

港湾技研資料

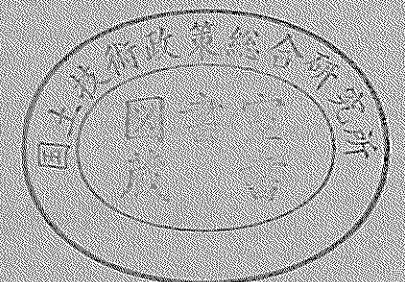
TECHNICAL NOTE OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No. 945 Sept. 1999

均し精度がケーソン底版断面力に及ぼす影響

宮	田	正	史
菅	野	高	弘
長	尾		毅
篠	原	勝	次
近	藤	隆	道

運輸省港湾技術研究所



目 次

1. はじめに	4
2. 既往の研究	5
2.1 捨石マウンドの諸特性	6
2.2 均し精度を緩和した場合の問題点	7
2.3 本研究の検討対象	9
3. 捨石マウンドの鉛直載荷実験	9
3.1 実験概要	10
3.2 実験結果及び考察	13
4. 均し精度が底版断面力に及ぼす影響の評価	29
4.1 解析手法	29
4.2 解析の諸条件及び評価対象	32
4.3 解析結果および考察	33
4.4 安全係数の適用	45
5. まとめ	47
6. おわりに	48
謝辞	48
参考文献	48

The Effect of Surface Configuration of Rubble Mounds on the Stress on the Bottom Slab of Caisson

Masafumi MIYATA¹⁾
Takahiro SUGANO²⁾
Takashi NAGAO³⁾
Katsuji SHINOHARA⁴⁾
Takamichi KONDOH⁵⁾

Synopsis

In Japan, divers make the surface of a rubble rock foundations flat to avoid intensive forces acting on the bottom slab of a caisson. The allowable range of the surface configuration has been determined to be approximately 5 cm. Ministry of Transport is now trying to expand the allowable range to shorten construction periods and reduce costs. But a alleviation of the allowable range could increase the section forces on the bottom slab of the caisson.

In the present study, we conducted plate loading tests on rubble mounds to investigate the contact condition between the rubble rocks and the plate. From the test results, we examined the effect of surface configuration on the number and pattern of the contacts and developed a method to estimate the effect of the surface configuration on the bending moment on the slab. The method is based on Monte Carlo Simulation using FEM analysis. In order to consider the effect of the surface configuration on the bending moment on the slab, we propose the introduction of a safety factor into the current Japanese design code for port facilities.

Key Words : Rubble rock foundations, Surface configuration, Plate loading tests,
Monte Carlo Simulation, Bending moment, Safety factor

-
- 1) Research Engineer, Structural Dynamics Laboratory, Structural Engineering Division, Port and Harbour Research Institute, Ministry of Transport.
(3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 JAPAN, PHONE:+81.468.44.5029, FAX:81.468.44.0839, E-mail:miyata@cc.phri.go.jp)
 - 2) Chief, Structural Dynamics Laboratory, Structural Engineering Division, Port and Harbour Research Institute, Ministry of Transport.
 - 3) Chief, Geotechnical Earthquake Engineering Laboratory, Structural Engineering Division, Port and Harbour Research Institute,
Ministry of Transport.
 - 4) Chief, Technology Development Section, Yokohama Research and Design Office, Second District Port Construction Bureau,
Ministry of Transport.
 - 5) Engineer, Technology Development Section, Yokohama Research and Design Office, Second District Port Construction Bureau,
Ministry of Transport.

均し精度がケーソン底版断面力に及ぼす影響

宮 田 正 史¹⁾
菅 野 高 弘²⁾
長 尾 毅³⁾
篠 原 勝 次⁴⁾
近 藤 隆 道⁵⁾

要 旨

防波堤や岸壁などの基礎捨石マウンドの表面は、ケーソン底版に過大な集中荷重が作用しないように、従来から潜水土による入念な本均し作業が実施されている。本均し作業における標高の許容範囲は経験的に±5cmと定められているが、基礎マウンドの施工効率を向上させること等を目的とし、現在運輸省では均し精度の許容範囲を緩和する方向で検討を進めている。しかし、均し精度を緩和した場合、ケーソン底版に過大な集中荷重が作用し、底版に発生する断面力が増加する懸念がある。

本研究では、実際に港湾工事で使用される捨石を用いたマウンドの鉛直載荷実験の結果から、均し精度の緩和がケーソン底版と捨石との接触点数及び接触分布に及ぼす影響を明らかにした。実験で得られた接触点数および接触分布を基に、均し精度がケーソン底版に発生する曲げモーメントに及ぼす影響を、底版のFEM解析及びモンテカルロ法を用いて確率的に評価する解析手法を開発した。解析結果から、均し精度を緩和した場合の底版曲げモーメントの増加程度を評価した。最後に、均し精度の緩和が底版断面力に及ぼす影響を合理的に実設計に反映させるため、安全係数の導入を提案した。

キーワード：捨石マウンド、均し精度、鉛直載荷試験
モンテカルロ法、底版曲げモーメント、安全係数

-
- 1) 運輸省 港湾技術研究所 構造部 構造振動研究室
(〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1、PHONE:0468-44-5029,FAX:0468-44-0839,E-mail:miyata@cc.phri.go.jp)
 - 2) 運輸省 港湾技術研究所 構造部 構造振動研究室長
 - 3) 運輸省 港湾技術研究所 構造部 地盤震動研究室長
 - 4) 運輸省 第二港湾建設局 横浜調査設計事務所 技術開発課長
 - 5) 運輸省 第二港湾建設局 横浜調査設計事務所 技術開発係長

1. はじめに

港湾施設には数多くの種類と形式があるが、混成式防波堤や重力式係船岸に代表される重力式構造物は、我が国で最も普及しているものの一つである。その構造様式は、図-1に示すように石材で人工的に構築したマウンド状の基礎の上に、ケーソン等を据え付けて本体とするものである。このような基礎を構築する石材は海中へ捨て込んで施工されるため、捨石と呼ばれる。また、捨石を用いて築造された基礎マウンドは、一般に捨石マウンドと呼ばれている。このような捨石マウンドを設置する主な理由は、捨石マウンドの施工が工費の削減に寄与するため、及び構造物の支持力を十分に得られる安定した基礎地盤とするためである。後者についてさらに言えば、マウンド上の構造物には波力や地震力等による大きな外力が作用するが、その外力は構造物を通してマウンドに作用することになる。この際、マウンドはマウンドに作用する大きな荷重を十分に支持し、かつ海底地盤に均等に分散させて伝達するという役目がある。従って、捨石マウンドは港湾の重力式構造物にとって非常に重要な役割を担っていると言える。

このように、捨石マウンドは港湾構造物にとって重要なものであるが、必ずしもその諸特性が十分に解明されているとは言えない。特に、捨石マウンドの支持力が十分であるかどうかの検討法、及びマウンド表面の形状が構造物本体に与える影響の評価法が確立されていないと言える。後者のマウンド表面については、従来より潜水士が丹念にマウンド表面付近の捨石を移動して平坦に均す作業が行われている。理想的には、マウンドの表面は

凸凹が一つもない平面であることが、ケーソン本体にとって望ましいと言える。しかしながら、実際の捨石マウンドに使用される捨石材料の直径は、数10cm～1m程度であるため、マウンドの表面を凹凸の無い完全な平面にすることは不可能である。そこで、マウンド表面については、ある程度の標高の許容範囲をもって平坦と判断することとなる。国の直轄工事では、ケーソン及び根固めブロックを据え付ける部分の標高の許容範囲は±5cmと定められている¹⁾。また、据え付け部分以外のマウンド表面については許容範囲±30cmと定められている。許容範囲を±5cmとした場合の潜水士による均し作業は、本均しと呼ばれている。また、±30cmとした場合は、一般に荒均しと呼ばれている。図-2に本均しと荒均しの模式図を示す。

実際の潜水士による本均しは、図-3に示すようにヌキと均し定規等を用いて、捨石マウンドの天端面の標高が所定の均し精度±5cmにおさまるように捨石を一つずつ移動して組み合わせ、マウンド表面を平坦にする作業のことを言う。一般に本均し作業の実施によって、2つの効果があるとされている。一つは、マウンド表面付近の捨石の組み合わせが堅固となりマウンドの滑動抵抗及び支持力を確保する効果があること、もう一つはマウンド表面を平坦にすることにより、ケーソン底版に集中的な荷重が作用するのを避ける効果があることである。既往の施工実績から判断すると、本均しのマウンド上に設置されたケーソンが、据え付け時及び据え付け後に大きく変位したり、ケーソン底版及び側壁等がマウンドの表面形状の影響によって破損した事例の報告は無いことから、経験的に定められた本均し精度±5cmは、十分安全側の施工基準であると言える。

一方、港湾構造物は大水深や厳しい波浪条件などの地点に建設される動向にある。水深が深くなると、潜水士によるマウンドの均し作業の危険性が増大し、またその作業効率が悪くなるという問題が発生する。さらに、大水深に適格な潜水士の確保も非常に困難となる。このような観点から、捨石マウンドの均し作業の省力化・機械化が望まれている。このため、釜石湾口防波堤等の大水深港湾構造物の建設を契機に、マウンド均し作業の機械化（機械均し）の導入が進められてきた。

機械均しの場合、従来の潜水士による本均しの精度を確保することは困難であるため、均し精度を緩和する必要がある。加えて、本均し精度の緩和が、港湾工事の建設費削減に寄与することから、近年特に本均し精度の簡略化が求められている。このような現状を踏まえて、現在、運輸省ではマウンド表面の本均し精度の許容範囲

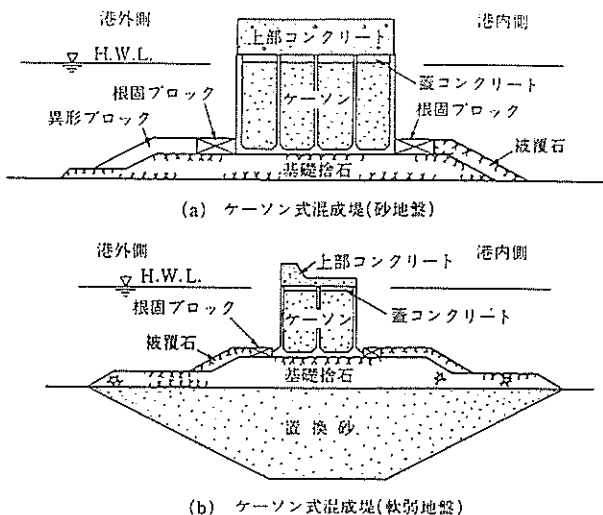


図-1 混成式防波堤の標準断面図例

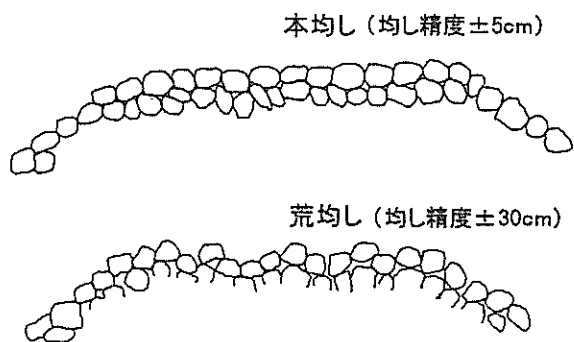


図-2 本均し及び荒均しの模式図

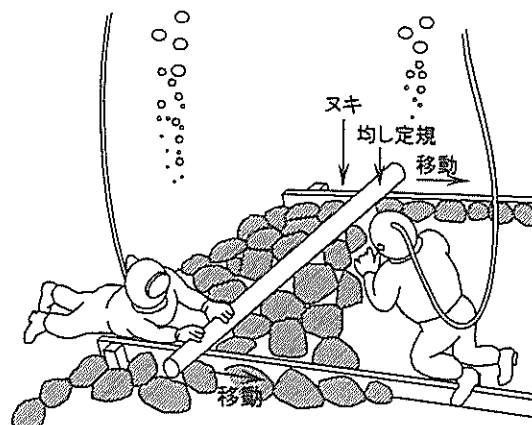


図-3 潜水士による本均し作業

±5cmを緩和し、基礎マウンドの施工効率を向上させる方向で検討を進めている。

しかしながら、捨石マウンドの天端面の本均し精度を緩和した場合、以下の2つの問題が生じる可能性がある。

①マウンドの支持力及び滑動抵抗の低下

②ケーソン構造部材の断面力の増加

一つ目の問題は、均し精度の緩和に伴いマウンド表面の捨石の組み合わせが弱くなり、マウンドの滑動抵抗及び支持力が低下する可能性があることである。二つ目の問題は、マウンド天端面の凹凸（不陸）が大きくなるため、ケーソンの支持形態が従来の本均し精度±5cmの場合と異なり、ケーソンにねじれ等が発生し、ケーソン構造部材の断面力が増加する可能性があることである。従って、均し精度の緩和に向けては、これらの問題を解決する必要がある。

これらの解決すべき問題の中で、本研究では、均し精度の緩和がケーソン構造部材の断面力に及ぼす影響（上の段落中の②）について検討を行う。ケーソン底版はマウンド天端面付近に位置する捨石によって、離散的に支持されているが、その支持状況が検討のポイントになる。本均しの場合、ケーソン底版と捨石との接触点数（支持点数）は比較的多く、均一に分布するものと考えられるが、均し精度を緩和した場合、接触点数が本均しに比較して減少し、その分布は不均一になるものと推定される。この場合、接触点数が減少することにより一接触点当たりの支持する荷重（以下、接触荷重と呼ぶ）が大きくなり、結果として不均一かつ集中的な接触荷重がケーソン底版に作用する可能性がある。このため底版の曲げモーメント等の断面力が大幅に増加する懸念がある。

本研究は、均し精度の緩和がケーソン構造部材の断面力に及ぼす影響について明らかにすることを目的として

いる。検討対象とする構造部材はケーソン底版とし、断面力はケーソン底版の曲げモーメントを対象とする。具体的な研究内容は以下に示す通りである。

- ①実際に港湾工事で使用される捨石を用いたマウンドの野外における鉛直載荷実験を実施し、均し精度の緩和がケーソン底版と捨石との接触点数及び接触分布等に代表される支持形態に及ぼす影響を明らかにする。
- ②実験で得られた接触点数および接触点分布を基に、均し精度がケーソン底版に発生する曲げモーメントに及ぼす影響を、底版のFEM計算及びモンテカルロ法を用いて確率的に評価する解析手法を開発した。本解析手法は、ケーソン底版とマウンド捨石との間に発生する離散的な荷重作用を考慮できるものである。
- ③解析結果から、均し精度±5cmにおけるマウンドからの反力を設計で想定しているような等分布荷重として与えた場合と、離散的な荷重が作用するとした場合との底版曲げモーメントの相違程度について検討する。この検討により、設計における底版曲げモーメントの算定方法の妥当性の評価を行う。
- ④さらに、均し精度を±5cmから±10cm、±20cm及び±30cmへと緩和した場合の底版曲げモーメントの増加程度について評価する。これにより、均し精度の緩和の可能性について検討を行う。
- ⑤最後に、均し精度の緩和が底版断面力に及ぼす影響を合理的に実設計に反映させるため、安全係数の導入を提案する。

2. 既往の研究

本研究では、捨石マウンドの均し精度がケーソン底版断面力に及ぼす影響を評価することを目的としている。

従って、本章では特に捨石マウンドの天端面の形状及び捨石マウンドの天端面の形状がケーソン構造部材の断面力に及ぼす影響を検討した研究を中心に紹介する。最後に、既往の研究との比較を通じて、本研究の位置づけ及び検討対象を明らかにする。

2.1 捨石マウンドの諸特性

(1) 捨石の形状

港湾工事で使用される捨石材料は、地山から直接割り砕いた割石材料が一般的に使用される。従って、以下の本文中では、捨石は割石を意味するものとする。捨石の形状については、「港湾工事共通仕様書¹⁾」において直轄工事に用いられる場合の仕様が規定されている。同仕様書によると、「石は、扁平細長でなく・・・」とのみ記されている。また、「港湾の施設の技術上の基準・同解説」においても、捨石の形状については同様の記述がなされている。実際の捨石の規格としては、各港湾建設局において、捨石一個当たりの質量の範囲を規定しており、一般的には数10～数100kg/個の割石を用いている。

捨石の形状の詳細については、荘司²⁾により統計的にまとめられている。その結果によると、割石の形状はZingg³⁾の分類に従うと、多少のばらつきがあるが、平均的にみるとほぼ塊状であることがわかっている。具体的には、割石の長辺長をa、中間長をb、短辺長をcで示すと、寸法比 b/a 及び c/b がともに0.66以上に相当する形状を意味している。また、口田⁴⁾はフラクタル次元を導入し、全く別の観点から捨石の2次元形状を評価している。その結果、捨石の2次元形状をフラクタル次元で表現すると、約2.57～2.63であることがわかっている。

(2) 捨石マウンドの天端面の形状

捨石マウンドの天端面の本均し精度については、「港湾工事共通仕様書¹⁾」により、標高の許容範囲が定められている。その許容範囲は経験的に±5cmと定められている。潜水士による本均し作業の場合、許容範囲±5cm以内にマウンド天端面の凹凸が収まるように捨石を配置している。但し、マウンドの天端面形状の出来形検査については、測定間隔が10m以下という基準があるのみであり、マウンド天端面の標高分布の詳細データは非常に少ないのが現状である。

マウンド天端面の詳細な標高分布については、第二港湾建設局横浜調査設計事務所が昭和61年に実施した小名浜港の防波堤マウンドにおける測量結果がある。実験では、本均し（均し精度±5cm）、荒均し（均し精度±30cm）及び機械均しの3種類の均し方法によるマウンドが

築造され、各々のマウンドの天端面標高が詳細測量された。詳細測量は、測定間隔を30cmとしたスタッフ測量により実施された。スタッフの先端には、先端が捨石間の隙間に過度に落ち込まないように、直径10cmの円盤が設置された。各均しごとのマウンド天端面の標高平面分布と標高の頻度分布を図-4に示す。図から、本均しの天端面は、荒均し及び機械均しに比較して、非常に平坦であることがわかる。マウンド天端面の凹凸程度を標準偏差として表すと、本均しの場合は約2cm、荒均しの場合は約10cm、機械均しの場合は約15cmとなっている。標高の頻度分布をみると、本均し及び機械均しについては、ほぼ正規分布である。荒均しは、標準偏差が大きく全体的に不陸が大きいものの、潜水士が手作業で均し作業を行っているため、最大突出高が均しの許容範囲（±30cm）以内に抑えられている。なお、機械均しマウンドの築造に使用された水中捨石均し機は、当時第二港湾建設局で開発されたものである⁵⁾。均し方法は捨石捨込み方式と呼ばれ、捨石均し面の近くまで降下させた鋼製の投入シュートの上部から捨石を投入して、シュート下端から捨石を自重で押し出すと同時にシュートを水平に移動することにより均し面を水平に敷き均す方式である。

現在、捨石均し機については数種類開発されている。これらの均し方式は、何れもマウンドの均し面を転圧して均し面を水平にする方式である。転圧方法には、ローラーによる転圧、重錘の落下による転圧、起振機を内蔵したダンパによる転圧等がある。均し面を転圧するため、従前の捨石均し機に比較して均し精度は向上していると言われている。これらの捨石均し機は、特に大水深におけるマウンド築造において使用実績が多く、実用上全く問題ないレベルに到達している。

しかし、均し面を過度に転圧すると表層付近の捨石が細かく割れる可能性があること、また従来の潜水士による均しに比較してマウンド天端付近の剛性が部分的に大きくなること等の問題が発生する可能性がある。マウンド天端付近の剛性が部分的に大きくなった場合、マウンド天端面は見かけ上、水平であるにもかかわらず、ケーソンは剛性の高い部分のみで支持されることになり、あたかも均し精度が悪い場合のケーソンの支持状態と同様になってしまう可能性がある。機械均しにおける転圧方法の相違が、マウンド支持力や滑动抵抗及びケーソン構造部材の断面力等に及ぼす影響については、検討された事例は無く、不明な点が多い。従って、本研究では均し精度の緩和がケーソン底版に発生する断面力に及ぼす影響を検討するが、均し方法は潜水士による本均し及び荒均しを検討対象とし、機械均しは検討対象外とする。

1メッシュの幅：30cm

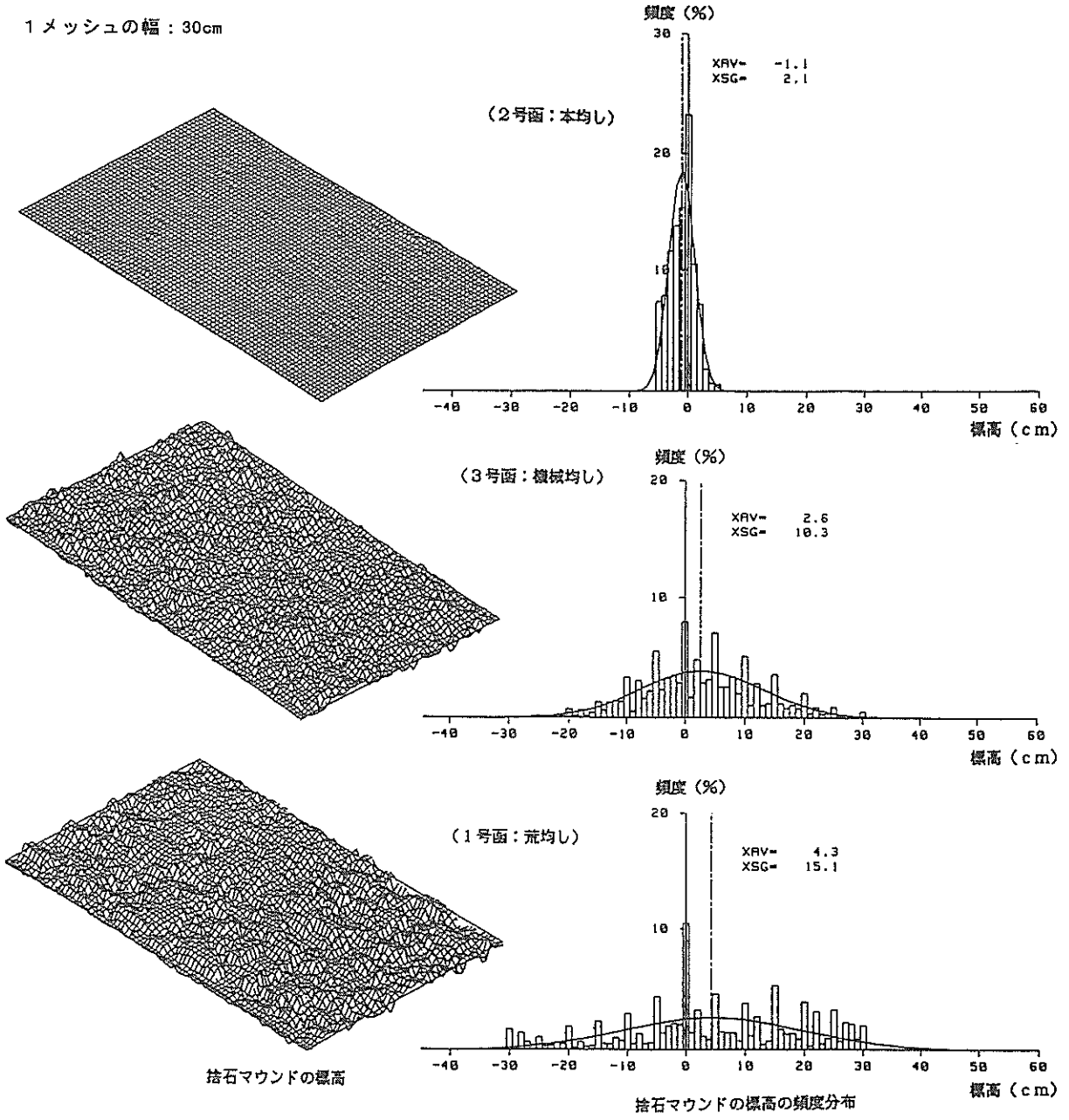


図-4 マウンド天端面の標高分布特性 (小名浜港)

2.2 均し精度を緩和した場合の問題点

(1) マウンドの支持力及び滑動抵抗の低下

本均し作業は、単に捨石マウンドの天端面を平坦にするばかりでなく、個々の石の組み合わせを良くし、マウンドを堅固にするという効果があるものと考えられる。従って、均し精度を緩和した場合、マウンドの支持力や滑動抵抗が低下する恐れがある。

マウンド天端面の不陸の有無が、マウンドの支持力及び滑動抵抗に及ぼす影響については、第二港湾建設局が陸上でほぼ実物に近い高さ2mの捨石マウンドを造成し、

載荷ブロックによるマウンドの載荷試験を行っている⁹⁾。ブロックの上部及び側部に油圧ジャッキを設置し、ブロックに作用させる水平荷重と鉛直荷重の比を変化させることにより、マウンドの鉛直載荷実験、滑動実験、支持力実験を実施している。マウンド天端面に作用させた鉛直接地圧(ブロックに作用させた総鉛直荷重をブロック底版のの載荷面積で除した鉛直平均応力を意味する。以下単に接地圧と呼ぶ)は最大約370kPaであり、現実のマウンドに作用する接地圧に近い条件の実験である。実験の結果、捨石質量が50~200kg/個のマウンドでは、マウ

ンド天端面の均し精度を±5cmから±30cmに緩和しても、支持力及び滑動抵抗は低下しないことが明らかになった。

マウンドの滑動抵抗の低下については、第一港湾建設局も陸上におけるコンクリートブロックの滑動試験を行い、捨石マウンドの均し方法と摩擦係数の関係について検討をしている⁷⁾。実験用のマウンドの高さは1.5mであり、50~200kg/個の捨石を用いている。その結果によると、均し精度を緩和すると摩擦係数が若干低下する傾向が見られた。但し、この実験ではマウンド接地圧が約24kPa~74kPaと実際の設計で想定される接地圧に比較すると小さく、その結果を実際の構造物の滑動抵抗の検討にそのまま適用することはできないと考えられる。

これらの実験結果から、均し精度の緩和により捨石マウンド部分の支持力や滑動抵抗が著しく低下することはないと考えられるが、均し精度の緩和がマウンド滑動抵抗及び支持力に及ぼす影響については、不明な点が多く、今後取り組むべき課題である。この問題については、本研究の検討対象外とする。

(2) ケーソン構造部材の断面力の増加

捨石マウンドの均し精度を緩和した場合、マウンド天端面の凹凸（不陸）が大きくなるため、ケーソンの支持形態が従来の均し精度±5cmの場合と異なり、ケーソンにねじれ等が発生し、ケーソン構造部材である側壁や底版の断面力を増加させる懸念がある。

均し精度を緩和した場合のケーソンの支持形態の相違が、ケーソン構造部材の断面力に及ぼす影響については2つの問題が存在する。その一つは、図-5の上段に示すように従来の本均しではマウンド表面が十分に平坦かつ堅固であるため、ケーソンは容易に平坦に据え付けられるが、均し精度が緩和されると図-5の下段に示すようにマウンド表面の捨石は、隙間に落ち込んだり回転しやすくなるため、ケーソンの傾斜等の変形が大きくなる懸念がある。このとき、ケーソン底版の支持形態を底版全体として見た場合、底版のある領域では特に大きな反力を受け、逆にある領域ではほとんど反力を受けないというような支持形態になる可能性もある。このため、これまで設計で想定していなかったケーソンのねじれ等が発生し、ケーソンの底版や側壁に発生する応力が増加する危険性がある。これは、ケーソンの支持形態をマクロ的に見た場合の均し精度の緩和にともなう問題点であると言える。

第二の問題点については、ケーソン底版とマウンド捨石との接触状況がポイントとなる。既に述べたように、均し精度の緩和にともないケーソン底版と捨石との接触点数及び接触分布が変化すると考えられる。すなわち、

均し精度を緩和した場合、接触点数は本均しに比較して減少し、かつ接触分布はより不均一になる。このため、ケーソン底版に作用する1接触点当たりの接触荷重は大きくなり、かつ接触荷重のばらつきも大きくなることが予想される。その結果、離散的な接触荷重（集中荷重）がケーソン底版に作用するとことになり、隔壁及び側壁等に囲まれたケーソン底版の一隔室に着目した場合、その底版の断面力が増加すると考えられる。これは、ケーソン底版の支持形態をミクロ的に見た場合の均し精度の緩和にともなう問題点であると言える。

マウンドの天端面形状がケーソン構造部材の断面力に及ぼす影響について検討した研究事例を見ると、横田ら⁸⁾はケーソンにねじれが生じない場合とねじれが生じる場合について、いくつかの簡単な不陸パターンを想定した検討を行っている。この結果、想定した不陸パターンが実際に存在するとは限らないとはしながらも、ケーソンがねじれる場合なども考慮し、従来の設計法では十分な検討ができない場合には、有限要素法による解析を行う必要があるとしている。横田らは、ケーソン底版の一部を長方形など簡単な形状の面として支持する不陸パターンを想定したが、外山⁹⁾はマウンド天端面の凹凸を想定して、離散的な接触荷重がケーソン底版に作用するような不陸パターンを導入した。具体的には、マウンド天端面の標高を正規分布で与え、その標高に応じた地盤バ

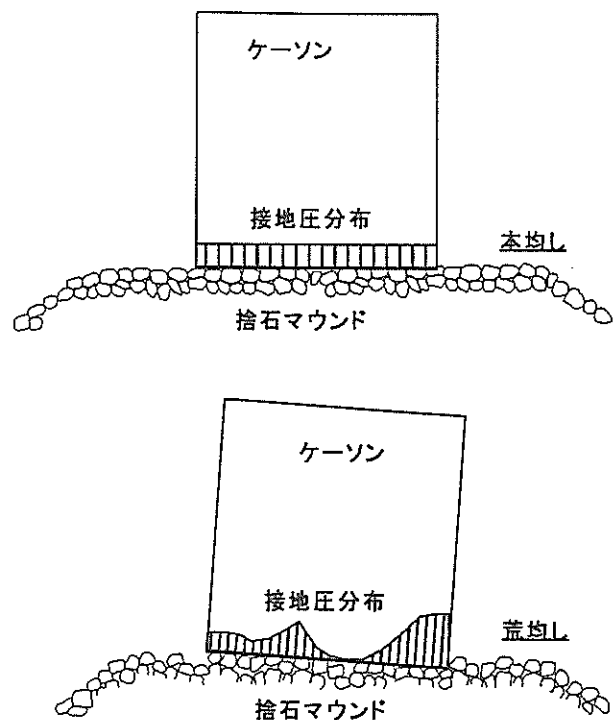


図-5 本均しと荒均しのケーソン安定性に及ぼす影響

ネによりケーソンが支持されるものとして、ケーソン全体の挙動及び底版断面力の算定を行っている。地盤バネは計算の都合上、底版の50cm×50cm区画に一つずつ配置された。この結果、均し精度の緩和により底版断面力は増加するが、底版を厚くする等の対処を行えば、均し精度±30cmまでの緩和は実現可能であるとの結論を得ている。また、均し精度の底版断面力の増加程度を合理的に実設計に導入するために、信頼性設計法における確率的な含みを持った荷重係数の導入を提案している。さらに石原ら¹⁾は、外山がマウンド天端面の標高を正規分布として表現しているのに対し、標高をフラクタル次元により表現し、同様の方法によりケーソンの底版断面力の算定を実施している。その結果、フラクタル次元による標高分布を用いた方が、外山の方法よりはケーソン底版に発生する断面力は小さくなるという結果を得ている。但し、断面力は設計値より大きい。

これらの検討結果は、いずれも均し精度の緩和によってケーソン構造部材に発生する断面力が増加することを支持するものである。しかしながら、ここで注意すべきことは、これらの検討では、現実のケーソン底版と捨石との接触状況が全く反映されていないことである。実験結果に基づいた接触状況を考慮に入れて、断面力の増加程度を評価することが必要と考えられる。

2.3 本研究の検討対象

前述したように、均し精度の緩和による問題点は、大きく分類すると、マウンド支持力・滑動抵抗の低下及びケーソン構造部材の断面力の増加、とになる。本研究では後者を検討対象とする。

均し精度の緩和がケーソン構造部材の断面力に及ぼす影響については、ケーソンの支持形態をミクロ的にみた場合の検討を実施する。従って、マウンド天端面の広域に渡るような凹凸の影響は検討対象外となる。

ケーソンの支持形態をミクロ的に見た場合の検討ポイントは、既往の研究で考慮されていないケーソン底版と捨石の実際の接触状況を考慮してケーソン構造部材の断面力の増加程度を算定することにある。さらに検討内容を絞ると、均し精度の緩和にともなうケーソン底版と捨石との接触点数の減少及び接触分布の変化が、ケーソンの1隔室の底版曲げモーメントに及ぼす影響を評価対象とする。曲げモーメントをケーソン底版の断面力として選んだ理由は、分布荷重を受ける版の解析では曲げモーメントの影響が支配的であり、せん断力が問題になることは少ないためである。なお、ケーソンの隔室は数個存在するが(図-6)、本研究では任意の一隔室の底版を対

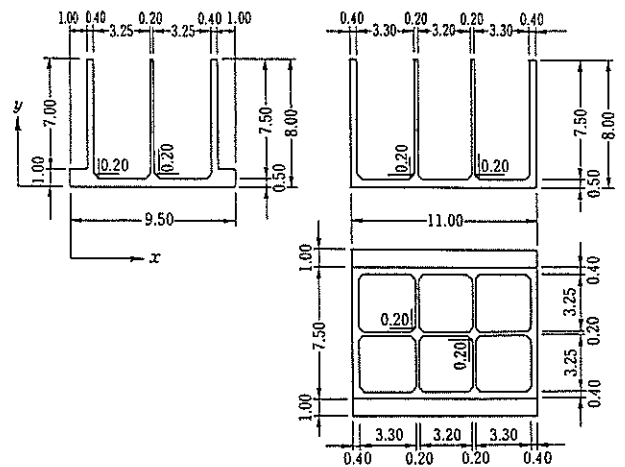


図-6 ケーソンの断面形状の例

象とし、底版に鉛直方向の等分布荷重が作用した荷重条件を想定している。

検討を実施するにあたっては、図-7に示すように2段階の検討が必要になる。第一段階は、離散的な荷重作用を考慮していない現行設計法で算定した底版曲げモーメント(図-7(a))と、離散的な荷重作用を考慮して算定した本均しマウンドにおける底版曲げモーメント(図-7(b))との比較である。設計上、本均しマウンド上の底版に作用する荷重分布は、ケーソンに鉛直荷重のみが作用する場合、等分布荷重を仮定している(図-7(a))。しかし、実際のマウンドを構成する捨石は有限の大きさを有する粒状体であるため、本均しと言えども図-7(b)に示すとおり、実際には捨石からの離散的な接触荷重がケーソン底版に作用している。従って、離散的な荷重作用を考慮した場合に発生する底版曲げモーメントは設計値と異なる可能性があり、初めに設計値の妥当性について検討する必要がある。

第二段階の検討では、均し精度を±5cmから±10cm、±20cm、±30cmと緩和した場合の底版曲げモーメントの増加程度を評価する(図-7(c))。この検討でポイントとなるのは、各均し精度におけるケーソン底版と捨石との接触状況を現実に近い条件で与えることにある。このため、次章に示す実験を行うことにより、実際のケーソン底版と捨石との接触状況を把握している。

3. 捨石マウンドの鉛直載荷実験

均し精度の緩和にともなう底版曲げモーメントの増加程度の算定をする際に、今回の検討では特にケーソン底版と捨石のミクロ的に見た接触状況の与え方がポイント

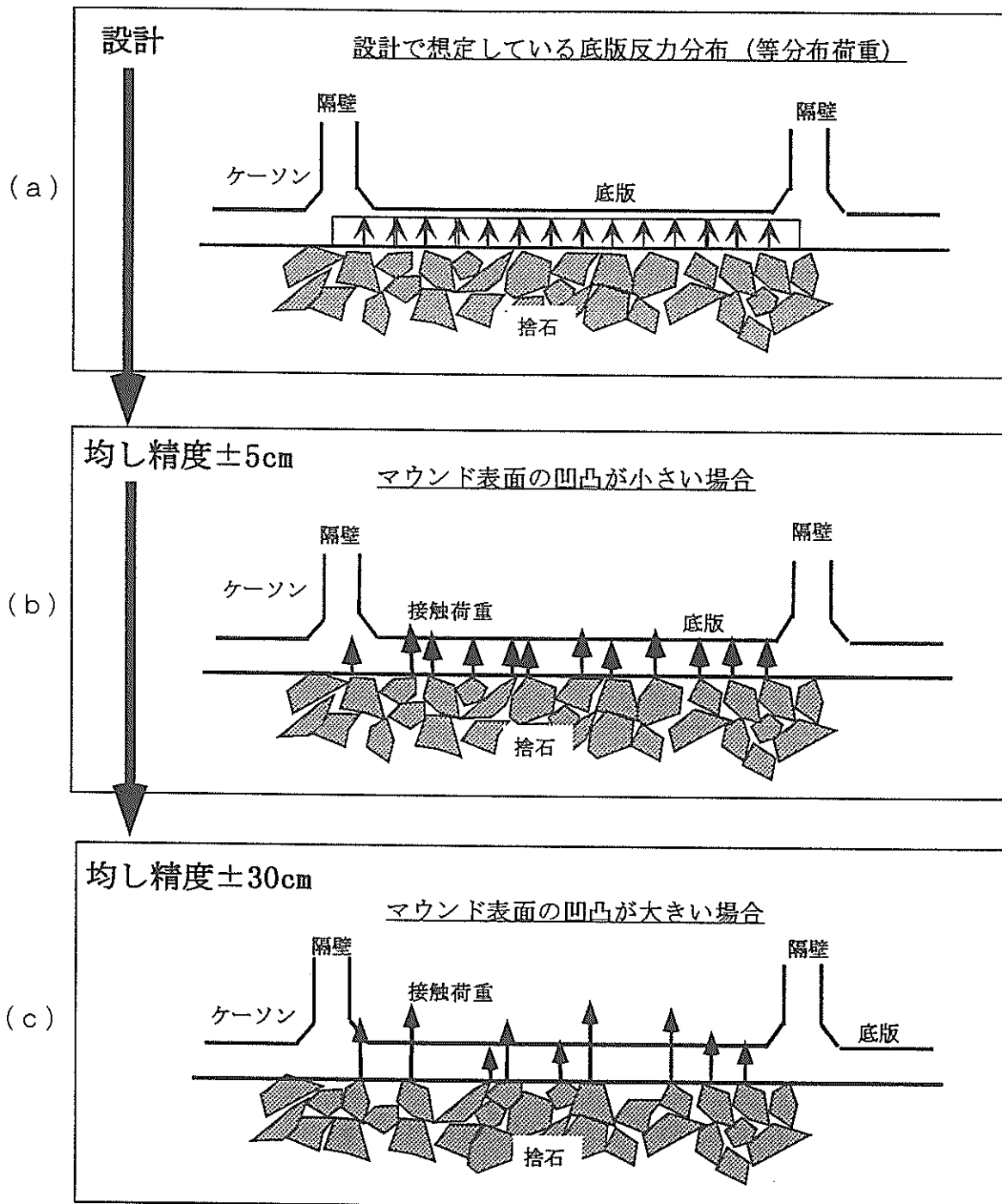


図-7 捨石マウンドの表面の凹凸によるケーソン底版に及ぼす影響の概念図

となる。本章では、均し精度がケーソン底版と捨石の接触状況に及ぼす影響を把握するために、第二港湾建設局が昭和59、60年度に実施した陸上における捨石マウンドのブロック載荷試験⁹⁾を参照する。

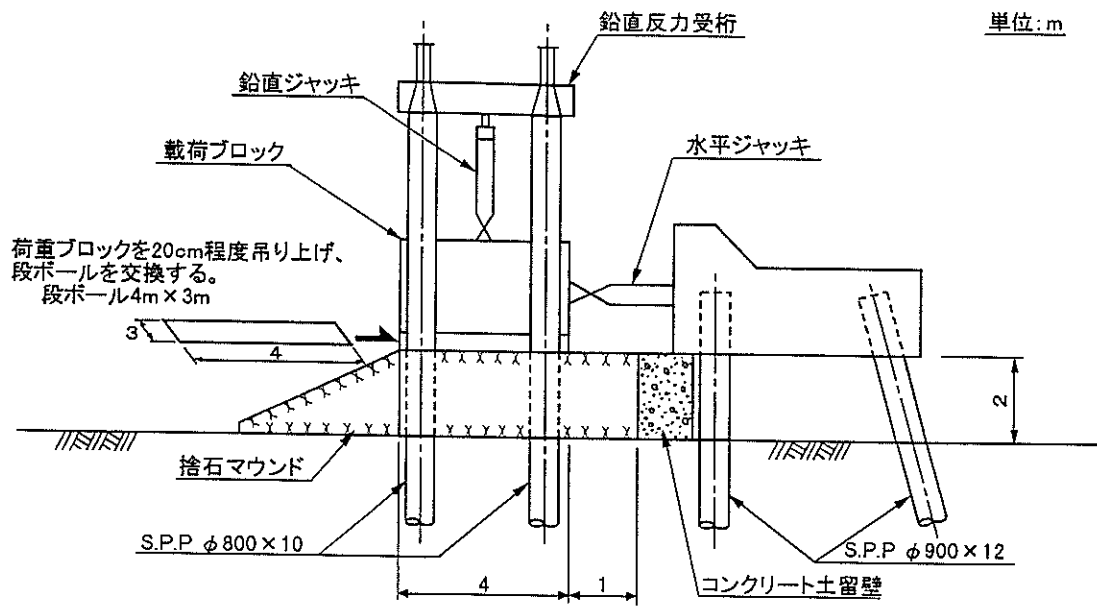
この実験では、捨石のサイズ、載荷ブロックの載荷条件、マウンド層厚、均し精度等の実験条件を様々に変化させた一連の実験を実施している。本章では、それらの実験ケースの中から、マウンドの層厚が2m、載荷ブロッ

クに鉛直荷重のみを作用させた荷重条件、マウンドの捨石の質量が5~150kg/個の実験条件のものを選択して、均し精度が載荷ブロック底版と捨石との接触状況に及ぼす影響について新たに検討する。

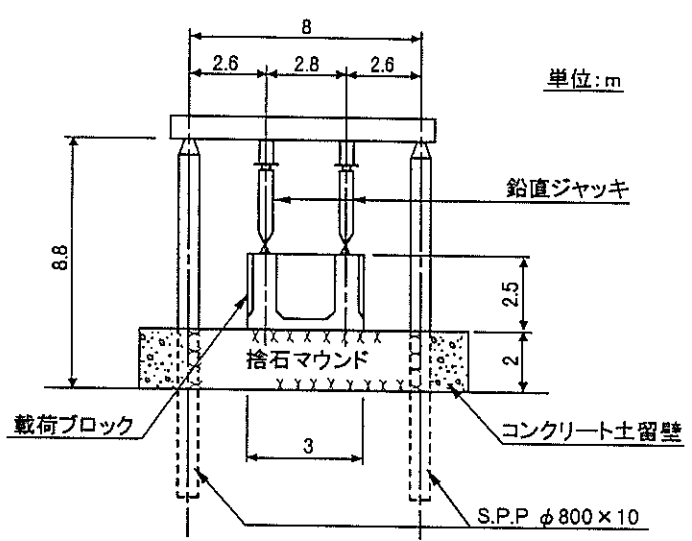
3.1 実験概要

(1) 実験施設の概要

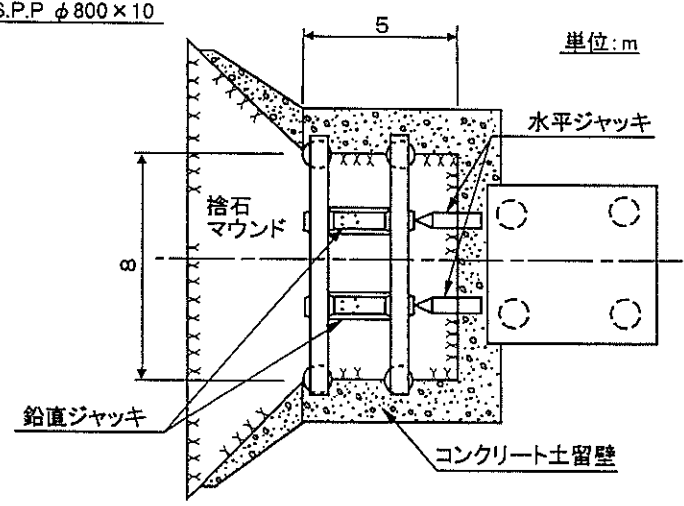
本実験に用いた載荷装置の標準断面図を図-8に示す。



(a) 側面図



(b) 断面図



(c) 平面図

図-8 野外実験施設の標準断面図

実験施設は全て野外に設置された。捨石マウンドは重力式のコンクリート製土留壁に囲まれた中に築造された。土留壁はマウンドの左右及び背後に配置されており、土留壁が無い面にマウンド法面が築造された。土留壁は重力式であり、過大な側圧をマウンドに与えないように配慮している。マウンドのサイズは、層厚2m、天端幅5m、奥行8m、法面勾配は1:2である。

マウンドの載荷は、マウンド上に載荷用のブロックを載せ、載荷ブロックに連結した鉛直ジャッキを用いることにより行う。今回の検討対象とする実験ケースでは、鉛直荷重のみを作用させているため、水平ジャッキは使用していない。鉛直ジャッキの反力については、鋼管杭4本で支持された鉛直反力受桁により支持する。載荷ブロックは鉄筋コンクリート製である。載荷ブロック底版の載荷面（底版）のサイズは幅3m×長さ4mである。

(2) 実験マウンド

a) 基礎地盤

本実験施設を建設する前に、基礎地盤のボーリング調査をしている。その結果、直下に軟弱な粘性土があったため、表層付近から粘性土の下に位置する土丹層までの地盤を、セメント系固化材により改良し強固な地盤とした。改良土の表層付近については、均質な山砂に置換え、それを振動コンパクター（80kg型）を用いて十分に締固め、強固な地盤とした。実際の捨石マウンドの基礎地盤は軟弱であることが多く、ケーソン及びマウンドの自重等で基礎地盤全体が沈下することがあるが、それに比較すると本実験におけるマウンドの基礎地盤は非常に堅固であり、沈下はほとんど発生しない条件と言える。

b) 使用割石

実際に港湾工事で使用される捨石（割石）を実験用マウンドに使用した。使用した捨石の1個当たりの質量は、約5～150kgの範囲である。捨石の形状は、写真-1に示すとおり、ゴツゴツとした角張った塊状の形をしている。図-9に使用した捨石の質量分布を示す。図-10に捨石質量から同じ質量を持つような球の直径に換算した粒径分布を示す。使用した捨石の球形換算直径は、概ね10cm～50cm程度であることがわかる。

c) マウンド造成方法

実験マウンドは、図-11に示すとおりタイヤショベルを用いて行い、各実験ケースごとに新たに造成している。マウンドは一層で仕上げ、適当に捨石マウンドの天端を揃えながら投入している。

実験マウンドの均し方法は、本均し（±5cm）、荒均し（±10cm、±20cm、±30cm）の4種類とした。均し作業は、港湾工事で実際に作業を行っている潜水土により、

均し精度を指示して実施した。従って、意図的にマウンド天端面に凹凸を付けることは行っていない。

(3) 計測項目と載荷方法

載荷実験では様々な種類の計測を行っている。その中で、本研究の検討に必要な計測項目のみを挙げると、載荷ブロックに作用する総鉛直荷重、載荷ブロックの鉛直変位及び載荷ブロック底面と捨石との接触状況である。

載荷手順としては、まず初めに載荷ブロック単体をマウンド上に設置する。載荷ブロックの質量は約42000kg、底版サイズは3m×4mであるので、鉛直荷重を底版面積で除した鉛直接地圧は約34kPaになる。載荷ブロックを載せた後に、載荷ブロックに鉛直ジャッキを連結して、鉛直荷重を徐々に大きくする。所定の各荷重段階（表-1）に達した時点で直ちにブロックの鉛直変位を計測する。鉛直変位の計測後に、1度載荷ブロックを吊り上げ、次に示すブロック底面と捨石との接触位置を計測する。その後、再び載荷ブロックを載せ、次の荷重ステップに達するまで載荷する。

載荷ブロック底面と捨石との接触状況の測定については、載荷ブロックの底面に貼り付けた段ボール紙を利用する。段ボール紙は、表-1に示す各荷重を作用させる前に貼り付けられ、載荷後に載荷ブロックを吊り上げた時

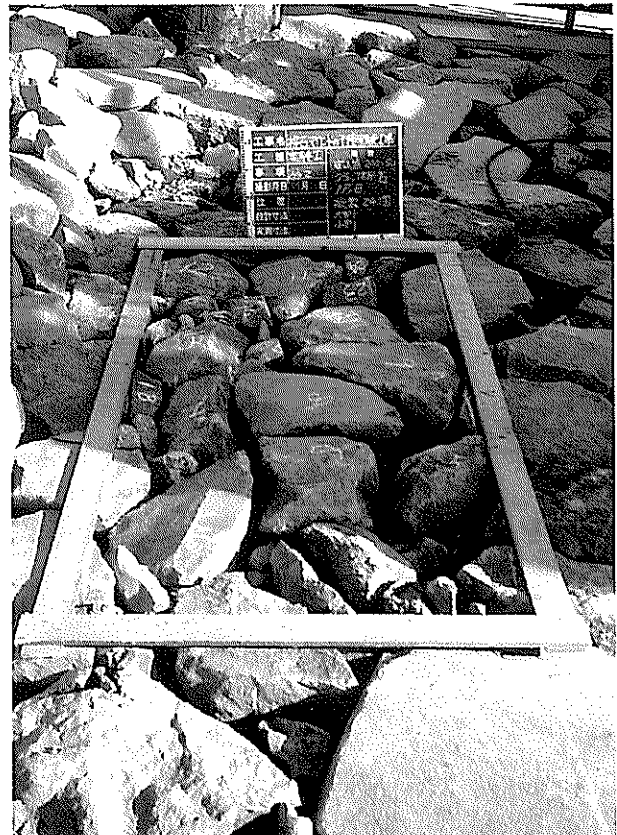


写真-1 捨石形状及び天端面均し状況

に底版から取り除く。ブロック底版と捨石が接触すると段ボール紙上にその接触跡が残るが、この接触跡の位置と数を調べることで、均し精度及び接地圧に応じた接触状況を調べている。段ボールは各荷重段階毎に交換している。

なお、載荷前には、マウンド天端面の標高測量を実施している。測量間隔は25cmであり、先端に直径10cmの円盤を付けスタッフを用いて測量を実施している。

(4) 実験ケース

均し精度の影響を評価するために、均し精度を±5cm、±10cm、±20cm、±30cmと4種類変化させた全6ケースの

実験を実施した。実験ケースの一覧を表-2に示す。均し精度±5cm及び±30cmのケースについては、実験の再現性の確認のため、2ケースずつ実施している。

3. 2 実験結果及び考察

(1) マウンド天端面の標高

載荷前のマウンド天端面の標高の測量結果を図-12に示す。均し精度が悪くなるに応じて、天端面の凹凸程度が大きくなることわかる。均し精度が±5cmと±10cmの場合、平坦な部分の比率が大きいが、均し精度が±20cm及び±30cmになると、大部分が凹凸の大きい形状にな

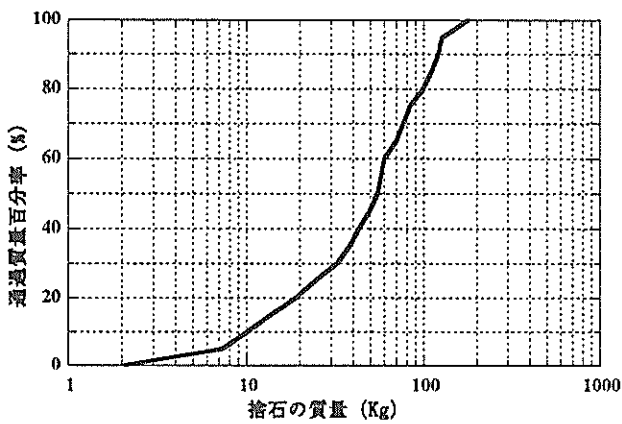


図-9 捨石の質量加積曲線

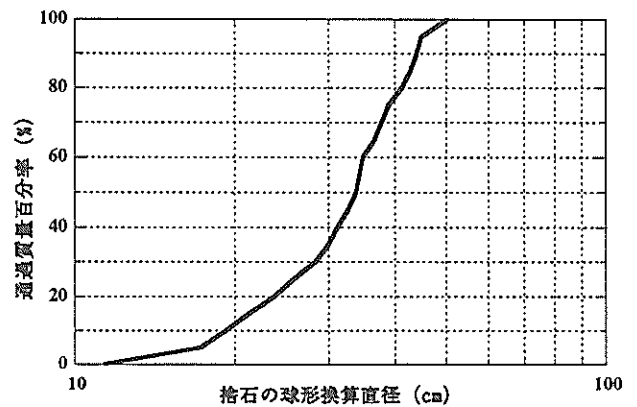


図-10 捨石の球形換算粒度分布

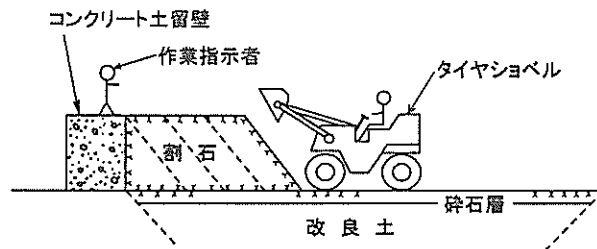


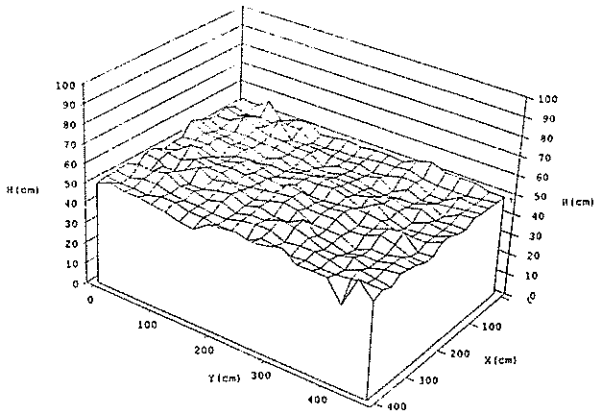
図-11 マウンド造成方法

表-1 測定荷重段階

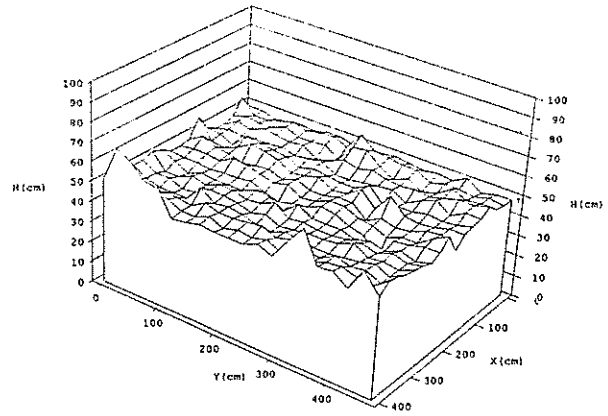
載荷段階	1	2	3	4	5
鉛直荷重 (kN)	410	1390	2370	3360	4340
接地圧 (kPa)	34	120	200	280	360

表-2 実験ケース一覧

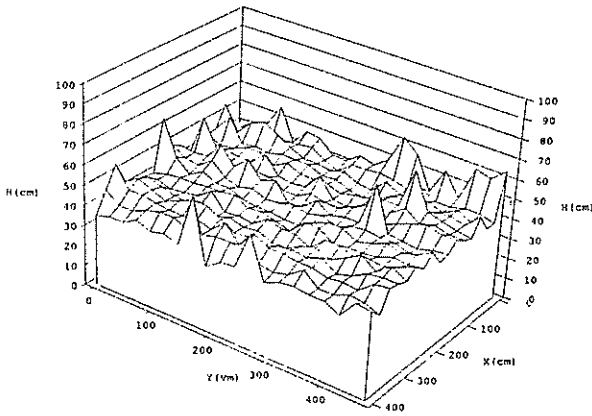
実験ケース	均し精度	均し方法
case5a	±5cm	本均し
case5b		
case10	±10cm	荒均し
case20	±20cm	
case30a	±30cm	
case30b		



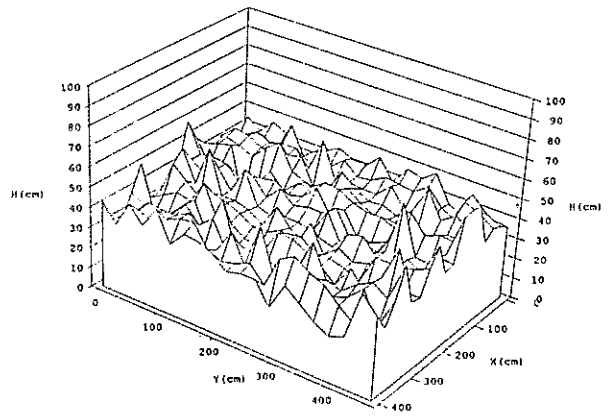
(a) CASE5a (均し精度±5cm)



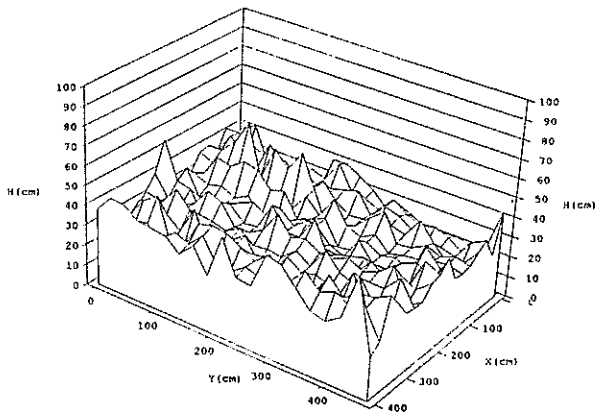
(b) CASE5b (均し精度±5cm)



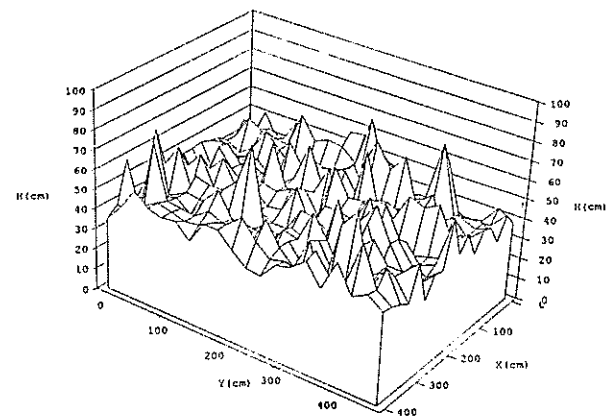
(c) CASE10 (均し精度±10cm)



(d) CASE20 (均し精度±20cm)



(e) CASE30a (均し精度±30cm)



(f) CASE30b (均し精度±30cm)

図-12 マウンド天端面の標高分布

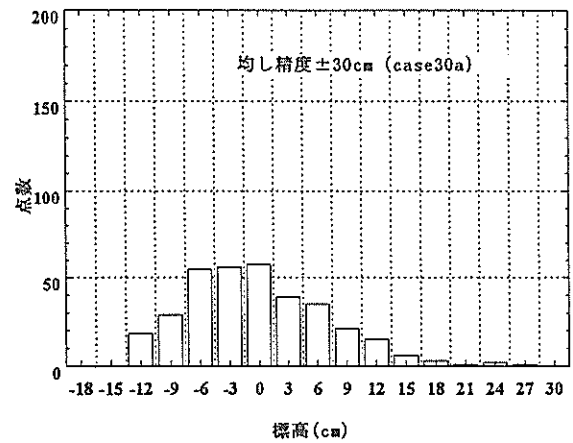
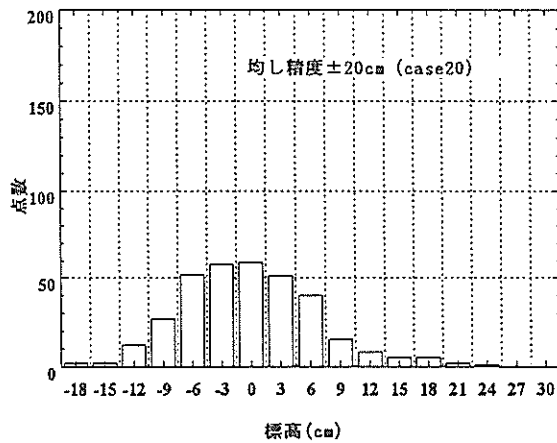
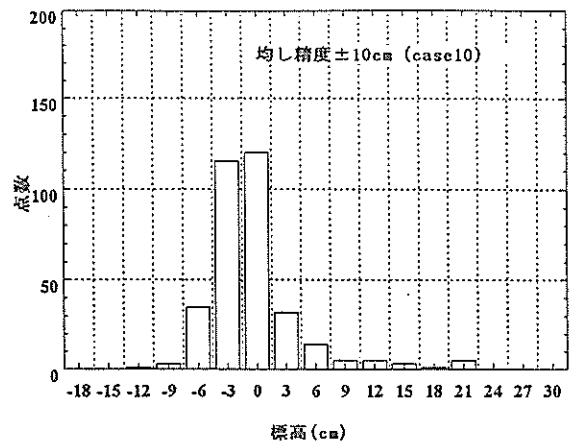
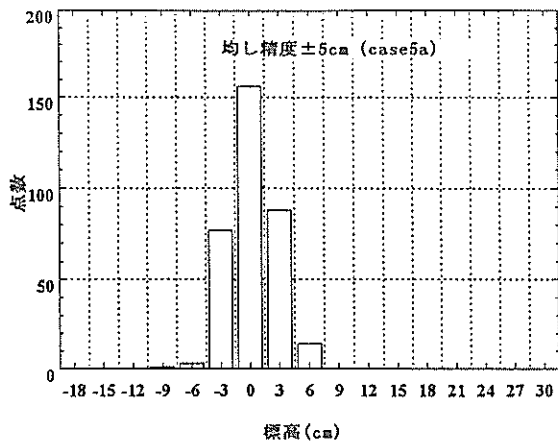


図-13 マウンド天端標高の頻度分布

表-3 マウンド天端標高の標準偏差

実験ケース	均し精度	標準偏差 (cm)	最高値 (cm)	最小値 (cm)
case5a	±5cm	2.4	7	-10
case5b		3.4	21	-15
case10	±10cm	4.7	21	-12
case20	±20cm	6.8	24	-19
case30a	±30cm	7.2	26	-13
case30b		8.5	31	-14

っていることがわかる。

次に、各ケースで計測した標高の平均値を基準とした場合の標高の頻度分布を図-13に示す。この結果から、いずれのケースも正規分布であると推定される。但し、均し精度によって、その分布形状が異なることがわかる。すなわち、均し精度±5cm及び±10cmの場合は標高の分布幅が狭いが、これに比較すると均し精度が±20cm及び±30cmの場合は標高の分布幅が広がっている。従って、

本実験におけるマウンドの均し作業を、その標高分布の特性で分類すると、マウンド天端面の凹凸が小さい均し精度±5cm及び±10cmのグループと、凹凸が相対的に大きい均し精度±20cm及び±30cmのグループに分けられるようである。

マウンドの標高分布を標準偏差を指標として評価すると(表-3)、均し精度が悪くなるに従い、標高の標準偏差は大きくなっている。しかし、標準偏差を指標とすると、前述したグループ分けを可能とするような明確な相違は無いことがわかる。

(2) マウンドの鉛直変形特性

図-14に载荷ブロックの鉛直変位と载荷ブロック底版の鉛直接地圧との関係を示す。载荷ブロックの鉛直変位は、ブロックをマウンドに載せた初期の状態を基準(ゼロ)とし、ブロック四隅の鉛直沈下量の平均を用いている。また、鉛直接地圧(以下、単に接地圧と呼ぶ)は、载荷ブロックに作用させた総鉛直荷重をブロック底版の载荷面積で除した値と定義している。

本図より、均し精度が悪いと、载荷ブロックの鉛直変

位は、均し精度が良い実験ケースに比較して大きくなっているのがわかる。また、鉛直変位と接地圧の関係は、均し精度の相違により大きく2グループに分けることができるようである。1つは、均し精度±5cmと±10cmのグループ（以下、均し精度が良いグループと呼ぶ）、他方は均し精度が±20cmと±30cmのグループ（以下、均し精度が悪いグループと呼ぶ）である。この2グループに分けて、この図をあらためて眺めると、载荷の初期段階、すなわち接地圧が34kPaから120kPaに移行する途中で、

両グループの鉛直変位に大きな差が発生している。さらに接地圧が大きくなると、両グループの接地圧の増加に対する鉛直変位の増加率はほぼ同程度になることがわかる。

载荷の初期段階において、均し精度が悪いグループの鉛直変位が著しく増加するのは、均し精度が悪い場合、マウンド天端付近の捨石の組み合わせが弱く、天端付近の捨石が回転したり下方へ移動するためであると考えられる。従って、均し精度が悪い場合の载荷初期における

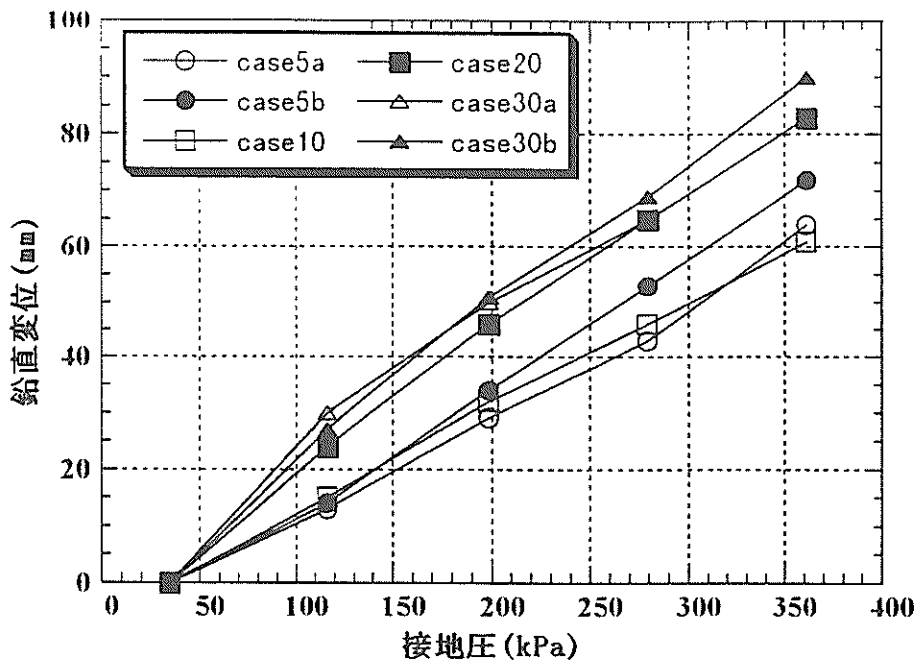


図-14 鉛直変位と接地圧の関係

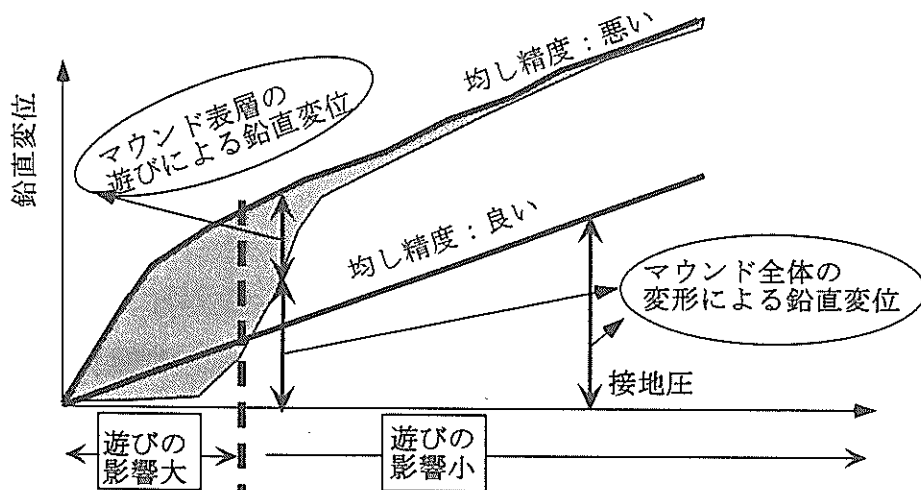


図-15 マウンド表面部分の遊びがマウンドの鉛直変位に及ぼす影響の概念図

マウンドの鉛直変位は、マウンド天端部分のマウンドの、いわゆる「遊び」によるものと考えられる。鉛直接地圧の増加にともないマウンド天端付近の「遊び」が解消された後は、マウンドは全域にわたって均等に圧縮すると考えられる。そのため、鉛直変位と接地圧の関係は線形的になると推定される。一方、均し精度が良い場合、マウンド天端付近の捨石は載荷前から堅固に組み合っており、マウンド天端付近の「遊び」に起因する鉛直変位がほとんど発生しないと考えられる。そのため、載荷初期から接地圧が大きくなるまで、鉛直変位と接地圧の関係は線形的であると推定される。

マウンドの遊びの影響をわかりやすく説明するために、マウンドに鉛直荷重を作用させた際に発生するマウンドの鉛直変位の要因の概念図を図-15に示す。均し精度が悪い場合、マウンド天端の鉛直変位は、マウンド表層付近の「遊び」によるもの（図中の灰色ハッチ部分）と、マウンド全域の圧縮による鉛直変位とに分類できる。「遊び」に起因する鉛直変位は、接地圧レベルが小さい範囲で相対的に大きく、接地圧レベルが大きくなると、「遊び」による鉛直変位は相対的に小さくなると考えられる。

以上の結果から、マウンドに鉛直荷重のみを作用させた場合、マウンドの鉛直変形特性が均し精度により異なることが明らかになった。しかしながら、実験の結果、均し精度±5cmと±10cmにおける鉛直変位と接地圧の関係における相違はほとんど見受けられなかった。従って、鉛直荷重のみがマウンドに作用する荷重条件のもとでは、均し精度を±5cmから±10cmに緩和しても、マウンドに上載される構造物に大きな変形等を引き起こすようなことは無いと考えられる。一方、均し精度が±20cmと±30cmの場合、均し精度が±5cm及び±10cmの実験ケースに比較して、明らかにマウンドの鉛直変形特性が異なっており、均し精度の大幅の緩和については細心の注意が必要である。しかしながら、均し精度が良いグループと悪いグループの絶対的な鉛直変位の差は、層厚2mに対して約2～3cmと非常に小さく、かつ接地圧が大きい範囲では、その鉛直変形特性は両グループで同様である。このことから、マウンドの鉛直変形特性に限定してみた場合、接地圧レベルが小さい範囲を除けば、均し精度の緩和の影響は小さいことが予想される。しかしながら、両均し精度のグループの最終的な鉛直変位の差が約2～3cmであることから初期に存在していた±10cm以上の不陸は、今回の条件下では完全には解消されていないと考えられる。従って、不陸（凹凸）の解消という観点で見ると、初期不陸の影響は接地圧が大きい

レベルでも残存していることになる。

マウンド天端の載荷前における初期不陸（凸凹）が、どのようなメカニズムで、どれくらいの時間をかけて、そしてどの程度解消されるのかについては、さらに慎重な検討が必要である。今回の実験の場合、載荷ブロックをマウンドに載せた直後に、初期不陸がどの程度解消されたかについてはデータを得ることができなかった。鉛直接地圧が小さいほどマウンド天端付近の「遊び」による影響が大きくなると考えられるので、接地圧が小さいレベルでの初期不陸の解消程度を検討する必要がある。また、今回の実験で使用したマウンドは層厚が2mと小さく、かつマウンド直下の基礎地盤は非常に堅固であった。従って、実験マウンドは非常に堅固な部類に入ると考えられる。マウンドが堅固であればあるほどマウンドの変形量は抑制されるため、初期不陸の解消という観点から見ると、今回のマウンドは不利な実験条件である。一方、基礎地盤が軟弱な場合やマウンドの層厚が大きい場合は、マウンド全体の変形量も大きくなり、初期不陸の解消が生じやすい有利な条件にあると考えられる。従って、基礎地盤の条件やマウンド層厚が初期不陸の解消に及ぼす影響についても今後検討する必要がある。さらに、今回の実験では、マウンド天端面に鉛直方向の接地圧を単調的に作用させたが、実際のマウンドの設置状況下ではケーソンが波浪による水平力を受け、マウンドは繰り返し偏心荷重を受けることになる。このため、実験と実際の載荷条件は大きく異なると言える。従って、長期間にわたる繰り返し偏心荷重が初期不陸の解消に及ぼす影響についても別途検討が必要である。また、実際の現地ケーソンは経年的に沈下する傾向にある。この沈下は、基礎地盤部分の圧密等による沈下とマウンド部分の沈下に起因すると考えられるが、このような経年的な沈下にもない初期不陸がどのように解消されるのかについても、今後検討すべき問題といえる。

(3) ケーソン底版と捨石の接触状況

a) 接触状況の概要

載荷前に載荷ブロックの底版に段ボール紙を貼り付け、その後ブロックを載荷すると、段ボール紙に載荷ブロック底版と捨石とが接触した跡が残る。その接触跡の数を接触点数とし各載荷段階毎に段ボールから読みとった。均し精度±5cm、±10cm、±20cm及び±30cmのケースにおける段ボールによる接触点数の測定状況を、接地圧ごとに写真-2 (case5a)、写真-3 (case10)、写真-4 (case20) 及び写真-5 (case30a) に示す。

いずれの均し精度のケースにおいても、接地圧が増加するにともない、接触点数も増加している。また、全体

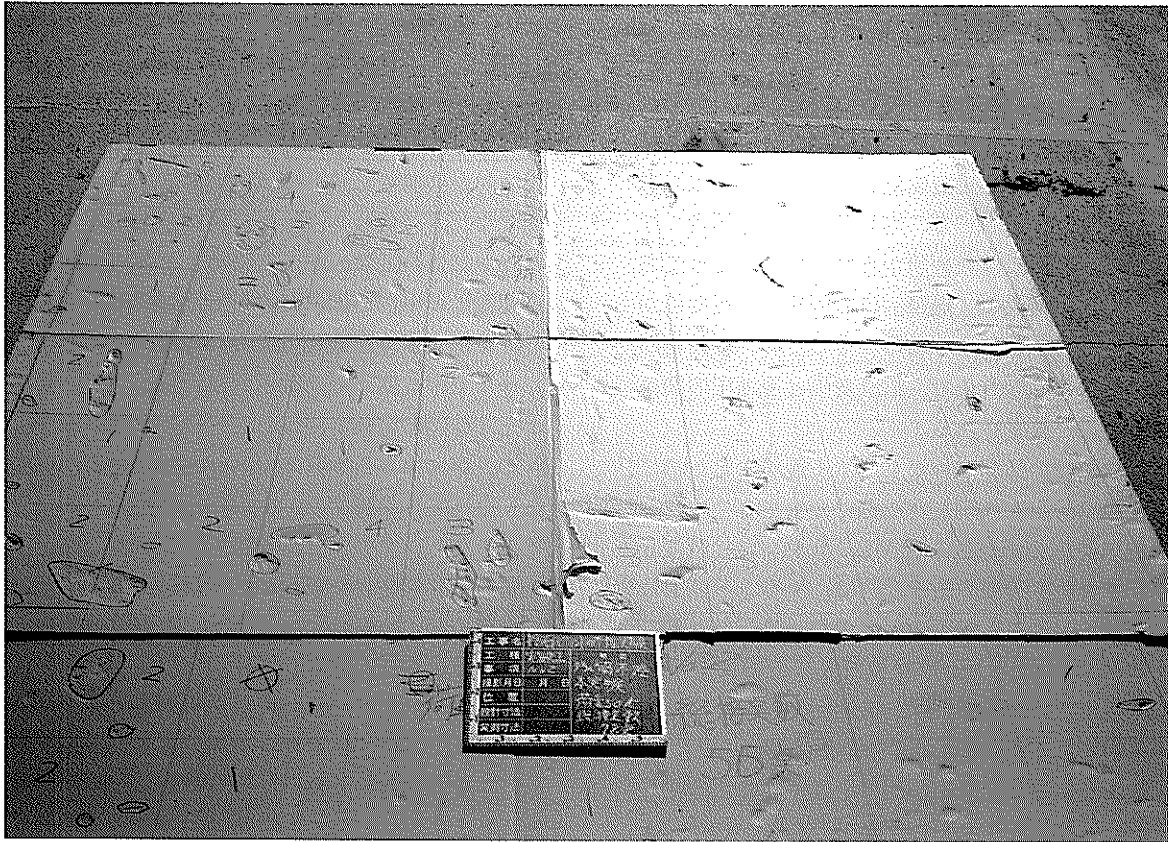


写真-2(a) 載荷底版と捨石の接触状況 (均し精度 $\pm 5\text{cm}$ (case5a)、接地圧 120kPa)

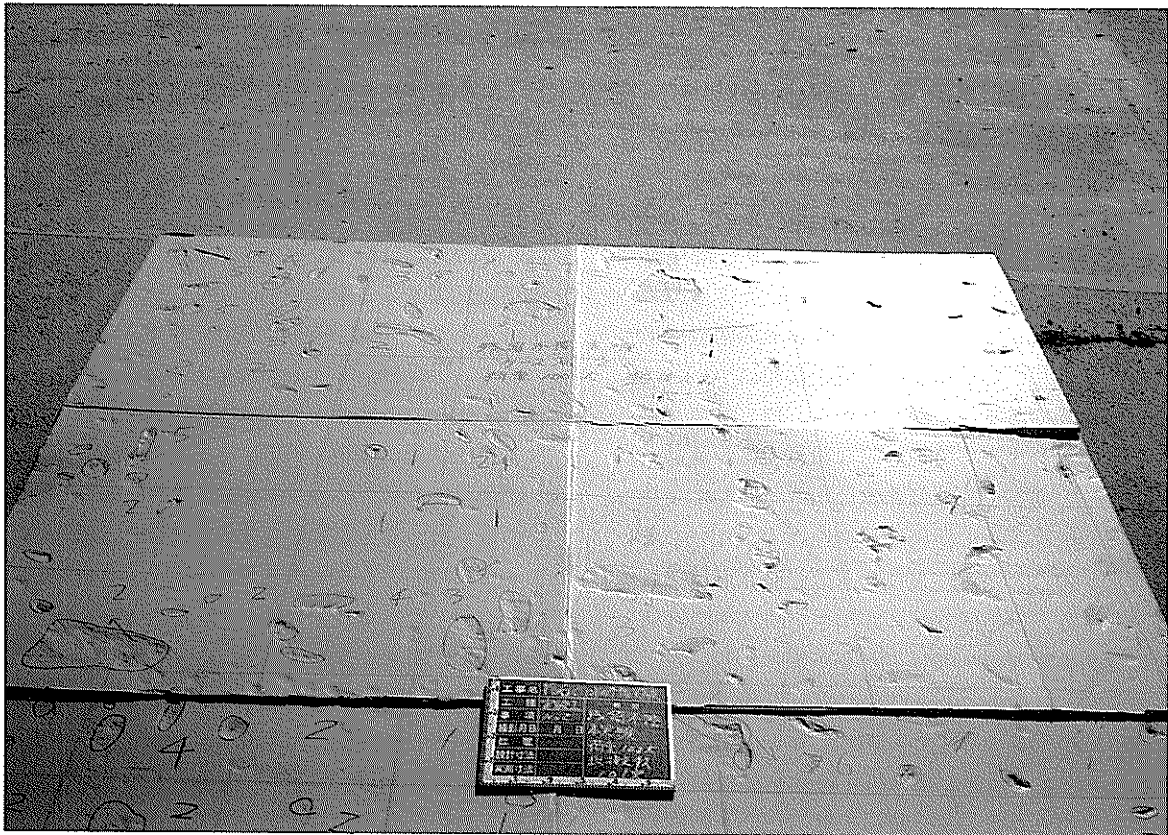


写真-2(b) 載荷底版と捨石の接触状況 (均し精度 $\pm 5\text{cm}$ (case5a)、接地圧 200kPa)

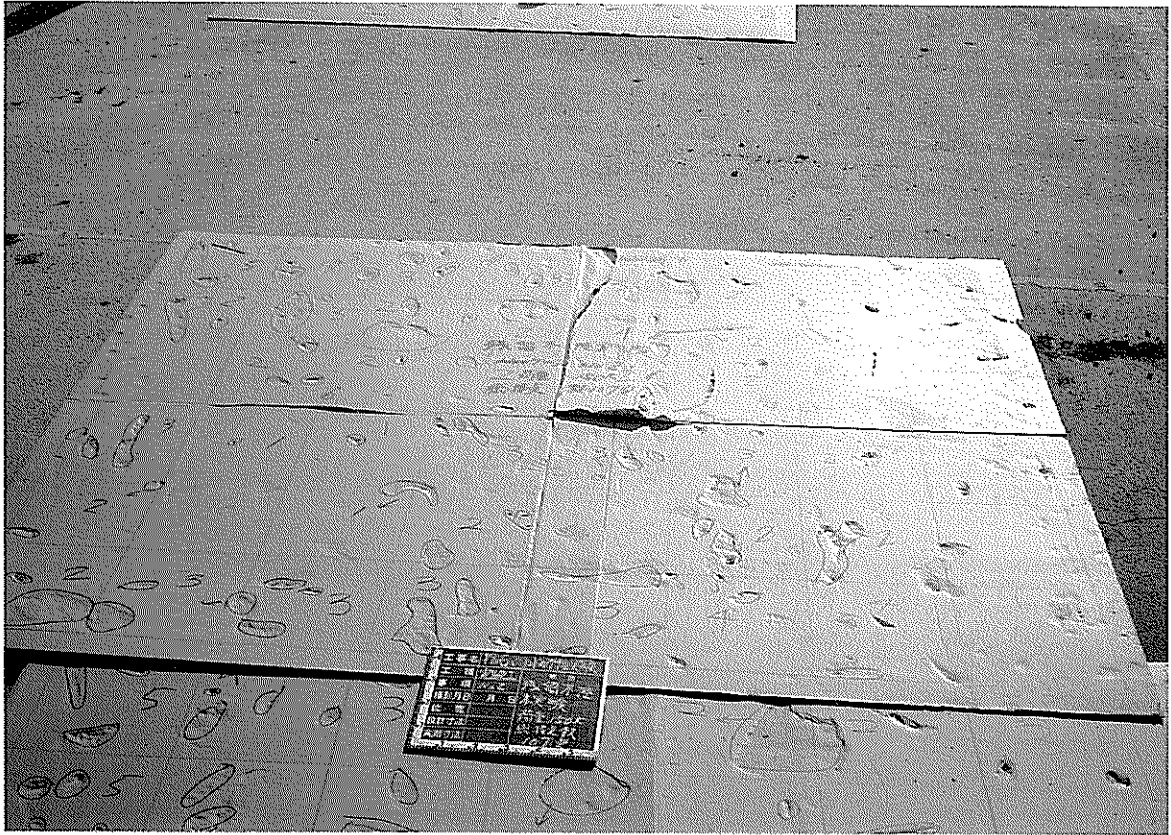


写真-2(c) 載荷底版と捨石の接触状況（均し精度±5cm(case5a)、接地圧280kPa）

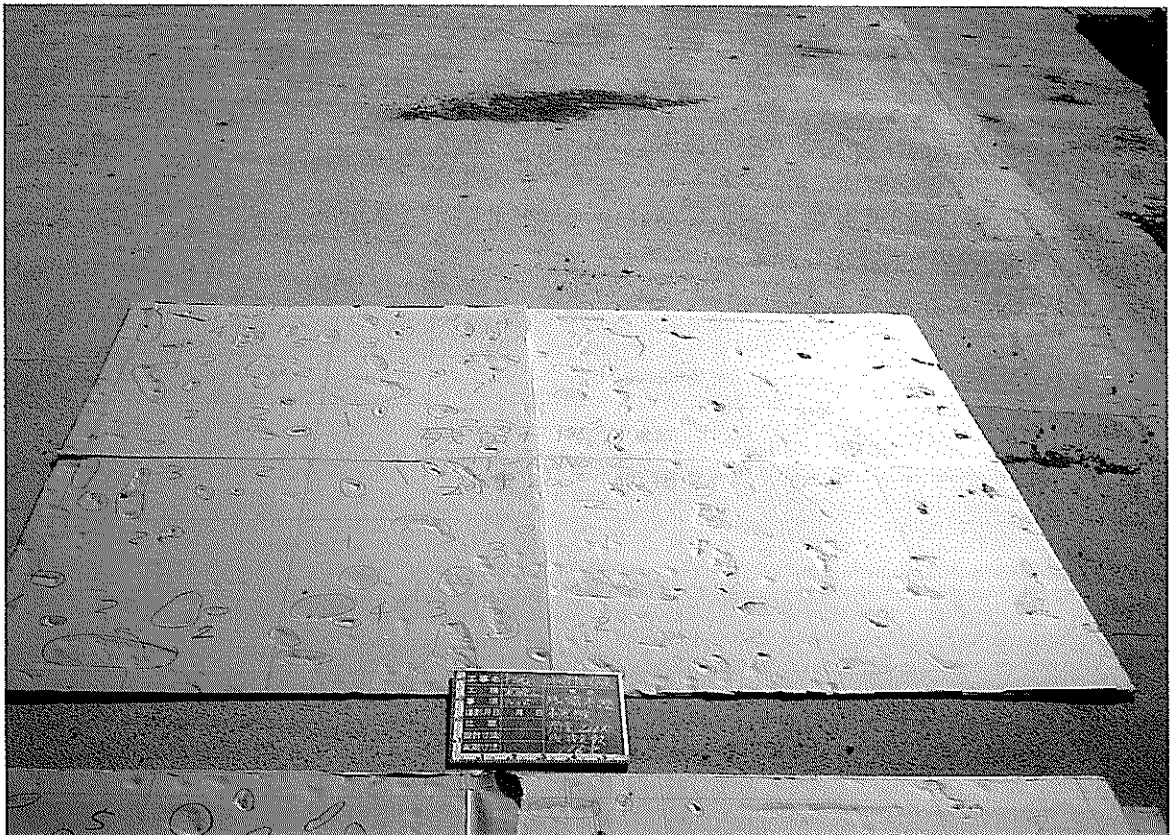


写真-2(d) 載荷底版と捨石の接触状況（均し精度±5cm(case5a)、接地圧360kPa）

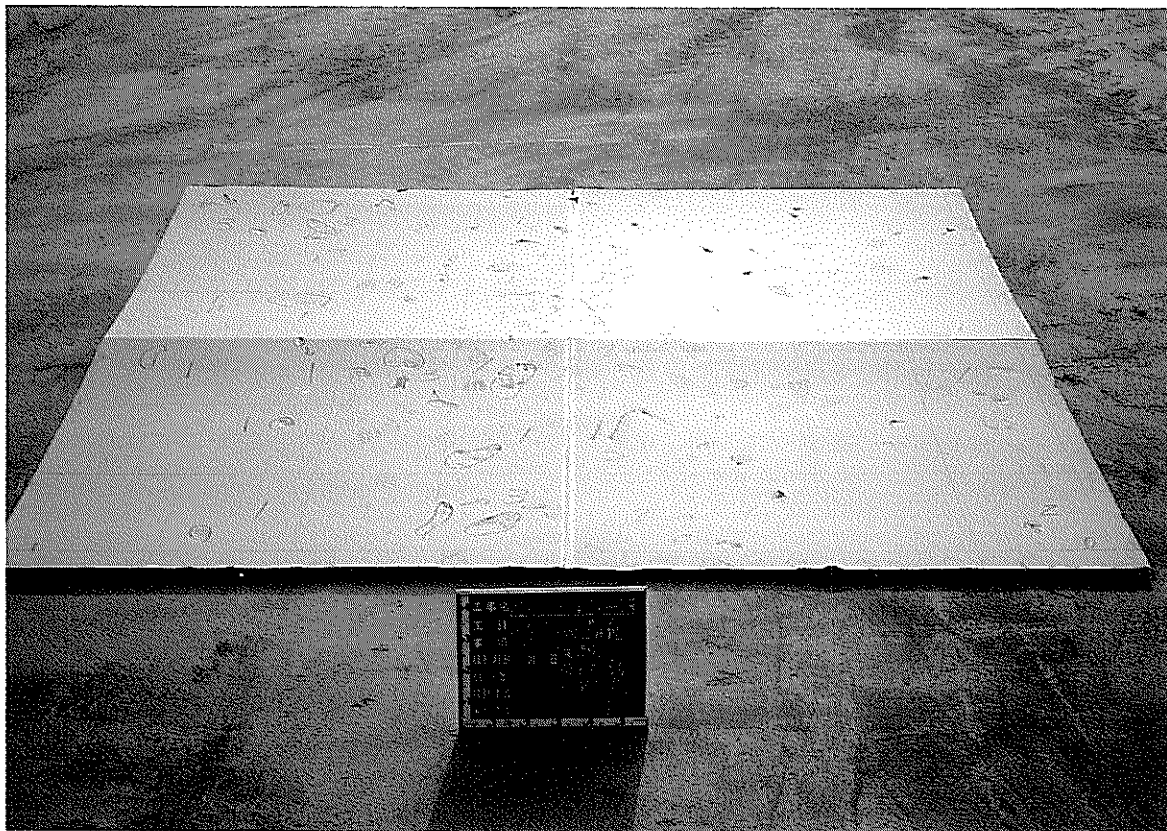


写真-3(a) 荷重底版と捨石の接触状況（均し精度±10cm(case10)、接地圧120kPa）

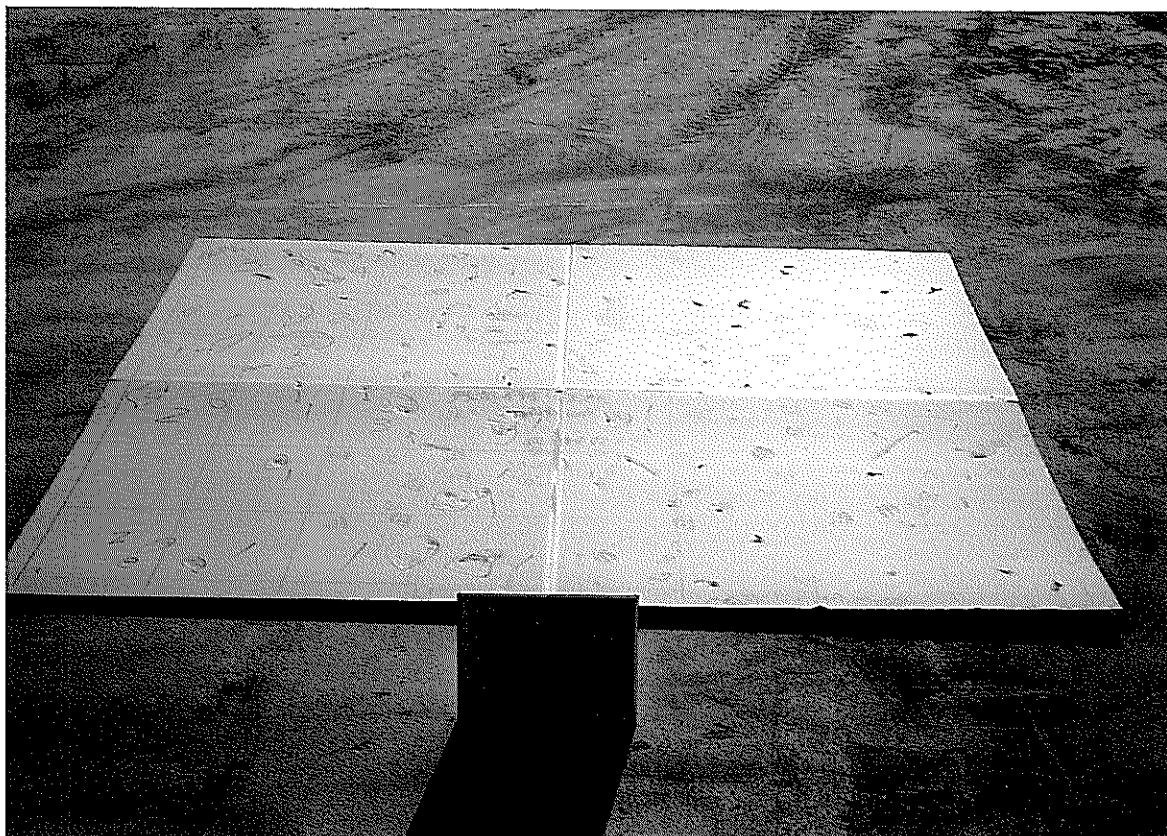


写真-3(b) 荷重底版と捨石の接触状況（均し精度±10cm(case10)、接地圧200kPa）

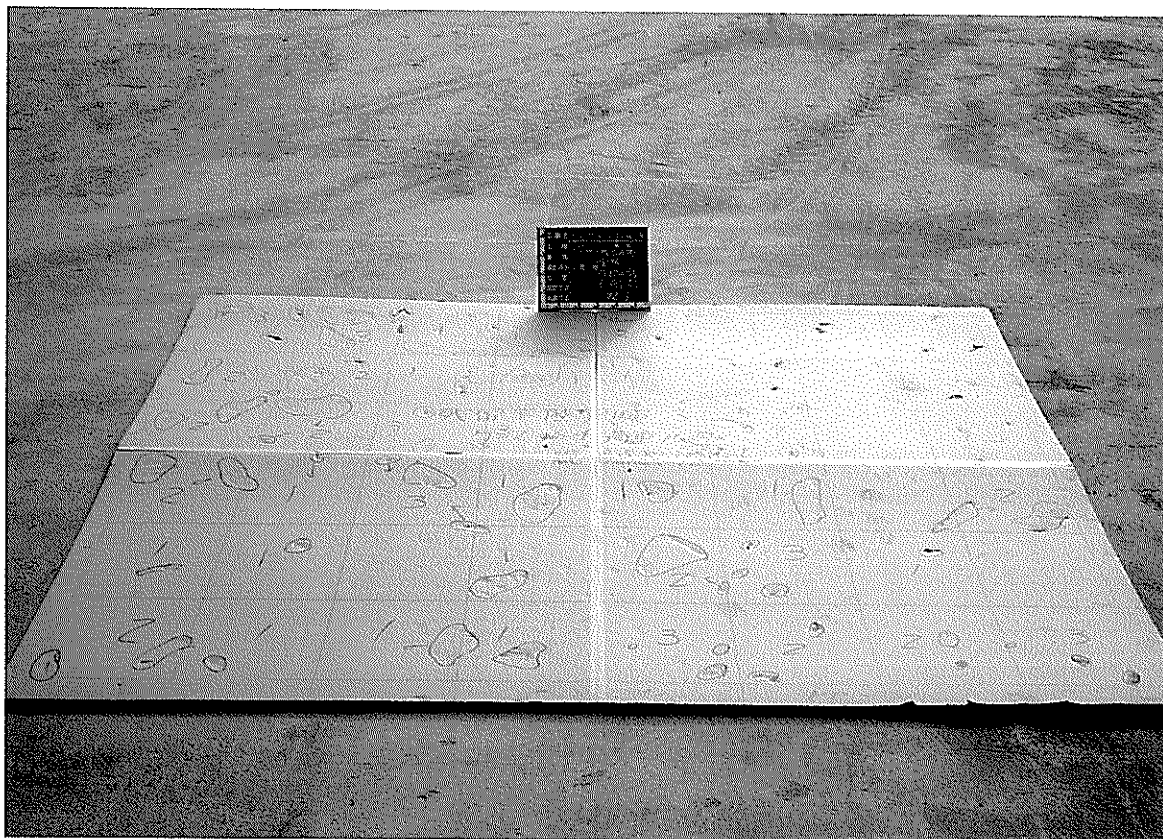


写真-3(c) 載荷底版と捨石の接触状況（均し精度±10cm(case10)、接地圧280kPa）

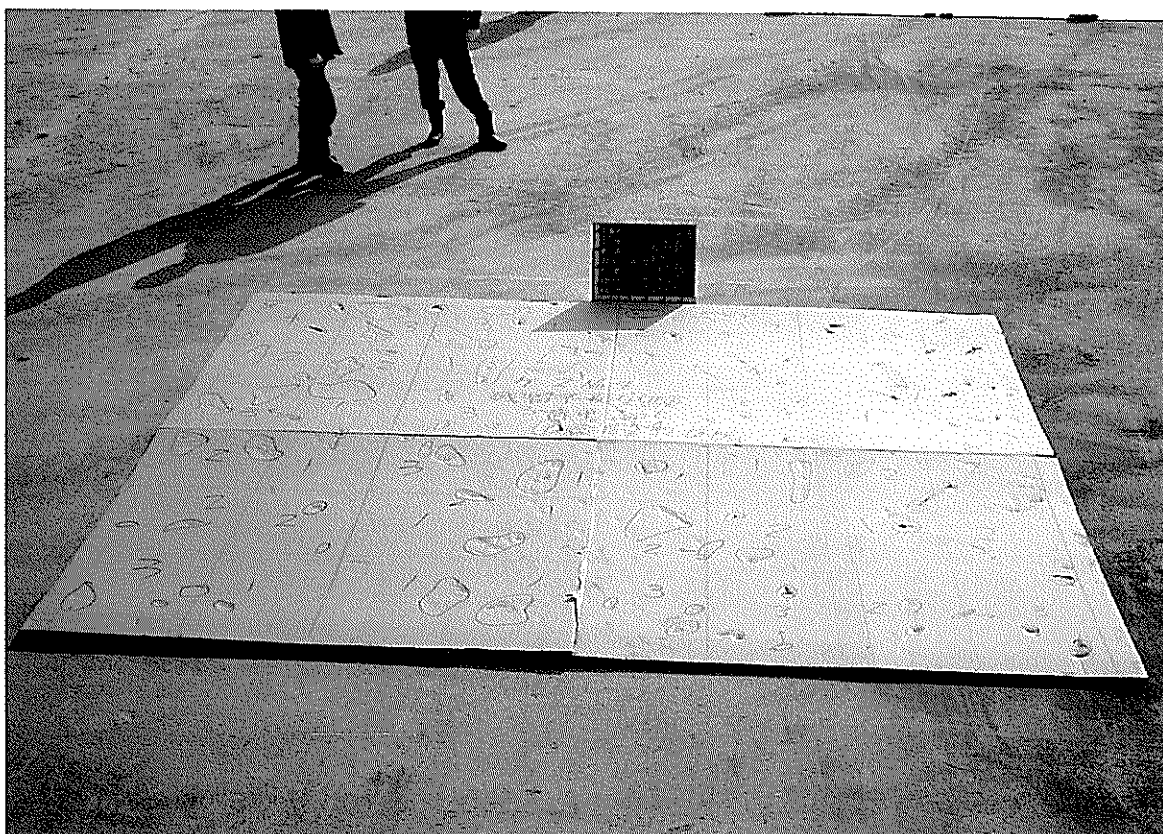


写真-3(d) 載荷底版と捨石の接触状況（均し精度±10cm(case10)、接地圧360kPa）



写真-4(a) 載荷底版と捨石の接触状況（均し精度±20cm(case20)、接地圧120kPa）

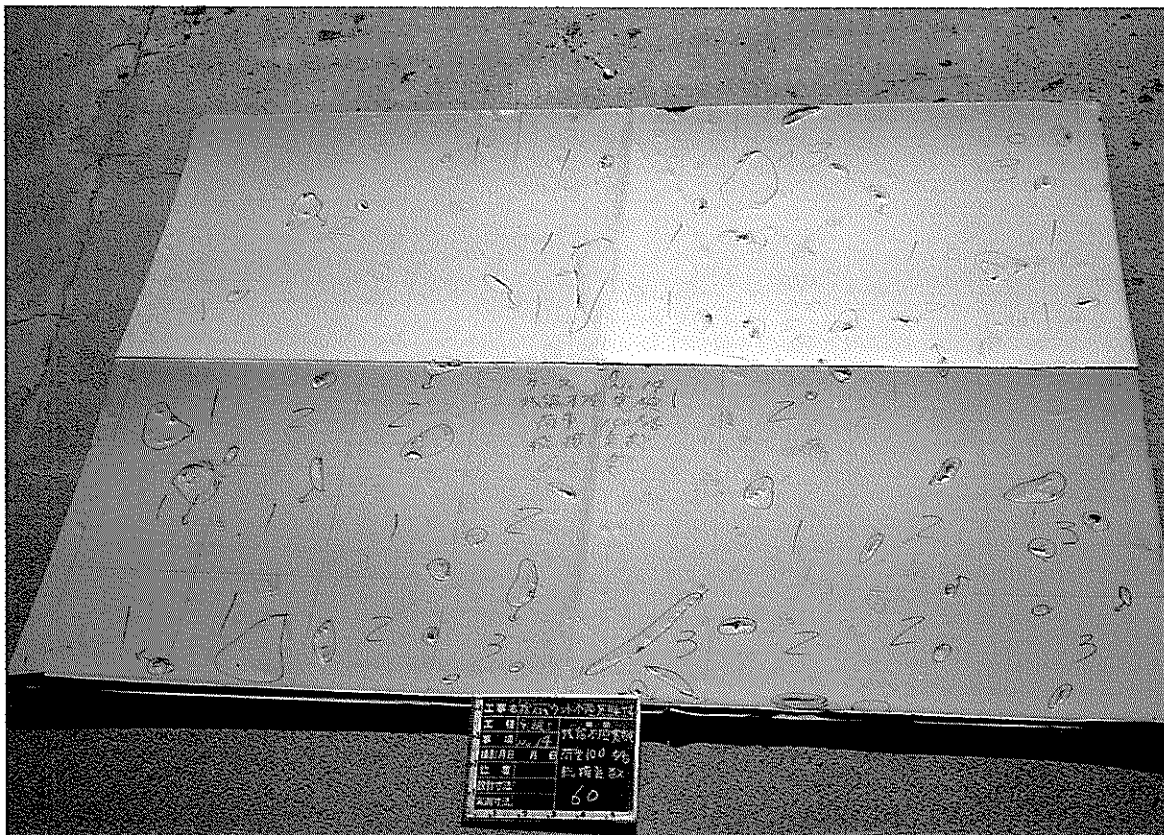


写真-4(b) 載荷底版と捨石の接触状況（均し精度±20cm(case20)、接地圧200kPa）

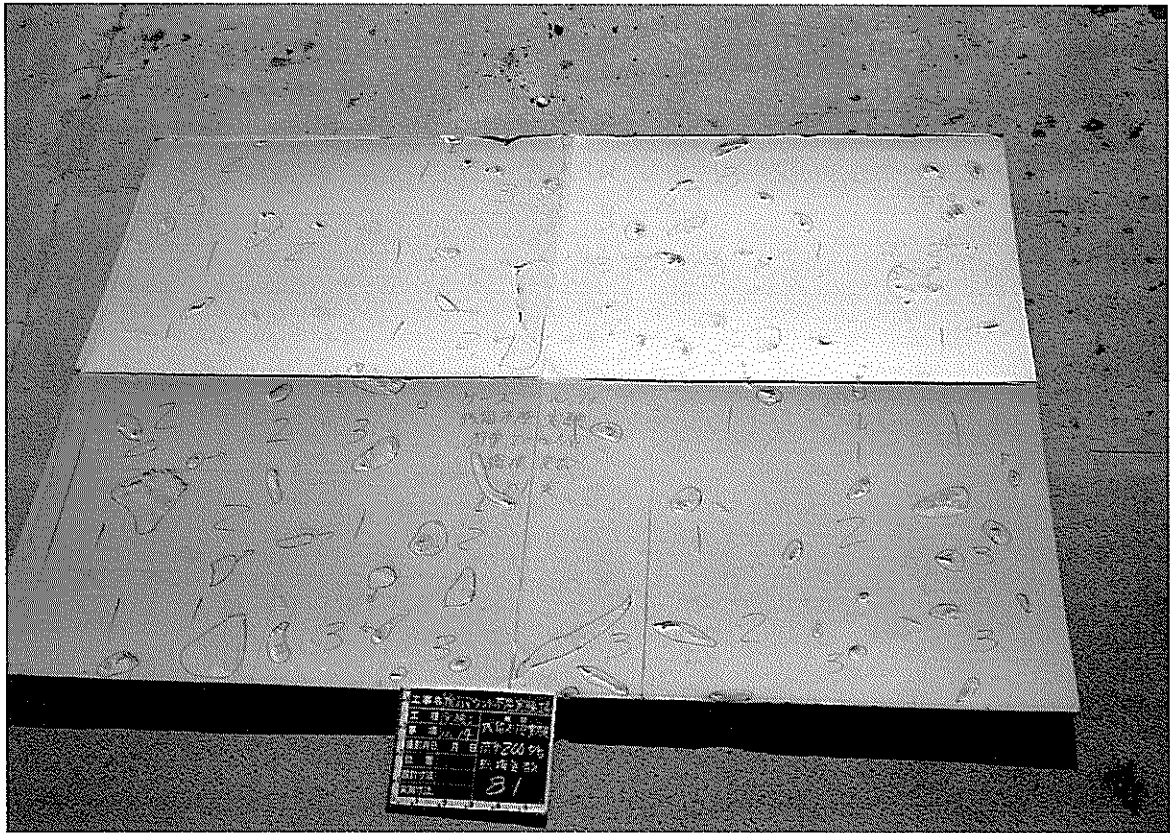


写真-4(c) 荷底版と捨石の接触状況（均し精度±20cm(case20)、接地圧360kPa）

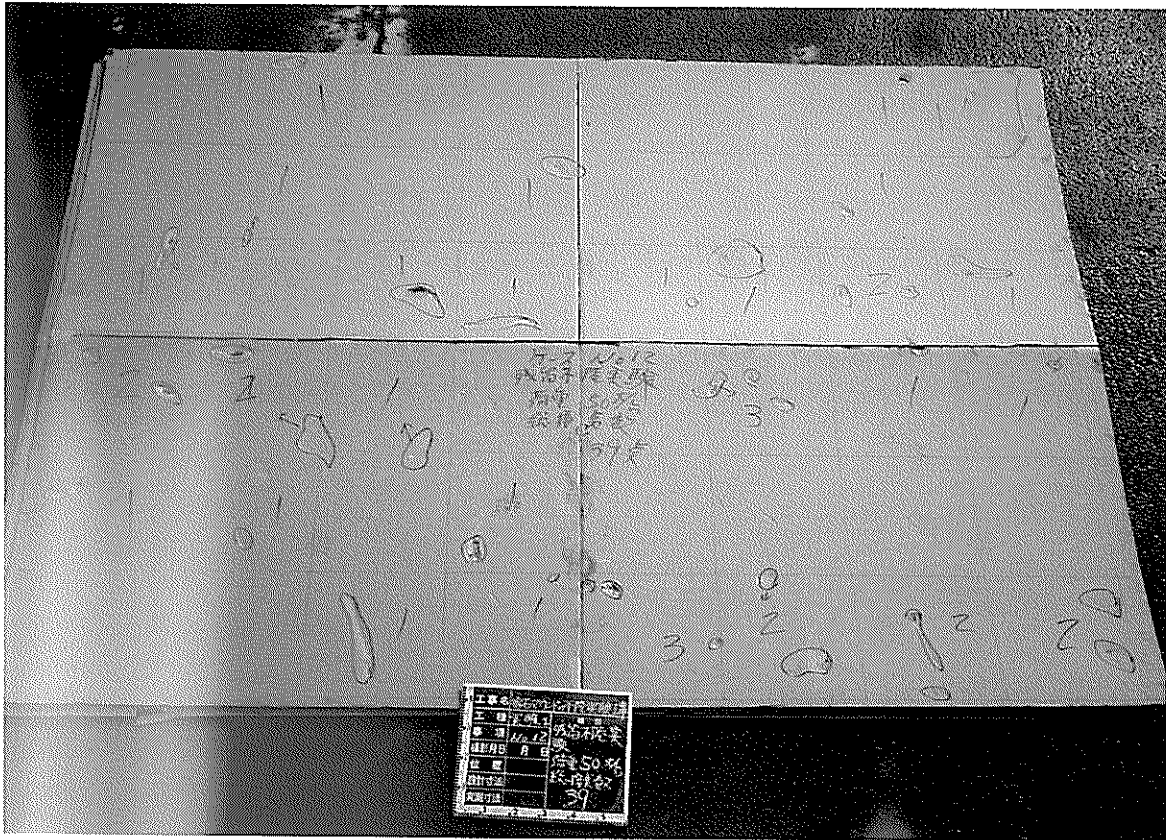


写真-5(a) 載荷底版と捨石の接触状況 (均し精度± 30cm(case30a)、接地圧 120kPa)

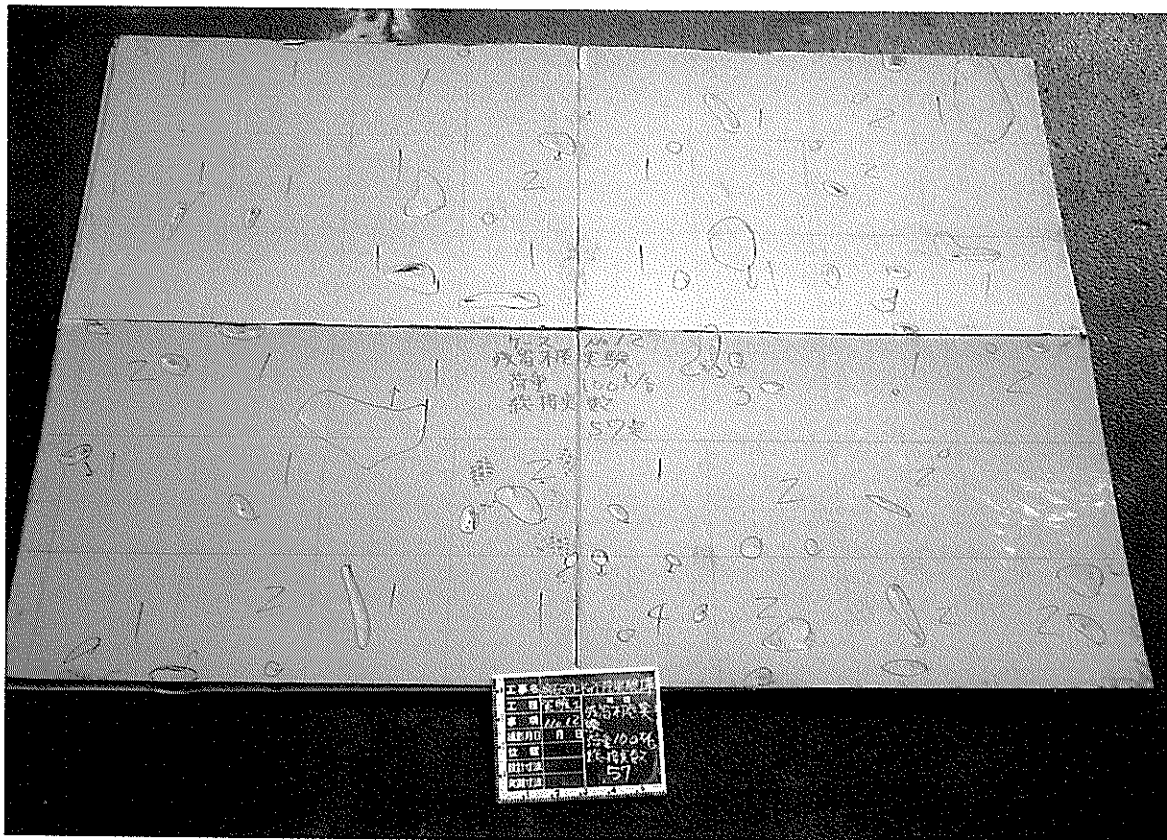


写真-5(b) 載荷底版と捨石の接触状況 (均し精度± 30cm(case30a)、接地圧 200kPa)

的な接触状況としては、一部に接触点が集中することなく底版の全域にわたって、概ね均等に接触点が存在しているようである。

しかし、同じ接地圧で比較すると、均し精度が悪くなると明らかに接触点数が少なくなる。従って、初期のマウンド天端面の不陸（凹凸）は、単に鉛直荷重をマウンドに作用させただけでは解消しないと言える。

b) 接触点数

荷重ブロック底版と捨石の接触点数と接地圧の関係を図-16に示す。いずれのケースにおいても、接地圧が増加すると接触点数も増加することがわかる。また、接触点数の接地圧に対する増加勾配は、接地圧が200kPaを越えると、やや小さくなる傾向にあり、接触点数の増加は遅減するようである。同じ接地圧レベルで比較すると、均し精度が悪いと接触点数が極端に少なくなっており、均し精度が接触点数に及ぼす影響は大きいことがわかる。また、接地圧レベルが大きくなっても、その大小関係は変わらず、かつ接触点数の差は保たれたままであることがわかる。従って、マウンドの初期不陸は、鉛直接地圧を単に作用させただけでは、容易に解消しないと言える。また、接地圧と鉛直変位の結果と同様に、接触点数と接地圧の関係においても、均し精度±5cm及び±10cmのグループと均し精度±20cm及び±30cmのグループとに分けることができる。

図-17に、均し精度±5cmの接触点数（case5aとcase5bの平均）を基準とした場合の各均し精度における接触点数の割合（%）を示す。均し精度が±20cm及び±30cmの場合、均し精度±5cmのケースに比較して、約6～7割程度の接触点数となっている。均し精度±10cmについては、約8～9割程度の接触点数となっている。この均し精度の相違による接触点数の差が、どの程度ケーソン底版に発

生ずる曲げモーメントに影響を及ぼすのかが、次章の検討ポイントとなる。

c) 接触点の分布パターン

図-18に、4m×3mの荷重ブロックの底版を50cm×50cmに分割し、その区画内（以下、50cm格子と呼ぶ）の接触点数を色分けして示した図を示す。この図より、均し精度及び接地圧に応じた捨石と底版との接触点の分布パターンについて考察する。

各ケースとも接地圧の増加に伴い、50cm格子内で全く接触していない区画（図中の無印の区画、以下非接触50cm格子と呼ぶ）が減少して行く様子がわかる。均し精度±5cm及び±10cmのケースでは、接地圧が約200kPa以上で、非接触50cm格子はほとんど無くなっており、接触点の分布は概ね均一であると言える。一方、均し精度±20cm及び±30cmのケースでは、接地圧が小さい範囲では、非接触50cm格子が非常に多く、不均一な接触分布をしている。接地圧が約360kPaの場合においても、非接触50cm格子は15～20%程度存在しており、接触点分布の不均一性が残っていると言える。次章におけるケーソンの底版曲げモーメントの検討では、これらの現実に応じた接触状況を有効に利用することがポイントとなる。

さらに、各荷重段階における50cm格子内の接触点数の増減について調べるために、図-19に荷重前後の50cm格子内の接触点数の増減について同様の分布パターンを示す。図中において、荷重前後で50cm格子内の接触点数が増加した区画を赤系色で、接触点数が減少した区画を青系色で示している。また、荷重後に50cm格子内の接触点がゼロになった区画を×印で、荷重後に接触点が新たに発生した区画を太線の□印で示している。この図より、いずれのケースにおいても、荷重ブロックに荷重を作用させると、新たな接触が発生する区画があらわれ

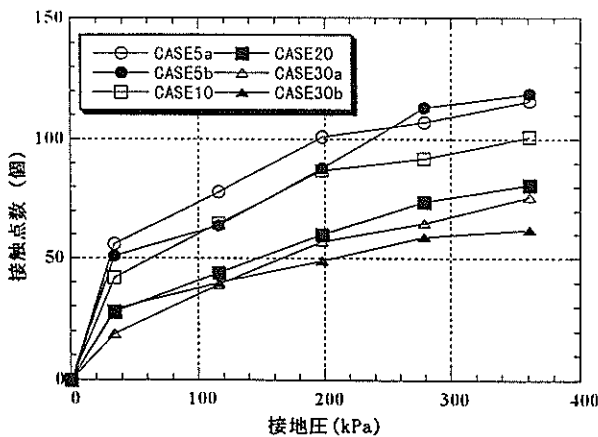


図-16 荷重ブロックの接触点数と接地圧の関係

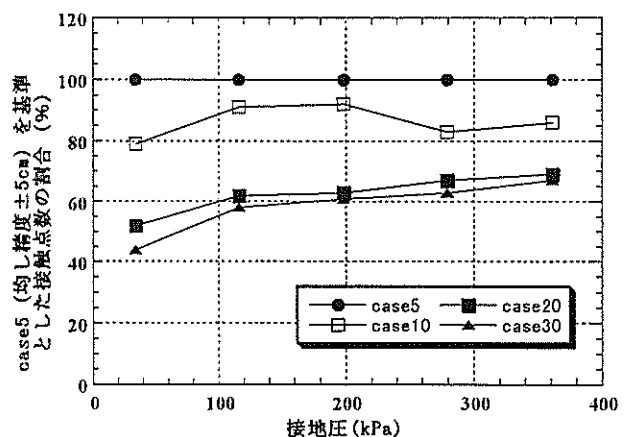


図-17 均し精度±5cmを基準とした場合の各均し精度における接触点数の割合と接地圧の関係

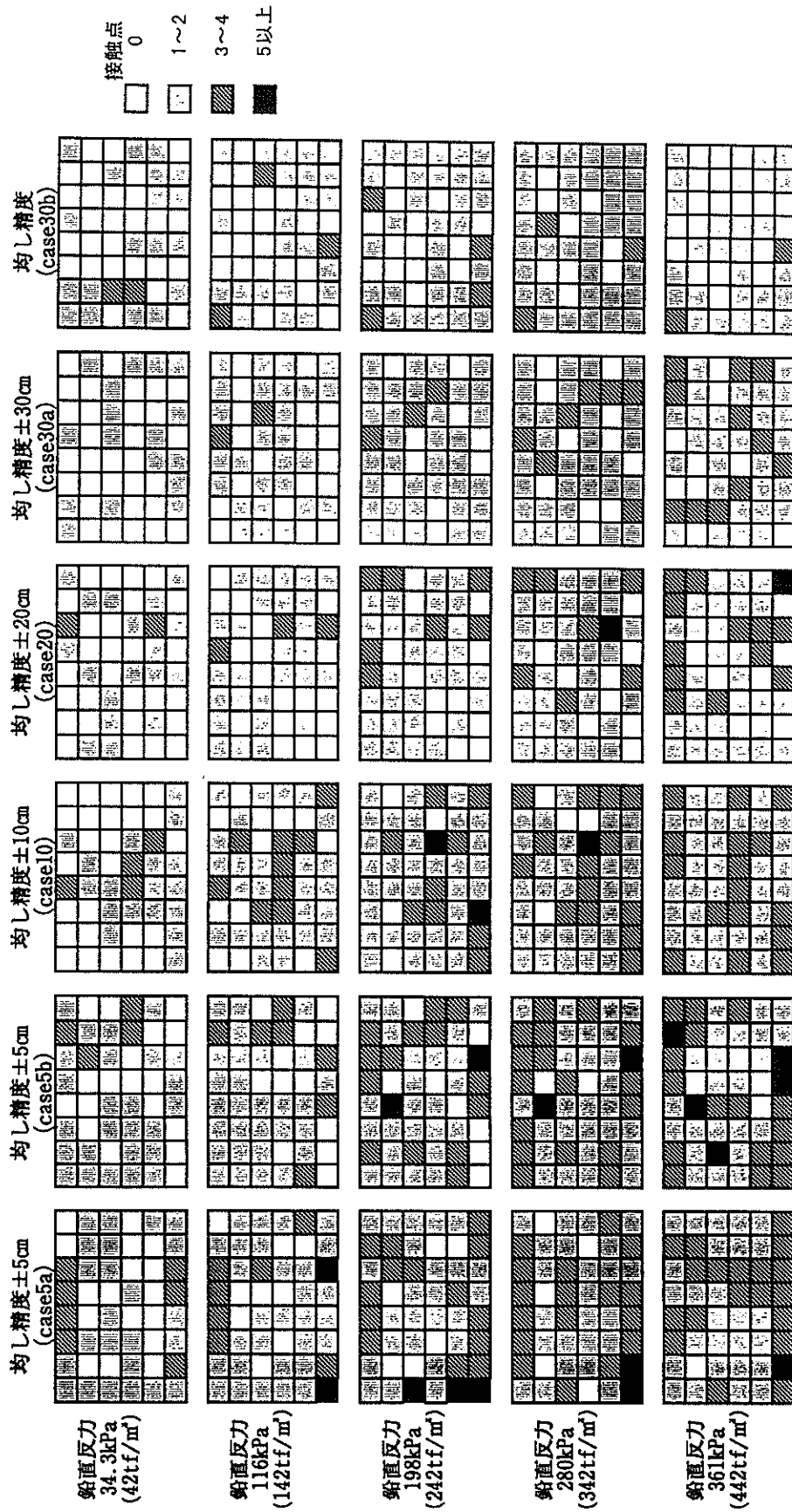


図-18 50cm 格子内の接触点数の分布パターン

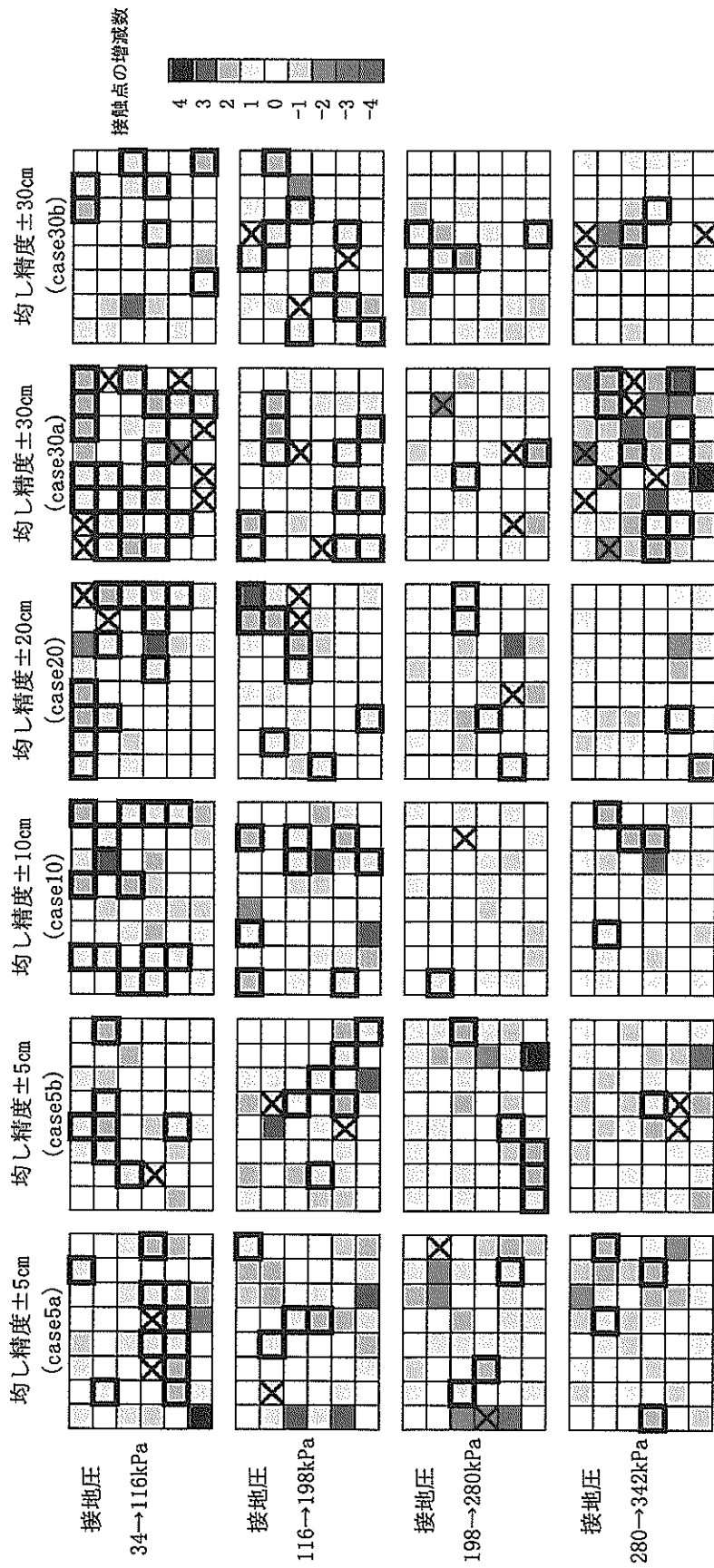


図-19 50cm 格子内の増減接触点数の分布パターン

るが、同時に一度接触していた捨石が底版から離れる区画もあることがわかる。本図では、50cm 格子内における増減接触点数について整理しているが、個々の接触点について見た場合、捨石と底版の接触の発生及び消滅は、さらに頻繁に生じているものと考えられる。なお、均し精度が±30cm については2ケースの実験結果が得られているが、両者の増減接触点の分布パターンは大きく異なる。case30a の場合、接触の発生及び消滅は頻繁に生じており、載荷ケーソンを支持する捨石は載荷段階ごとに大きく変化しているものと考えられる。一方、case 30b の場合、接触の発生及び消滅は比較的少ないものとなっており、載荷ケーソンを支持する捨石の入れ替わりが少ないと考えられる。同じ均し方法及び均し精度のマウンドにおける増減接触点数のパターンが著しく異なる理由や、その相違がマウンド支持力や滑動抵抗に及ぼす影響等については不明であり、今後の課題と言える。

4. 均し精度が底版断面力に及ぼす影響の評価

本章では、初めに均し精度がケーソン底版の1隔室に作用する曲げモーメントに及ぼす影響を評価できる解析手法を提案する。解析手法は、ケーソン底版と捨石との間で発生する離散的な荷重作用を考慮できるものである。

次に、提案した解析手法を利用して、大きく分類して以下に示す2項目の検討を行う。

①均し精度±5cm におけるマウンドからの反力を、設計で想定しているような等分布荷重として与えた場合と、3章の実験結果に示すような離散的な荷重が作用するとした場合との底版曲げモーメントの相違程度について検討する。この検討により、設計における底版

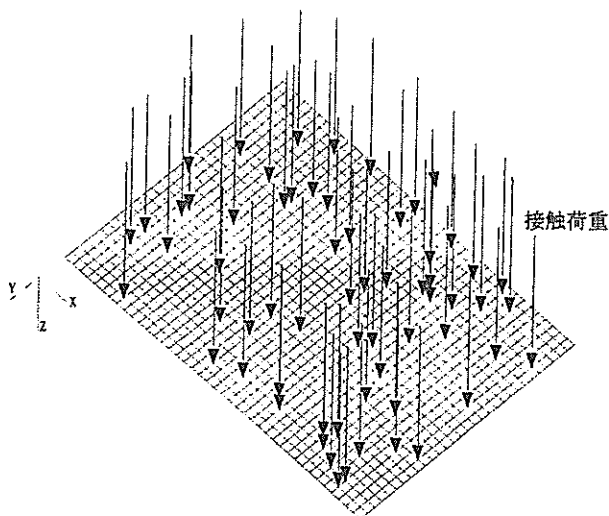


図-20 底版の FEM モデルの例

曲げモーメントの算定方法の妥当性の評価を行う。

②均し精度を±5cm から±10cm、±20cm 及び±30cm へと緩和した場合の底版曲げモーメントの増加程度について評価する。これにより、均し精度の緩和の可能性について検討を行う。

最後に、均し精度の底版断面力に及ぼす影響を合理的に実設計に反映させるために、安全係数の導入を提案する。

4.1 解析手法

(1) 解析手法の骨子

実験結果から、均し精度を緩和すると底版と捨石との接触状況が変化することが明らかになっている。従って、均し精度がケーソン底版の曲げモーメントに及ぼす影響を評価するにあたっては、接触状況を合理的に考慮できるようにすることがポイントになる。このため、本検討では、メッシュ間隔を小さくした有限要素法によりケーソン底版をモデル化し、その節点に離散的な接触荷重を作用させた線形静解析を行い、底版に発生する曲げモーメントを算定する(図-20)。

しかし、均し精度や載荷条件等の諸条件が同一であったとしても、底版と捨石との接触状況は非常にばらつきの大きい現象であると言える。従って、接触状況は確率的なモデルにより表現されるべきである。よって、本検討における底版曲げモーメントの算定では、図-20に示すように細かく要素分割された要素節点に離散的な接触荷重を作用させるが、荷重を作用させる節点位置や接触荷重の大きさを、ある確率モデルに基づき与えることとする。接触状況を表現する確率モデルを導入したため、底版の曲げモーメントの算定にあたっては、モンテカルロ法による繰り返し計算が必要となる。また、曲げモーメントの評価についても、確率的な評価が必要となる。

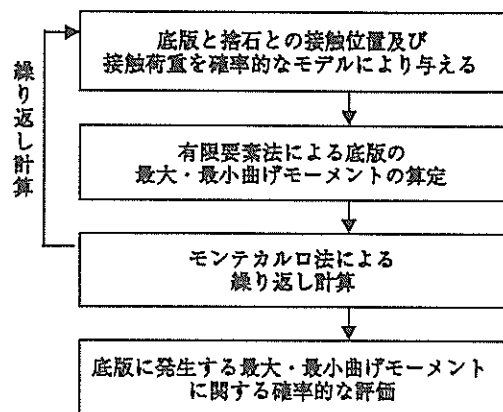


図-21 本解析手法の骨子

以上に示した検討の流れが本解析手法の骨子である。これを簡単なフローチャートとして図-21に示す。

(2) 接触状況を表現する確率モデル

接触状況を表現する確率モデル（以下、接触確率モデルと呼ぶ）については、どのような接触確率モデルが実現象を表現するのに相応しいのか、現段階では全く不明である。例えば、接触位置の分布については、接触確率モデルを構築するに十分な量の実験データが無い。また、個々の捨石等の接触荷重については、計測が実施された報告は無く、検討すべきデータ自体が無い。従って、今回の検討では、接触状況を表現する確率モデルについては、様々な仮定を設けて構築せざるを得ない。但し、3章に示した荷重ブロック底版と捨石との接触状況の測定結果を利用し、現実の接触状況を可能な限り反映するようにしている。

接触確率モデルの構築にあたっては、以下に示す項目について確率モデルを決定する必要がある。

- ①底版と捨石の総接触点数
- ②底版と捨石の接触位置の空間的な分布特性
- ③底版と捨石の接触荷重の大きさの分布特性
- ④底版と捨石の接触荷重の空間的な分布特性

本節では、本解析手法で仮定した接触確率モデルにおいて、上の①～④に示した項目をどの様にモデル化したかについて説明する。本解析手法で与えた接触確率モデルの概要を図-22に示す。

a) 底版と捨石の総接触点数

本解析では、底版と捨石との総接触点数は確率変数としては与えず、実験で得られた均し精度及び接地圧により決まる確定値として与えた。表-4に本検討で用いた単位面積当たり（1m²）の接触点数を示す。同一の均し精度において2回実験を実施しているケースについては（均し精度±5cm及び±30cm）、曲げモーメントの計算結果がより厳しい条件となるように接触点数が少ない方の値を採用した。底板面積を変化させた解析ケースの

底板のFEM解析における接触分布及び接触荷重の与え方

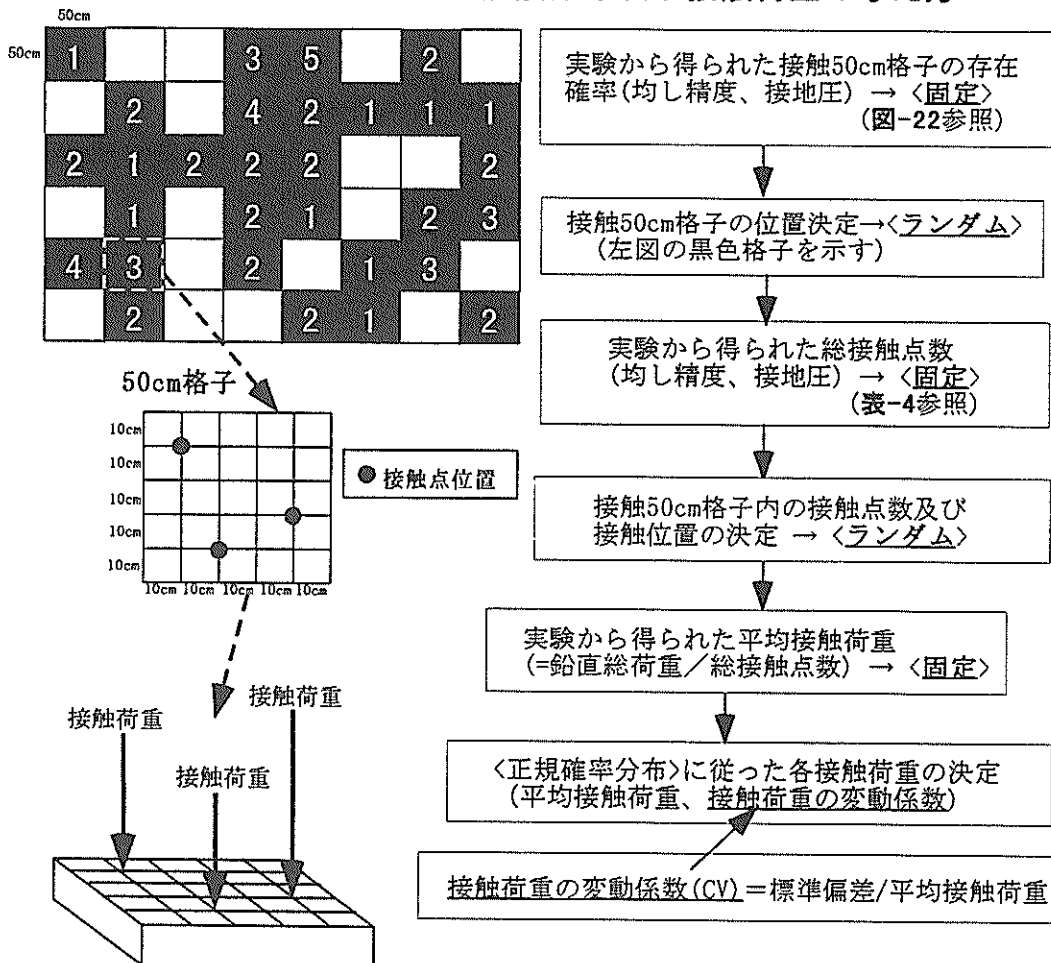


図-22 接触状況を表現する確率モデルの概要

表-4 単位面積当たり(1m²)の接触点数 (解析モデル)

接地圧 (kPa)	均し精度			
	±5cm	±10cm	±20cm	±30cm
34	4.3	3.5	2.3	1.6
116	5.3	5.4	3.7	3.3
198	7.3	7.3	5.0	4.1
279	9.4	7.7	6.2	4.9
361	9.9	8.4	6.8	5.2

場合は、単位面積当たり(1m²)の接触点数に隔室面積を乗じたものを、総接触点数としている。

総接触点数についても、本来ならば確率変数として与えるべきではあるが、本解析では均し精度の影響を明確に評価するために、敢えて確率変数とはしなかった。

b) 底版と捨石の接触位置

実験で用いた捨石の最小直径は約 10cm であったため、隣り合う接触位置は少なくとも 10cm 以上は離れていると仮定できる。従って、本解析では底版の FEM のメッシュサイズを 10cm × 10cm とした。底版の曲げモーメントの計算では、10cm 格子の節点に個々の捨石からの接触荷重を作用させるが、実験結果から底版を 50cm 格子に区切って見た場合、均し精度及び接地圧に応じてその接触パターンは異なっていた。従って、接触位置をランダムに与えることは適当でないと考えられる。

そこで、実験結果の 50cm 格子の接触分布パターンを利用して、接触位置の空間的な分布特性を表現する確率モデルを与えることにする。実験で得られた接触50cm格子(50cm×50cm区画内で一点以上の接触点を有する格

子)の全50cm格子数に対する割合(接触50cm格子の存在確率)と接地圧の関係を見ると(図-23)、均し精度±5cmの場合、接地圧100kPa程度において、接触50cm格子の存在確率は約70~80%、接地圧300kPa程度において約90%以上となっている。また、均し精度±30cmと±5cmにおける接触50cm格子の存在確率を比較すると、±30cmの方が約20%程度低い値となっている。接触位置を与える確率モデルには、これらの均し精度及び接地圧レベルに応じて決まる接触 50cm 格子の存在確率を取り入れた。接触 50cm 格子の存在確率は、図-23に示す値を固定値として与えるが、接触 50cm 格子の位置は図-22の左上図に示すとおり(図中の■で示した 50cm 格子)、モンテカルロの繰り返し計算毎にランダムに与える。これにより、実験結果から得られた全体的な接触パターンが解析上反映されるようになっていく。

次に、接触 50cm 格子内の接触点数(図-22の左上図の■で示した格子内の数字)を与えることになる。50cm 格子内の接触点数については、接触 50cm 格子のみがランダムに選択されるように乱数を発生させ、格子が選択された回数を接触 50cm 内の接触点数とする。乱数を発生させる回数は、実験で得られた総接触点数とする。さらに、接触 50cm 格子内における捨石の接触位置を定めるが、これについても乱数を発生させ、接触 50cm 内でランダムに 10cm 格子の FEM 要素節点に所定の数の接触荷重が発生するように定める(図-22の左中図)。以上に示した方法により、捨石の接触位置の空間的な分布を与える。

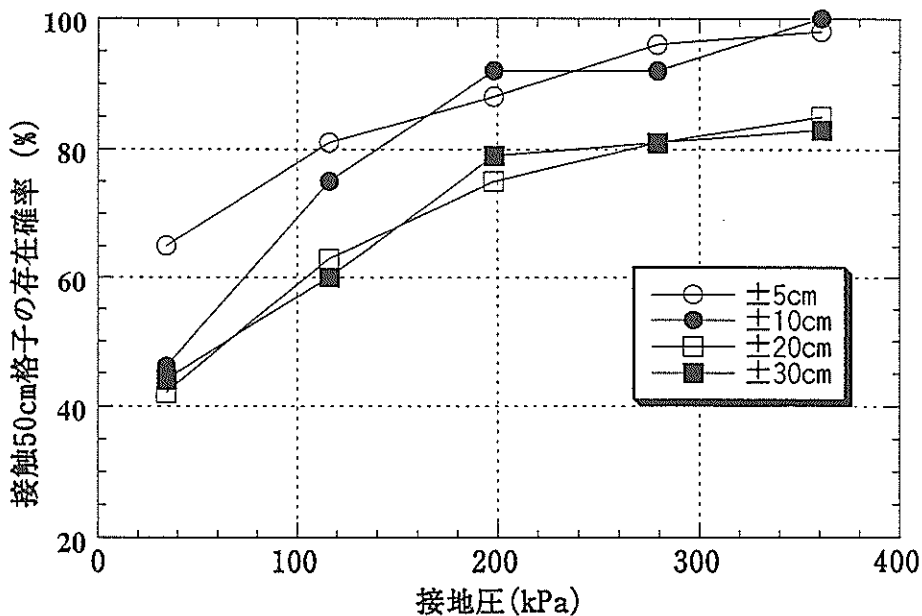


図-23 接触 50cm 格子の存在確率と接地圧の関係

c) 底版と捨石の接触荷重

底版と捨石の接触荷重については、荷重の大きさの分布特性と空間的な分布特性の2点について定める必要がある。これらの分布特性が変化すると、底版に作用する曲げモーメントも変化すると考えられるため、その分布特性の選定は慎重にすべきであるが、現段階ではそれらの分布特性については全く不明である。そこで、本検討では、接触荷重の大きさが従う確率分布は正規分布として与え、接触荷重の空間的な相関性については、無相関であると仮定した。

接触荷重の大きさが従う確率分布を正規分布として与えることにより、接触荷重のばらつき（不均一性）が表現され、接触荷重のばらつきの大きさが底版曲げモーメントに及ぼす影響を評価することができる。正規分布の場合、接触荷重の平均値と標準偏差を与えることにより分布形状が定義されるが、本検討では接触荷重の平均値については、底版全体に作用する総鉛直荷重を総接触点数で除した値（平均接触荷重）を固定値として与えた。また、接触荷重のばらつきの大きさについては、標準偏差を平均接触荷重で除した値である変動係数を指標として与えた。この変動係数を用いることにより、平均接触荷重で基準化された接触荷重のばらつきを表すことができる。以下、ここで定義した変動係数を、接触荷重の変動係数と呼ぶ。

以上に、本検討で適用した接触状況を表現する確率モ

デルを示したが、これはあくまでも試行的に適用したものであり、今後、より妥当な確率モデルの適用が必要であると考えている。

4. 2 解析の諸条件及び評価対象

今回の検討における解析条件の一覧を表-5に、解析ケースの一覧を表-6に示す。解析ケースの選定に当たっては、均し精度の影響を評価するために±5、10、20及び30cmの4種類の均し精度を対象とした。また、接触荷

表-5 計算条件の一覧

底版サイズ	(長方形) 4m×3m、 (正方形) 3m×3m、4m×4m、5m×5m	
境界条件	四辺固定	
底版のメッシュサイズ	10cm×10cm	
底版の物性	材料	コンクリート
	版厚	0.3m
	ヤング率E	2.65×10 ⁷ kPa (2.7×10 ³ kg/m ²)
	ポアソン比ν	0.1667
接地圧	200、360kPa	
モンテカルロ 試行回数	50回	
接触荷重の 変動係数(CV)	0.0、0.15、0.3、0.45	
評価項目	X方向最大曲げモーメント（版中央）、M _{x_max}	
	X方向最小曲げモーメント（版端部）、M _{x_min}	
	Y方向最大曲げモーメント（版中央）、M _{y_max}	
	Y方向最小曲げモーメント（版端部）、M _{y_min}	

表-6 解析ケースの一覧

載荷版 サイズ	接触荷重の 変動係数	接地圧360kPa				接地圧200kPa			
		均し精度(cm)				均し精度(cm)			
		±5	±10	±20	±30	±5	±10	±20	±30
3m×3m	0								
	0.15								
	0.3								
	0.45	●	●	●	●	●	●	●	●
4m×4m	0								
	0.15								
	0.3								
	0.45	●	●	●	●	●	●	●	●
5m×5m	0								
	0.15								
	0.3								
	0.45	●	●	●	●	●	●	●	●
3m×4m	0	●			●				
	0.15	●			●				
	0.3	●			●				
	0.45	●	●	●	●				

注) ●：今回報告の検討対象とする計算ケース

重の大きさのばらつきが底版曲げモーメントに及ぼす影響を評価するために、0.0、0.15、0.3 及び 0.45 の 4 種類の接触荷重の変動係数を対象とした。底版の形状については、底版の辺長比の影響を検討するために、正方形及び長方形（底版サイズ：3m × 4m）を対象とした。また、隔壁面積の影響を把握するために、正方形底版については、底版サイズが 3m × 3m (9m²)、4m × 4m (16m²) 及び 5m × 5m (25m²) の 3 種類の隔壁面積を対象とした。

底版の曲げモーメントの算定における底版周辺の境界は全て固定条件とした。底版の要素分割サイズは 10cm × 10cm とした。底版の厚さは 0.3m、材料はコンクリートとした。コンクリートのヤング率、ポアソン比等は表中に示す値を用いた。底版に作用する鉛直総荷重を底版面積で除した鉛直接地圧は、3 章で示した実験における接地圧と同じ、200kPa 及び 360kPa の 2 種類を対象とした。モンテカルロの繰り返し試行回数は 50 回とした。

有限要素法については、市販のプログラムである MSC/NASTRAN を利用した。底版のモデル化には、平面要素を用いた。底版の曲げモーメントは、底版要素の節点に離散的な鉛直接触荷重を与えた条件における線形静解析により算定した。座標軸は、図-20に示すとおり長方形断面における短辺方向を X 軸、長辺方向を Y 軸とした。

4.3 解析結果及び考察

(1) 解析結果の評価に関する前提条件

a) 評価項目

底版に分布荷重が作用すると、底版にせん断力及び曲げモーメントが発生するが、分布荷重を受ける版の解析においては曲げモーメントの影響が支配的であり、せん断力が問題になることは少ない。従って、本検討では、底版の曲げモーメントを指標として均し精度の底版断面力に及ぼす影響の評価を行う。ここで、底版の曲げモーメントの正負の定義をしておく。図-24に示すように底版が下方から鉛直荷重を受けた場合、底版の中央部は上に凸になるような曲げ変形を起し、固定端の付近は下に凸になるような曲げ変形を起す。本検討では図中に示すとおり、底版中央部で底版を上へ凸に変形させる方向の曲げモーメントを正、固定端付近で底版を下へ凸に変形させるような曲げモーメントを負と定義する。

ケーソン底版の一隔壁の底版は、側壁及び隔壁に支持されており、図-24に示すような荷重を受けた場合、版中央付近で最大曲げモーメントが発生し、固定端で最小曲げモーメントが発生する。本解析ケースでは、2 次元

的に広がりを持つ底版の曲げモーメントを対象としているので、水平 2 方向の曲げモーメントを考慮する必要がある。底版に等分布荷重が作用する場合、曲げモーメントの平面分布は向かい合う 2 組の固定辺の中心を結ぶ線について線対称となり、X 及び Y 方向の最大曲げモーメントは底版の中心で、最小曲げモーメントは両辺の固定辺上の中心で発生する。しかし、離散的な接触荷重を同じ底版に作用させた場合、今回の解析手法によると接触荷重の作用位置及び荷重の大きさがランダムに与えられるため、底版の曲げモーメントの平面分布は線対称にはならない。そこで、本検討における FEM 解析の結果から算定した底版の X 及び Y 方向の曲げモーメントのコンター分布の一例を図-25(a)、(b)に示す。この場合、底版に離散的な接触荷重（図中の△印）を作用させているため、曲げモーメントの平面分布は等分布荷重を作用させた場合と大きく異なることがわかる。離散的な接触荷重が任意の位置に作用するため、X 及び Y 方向の最大曲げモーメントは底版の中心から少し離れた位置で発生している。また、最小曲げモーメントについても、両固定辺の中心では発生せず、いずれかの辺上の中心付近で発生している。

実務上、底版の曲げモーメントは底版中央付近の最大値と固定辺の最小値が重要となるため、本検討における均し精度の底版曲げモーメントに及ぼす影響の評価は、底版の X 及び Y 方向の最大曲げモーメント (M_{x_max} 、 M_{y_max}) 及び底版の X 及び Y 方向の最小曲げモーメント (M_{x_min} 、 M_{y_min}) を対象とする。これらの曲げモーメントについては、底版に作用させる接触荷重の位置及び接触荷重の大きさのばらつきを確率変数として与え、モンテカルロ法による繰り返し計算をしているため、最終的には確率的な評価をすることになる。具体的な評価

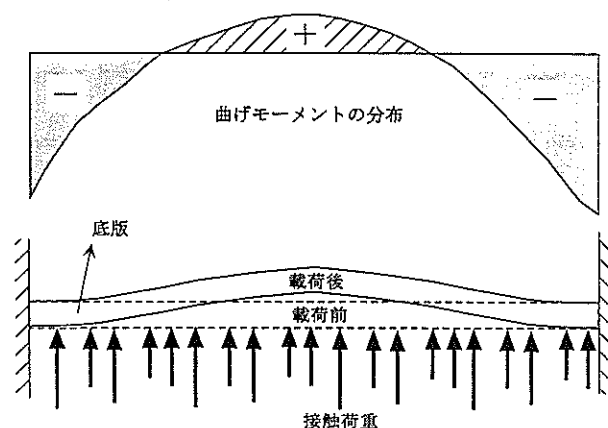


図-24 底版曲げモーメントの定義

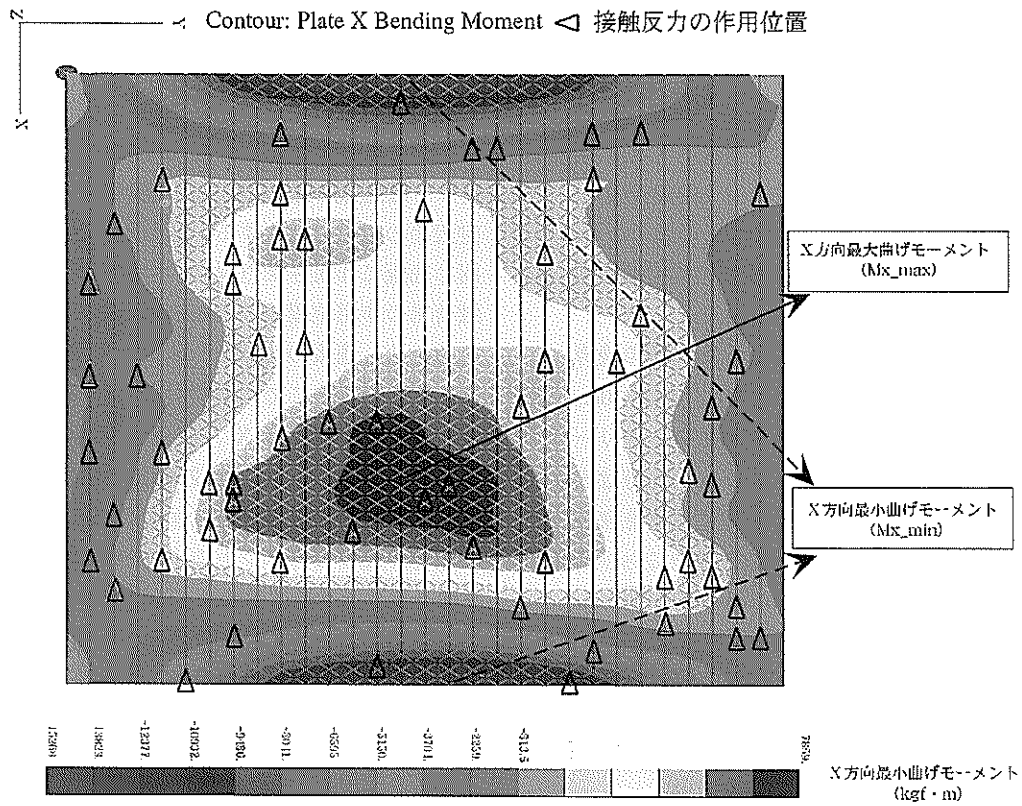


図-25(a) X方向の曲げモーメントのコンター図

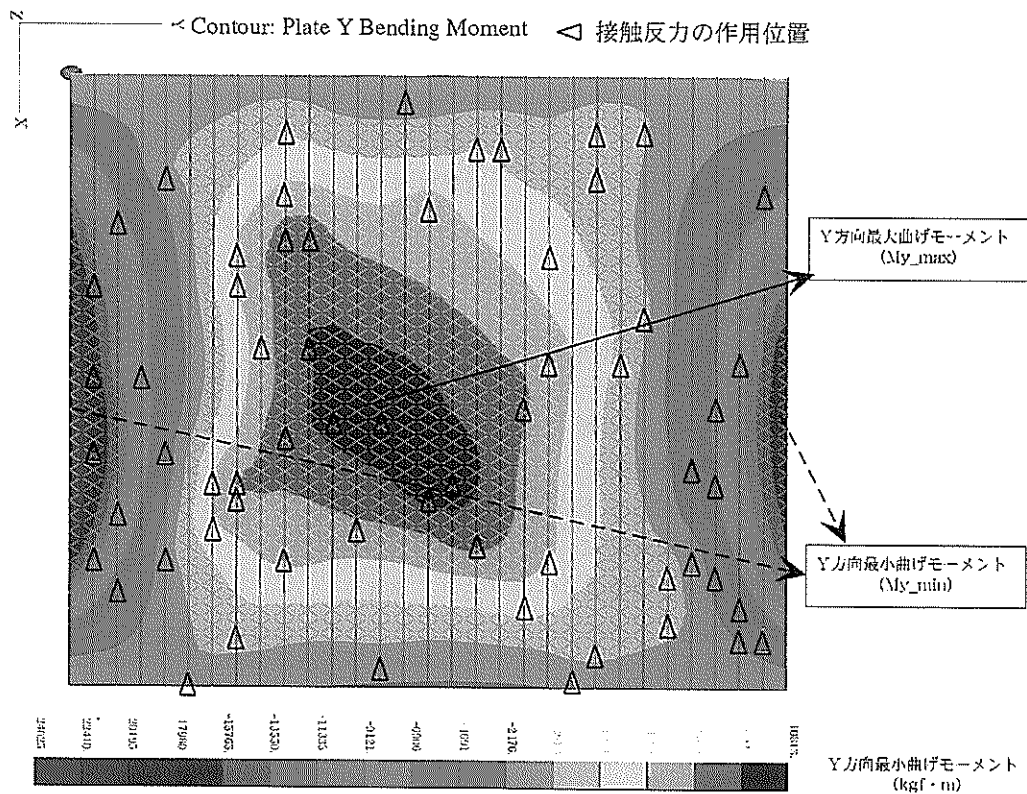


図-25(b) Y方向の曲げモーメントのコンター図

表-7 設計値と FEM 解析による最大・最小曲げモーメントの比較

	最大曲げモーメント (版中央) (kN・m)		最小曲げモーメント (版端部) (kN・m)	
	X方向	Y方向	X方向	Y方向
FEM解析	67.41	67.41	-150.77	-150.77
設計値	67.41	67.41	-149.72	-149.72
FEM解析/設計値	1.0000	1.0000	1.0070	1.0070

	最大曲げモーメント (版中央) (kN・m)		最小曲げモーメント (版端部) (kN・m)	
	X方向	Y方向	X方向	Y方向
FEM解析	186.40	186.40	-456.83	-456.83
設計値	187.27	187.27	-415.89	-415.89
FEM解析/設計値	0.9953	0.9953	1.0985	1.0985

	最大曲げモーメント (版中央) (kN・m)		最小曲げモーメント (版端部) (kN・m)	
	X方向	Y方向	X方向	Y方向
FEM解析	119.50	119.50	-290.06	-290.06
設計値	119.85	119.85	-266.16	-266.16
FEM解析/設計値	0.9971	0.9971	1.0898	1.0898

	最大曲げモーメント (版中央) (kN・m)		最小曲げモーメント (版端部) (kN・m)	
	X方向	Y方向	X方向	Y方向
FEM解析	59.63	103.22	-176.81	-223.27
設計値	58.31	103.09	-158.35	-210.74
FEM解析/設計値	1.0228	1.0013	1.1166	1.0594

方法については後述する。

b) 底版のFEM解析の精度確認

FEM解析による解析結果の精度を確認するために、厳密解とFEM解析による底版の最大及び最小曲げモーメントの算定結果の比較を実施した。ここで言う厳密解とは、底版に線形分布荷重を作用させた条件下におけるLevyのフーリエ級数解を用いた厳密解を意味している。Levyの厳密解は、底版の曲げモーメントの算定手法として設計に用いられており、以後はこの厳密解により算定された曲げモーメントを単に設計値と呼ぶ。解析の荷重条件としては、底版に接地圧360kPaの等分布荷重が作用した条件とした。FEM解析では、所定の接地圧になるように接触荷重を均等に分配して底版内の全節点に作用させることにより等分布荷重の条件とした。

表-7に設計値と FEM 解析による底版中央及び固定辺上における最大曲げモーメントと最小曲げモーメント及びその比を示す。この結果、底版中央部における最大曲げモーメントの設計値と FEM 解析結果との誤差は非常に小さく約 1%以内であることがわかる。一方、固定辺上における最小曲げモーメントの場合、FEM 解析結果が設計値を絶対値で最大 12%程度も上回るケースもあり、誤差が大きい結果となった。固定辺上における曲げモーメントは要素中心で算定される曲げモーメントを線形外挿して算出しているが、外挿方法の影響により設計値と FEM 解析値の差が生じている可能性がある。この点については、今回は詳細な検討は実施していない。

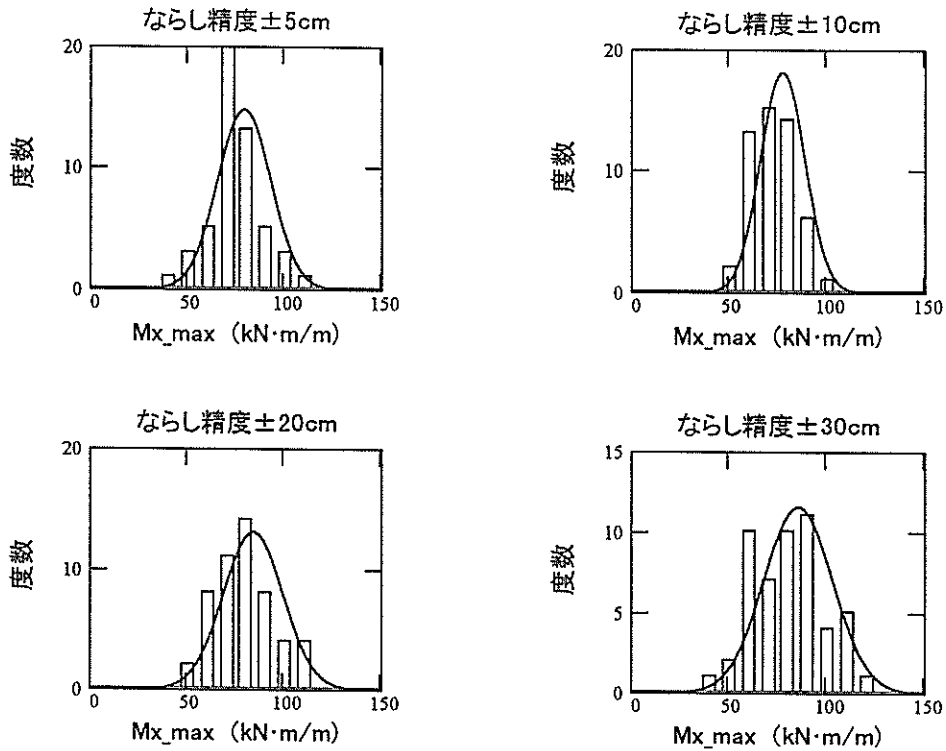
c) モンテカルロの試行回数と解析結果の確率的な評価

底版の曲げモーメントについては、繰り返し計算を実施して算定するため、確率的な評価が必要である。本来ならば、試行回数を変化させて最大・最小曲げモーメン

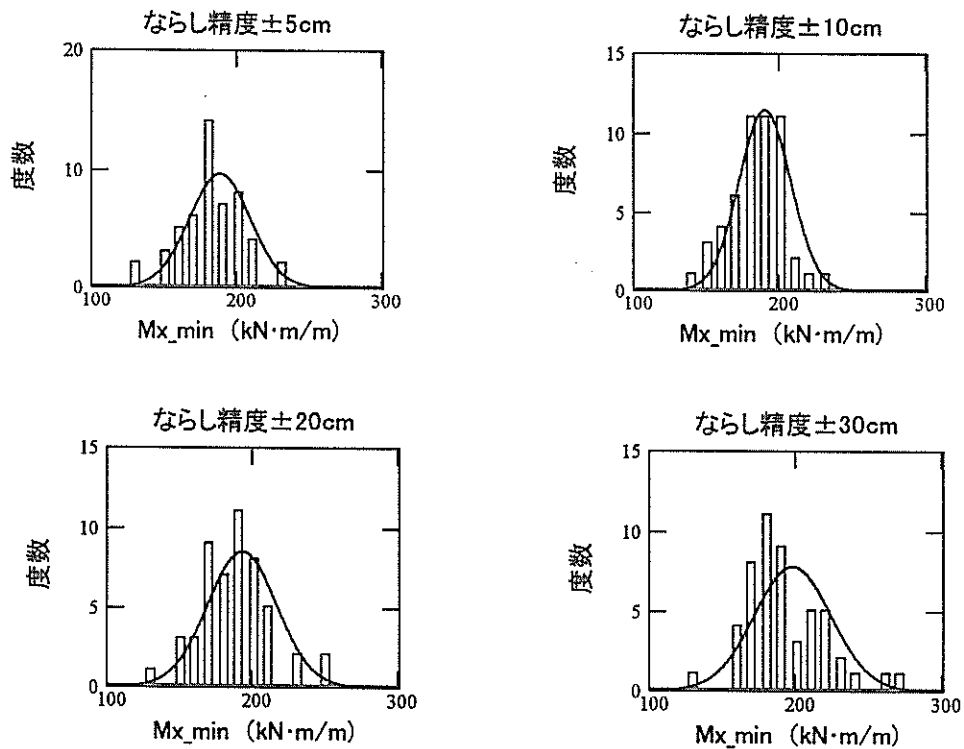
トの頻度分布の形状、期待値、最大値、最小値及び標準偏差などの結果を勘案しつつ適当な試行回数を決定することが必要である。しかし、今回はその検討は実施しておらず、モンテカルロの試行回数を 50 回に定めている。この妥当性について検討を行う。

図-26(a)~(d)にモンテカルロの試行回数 50 回後の最大・最小曲げモーメントの頻度分布の一例を示す。検討対象は、接触荷重のばらつきが底版曲げモーメントの結果に反映されやすい、底版サイズが最も小さい 3m × 3m、接触荷重の変動係数が大きい 0.45 の解析ケースを選定した。なお、接地圧は 360kPa とし、均し精度は± 5cm、± 10cm、± 20cm 及び± 30cm の全てを対象とした。この結果、何れの分布形状も正規分布に近いことが確認できた。そこで、分布形状について有意水準 5% の条件で χ^2 検定を実施したところ、1 データのみを除いて(均し精度± 20cm の Y 方向最大曲げモーメント)、正規分布であるとみなすことができた。このため、50 回のモンテカルロ試行回数で、ほぼ所要の接触位置及び接触荷重の確率変動を再現できたものと考えられる。従って、以後の解析結果の評価については、50 回のモンテカルロ試行計算による最大・最小曲げモーメントの結果が正規分布であるとして取り扱うこととする。

モンテカルロの試行計算後に、底版の最大・最小曲げモーメントの期待値及び標準偏差等が得られる。本検討では、最大曲げモーメントの期待値 (M^+mean) 及び期待値に標準偏差 σ の 2 倍を加えた ($M^+mean+2\sigma$) を評価対象とする。同様に、最小曲げモーメントの期待値 (M^-mean) 及びその期待値から標準偏差 σ の 2 倍を差し引いた ($M^-mean-2\sigma$) を評価対象とする。以後は、簡単のため M^+mean と M^-mean の絶対値をあらためて

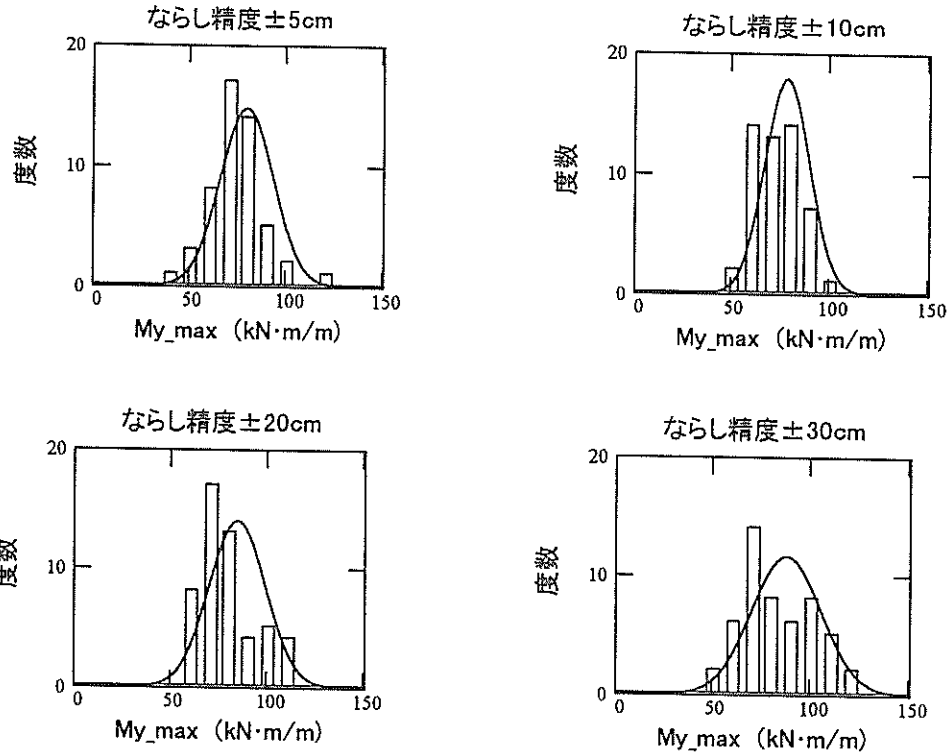


(a) X方向の最大曲げモーメントの頻度分布

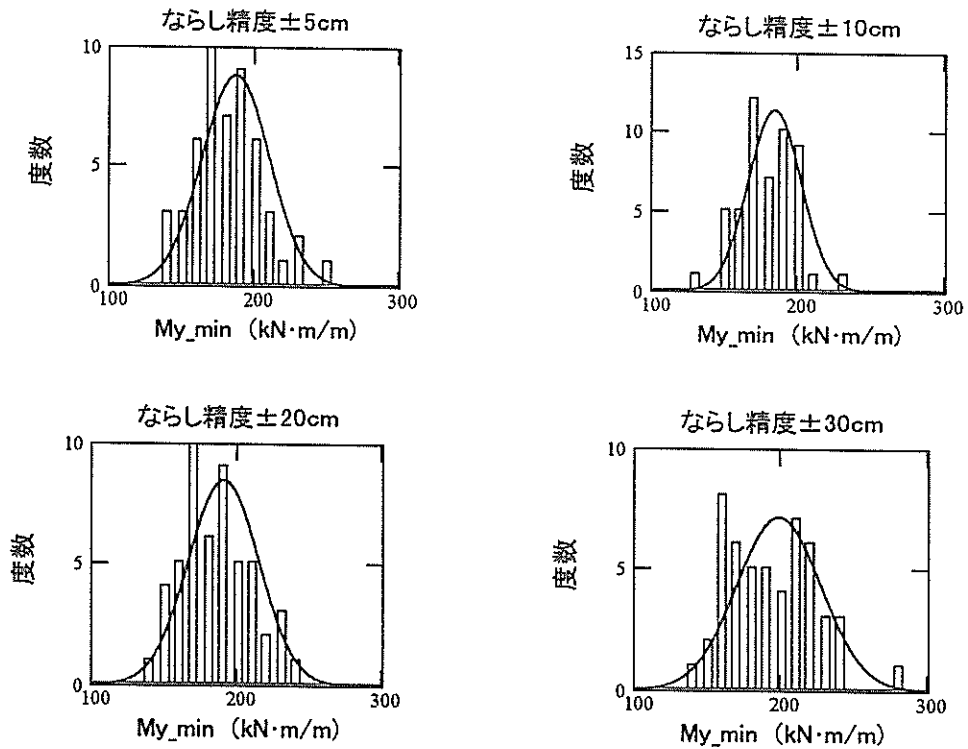


(b) X方向の最小曲げモーメントの頻度分布

図-26 最大・最小曲げモーメントの頻度分布 (底版サイズ: $3\text{m} \times 3\text{m}$ 、変動係数: 0.45、接地圧 360kPa)



(c) Y方向の最大曲げモーメントの頻度分布



(d) Y方向の最小曲げモーメントの頻度分布

図-26 最大・最小曲げモーメントの頻度分布 (底版サイズ: 3m × 3m、変動係数: 0.45、接地圧 360kPa)

Mmean と定義し、同様に $M^{+mean+2\sigma}$ と $M^{-mean-2\sigma}$ の絶対値をあらためて $M^{mean+2\sigma}$ と定義する。最大・最小曲げモーメントの結果は正規分布に従うとしているので、Mmean は底版の最大及び最小曲げモーメントの平均値、 $M^{mean+2\sigma}$ は片側超過確率約 2.3 % に相当する最大及び最小曲げモーメントを意味することになる。以後の検討では、Mmean と $M^{mean+2\sigma}$ を底版の最大・最小曲げモーメントの評価対象とする。Mmean により、底版に平均的に発生する最大・最小曲げモーメントを評価することができる。また、 $M^{mean+2\sigma}$ により、底版の離散的な荷重作用が底版に発生する最大・最小曲げモーメントのばらつき程度に及ぼす影響が評価できる。

d) 接触荷重の変動係数の影響

本検討では、接触荷重の大きさのばらつきを接触荷重の変動係数により表現している。本検討では、接触荷重の変動係数を 0.0、0.15、0.3 及び 0.45 の 4 種類に変化させて、接触荷重のばらつきが最大・最小曲げモーメントに及ぼす影響を評価している。接触荷重の変動係数がゼロの場合、全ての接触荷重の大きさは平均接触荷重と同一値として与えられる。反対に接触荷重の変動係数を大きくすると、接触荷重のばらつきは大きくなる。例えば接触荷重の変動係数が 0.45 の場合、接触荷重が平均接触荷重の 1.45 倍以上もしくは 0.55 倍以下である確率が約 32 % であり、ばらつきの大きい接触荷重を表現していることになる。

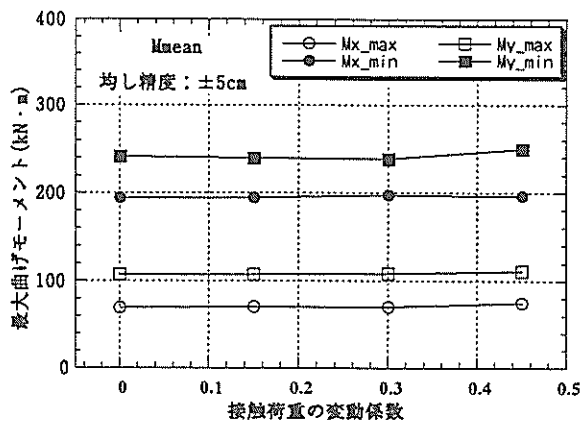
本検討の始めに、接触荷重の変動係数、すなわち接触荷重の大きさのばらつき具合が底版最大・最小曲げモーメントに及ぼす影響について検討する。底版サイズ 4m × 3m、接地圧 360kPa、均し精度 ±5cm 及び 30cm における、Mmean と接触荷重の変動係数の関係を図-27 に示

す。同様に、 $M^{mean+2\sigma}$ と接触荷重の変動係数の関係を図-28 に示す。この結果から、接触荷重の変動係数が大きくなっても、今回の計算条件下では底版の最大・最小曲げモーメントに大きな影響を及ぼさないことがわかる。実際は接触点数が非常に少なくなると、接触荷重の大きさのばらつきは底版曲げモーメントに大きな影響を及ぼすと考えられる。しかしながら、接触点数が相対的に少ない均し精度 ±30cm のケースにおいても、接触荷重の変動係数の増加が底版の Mmean 及び $M^{mean+2\sigma}$ に及ぼす影響が小さいことから、今回の検討で与えた底版と捨石の接触点数は、接触荷重のばらつきが問題とならない程度以上の多さであると言える。従って、以後の検討においては解析ケースを減らすために、接触荷重の変動係数を 0.45 として固定する。但し、接触荷重の大きさが正規分布以外の分布形状である場合や接触荷重の空間的な相関が無視できない場合などは、接触荷重の大きさのばらつきの影響が顕著になることも考えられるので注意が必要である。この点については、今後の検討課題とする。

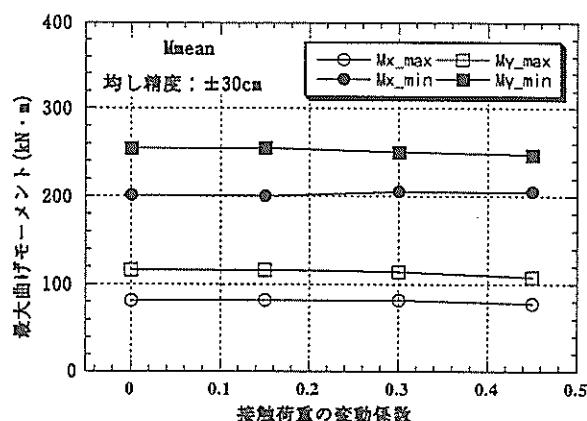
(2) 均し精度 ±5cm のマウンドの解析結果と設計値の比較

a) 解析結果と設計値の比較

マウンドの均し精度が ±5cm の場合におけるケーソン底版の断面力は、設計上、底版に等分布荷重が作用すると想定して算定されている。しかし、既に述べたように、実際は均し精度 ±5cm のマウンドであっても、捨石からの離散的な接触荷重がケーソン底版に作用することが明らかになっている。そこで、離散的な荷重作用を考慮した場合の底版曲げモーメントが設計値とどの程度異なるのかについて検討する。設計値では底版に作用す

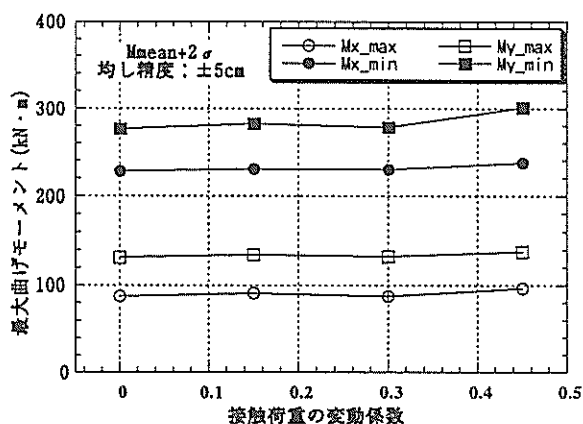


(a) 均し精度 ±5cm

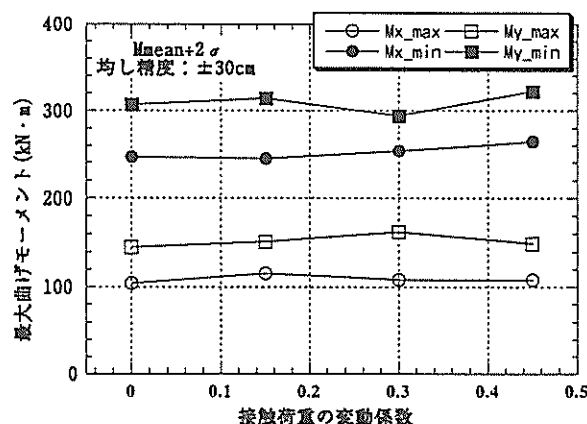


(b) 均し精度 ±30cm

図-27 最大曲げモーメント(Mmean)と接触荷重の変動係数の関係



(a) 均し精度±5cm



(b) 均し精度±30cm

図-28 最大曲げモーメント ($M_{mean+2\sigma}$) と接触荷重の変動係数の関係

る荷重を等分布荷重として与えているが、提案した解析手法（以下、提案解析手法と呼ぶ）では離散的な接触荷重の作用を考慮できる。ここでは、底版に同じ接地圧 360kPa を作用させた場合の提案解析手法と設計値により得られた底版の最大・最小曲げモーメントの比較を行う。なお、本検討ケースで対象とした底版サイズは前に示した4種類、接触荷重の変動係数は0.45とした。

表-8に各底版サイズを対象とした提案解析手法と設計値から得られた最大・最小曲げモーメント及び解析結果と設計値との曲げモーメントの比（FEM 解析値/設計値）を示す。最大・最小曲げモーメントについては、モンテカルロ繰り返し計算後の M_{mean} 及び $M_{mean+2\sigma}$ を評価対象とする。この結果、解析結果の M_{mean} は底版形状が正方形の場合、設計値の約 0.92 ~ 1.12 倍となっており、設計値に比較的近い値であることがわかる。一方、底版サイズが 3m × 4m の場合、解析結果の M_{mean} は、最大で設計値の約 1.3 倍の値となっており、離散的な荷重作用を考慮した場合、底版形状が底版曲げモーメントに及ぼす影響は大きいことがわかる。解析結果の $M_{mean+2\sigma}$ について見ると、正方形断面の場合、解析結果は設計値の約 1.1 ~ 1.4 倍、3m × 4m の断面の場合は約 1.3 ~ 1.65 倍であり、いずれも設計値を大きく上回ることがわかる。底版の形状の影響については、 M_{mean} と同様の結果となっている。

さらに、正方形断面のみを対象として見ると、隔壁面積が大きいほど、解析結果と設計値の差は小さくなる傾向にある。この理由は、隔壁面積が大きくなると、ケーソン底版と捨石との接触状況の不規則性が相対的に無視できるようになるためと考えられる。反対に、隔壁面積が小さくなると、ケーソン底版と捨石との接触状況の不

規則性が顕著に底版曲げモーメントに影響するようになると考えられる。そこで、正方形断面を対象として、曲げモーメント比 (M_{mean} /設計値、 $M_{mean+2\sigma}$ /設計値) と隔壁面積の関係を図-29に示す。図中の曲げモーメント比は、 M_{x_max} /設計値、 M_{x_min} /設計値、 M_{y_max} /設計値、 M_{y_min} /設計値を平均したものであり、図中で平均曲げモーメント比と定義する。この結果から、隔壁面積が大きくなると、解析結果と設計値との差は小さくなる関係にあることがわかる。すなわち、隔壁面積が小さい底版では、均し精度±5cmのマウンドであっても、捨石からの離散的な荷重作用のため設計値を上回る底版曲げモーメントが発生する可能性がある。一方、隔壁面積が大きくなると、隔壁面積が小さい場合に比較すると、設計値との差は小さくなることがわかる。この結果は、均し精度±5cmのマウンド上にケーソンを設置する場合、その隔壁面積によって設計上の余裕代が異なる可能性を示唆するものである。底版の形状が異なる場合も、同様の結果になると考えられる。

b) 設計値の妥当性の検討

提案解析手法により算定した最大・最小曲げモーメント (M_{mean} 及び $M_{mean+2\sigma}$) が設計値を上回っているにも関わらず、実際のケーソン底版が破損した例は報告されていない。その理由は、主に許容応力度法に含まれる安全率の存在のためであると考えられる。

ケーソンの底版部材は、通常鉄筋コンクリートが用いられる。鉄筋コンクリート部材の場合、鉄筋の降伏を先行させるため、その部材の照査にあたっては鉄筋の許容応力度を照査対象としている。設計上、鉄筋の許容応力度は JIS に規定された降伏点強度のおおむね 60% の値を採用している。さらに、JIS 規格による降伏点強度は、

表-8 均し精度 5cm における提案解析手法と設計値から得られた最大・最小曲げモーメントの解析結果

底版サイズ3m×3m、接地圧360kPa、接触荷重の変動係数0.45

	最大・最小曲げモーメント (Mmean)				最大・最小曲げモーメント (Mmean+2σ)			
	Mx_max	Mx_min	My_max	My_min	Mx_max	Mx_min	My_max	My_min
FEM解析値	79	188	79	186	107	230	107	233
設計値	75	167	75	167	75	167	75	167
FEM解析値/設計値	1.049	1.125	1.050	1.118	1.421	1.380	1.419	1.398

底版サイズ4m×4m、接地圧360kPa、接触荷重の変動係数0.45

	最大・最小曲げモーメント (Mmean)				最大・最小曲げモーメント (Mmean+2σ)			
	Mx_max	Mx_min	My_max	My_min	Mx_max	Mx_min	My_max	My_min
FEM解析値	129	316	130	306	165	379	164	362
設計値	134	297	134	297	134	297	134	297
FEM解析値/設計値	0.969	1.066	0.972	1.033	1.239	1.279	1.228	1.221

底版サイズ5m×5m、接地圧360kPa、接触荷重の変動係数0.45

	最大・最小曲げモーメント (Mmean)				最大・最小曲げモーメント (Mmean+2σ)			
	Mx_max	Mx_min	My_max	My_min	Mx_max	Mx_min	My_max	My_min
FEM解析値	193	477	193	478	230	550	233	538
設計値	209	463	209	463	209	463	209	463
FEM解析値/設計値	0.925	1.029	0.925	1.031	1.100	1.187	1.115	1.160

底版サイズ3m×4m、接地圧360kPa、接触荷重の変動係数0.45

	最大・最小曲げモーメント (Mmean)				最大・最小曲げモーメント (Mmean+2σ)			
	Mx_max	Mx_min	My_max	My_min	Mx_max	Mx_min	My_max	My_min
FEM解析値	75	196	111	250	96	237	138	301
設計値	58	158	105	211	58	158	105	211
FEM解析値/設計値	1.281	1.240	1.054	1.185	1.639	1.500	1.311	1.427

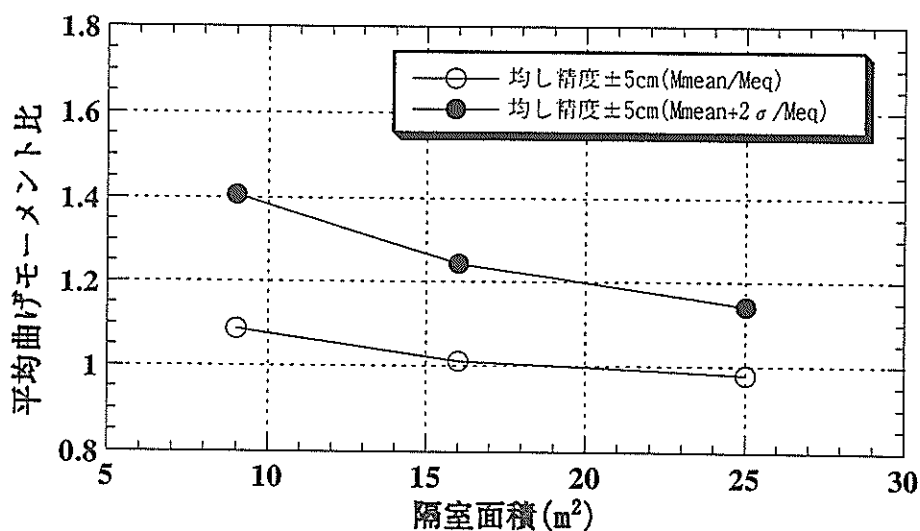


図-29 平均曲げモーメント比 (Mmean/設計値、Mmean+2σ/設計値) と隔室面積の関係 (接触荷重の変動係数 0.45、接地圧 360kPa、正方形断面)

不合格率がほぼゼロになるように定められているため、鉄筋の許容応力度は非常に安全側の値であると言える。従って、設計値の曲げモーメントは、鉄筋の許容応力度を部材の耐力照査としているため、約 1.5 (=1/0.66) 以上の安全率を含んでいることになる。さらに、その他の設計上の余裕代としては、例えば波力によってケーソン底版に作用する荷重の平均値は設計値を下回るように設定されていることが挙げられる¹¹⁾¹²⁾。今回の提案解析手法により算定した M_{mean} 及び $M_{mean}+2\sigma$ が設計値を大きく上回ってはいるものの、実際のケーソン底版の破損例が無いのは、以上に示す設計上の十分な余裕代の存在のためであると考えられる。

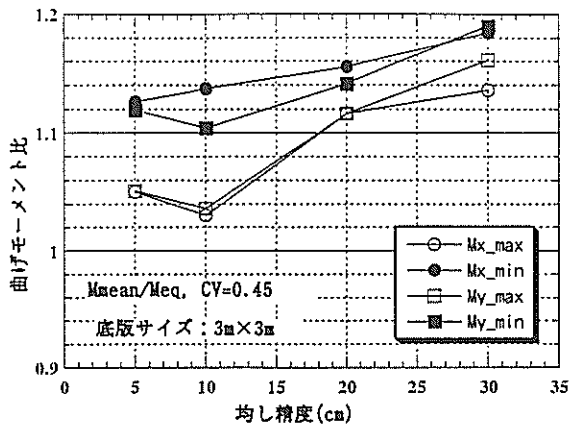
しかしながら、正方形断面の場合、底版の面積が大きくなると、相対的に提案解析手法と設計値による底版最大・最小曲げモーメントとの差が小さくなることや、底

版形状が正方形以外の場合、設計値からの増加分が大きくなることなどから、ケーソン底版の隔壁の諸条件により底版曲げモーメントにおける設計上の余裕代が異なる可能性がある。この点については、信頼性設計の導入を視野に入れて、今後さらに総合的な検討が必要であると考えている。

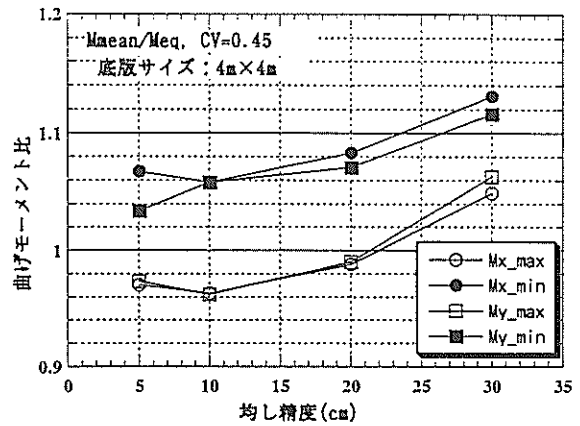
(3) 均し精度を緩和した場合の解析結果と設計値の比較

前項では、均し精度 $\pm 5\text{cm}$ のマウンドにおける解析結果と設計値の比較を実施したが、ここではさらに均し精度を $\pm 5\text{cm}$ から $\pm 10\text{cm}$ 、 $\pm 20\text{cm}$ 、 $\pm 30\text{cm}$ へと緩和した場合における解析結果と設計値による底版曲げモーメントの比較を実施する。

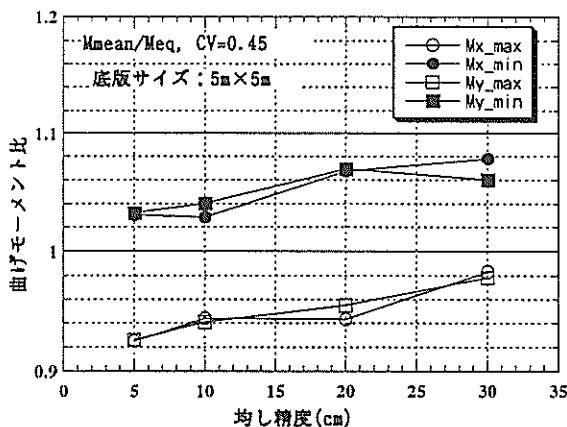
図-30に、曲げモーメント比($M_{mean}/\text{設計値}$)と均し精度の関係を示す。この結果から、底版形状が正方形であ



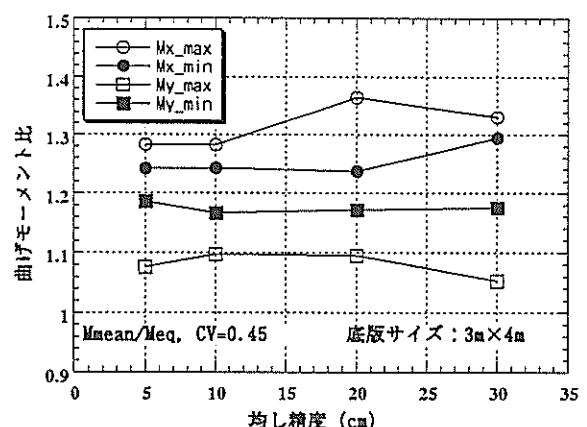
(a) 底版サイズ 3m x 3m



(b) 底版サイズ 4m x 4m



(c) 底版サイズ 5m x 5m



(d) 底版サイズ 3m x 4m

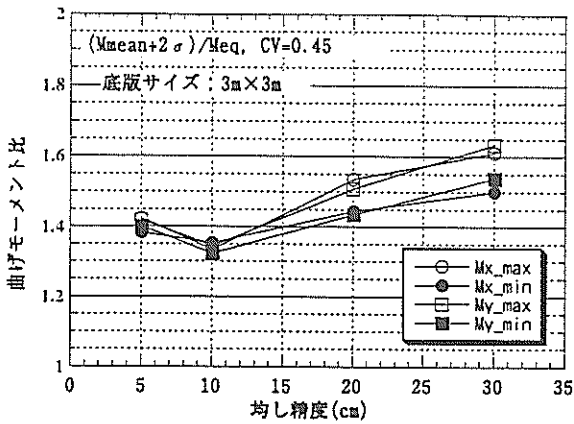
図-30 曲げモーメント比($M_{mean}/\text{設計値}$)と均し精度の関係
(接触荷重の変動係数 0.45、接地圧 360kPa)

る場合、均し精度を緩和するとMmean/設計値はさらに増加することがわかる。一方、断面形状が3m×4mの場合、Mmean/設計値と均し精度の相関性は無いようであるが、正方形断面に比較すると全体的に設計値を大きく上回っていることがわかる。従って、底版の断面形状の影響は大きいと言える。しかし、今回の検討では辺長比などの底版の断面形状を様々に変化させた解析は実施していないので、断面形状の影響については今後の検討課題とする。

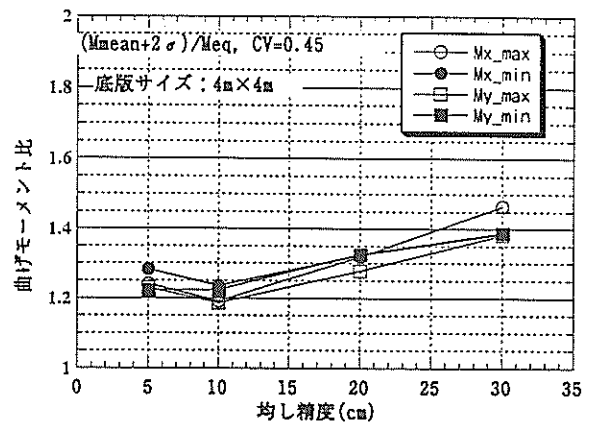
同様に、Mmean+2σについても、解析結果と設計値との比較を実施する。図-31に曲げモーメント比(Mmean+2σ/設計値)と均し精度の関係を示す。底版形状が正方形の解析ケースを見ると、均し精度が±5cmと±10cmのMmean+2σ/設計値は、ほとんど同じ値を取ることがわかる。一方、均し精度が±20cm及び±30

cmになると、均し精度が悪くなるに応じてMmean+2σ/設計値は、増加する傾向にあることがわかる。従って、正方形断面を対象とした場合、均し精度±5cmと±10cmの相違が底版曲げモーメントに及ぼす影響は非常に小さいと判断できる。しかしながら、均し精度が±20cmより大きくなると、現行の均し精度±5cmより底版曲げモーメントがさらに増加することが予想され、底版を厚くするなどの対処が必要であると考えられる。一方、断面形状が3m×4mの解析ケースの結果をみると、正方形断面と同様の傾向にあるが、正方形断面のケースに比較して、全体的にMmean+2σ/設計値の値が大きいことがわかる。

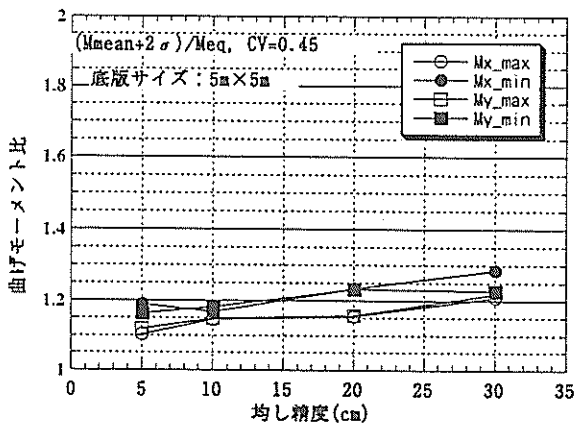
図-30及び図-31の正方形断面の場合の結果を見ると、解析結果と設計値との曲げモーメント比は明らかに隔室面積の影響を受けている。これを検討するため、図-32



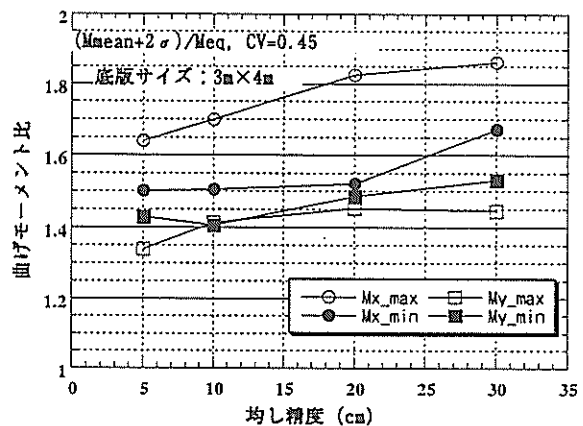
(a) 底版サイズ 3m×3m



(b) 底版サイズ 4m×4m



(c) 底版サイズ 5m×5m



(d) 底版サイズ 3m×4m

図-31 曲げモーメント比(Mmean+2σ/設計値)と均し精度の関係
(接触荷重の変動係数 0.45、接地圧 360kPa)

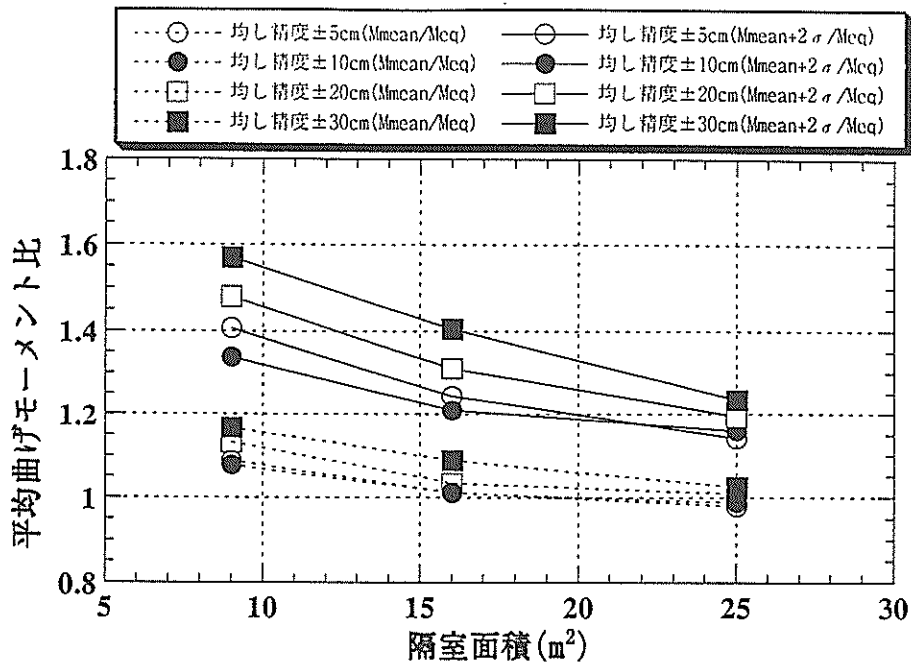


図-32 平均曲げモーメント比(Mmean/設計値、Mmean+2σ/設計値)と隔室面積の関係
(底版形状：正方形、接触荷重の変動係数 0.45、接地圧 360kPa)

に正方形断面を対象として、曲げモーメント比 (Mmean/設計値、Mmean+2σ/設計値) と隔室面積の関係を示す。図中の曲げモーメント比は、Mx_max/設計値、Mx_min/設計値、My_max/設計値、My_min/設計値を平均したものであり、平均曲げモーメント比と定義する。この図から、隔室面積が大きくなると、明らかに Mmean/設計値及び Mmean+2σ/設計値の値は、小さくなることわかる。また同じ隔室面積で比較した場合、特に隔室面積が小さいと、Mmean/設計値及び Mmean+2σ/設計値は均し精度が悪くなると、大きくなることわかる。この理由は、底版面積が小さい場合 (例えば 9m²)、接触状況の不均一性が Mmean 及び Mmean+2σ に大きな影響を与えるようになるためである。反対に室面積が大きいと (例えば 25m²)、接触状況の不均一性の影響が小さくなり、均し精度の相違が Mmean/設計値及び Mmean+2σ/設計値の値に及ぼす影響が小さくなるためである。従って、隔室面積が小さい場合、設計上の余裕代が少なく、かつ均し精度の影響を受けやすいことがわかる。反対に、隔室面積が大きいと、設計上の余裕代が大きく、かつ均し精度の影響が少ないことがわかる。

上段では、底版の形状が正方形である場合を対象としたが、辺長比が 1 以上の断面においても、平均曲げモーメント比と隔室面積との関係は同様の結果になると考え

られる。辺長比の影響については、今後の検討課題とする。

(4) 均し精度±5cmを基準とした場合の底版曲げモーメントの増加程度

均し精度±5cmにおいて築造されたマウンドにおいて、ケーソン底版が破損した事例の報告は、著者らの調べた限りでは皆無であった。防波堤において、暴風時・台風時に設計を越える波圧の作用により防波堤ケーソンが変位することはあるが、ケーソンの底版自体が破損した例の報告は無い。また、平成7年兵庫県南部地震の際、設計で想定していた設計震度を大きく上回る地震動の作用によってケーソン式岸壁は大きく変位したが、被災を受けたケーソンにおける大きな損傷はなく、復旧後ケーソン自体はそのまま再使用されている¹³⁾。このような実績を考慮すると、マウンドの均し精度を±5cmとして設計したケーソン底版は、構造上安全であると実証的に判断できる。

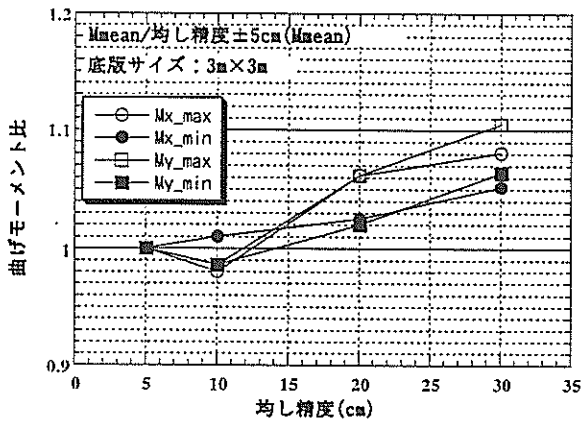
そこで、均し精度±5cmの提案解析手法による底版曲げモーメントが十分安全な値であるとのスタンスに立ち、均し精度±5cmを基準とした場合に、均し精度を±10cm、±20cm、±30cmへと緩和した場合の相対的な曲げモーメントの増加程度を検討する。この増加程度を評価することにより、均し精度を緩和した際の底版曲げモ

メントの増加分を考慮した設計値（以下、均し精度を考慮した設計値と呼ぶ）を簡単に与えることができる。均し精度を考慮した設計値は、通常的设计値を基準に算定されるため、両者は同程度に安全であると言える。しかしながら、既に説明したとおり、底版曲げモーメントの算定において、均し精度±5cmのマウンドからの離散的な接触荷重を考慮した場合（提案解析手法）、設計値を上回ることが明らかになっている。また、底版の設計上の余裕代は底版の隔室面積や辺長比などの諸条件により大きく異なる可能性があることも述べた。設計上の余裕代が諸条件により変化することは望ましくないが、この点についてはここでは考慮せず、本検討を進めることとする。

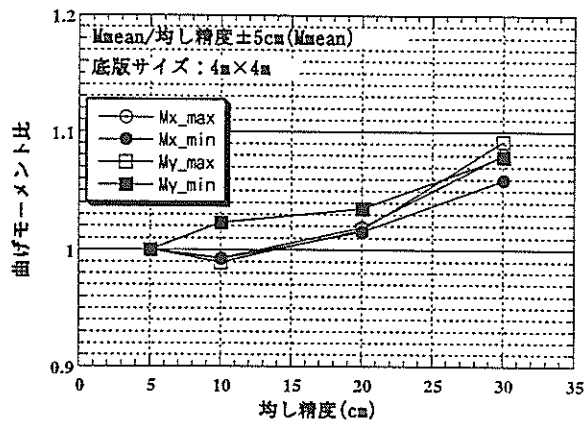
図-33に均し精度±5cmを基準とした時の曲げモーメント比($M_{mean}/M_{mean}(\pm 5cm)$)と均し精度の関係を示す。解

析条件は、接地圧360kPa、接触荷重の変動係数は0.45である。図から、均し精度を緩和しても M_{mean} の増加程度は小さく、 $M_{mean}/M_{mean}(\pm 5cm)$ は均し精度が±10cmの場合は最大約1.02倍、均し精度が±20cmの場合は最大約1.06倍、均し精度が±30cmの場合は最大約1.11倍であることがわかる。

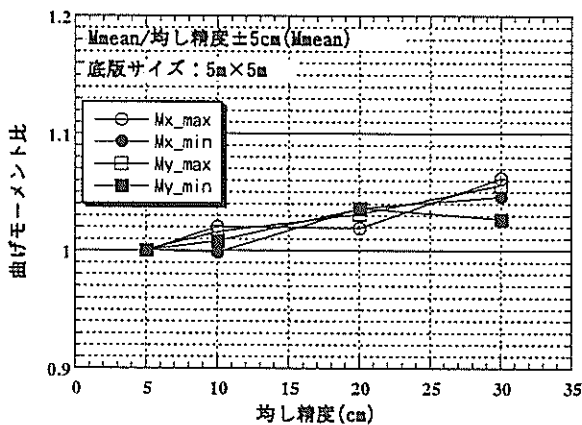
同様に、均し精度±5cmを基準とした時の曲げモーメント比($M_{mean}+2\sigma/M_{mean}+2\sigma(\pm 5cm)$)と均し精度の関係を図-34に示す。図から、均し精度を緩和しても、 $M_{mean}+2\sigma/M_{mean}+2\sigma(\pm 5cm)$ は著しく大きくならないことがわかる。 $M_{mean}+2\sigma/M_{mean}+2\sigma(\pm 5cm)$ は、均し精度が±10cmの場合は最大約1.06倍、均し精度が±20cmの場合は最大約1.11倍、均し精度が±30cmの場合は最大約1.18倍程度であることがわかる。以上の結果から、均し精度±5cmを基準とした場合、均し精度を緩和しても、それほ



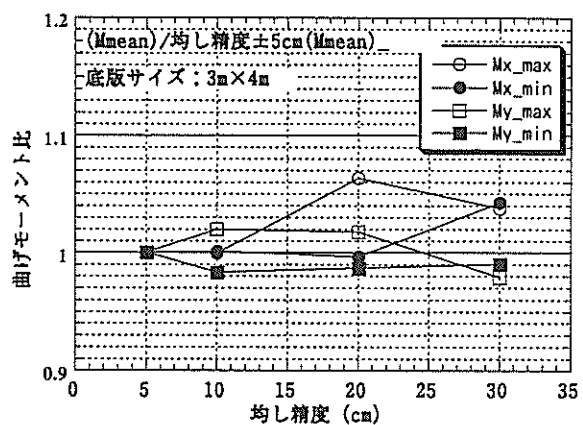
(a) 底版サイズ3m×3m



(b) 底版サイズ4m×4m

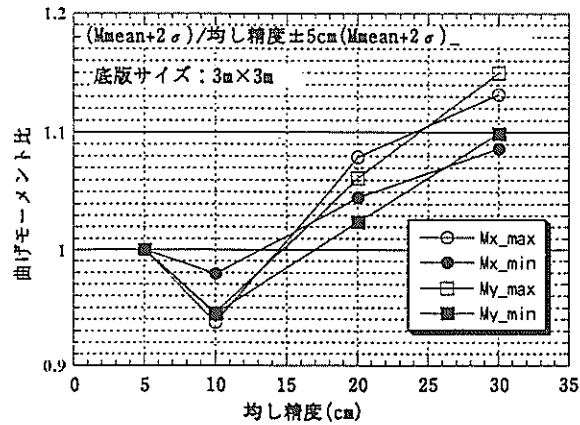


(c) 底版サイズ5m×5m

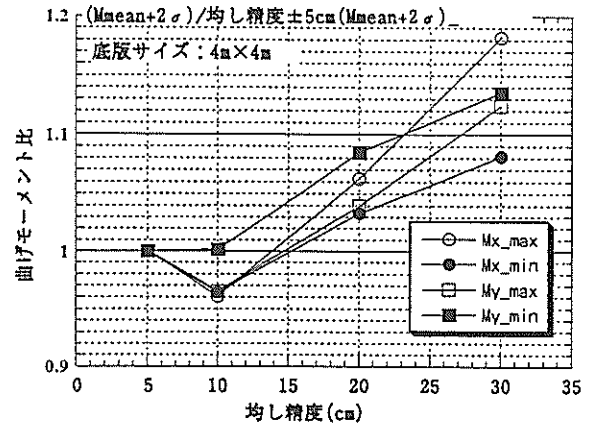


(d) 底版サイズ3m×4m

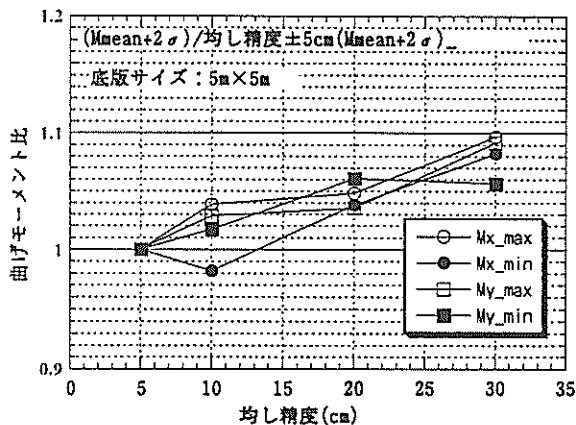
図-33 均し精度±5cmを基準とした時の曲げモーメント比($M_{mean}/M_{mean}(\pm 5cm)$)と均し精度の関係 (接触荷重の変動係数0.45、接地圧360kPa)



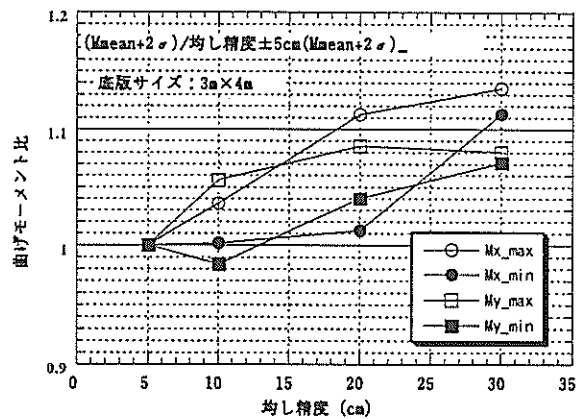
(a) 底版サイズ3m×3m



(b) 底版サイズ4m×4m



(c) 底版サイズ5m×5m



(d) 底版サイズ3m×4m

図-34 均し精度±5cmを基準とした時の曲げモーメント比($M_{\text{mean}+2\sigma} / M_{\text{mean}+2\sigma(\pm 5\text{cm})}$)と均し精度の関係 (接触荷重の変動係数0.45、接地圧360kPa)

ど大きな底版曲げモーメントの増加は発生しないことが明らかになった。また、これらの結果は、均し精度の緩和に応じて断面力の割り増しを行うことにより、簡便に均し精度の影響を底版の設計において考慮できることを示唆している。

最後に、接地圧の影響を検討する。表-9に全解析ケースにおける均し精度±5cmを基準とした場合の底版最大・最小曲げモーメントの増加程度の一覧を示す。接地圧が小さい場合、底版と捨石との接触点数が少なくなるため、均し精度が底版曲げモーメントに及ぼす影響が大きくなると考えられるが、結果を見ると接地圧200kPaと360kPaの範囲においては、均し精度±5cmを基準とした場合の最大曲げモーメントの増加割合と接地圧の明確な相関関係は無いようである。

4.4 安全係数の適用

現行の設計では、防波堤及び係留施設などのコンクリート構造物の設計は、限界状態設計法によることを標準としている。著者らは、均し精度の緩和が底版曲げモーメントに及ぼす影響を限界状態設計法における安全係数に組み入れることを提案する。具体的には、均し精度±10cm、20cm、30cmに応じた底版曲げモーメントの増加率を限界状態設計法における荷重係数の形で導入することを考えている。均し精度に応じた荷重係数は、今回提案した解析手法により算定した均し精度±5cmの底版曲げモーメントを基準とした場合の各均し精度(±10cm、±20cm、±30cm)の相対的な増加率を適用することができる。例えば、今回の検討結果によると、均し精度の影響を表す荷重係数は概ね以下に示すような値となった。

表-9 均し精度±5cmを基準とした場合の曲げモーメントの増加程度の一覧

底板サイズ=3m×3m、接地圧200kPa

均し精度 (cm)	曲げモーメント比 (Mmean/均し精度±5cmのMmean)					曲げモーメント比 (Mmean+2σ/均し精度±5cmのMmean+2σ)				
	①Mx_max	②Mx_min	③My_max	④My_min	①~④平均	⑤Mx_max	⑥Mx_min	⑦My_max	⑧My_min	⑤~⑧平均
5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
10	1.014	0.979	0.954	0.961	0.977	1.057	0.960	0.950	0.945	0.978
20	1.045	1.035	1.027	1.036	1.036	1.001	1.044	1.004	1.021	1.017
30	1.123	1.046	1.098	1.028	1.074	1.114	1.101	1.090	1.038	1.086

底板サイズ=3m×3m、接地圧360kPa

均し精度 (cm)	曲げモーメント比 (Mmean/均し精度±5cmのMmean)					曲げモーメント比 (Mmean+2σ/均し精度±5cmのMmean+2σ)				
	①Mx_max	②Mx_min	③My_max	④My_min	①~④平均	⑤Mx_max	⑥Mx_min	⑦My_max	⑧My_min	⑤~⑧平均
5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
10	0.980	1.010	0.986	0.986	0.991	0.937	0.979	0.945	0.944	0.951
20	1.062	1.025	1.062	1.020	1.043	1.079	1.045	1.062	1.024	1.053
30	1.081	1.052	1.105	1.064	1.075	1.132	1.086	1.150	1.099	1.117

底板サイズ=4m×4m、接地圧200kPa

均し精度 (cm)	曲げモーメント比 (Mmean/均し精度±5cmのMmean)					曲げモーメント比 (Mmean+2σ/均し精度±5cmのMmean+2σ)				
	①Mx_max	②Mx_min	③My_max	④My_min	①~④平均	⑤Mx_max	⑥Mx_min	⑦My_max	⑧My_min	⑤~⑧平均
5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
10	0.973	0.967	0.977	0.969	0.971	0.968	0.960	0.965	0.918	0.953
20	1.037	1.008	1.026	1.001	1.018	1.064	1.023	1.029	0.977	1.023
30	1.049	1.027	1.039	1.022	1.034	1.087	1.035	1.051	1.072	1.061

底板サイズ=4m×4m、接地圧360kPa

均し精度 (cm)	曲げモーメント比 (Mmean/均し精度±5cmのMmean)					曲げモーメント比 (Mmean+2σ/均し精度±5cmのMmean+2σ)				
	①Mx_max	②Mx_min	③My_max	④My_min	①~④平均	⑤Mx_max	⑥Mx_min	⑦My_max	⑧My_min	⑤~⑧平均
5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
10	0.993	0.992	0.989	1.023	0.999	0.960	0.964	0.965	1.002	0.973
20	1.019	1.015	1.017	1.035	1.022	1.063	1.033	1.040	1.084	1.055
30	1.081	1.059	1.092	1.079	1.078	1.182	1.081	1.124	1.136	1.131

平板サイズ=5m×5m、接地圧200kPa

均し精度 (cm)	最大曲げモーメント比 (Mmean/均し精度±5cmのMmean)					曲げモーメント比 (Mmean+2σ/均し精度±5cmのMmean+2σ)				
	①Mx_max	②Mx_min	③My_max	④My_min	①~④平均	⑤Mx_max	⑥Mx_min	⑦My_max	⑧My_min	⑤~⑧平均
5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
10	1.001	0.975	0.993	1.029	1.000	0.975	0.993	1.029	0.955	0.988
20	1.022	1.044	1.092	1.080	1.059	1.044	1.092	1.080	1.029	1.061
30	1.032	1.033	1.053	1.078	1.049	1.033	1.053	1.078	1.062	1.056

平板サイズ=5m×5m、接地圧360kPa

均し精度 (cm)	曲げモーメント比 (Mmean/均し精度±5cmのMmean)					曲げモーメント比 (Mmean+2σ/均し精度±5cmのMmean+2σ)				
	①Mx_max	②Mx_min	③My_max	④My_min	①~④平均	⑤Mx_max	⑥Mx_min	⑦My_max	⑧My_min	⑤~⑧平均
5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
10	1.020	0.998	1.016	1.008	1.010	1.038	0.982	1.028	1.017	1.016
20	1.019	1.036	1.031	1.036	1.030	1.048	1.038	1.035	1.061	1.046
30	1.062	1.046	1.056	1.027	1.048	1.097	1.082	1.092	1.057	1.082

底板サイズ=3m×4m、接地圧360kPa

均し精度 (cm)	曲げモーメント比 (Mmean/均し精度±5cmのMmean)					曲げモーメント比 (Mmean+2σ/均し精度±5cmのMmean+2σ)				
	①Mx_max	②Mx_min	③My_max	④My_min	①~④平均	⑤Mx_max	⑥Mx_min	⑦My_max	⑧My_min	⑤~⑧平均
5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
10	0.999	1.001	1.020	0.983	1.001	1.036	1.002	1.056	0.984	1.019
20	1.064	0.996	1.018	0.987	1.016	1.113	1.012	1.085	1.040	1.063
30	1.038	1.043	0.979	0.990	1.012	1.135	1.113	1.080	1.071	1.100

(均し精度の影響を表す荷重係数(案))

均し精度±5cm	: 1.00
均し精度±10cm	: 1.05
均し精度±20cm	: 1.10
均し精度±30cm	: 1.15

従って、均し精度を現行の±5cmから緩和した場合、通常の設計値(曲げモーメント)にこれらの荷重係数を乗じたものが、均し精度を考慮した場合の設計値になる。これにより、均し精度が底版曲げモーメントに及ぼす影響を合理的に実設計に反映することができる。

しかし、今回は限られた実験データ及び解析条件下における検討結果である。従って、上に示した均し精度の影響を表す荷重係数は、あくまでも案であり今後さらに精度を向上させる必要があると考えている。また、既に述べたように、底版の隔室面積や辺長比により設計上の余裕代が異なることが予想されるので、この点についても整合性のある設計法への検討が今後必要であると考えている。

5. まとめ

(1) 陸上における層厚2mの捨石マウンドの鉛直載荷試験の結果から、以下の事項が明らかになった。

- ①均し精度±5cmにおけるケーソン底版とマウンド捨石との接触点数を基準とすると、均し精度±10cmのそれは約8~9割程度、均し精度±20cm及び±30cmのそれは約6~7割程度であり、均し精度を緩和すると接触点数が少なくなることが明らかになった。また、この結果は、鉛直接地圧を360kPaにまで増加させても変化しなかったことから、鉛直接地圧を大きくしても載荷前のマウンド表面の凹凸(不陸)は残存していることが明らかになった(今回の実験条件下)。
- ②マウンド天端に鉛直荷重を作用させた場合の鉛直接地圧とマウンド天端の鉛直変位との関係は、均し精度±5cm及び±10cmのグループと均し精度±20cm及び±30cmの2グループに分けることができた。均し精度が±20cm及び±30cmの場合、鉛直接地圧が比較的小さい範囲(~120kPa)でマウンド天端付近の「遊び」に起因する鉛直変位が卓越した。その結果、均し精度±5cm及び±10cmのグループに比較して、約2~3cmほど鉛直変位が大きくなった。さらに鉛直接地圧(~360kPa)を増加させても、両グループの鉛直変位の差はほとんど変わらなかったことから、均し精度がマウンドの鉛

直変形特性に及ぼす影響は接地圧が小さい範囲で相対的に大きくなることが明らかになった。

(2) ケーソン底版とマウンド捨石間の離散的な荷重作用を考慮できる解析手法を提案した。本解析手法は底版のFEM解析及びモンテカルロ法により構成されている。この手法を用いて、均し精度を緩和が底版曲げモーメントに及ぼす影響を確率的に評価できる。

(3) 提案した解析手法を用いて算定した均し精度±5cmにおける底版曲げモーメント(解析結果)とマウンドの不陸(凹凸)を考慮していない技術基準による設計値との比較を行った。その結果、以下の事項が明らかになった。

- ①底版の形状が正方形の場合、提案解析手法による均し精度±5cmにおける最大・最小底版曲げモーメントの絶対値の期待値(Mmeanと呼ぶ)は、設計値と同程度の値であった。一方、底版形状が3m×4mのケースの場合、Mmean(解析結果)は設計値に比較して最大約1.3倍の値となった。
- ②また、最大・最小底版曲げモーメントの解析結果のばらつきを考慮するために、Mmeanに標準偏差の2倍を加えた曲げモーメント(Mmean+2σと呼ぶ)と設計値を比較した。その結果、底版形状が正方形の場合、Mmean+2σは設計値の最大約1.4倍の値となった。一方、底版形状が3m×4mの場合、設計値の最大約1.65倍の値となった。
- ③このように底版に作用する離散的な荷重作用を考慮して算定した底版曲げモーメントは、底版に作用する荷重を等分布荷重として算定した設計値を大きく上回る結果となった。それにもかかわらず、実際のケーソン底版が破損することが無いのは、現行の設計法に含まれる十分な余裕代のためであると考えられる。
- ④底版設計上の余裕代の程度は、隔室面積や底版形状により異なることが明らかになった。すなわち、底版形状が正方形の場合、隔室面積が小さいほど設計上の余裕代が小さくなることが明らかになった。この理由は、隔室面積が小さい場合、底版曲げモーメントは接触状況の不均一性の影響を受けやすく、底版に大きな曲げモーメントが発生しやすいためである。反対に隔室面積が大きい場合、接触状況の不均一性の影響は相対的に小さくなり、底版設計上の余裕代は大きくなるためである。

(4) 均し精度の緩和が底版曲げモーメントに及ぼす影

響を合理的に実設計に反映させるために、著者らはその影響を限界状態設計法における安全係数に組み入れることを提案する。具体的には、均し精度±10cm、20cm、30cmに応じた底版曲げモーメントの増加率を限界状態設計法における荷重係数の形で導入することを提案する。均し精度に応じた荷重係数は、今回提案した解析手法により算定した均し精度±5cmの底版曲げモーメントを基準とした場合の各均し精度(±10cm、±20cm、±30cm)における曲げモーメントの相対的な増加率を適用することができる。均し精度を現行の±5cmから緩和した場合、通常の設計値にこれらの荷重係数を乗じたものが、均し精度を考慮した場合の設計値となる。

しかし、今回は限られた実験データ及び解析条件下における検討結果であるため、均し精度を表す荷重係数の具体的な数値に関しては、今後さらに慎重な検討が必要である。

6. おわりに

本報告では、捨石マウンドの均し精度の緩和がケーソン底版の曲げモーメントに及ぼす影響について検討した。今回提案した解析手法について言えば、解析に用いた実験データが少なく、解析条件が限られていること、及びケーソン底版と捨石との接触状況を表現する確率モデルが妥当であるかについての検証を実施していないなど、今後検討すべき事項は多い。接触状況については、本質的に非常にばらつきの大きい事象であるので、解析結果の信頼性を増すためには、多くの模型実験が必要であると考えている。特に、捨石一つ一つの接触荷重等については実験データが全く無いため、今後は離散的な接触荷重を計測できるような実験が必要であると考えている。また、個々の捨石の挙動を追跡することが可能である個別要素法の導入が、より高度な接触モデルの構築に有効であると考えている。今後、提案した解析手法をさらに合理的なものとし、提案した均し精度の影響を表す荷重係数の信頼性を向上させるために、模型実験及び個別要素法による解析を鋭意進める予定である。

また、底版の設計上の余裕代が、隔室面積やその形状により異なることは、設計上の合理性及び整合性を考えると、非常にやっかいな問題である。この点については、信頼性設計を視野に入れて、より合理的な設計法について別途検討を進める予定である。

(1999年6月30日受付)

謝辞

本研究の実施にあたっては、以下に示す方々にお世話になった。実験データの取りまとめについては、第二港湾建設局横浜調査設計事務所技術開発課にお世話になった。また、本研究を取りまとめるに当たっては、横浜調査設計事務所深沢勝一前次長、横浜設計事務所中村聡志次長、菊池喜昭基礎工研究室長、山本修司設計基準研究室長、水上純一主任研究官(土質部)、前橋工科大学土倉泰助教授及び上部達生構造部長に有益な御意見を多数頂きました。解析については、山本俊介氏(株)日本港湾コンサルタント)に、実験データの整理及び図面の作成については佐藤陽子氏(科学技術振興事業団重点研究支援協力員)、殿村伸子氏(地盤震動研究室)及び高橋奈緒美氏(構造振動研究室)に、解析結果のデータ入力については当所情報センターに御協力頂きました。ここに記して感謝の意を表したい。

参考文献

- 1) 運輸省港湾局編集：港湾工事共通仕様書、日本港湾協会、1999年3月。
- 2) 荘司喜博：大型三軸圧縮試験による捨石材のせん断特性に関する考察、港研技術研究所報告、第22巻、第4号、1983年12月、pp.63~74。
- 3) 最上武雄編者：土質力学、技報堂、1979年、p.897。
- 4) 口田登、辻垣武彦、森田博史：捨石による基礎マウンドの形状及び力学特性に関する考察、港研技術研究所報告、第30巻、第1号、1991年3月。
- 5) 寺内潔：釜石港の大水深機械化施工による港湾工事、第2回技術講習会、1990年。
- 6) 田中洋行、小谷拓、高橋盛男：捨石マウンドの均しと支持力の関係について、第12回海洋開発シンポジウム論文集、1987年。
- 7) 森平倫生、木原 力、堀川 洋：混成式捨石マウンドの摩擦係数について、第25回海岸工学論文集、1987年。
- 8) 横田 弘、南兼一郎、清宮 理：ケーソン式港湾構造物への有限要素法の適用、港湾技研資料、No.403、1981年12月。
- 9) 外山進一：均し精度を考慮した底版の計算、港湾技研資料、No.512、1985年3月。
- 10) 石原弘一、横田 弘：捨石マウンド表面形状の評価及びそれに基づくケーソン底版の発生応力の検討、港湾技研資料、No.764、1993年9月。

- 11)長尾 毅、門脇陽治、土田 孝、寺内 潔：信頼性設計法による防波堤の全体安定性（第 2 報）～支持力安全性に対する検討～、港研技術研究所報告、第36巻、第1号、1995年3月.
- 12)Takayama,T. and Ikeda,N. :Estimation of Sliding Failure Probability of Present Breakwaters for Probabilistic Design, Rept. Port and Harbour Res. Inst., Vol.31,No.5, 1993,pp.332.
- 13)外山進一、松永康男：兵庫県南部地震による港湾施設の被害考察（その 2）被災状況－岸壁、防波堤、海岸保全施設－ 港湾技研資料、No.813、1995 年 9 月.

港湾技研資料 No.945

1999.9

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発行所 運輸省港湾技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印刷所 昭和情報プロセス(株)

Published by the Port and Harbour Research Institute
Nagase, Yokosuka, Japan

Copyright ©(1999) by P.H.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.H.R.I.

この資料は、港湾技術研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本資料の全部又は一部の転載、複写は、港湾技術研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。