力場での長尺の水槽を用いた水理実験では、沖波から護岸までをモデル化して、海底面の影響を考慮した波の変形を再現することが一般的である。一方、遠心装置の実験用プラットフォームの寸法は限られており、沖波から護岸までの全体をモデル化することは難しい。そのため、護岸の近傍に設置した造波装置と護岸前面の急勾配の斜面によって、来襲する非線形性の強い波を再現した。また、流体解析を利用して波の妥当性を検証した。

(2) 波の再現性に加えて、地盤の不飽和状態の計測方法を検討した。地盤の飽和状態は安定性に大きな影響を与えるために、計測すべき重要なものである。遠心力を除荷するとサクションも変化して飽和度が変化してしまうために、実験後に計測することも難しい。このため、遠心力場で飽和度を計測する方法が必要であった。

(3) 遠心力場で地盤を含む護岸の安定性について検討した。遠心力を付加することで実物スケールの護岸での地盤の応力状態や水圧状態を再現できる。実験では、波や水位条件を変化させて、水位条件などの地盤の間隙水圧の状態が地盤の安定性に与える影響について検討した。地盤内の浸透に対する実験相似則についても考えた。また、護岸の地盤を含む破壊メカニズムを明らかにすることで、そのメカニズムに基づいて、護岸が不安定化しないようにするための対策方法について検討した。

(4) 数値解析としては、流体解析で得られた波の情報 (水圧の情報) を地盤 FEM に逐次入力して、地盤の安定性を検討した。数値解析を行うことで地盤の応力状態を把握することができ、護岸の破壊メカニズムがより明確になる。また、ミクロの観点からの検討として、DEM を用いて浸透力の変動による地盤のゆるみについて検討した。

4. 研究成果

(1) 相似則の検討

遠心模型実験は、今までは主に地盤挙動を再現するために用いられてきたが、本研究では護岸内部の地盤の安定性を低下させる外力である波についても再現した。水理問題を遠心力場で再現

することは新しく、まず初めに実験相似則について整理した。模型実験を行う上で、各諸元の相似比を把握しておくことは重要であり、特に浸透時間に関する相似比は時間スケールの異なる海面上昇を考える上で必要なファクターとなる。本研究の現象における時間に対しては、地盤の動的挙動の時間と間隙水の浸透時間、流体の動的挙動の時間の3つがあり、それぞれの相似比の関係を確認しておく必要があった。

流体として水を用いた実験では各時間の相似比は一致しなかった。このため、間隙流体の粘性を調整するなどして、透水係数を調整する必要があった。遠心力場では流体と地盤の動的挙動、浸透時間（乱流）の時間の相似則は合っており、粘性流体を用いることで浸透時間（層流）の相似比も合わせることができる。ただし、粘性流体を用いることでレイノルズ数が小さくなり、波の挙動や地表面付近の漂砂状況に影響を与える懸念がある。一方、地盤の動的挙動と浸透時間の相似比を切り離して考えることもできる。例えば、長期間にわたる地盤の圧密を模型で再現する場合、浸透現象に対して動的挙動を無視できるために、浸透時間の相似比を全体の時間の相似比と考えることができる。本研究で検討した現象は地震動などではないため、後者の相似則を適用して地盤の動的挙動を無視することとした。そうすると、浸透時間の相似比は $1/N^2$ （ N ：模型寸法比）となり、実物よりも模型において浸透が N^2 倍速いことになる。波の挙動がフルード則に従うならば、波の時間の相似比は $1/N$ である。この考え方によって実験での時間を整理した。

(2) 波の妥当性検証

護岸近傍に設置した造波装置および比較的短い水槽によって、遠心力場で非線形性の強い波を再現する方法について検討した。初めに、造波板をコンピュータ制御で任意に動かすことで、不規則波を作り出すことに成功した（図1参照）。図に示すように、概ね入力波のスペクトルを再現できた。また、実験で作出した波と流体解析で求めた波の波形や水圧はほぼ一致していた。次に、流体解析を利用して、発生する波の妥当性について検証した。通常の重力場での長尺の水槽を用いた水理実験では、沖波から護岸までをモデル化することが一般的である。長尺（緩勾配の海浜）と短尺（急勾配の海浜）の両条件

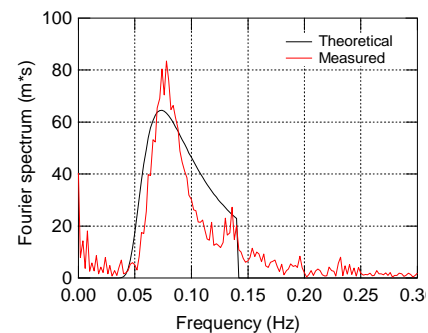


図1 入力波と計測した波

において、護岸前における水圧変動を類似させる検討を行った。この結果を図2に示す。水圧変動に着目したのは、それが護岸の安定性に大きな影響を及ぼすためである。Case1が長尺、Case2~4が短尺での結果である。また、Case2と3は前浜の形を変え、Case4ではさらに波高を小さくした。検討の結果、Case4のように碎波による波高の減少を加味して入力する波高を調整することで、Case1と類似させられており、短尺の水槽であっても波による護岸の安定性を検討できることが分かった。

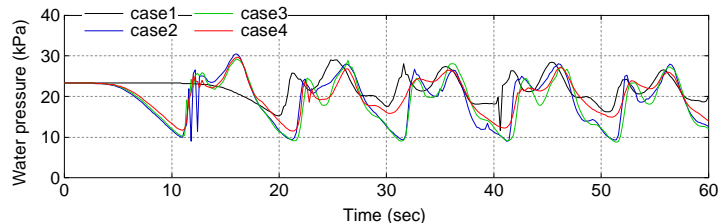


図2 海浜状態を変化させた場合の水圧変動の比較

(3) 飽和度の検証

地盤の不飽和状態を把握することを目的として、地盤のサクシオンを計測する手法についても確立した。相似比の項でも述べたように、遠心力場での現象の進行時間は短くなるため、間隙水圧やサクシオンも速く変動する。このため、通常的水分計のような計測に時間を要する仕組みでは変動するサクシオンを推定することができなかった。このため、一般的な間隙水圧計を用いて負圧を計測することを試みた。具体的には、あらかじめ正圧を作用させておき、その正圧の減少量から負圧を推定した。ただし、この方法で計測するためには、地盤の飽和度がある程度高い必要があり、飽和度が40%以下となると計測は難しかった。この方法によって、護岸内部の地盤のサクシオンについても計測を行った。

(4) 地盤の不安定化

遠心模型実験によって護岸の破壊実験を実施し、その破壊特性を把握するとともに、地盤内の水位条件が地盤の不安定化に影響を与えることも確認した。入射させる波としては、最初のシリーズでは規則波、次のシリーズでは不規則波としたが、いずれの波においても護岸の地盤からの破壊現象の再現に成功し、それらの破壊特性は一致していた。また、地盤内の間隙水圧状態の違いが破壊特性に及ぼす影響についても定性的に等しくなっていた。このため、ここでは不規則波の実験結果について述べる。水面の状態を変化させたシリーズでの実験断面図を図3に示してい

る。Case SW1 は基本ケース、SW2 は水位を高くしたケース、SW3 は護岸前面での水位が基本ケースと等しく、地盤内部の水位を低く保ったケースである。

いずれのケースにおいても、しばらく波を入射させた後に護岸内部の地盤の飽和度が高まり、引き波時に地盤内部においてすべり破壊が生じた。SW2 での破壊の様子を図 4 に示す。水位が高いほど、深部から地盤が破壊していた。さらに興味深い点は護岸が破壊するタイミングである。水位が高いケースほど早い段階で護岸が崩壊していた。間隙水圧の時刻歴（図 5）を見てみると、水位が高いケースでは間隙水圧が早く高まっており、護岸背後地盤の飽和化が進んでいたことが分かった。飽和化は地盤を不安定化させることに加えて、地盤の斜面下方への駆動力となる浸透力を発生させたと考えられる。さらに、法尻ブロックの前後において間隙水圧の差が生じており、これは法尻ブロックが移動する駆動力となったと考えられる。なお、時間については、浸透の状況が破壊に影響を与えるために、相似比を $1/N^2$ とした。気候変動による海面上昇の時間スケールは大きく、実験条件としてはあらかじめ水位を高めており、波による地盤内の水位状況については、時間の相似比を $1/N^2$ として考えたことになる。水位が低い場合には 175 分程度で護岸が破壊に至っているが、海面上昇したと仮定して水位を高めたケースでは 675 分程度で破壊しており、水位が高い場合には破壊の度合いだけでなく、破壊するまでの時間も短くなることが分かった。

(5) FEM による検討

解析的なアプローチとして FEM によって護岸の破壊メカニズムを検討した。FEM の地盤表面には、境界条件として変動する水圧を与えた。この水圧については、あらかじめ流体解析 (CADMAS-SURF 2D を利用) を行って求めておいた。水圧の情報のみを与えてせん断力を与えなかった理由は、検討の結果、せん断力は非常に小さく、地盤の安定性に大きな影響を及ぼさないことが分かったためである。FEM による計算では、不飽和状態の土に対して飽和度も併せて検討を行い、これを図 6 に示す。CaseB が地表面からの浸透が有るケース、CaseP が地表面からの浸透が無いケース、CaseK は地盤の透水係数を小さくしたケースである。越波して地表面から水が浸透することで、地盤内の水位も高まっていく様子分かる。解析の結果、図 7 に示すように遠心模型実験結果と同様にすべり面が発現して崩壊に至った。法尻ブロック下部のせん断力の時刻歴を図 8 に示しているが、引き波時にせん断力は大きくなり、地盤の飽和度が高いケースほどその力が大きく

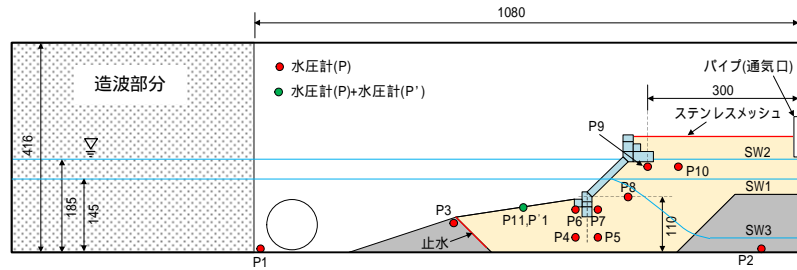


図 3 遠心模型実験の断面図

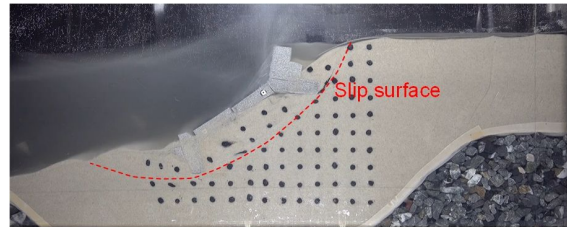


図 4 護岸の破壊の様子

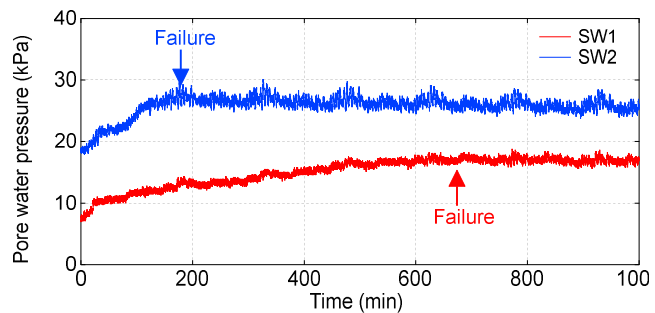


図 5 間隙水圧の比較 (センサーP8)

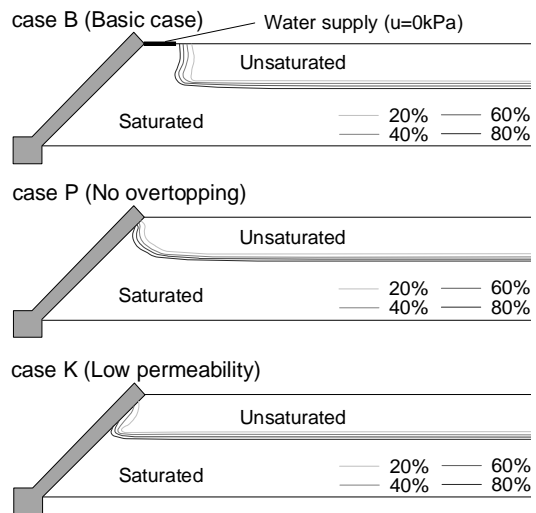


図 6 地盤内部の水面の変化

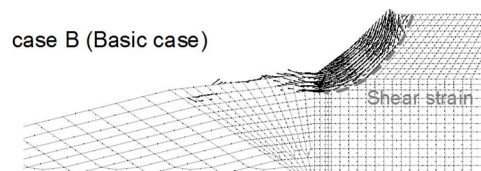


図 7 変位ベクトル図 (破壊の様子)

なることも分かった。

(6) DEM による検討

上記の FEM では地盤を連続体として扱って安定性を検討したが、DEM を用いて地盤を土粒子から構成されるものとしてミクロの観点からも地盤の安定性を検討した。検討では、護岸周辺地盤の浸透現象を簡略化した矢板周りの浸透現象を対象として、浸透力に応じた粒子の流出を仮定することで地盤内におけるゆるみの発生を検討した。図 9 に示すように、地盤を大小の粒子でモデル化し、矢板の左側領域の水位が高いことを想定して、粒子に浸透力を作用させた。また、浸透力によって不安定化しつつある粒子を赤色に変化させ、拘束されなくなった粒子を計算から排除している。図を見ると、浸透力が大きい矢板下端付近で粒子に抜けや赤色に近づいた粒子が発生しており、地盤が浸透力によってゆるむことを再現できた。この手法を用いて、浸透力を変動させると、ゆるみがより進行しやすい傾向が見られた。このことから、護岸内部の地盤のように波の変動によって浸透力が変動すると、地盤のゆるみが助長される可能性があることが分かった。

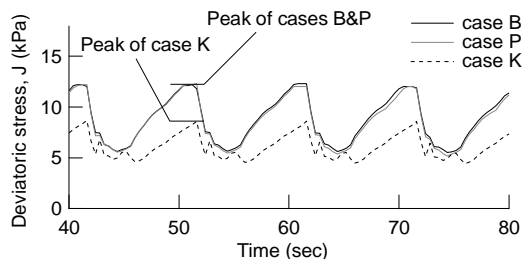


図 8 法尻ブロック下部の地盤でのせん断力

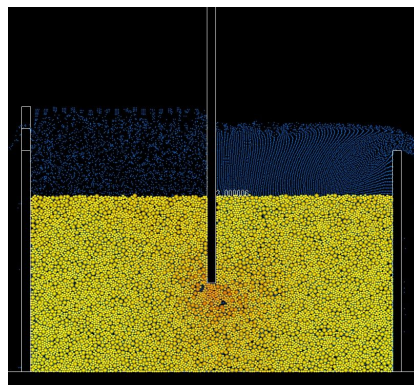


図 9 矢板周りの浸透におけるゆるみの発生

(7) 護岸の不安定化メカニズムと対策方法
護岸内部の地盤が不安定化する要因は以下の 4 点にまとめられた。また、要因をまとめた概念図を図 10 に示している。

波による地盤の飽和化およびサクシオン・単位体積重量の変化

引き波時に被覆工下部や法尻ブロック周辺地盤で発生する浸透力

引き波時に被覆工や法尻ブロックの外に作用する水圧差、被覆工に作用する水圧（揚圧力）とそれに起因する地盤の拘束圧低下

波による地盤への繰り返し载荷に起因する地盤の軟化あるいは液状化

これらのメカニズムに従って、護岸の安定性を高める対策法を考えた。対しては、地盤の飽和化を遅らせるために越波を防ぐ、越波したとしても遮水層を設けるなどして地表面からの浸透を防ぐ、浸透したとしても直ちに海に排水できるように透水性の高い地盤材料を用いることが考えられる。については、浸透力や水圧差に耐えられるように法尻ブロックやその付近を補強する方法が有効であった。例えば、地盤内にセメントを混合して固化する深層混合処理工法によって壁面を構築することで、効果的に護岸を補強することが考えられた。

(8) 国内外へのインパクトと今後の展望

地盤内に間隙水を保持した状態で引き波が発生することで地盤が不安定化すること、地盤内の水位が高く、多くの水を保持することで地盤の安定性は低下すること、地盤内に発生する浸透力が地盤の不安定化の要因であり、それが変動することで地盤にゆるみが生じる可能性などを、実験や解析を通して明らかにした。不安定化メカニズムを明らかにすることによって、有効性の高い対策を施すことが可能であり、今後の社会資本整備において意義のある研究成果を得た。今後、海岸の設計法の提案を行い、現場の設計に反映させていくことが望まれる。

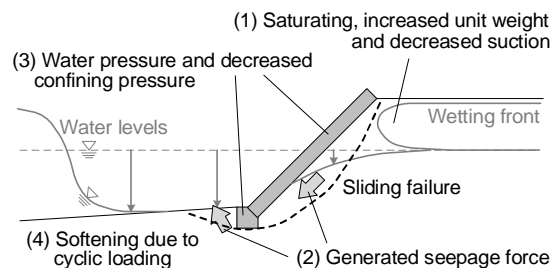


図 10 護岸の破壊メカニズム

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 高橋英紀	4. 巻 59
2. 論文標題 波による地盤を含む護岸の不安定化に関する遠心模型実験	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 港湾空港技術研究所報告	6. 最初と最後の頁 31～50
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 オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Mori Nobuhito, Yasuda Tomohiro, Arikawa Taro, Kataoka Tomoya, Nakajo Sota, Suzuki Kojiro, Yamanaka Yusuke, Webb Adrean	4. 巻 61
2. 論文標題 2018 Typhoon Jebi post-event survey of coastal damage in the Kansai region, Japan	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Coastal Engineering Journal	6. 最初と最後の頁 278～294
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/21664250.2019.1619253	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Hidenori Takahashi, Yoshiyuki Morikawa and Hiroaki Kashima	4. 巻 19
2. 論文標題 Centrifuge modelling of breaking waves and seashore ground	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 International Journal of Physical Modelling in Geotechnics	6. 最初と最後の頁 115～127
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1680/jphmg.17.00037	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計0件

〔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
研究分担者	近藤 明彦 (Kondo Akihiko) (80755893)	国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・港湾空港技術研究所・主任研究官 (82627)	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究 分 担 者	森 信人 (Mori Nobuhito) (90371476)	京都大学・防災研究所・教授 (14301)	

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