

長大橋基礎に作用する 地震時のサクシヨンの効果

福井次郎¹・大塚雅裕²・喜多直之³・浅井隆一⁴

¹独立行政法人土木研究所構造物研究グループ基礎チーム上席研究員
(〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

E-mail: fukui@pwri.go.jp

²本州四国連絡橋公団第三管理局保全部橋梁維持課
(〒722-0036 尾道市東御所町1-20)

E-mail: otsukam@hsba.go.jp

³株式会社大林組東京本社土木技術本部設計第一部
(〒108-8502 東京都港区港南2-15-2品川インターシティB棟)

E-mail: kita.naoyuki@obayashi.co.jp

⁴独立行政法人土木研究所構造物研究グループ基礎チーム交流研究員
(〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

E-mail: asai44@pwri.go.jp

長大橋建設技術の検討課題のひとつに大水深基礎の合理的な設計手法の確立が挙げられる。著者らは、水中に設置された基礎が地震力を受けて浮上りを生じた際、その浮上りに抵抗するように基礎底面に作用するサクシヨンに着目し、このサクシヨンによる浮上り抵抗を考慮した合理的な耐震設計法についての検討を行った。

本論文では、室内模型実験により明らかになったサクシヨンの特性を報告するとともに、その特性を考慮した大水深基礎の合理的な耐震設計法を提案するものである。

Key Words : huge bridge , large depth foundation , suction , seismic design , model experiment

1. はじめに

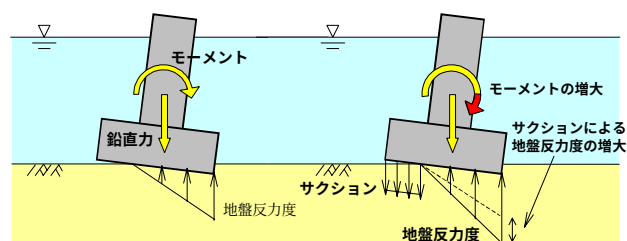
長大橋の建設に関する技術課題の一つとして大水深基礎の合理的な設計法の確立が挙げられる。これまでも長大橋大水深基礎は建設されているが、今後、地盤条件や施工条件がさらに厳しい地点での架橋が想定されている。想定される厳しい条件下においても、建設コストの縮減を図った合理的な基礎構造とするための技術開発が望まれている。

ここでは、大水深基礎の合理的な設計法の開発として、水中基礎に作用するサクシヨンの効果に着目した。ここでいうサクシヨンとは、水中に設置された基礎が地震時の慣性力などにより回転し浮上りを生じた際の基礎底面下の水の圧力変動に起因する見かけ上の浮上り抵抗であり、水圧低下量に相当する下向きの圧力である。

図-1にサクシヨンを考慮した設計法の概略を示す。これまで行われてきた長大橋基礎の設計では、大規模地震時に基礎が浮上ることを想定している。しかし、現行の道路橋示方書¹⁾における直接基礎の設計法では、浮上りに伴い基礎底面に発生するサクシヨンの影響は考慮されていない。このサクシヨンは、

鉛直下向きに作用することから浮上りに抵抗するモーメントと鉛直力の増加となるものであり、この影響を適切に考慮した設計を行うことで、従来の設計法に比べて経済的な基礎寸法とすることが可能となると考えられる。さらに、サクシヨンの特性を明らかにすることで、より効率的にサクシヨンによる浮上り抵抗を考慮できる新形式の基礎構造の開発も期待できる。

そこで本論文では、サクシヨンの特性を把握する目的で行った室内模型実験の結果について述べ、その室内模型実験の結果に基づき、サクシヨンによる浮上り抵抗を考慮した合理的な設計法を提案するものである。



従来設計 サクシヨンを考慮した設計
図-1 サクシヨンを考慮した設計法

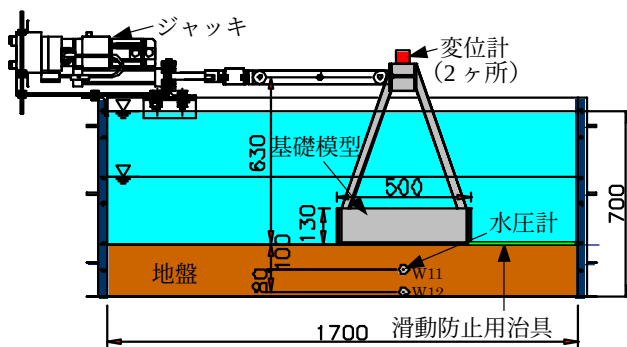


図-2 室内模型実験概略図

表-1 実験ケース

ケース	地盤種別	角速度	水深	止水構造
C11	不透水性	0.2rad/sec	250mm	止水ゴムなし
C15		0.05rad/sec	500mm	
C16		0.1rad/sec		
C17		0.2rad/sec		
C25	透水性	0.2rad/sec	500mm	止水ゴムあり
C35	不透水性	0.05rad/sec		
C36		0.2rad/sec		

2. 実験模型と実験方法

図-2に室内実験装置の概略図を示す。L1700mm x B800mm x H700mmの水槽内に地盤を作成し、注水した状態で基礎模型を設置した。

地盤は、不透水性弾性地盤（水槽内に設置したコンクリートブロック表面に厚さ23mm、硬度40のゴム板を接着）と、透水性地盤（鹿島砂、厚さ200mm、相対密度70%、透水係数0.061cm/s）の2種類を用いた。

基礎模型は、L500mm x B400mm x t130mmの鋼製型枠にコンクリートを充填したフーチングとφ34mmの鋼製パイプをトラスに組んだ構造である。荷重は、ジャッキを用いて変位制御による水平荷重を脚頭部に載荷した。計測項目は、作用荷重（水平荷重）、載荷点の変位および回転角を算出するための脚頭部変位2ヶ所、フーチング下面の水圧10ヶ所（図-3）である。また、透水性地盤においては、地盤内の2ヶ所についても水圧を測定した。

なお、本実験は浮上り抵抗特性のみに着目することから、水平載荷に対して滑動を防止するための治具を設置している。

実験ケースを表-1に示す。パラメータは、基礎設置地盤の種別、基礎の角速度、基礎設置水深、基礎底面の止水構造の有無である。ここで、表-1の止水ゴムとは、基礎が浮上ったときにフーチング下面に生じる隙間に水が回り込むのを防止するためにフーチング下端周囲に取り付けたゴム板である（図-4）。

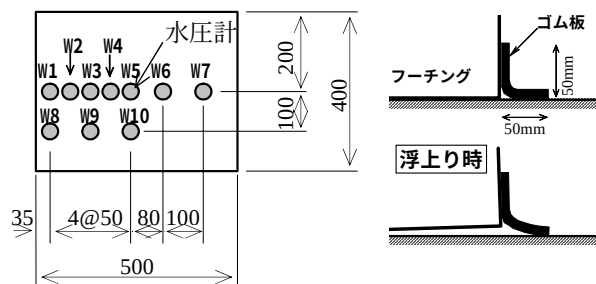


図-3 水圧計設置位置図

図-4 止水ゴム

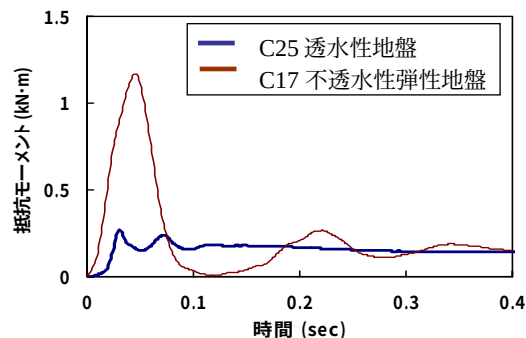


図-5 地盤種別による抵抗モーメントの時刻歴

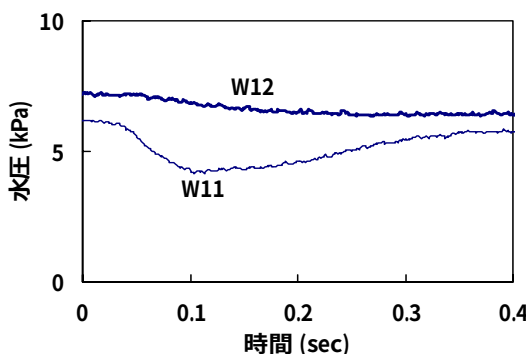


図-6 透水性地盤（C25）地盤内水圧の時刻歴

3. 実験結果

(1) 地盤種別によるサクシヨンの発生状況

図-5に不透水性弾性地盤と透水性地盤での抵抗モーメントの時刻歴を示す。不透水性弾性地盤に比べて透水性地盤では抵抗モーメント（水平荷重にフーチング下面から載荷点までの高さ630mmを乗じた値）が小さくなる結果となった。ここで、透水性地盤における地盤内の水圧の時刻歴を図-6（水圧は大気圧を0，以下同様）に示す。地盤内の間隙水圧の変動にあわせて抵抗モーメントが変動しているのが見られる。すなわち、不透水性弾性地盤では基礎の浮上りによる水圧低下に伴い基礎端部からのみ水が流入するのに対して、透水性地盤では基礎端部からの水の流入に加えて、基礎底面地盤からの上向きの浸透流により水が流入していると考えられる。そのため、基礎底面にはサクシヨンが発生しにくく、抵抗モーメントも小さくなったと思われる。したがって、透水性地盤においては、地盤の透水係数などの条件を含めた詳細な検討や浸透流に対するボーリングの検討を行う必要がある。

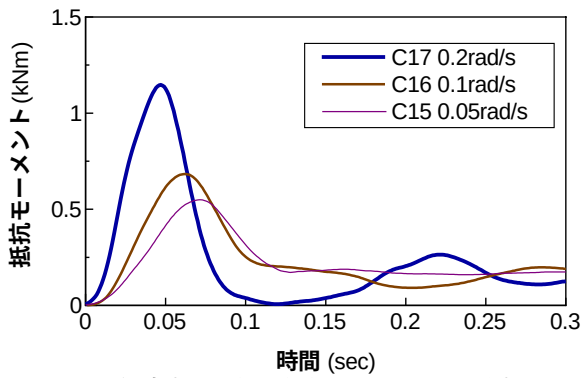


図-7 角速度の影響（抵抗モーメントの時刻歴）

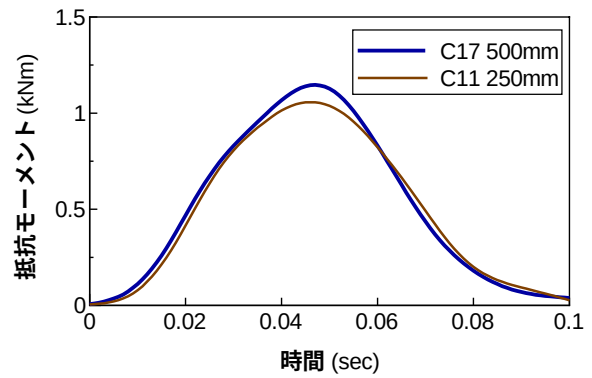


図-9 水深差の影響（抵抗モーメントの時刻歴）

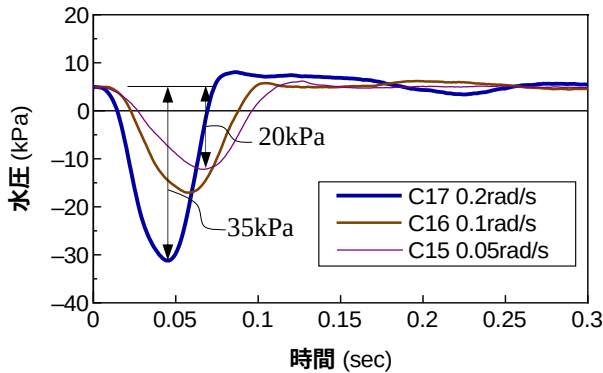


図-8 角速度の影響（W2水圧の時刻歴）

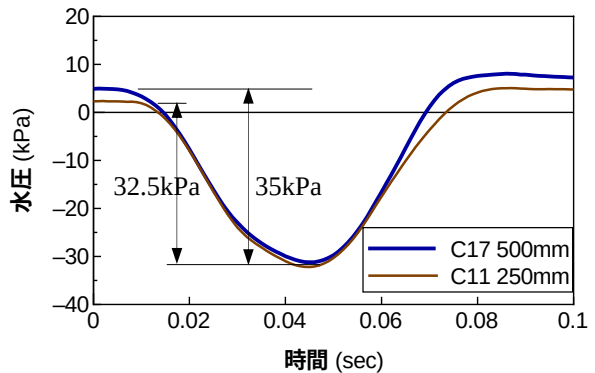


図-10 水深差の影響（W2 水圧の時刻歴）

(2)基礎の角速度と浮上り抵抗の関係

図-7 に不透水性弾性地盤において角速度が異なる C15～C17 の抵抗モーメントの時刻歴を示す。ここで、角速度は脚頭部の 2 ヶ所の鉛直変位より算出した回転角から求めた。基礎の抵抗モーメントのピーク値は角速度が大きいほど大きくなるのがわかる。また、図-8 に同ケースにおける水圧計 W2（フーチング端部から 85mm 位置）で計測された水圧の時刻歴を示す。角速度が大きいほど負圧のピーク値は大きくなっている。すなわち、角速度が大きいほど大きなサクションが発生し、抵抗モーメントが大きくなると考えられる。ただし、今回の実験では発生したサクション（水圧変動量）の値は 20～35kPa と真空状態（静水圧＋大気圧に相当する圧力が低下した状態）に比べて小さな値であった。また、発生したサクションも短時間で消散する結果となった。

(3)浮上り抵抗に対する水深の影響

図-9 に水深の異なる C11 と C17 の抵抗モーメントの時刻歴を示す。抵抗モーメントのピーク値は水深の大きい C17 の方が大きくなっている。

図-10 に示す水圧計 W2 で計測された両ケースの水圧の時刻歴を見ると、載荷前には水深差による水圧差が生じているが、負圧の最大値はほぼ一致している。すなわち、水深差（250mm）に相当する水圧差（約 2.5kPa）がサクションの差となることがわかる。したがって、水深が大きいほどサクションは大きくなり、抵抗モーメントのピーク値も大きくなると考えられる。

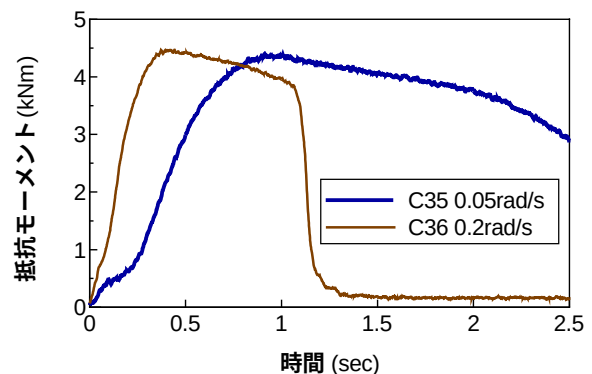


図-11 止水構造と角速度の影響
（抵抗モーメントの時刻歴）

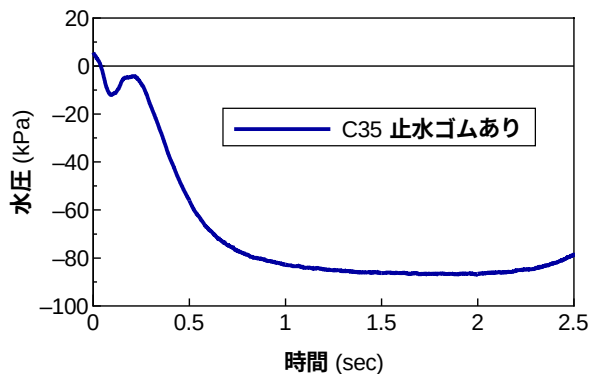


図-12 止水構造の影響（W2 水圧の時刻歴）

(4) 浮上り抵抗に対する止水構造の影響

図-11 にフーチング下端周囲に止水ゴムを取り付けた C35, C36 の抵抗モーメントの時刻歴を示す。C35, C36 の抵抗モーメントは、図-7 に示した止水構造のないケースに比べるとかなり大きな値となっている。また、最大抵抗モーメントのピーク値は角速度によって差が見られないことがわかる。

C35 の基礎底面における水圧時刻歴を図-12 に示す。水圧は真空状態に近い値となり、ピーク後もそのサクションは保持されていることがわかる。ただし、今回採用した構造は完全な止水構造ではなかったため、図-11 の抵抗モーメントはピーク後に徐々に低下している。なお、 $t=1.2\text{sec}$ 付近で C36 の抵抗モーメントが低下しているのは、止水ゴムが基礎底面に巻き込まれて水が流入したためである。

4. サクションを考慮した耐震設計法

(1) サクションの作用状態

室内模型実験の結果より、サクションの作用状態には、大きく分けて以下の 2 つの状態があることがわかった。

a) サクションの大きさが基礎の角速度に依存する場合

浮上った基礎底面下には常に水が充満しており、基礎の角速度に応じて水の流動および圧力変動が生じる状態。（以下「状態 a」）

b) サクションの大きさが基礎の角速度に依存しない場合

基礎の浮上りに対し、水の流入が遅れる、あるいは構造的に流入が遮断された場合に基礎底面下が真空になり、その後、圧力の変動が止まり、一定量のサクションが持続する状態。（以下「状態 b」）

基礎の設計では、力（加速度）あるいは変位量の大きさにより構造が決定される。基礎が回転運動する際の作用モーメントあるいは回転角が最大となる状態では角速度はゼロに近く、状態 a ではサクションはほとんど発生せず、基礎の設計に影響しない。一方、状態 b では発生したサクションが基礎の角速度に依存せず持続されるため、設計で考慮することが可能であると考えられる。そこで、以下では状態 b（特に、不透水性地盤で基礎端部のみから水が流入する場合）を想定した検討を行う。

(2) サクションを考慮した浮上り抵抗式

状態 b を想定して道路橋示方書¹⁾に記載の直接基礎の浮上り式（以下「道示式」）を、サクションを考慮した浮上り抵抗式（以下「修正式」）に拡張する。

図-13 に示すように、水中基礎に作用する転倒モーメントに対しては、地盤反力度とサクションが抵抗する。したがって、抵抗モーメント M は地盤反力度による抵抗 M_E と浮上り部のサクションによる

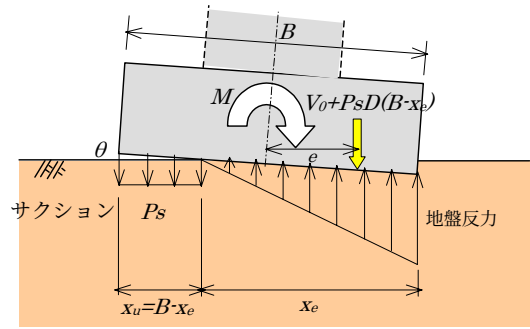


図-13 サクションを考慮した荷重状態

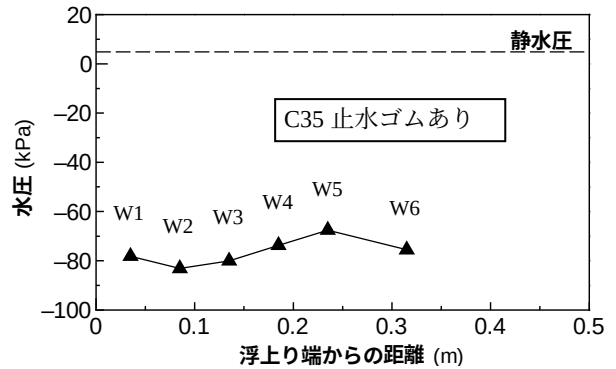


図-14 浮上り時基礎底面水圧分布（C35）

抵抗モーメント M_S の合計であり、式(1)で表される。

$$M = M_E + M_S \quad (1)$$

M_E と非線形応答回転角 θ の関係は、サクションによる鉛直力の変動を考慮して式(2), (3)で表すことができる²⁾。このとき、基礎に作用するサクションは、一定圧力である静水圧と大気圧がゼロ（真空状態）となる水圧変動量であるため等分布と仮定できる。これは実験でも確認されており、図-14 に示す C35 で実測された浮上り時の基礎底面の水圧は、ほぼ真空に近い圧力が等分布で作用していることがわかる。

$$\frac{M_E}{M_0} = 3 \frac{e}{B} \left(2 + \frac{BDp_s}{V_0} \left(6 \frac{e}{B} - 1 \right) \right) \quad (2)$$

$$\frac{e}{B} = \frac{1}{2} + \frac{BDp_s/V_0 - \sqrt{(BDp_s/V_0)^2 + 4(BDp_s/V_0 + 1)(\theta/\theta_0)}}{6(\theta/\theta_0)} \quad (3)$$

ここに、 M_0 ：浮上り限界モーメント、 θ_0 ：浮上り限界回転角、 θ ：回転角、 e ：鉛直荷重の偏心距離、 B ：基礎幅、 D ：基礎奥行き、 V_0 ：死荷重（浮力考慮）、 p_s ：サクションである。

また、 M_S は式(4)のように表される。

$$\frac{M_S}{M_0} = 9 \frac{BDp_s}{V_0} \left(2 \frac{e}{B} - 3 \left(\frac{e}{B} \right)^2 - \frac{1}{4} \right) \quad (4)$$

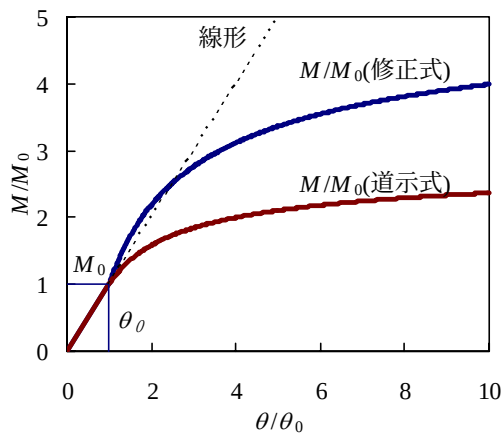


図-15 モーメント～回転角関係

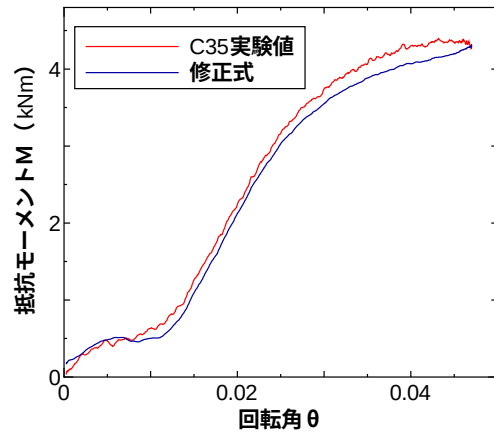


図-17 C35 実験値と修正式算出値との比較

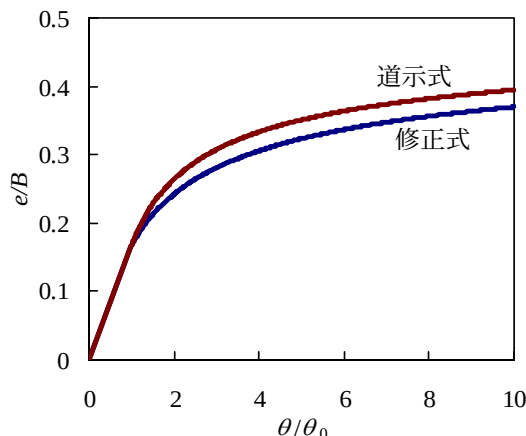


図-16 鉛直荷重の偏心距離

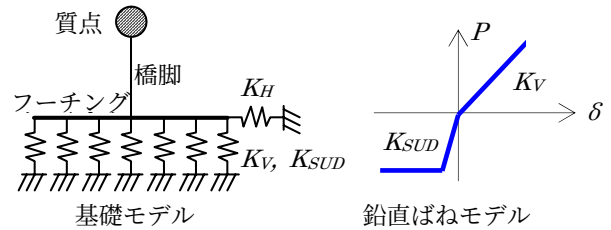


図-18 動的解析モデルと鉛直バネモデル

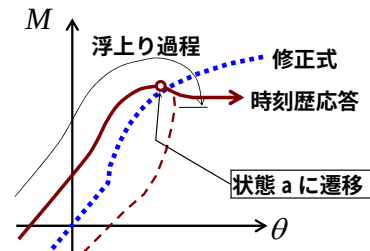


図-19 隙間体積 V と水の流入量 Q の関係

よって、式(1)、(2)、(4)より M は次式で表される

$$\frac{M}{M_0} = -\frac{9}{4} \frac{BDp_s}{V_0} + \left(6 + 15 \frac{BDp_s}{V_0}\right) \frac{e}{B} - 9 \frac{BDp_s}{V_0} \left(\frac{e}{B}\right)^2 \quad (5)$$

図-15 に、道示式と修正式による基礎のモーメント～回転角関係を示す。道示式に比べ修正式の方が抵抗モーメントは大きく、同じ抵抗モーメントに対する回転角は小さくなる。また、図-16 に両式による偏心距離と回転角の関係を示す。サクシオンにより浮上りが抑制されるため修正式による偏心距離は道示式に比べて小さくなる。

(3) 修正式の妥当性検証

修正式の妥当性を検証するために、実験結果との比較を行う。図-17 に C35 において実測された抵抗モーメント、修正式で算出された抵抗モーメントと回転角との関係を示す。ここで、式(5)の P_s は、図-3 に示す水圧計 W1～W6 における計測値の平均を用いた。また、 θ_0 の算出に使用する地盤の変形係数は、地盤に使用したコンクリートブロックの弾性係数 ($E_c=2.35 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$) を用いて計算した。修正式により算出した抵抗モーメントは、C35 の実験結果と非常に良く整合しており修正式は妥当であると判断できる。

(4) 動的解析による基礎浮上り時の状態確認

修正式を適用するにあたっては、式の導出の際に仮定した基礎底面下が真空状態にある（状態 b）という条件を満たしていなければならない。基礎の浮上りに際して基礎底面下に水が流入する場合に基礎の動きに応じて基礎底面下の水の状態が変化するため、動的解析により基礎の動きに応じたサクシオンの評価をしておく必要がある。

現状では、基礎の動きに応じて水による抵抗が変化するという特性を評価できる解析ツールがないため、修正式により設計した基礎構造を状態 b を想定した動解モデルに置き換えて時刻歴応答解析を実施し、基礎の応答と水の状態を確認して安定性を評価することとする。ここでは、図-18 に示すような簡易なモデルを考える。鉛直ばねは、圧縮側には地盤ばね K_V を、引張側にはサクシオンの特性 K_{SUC} を考慮した非線形バイリニア型モデルとする。このモデルを用いて時刻歴応答解析を実施し、基礎底面下の隙間体積 V と水の流入量 Q を算出する。流入量 Q は、流入する水の速度 v が基礎底面における静水圧（大気圧も考慮）と真空状態の圧力との差に対し、ベルヌイ式から、

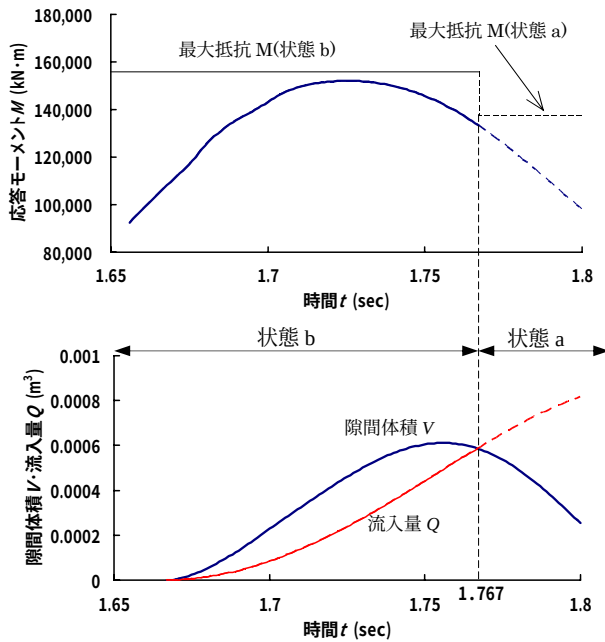


図-20 V, Q および M の時刻歴と最大抵抗

$$v = \sqrt{2g(h + p_a / w)} \quad (6)$$

で与えられ、これに流入断面積と時間を乗じて求める。ここに、 g ：重力加速度、 h ：水深、 p_a ：大気圧、 w ：水の単位体積重量である。 $V > Q$ の時が状態 b であり、基礎底面下は真空状態にある。

基礎が浮上っている過程で状態 b から状態 a に遷移する場合には、瞬間的にサクションによる浮上り抵抗がなくなることから基礎の応答が不安定になる可能性がある（図-19）ので、浮き上がり過程で $V > Q$ となっていることを確認する必要がある。基礎が降下している過程において状態 b から状態 a に遷移する場合については、低下していた水压は静水压を超えて高い圧力状態に至るが、この圧力は基礎を押し上げることはなく（基礎が持ち上げられれば再び水压が低下する）、基礎の応答が不安定になることはないと考えられる。ただし、地盤のみで基礎を支持する状態に急変することから、地盤が極限状態に至る可能性があるため、これを確認する必要がある。

図-20 は、修正式により設計した直接基礎（平面寸法：10m×10m、死荷重：48,000kN、水深 5m）について動的解析を実施した例である。地盤の限界状態（地盤反力度の上限値 1,500kN/m²）から決まる最大抵抗モーメントは、サクションを考慮した場合、つまり状態 b にある場合に 155,750kNm、無視した場合、つまり状態 a にある場合に 137,600kNm となる。状態 b から状態 a に遷移するのは基礎が降下している状態（隙間体積が減少している）であり、かつ応答モーメントは常にそれぞれの状態における最大抵抗モーメントを下回っていることから、この基礎の安定性は確保されているものと評価できる。

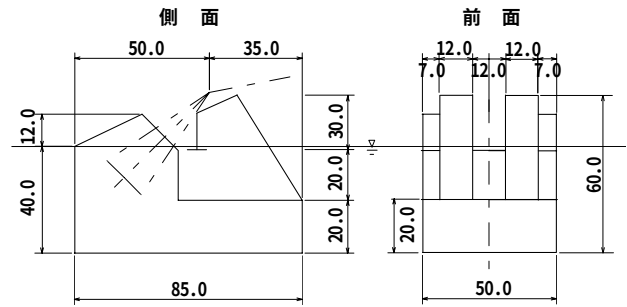


図-21 試設計案一般図

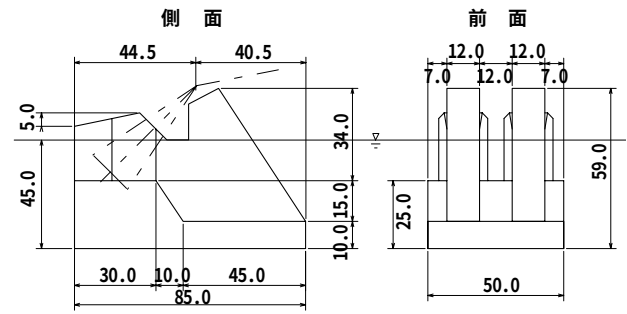


図-22 サクションを考慮した試設計一般図

表-2 地震時安定照査結果の比較

		単位	試設計案	検討結果
底面諸力	鉛直力	MN	1,646	1,875
	水平力	MN	1,875	1,959
	モーメント	MN・m	53,798	51,607
支持力照査	極限支持力	MN	5,368	6,744
	安全率(≥2.0)	—	3.26	3.60
滑動照査	抵抗力	MN	4,417	5,173
	安全率(≥1.2)	—	2.36	2.64

(5) サクションを考慮した耐震設計例

海峡横断道路プロジェクトの試設計案³⁾（図-21）に示される吊橋のアンカレイジに対して、サクションを考慮した耐震設計を行った。図-22 にサクションを考慮した設計を行った場合の構造を、表-2 に地震時安定照査結果の比較を示す。ここで、試設計案では、基礎底面寸法は常時の支持力から、その他の構造寸法もアンカーフレーム、サドルの諸元、配置等から決まっているため、地震時の支持力、滑動の安全率には余裕がある。このため、サクションを考慮した試設計においても、基礎底面形状は試設計案と同じとし、アンカーフレーム、サドルの諸元、配置等を考慮した上で、支持力、滑動の安全率が試設計案と同程度になるよう躯体重量を変化させた。その結果、サクションを考慮することで従来の設計法よりも抵抗モーメントを大きく算出できるため、躯体重量を低減することが可能となり、コンクリート体積は試設計に対し約 2 割削減することができた。

サクションを考慮した耐震設計を行った結果、

- ・荷重の偏心傾斜を考慮した極限支持力式を用いるため、サクションにより鉛直力が増加することで極限支持力は大きく評価される。そのため鉛直荷重に対する安全性は高く評価できる。

・サクシヨンによる浮上り抵抗モーメントの増加に伴い、作用水平力は増大する。しかし、鉛直力の増加により水平抵抗力も増大するために、滑動に対する安全率は向上している。
ということがわかり、合理的な設計が可能となることが確認できた。

5. まとめ

サクシヨンに関する室内模型実験および設計法から得られた結果をまとめると以下の通りとなる。

- ①基礎浮上り時の基礎底面隙間体積 V と水の流入量 Q の関係により2つの状態（状態 a, b）に分けられ、状態 b であれば、ほぼ真空状態のサクシヨンが継続して作用するため、サクシヨンを考慮した耐震設計を行うことが可能である。
- ②サクシヨンを考慮した修正式を用いることで、従来の道式で計算した基礎の規模を小さくすることが可能である。
- ③基礎設置地盤が砂質土などのような透水性地盤では、浮上り時に基礎直下からの浸透流による水の流入もあり継続的にサクシヨンは作用しない。また、浸透流の大きさによってはポイリングの危険性もあり検討を要する。

④水深が大きいほどサクシヨンによる抵抗モーメントは大きくなるため、大水深基礎の設計に適応した場合、大きなメリットとなることが期待される。

⑤繰返し荷重を受けた際、浮上り時に基礎底面に流入した水が基礎降下時に残留し滑動抵抗の低下も予想される。今後、滑動抵抗についても詳細に検討を行っていく必要がある。

⑥基礎底面に止水構造を設置することで、基礎の角速度に関わらずほぼ真空の最大サクシヨンが継続して作用する。今後、合理的な設計法のみでなく、サクシヨンを最大限生かした合理的な新形式基礎構造の提案を行いたいと考えている。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 IV 下部構造編，2002.3
- 2) 福井次郎，大塚雅裕，喜多直之：水中基礎に関する地震時のサクシヨンに関する研究，土木研究所資料 第3896号，2003.3
- 3) 建設省関東地方建設局：平成 10 年度東京湾口道路技術調査報告書，1999.3

THE EFFECT OF THE SUCTION ON THE HUGE BRIDGE FOUNDATIONS DURING EARTHQUAKE

FUKUI Jiro , OTUKA Masahiro , KITA Naoyuki , ASAI Ryuichi

This research is focused on rational design method for huge bridge foundation. Its attention is paid to the suction which acts on the foundation bottom so that it may resist for coming floating when the foundation installed underwater in response to earthquake.

This paper describes the result of the indoor model experiment conducted in order to grasp the characteristic of a suction. The rational seismic design method considering the effect of the suction is proposed.