

投稿論文 (和文)

**TECHNICAL
PAPER**

橋梁の実働応力測定と疲労寿命評価

山田健太郎*・石黒幸文**・加藤雅史***

鋼橋の疲労に対する耐久性の評価が重要になってきている。本報告では、異種の道路橋で実施されたヒストグラムレコーダによる実働応力の計測例を収集し、ECCS 疲労設計指針に示される修正マイナー則と3直線法を用いて検討を加えた。その結果、主桁等の主部材では、両 S-N 線図ともかなり長い寿命を与えたが、過去に疲労損傷を生じた継手では、寿命は短く、両 S-N 線図で計算される寿命の差も小さかった。

Keywords: bridge, fatigue, stress measurement, service stress, stress histogram

1. はじめに

道路網が整備され、国内貨物輸送量（輸送トンキロ）の約 1/2 を自動車輸送に頼るようになってきた。このことは道路橋にとっては、部材に発生する応力とその繰返し数が増大し、疲労の観点からすると好ましくない状況になってきている。事実、最近では、一般の鋼道路橋における疲労損傷事例がいくつか報告されるようになってきた^{1),2)}。これらの損傷の発生部位の多くは、主構以外の、いわゆる 2 次部材に多く、それが即座に構造物全体の崩壊につながるわけではない。しかし、この種の損傷の性質として、応力繰返し数の増加とともにその数が増えてゆくものと思われる。

疲労損傷の発生原因を明らかにするため、橋梁の構造特性や疲労損傷箇所の応力状況を把握しておくことが必要となる。そのためしばしば実橋の応力測定が行われる。

従来の測定では、荷重車による静的あるいは動的荷重試験が中心であったが³⁾、近年では、それに加えて一般交通により発生する実働応力範囲とその頻度分布の測定が多く行われるようになった⁴⁾。この背景として、疲労損傷に直接影響を及ぼす実働応力範囲の発生頻度分布を知る必要性が高まってきたのに加えて、ヒストグラムレコーダとよばれる自動計測装置が開発されたことが挙げられる⁵⁾。

本研究では、著者らが行ったいくつかの橋梁の実働応力測定結果に加えて、文献 3), 4) に示される応力範囲の頻度分布を用いて、疲労損傷度および疲労寿命の計算を行った。これらの橋梁は、橋梁形式や架設時期、あるいは、通過交通等に特徴のあるものを選定している。ま

た、本研究では、個々の部材や橋梁に対する評価に加えて、種々条件の異なる橋梁部材の疲労損傷度の相対的評価を加えた。このようなデータを蓄積してゆくことによって、より信頼性の高い橋梁の耐久性評価が可能になってゆくものと思われる。

2. 橋梁の実働応力測定

(1) 対象橋梁の概要

本研究で対象とした橋梁は、種々の交通条件下にある、リベットトラス橋、プレートガーダー橋、鋼床版箱桁橋、およびアーチ橋である。

1) 橋梁 A⁶⁾ (リベットトラス橋, Fig.1)

橋梁 A は、大正 14 年に架設され、供用開始後約 60 年経過した下路式曲弦ワーレントラス橋で、支間 73 m、幅員 16 m、鉄道道路併用橋として使用されている。

本橋は架設年次が古いため使用鋼種は不明であるが SS 41 相当といわれており、部材間の接合にはリベット継手が用いられている。現在では、1 日当たり約 250 本の電車が約 10 km/h の走行速度で往復している。また、片側約 1 万台の自動車（大型車混入率 11%）が通行しているが、本橋の交通条件はそれほど厳しいものではない。

2) 橋梁 B (活荷重合成プレートガーダー橋, Fig.2)

橋梁 B は昭和 42 年に架設され、供用開始後約 20 年経過した単純桁 2 連の活荷重合成桁橋（4 主桁）である。支間 27.9 m、幅員 7.0 m（2 車線）、主桁間隔 2.0 m からなる。また、5.58 m 間隔で対傾構が配置されており、一等橋として設計されている。床版は、厚さ 23 cm の RC 床版上に厚さ 12 cm のスチールファイバーコンクリート舗装が施されており、その剛性は大きい。本橋は、工場内の埋立地との連絡橋として架設された。そのため大型車の中には、80 t 以上のものもあり、その通行台数は、1 日当たり約 20 台であった。一般の道路橋と比較

* 正会員 Ph.D. 名古屋大学教授 工学部土木工学科
(〒464-01 名古屋市千種区不老町)

** 正会員 工修 中部電力(株)

*** 正会員 工博 名古屋大学助教授 工学部土木工学科

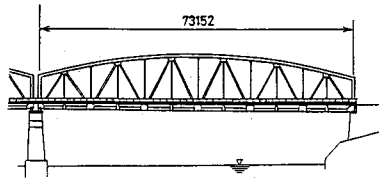


Fig.1 Bridge A : Riveted truss bridge.

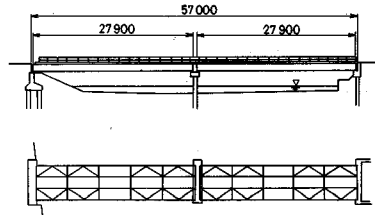


Fig.2 Bridge B : Composite plate girder bridge.

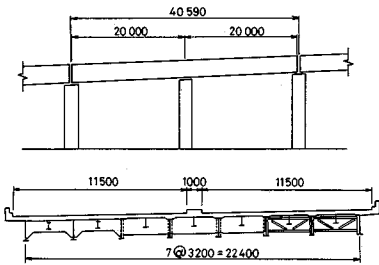


Fig.3 Bridge C : Non-composite plate girder bridge.

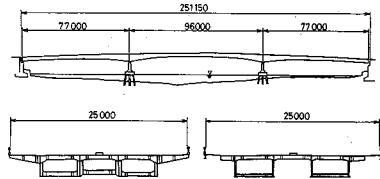


Fig.4 Bridge D : Three span continuous box girder bridge.

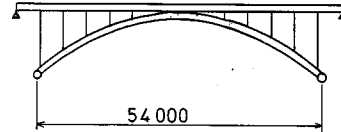


Fig.5 Bridge E : Deck type arch bridge.

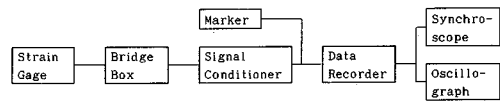


Fig.6 Block diagram of measuring stresses due to model truck.

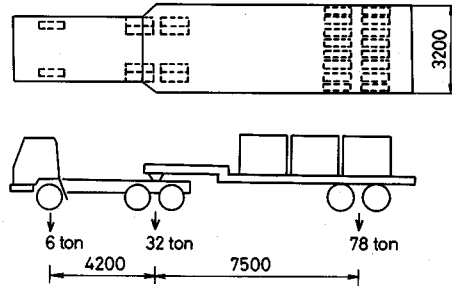


Fig.7 5-axle trailer used for model truck.

すると、通行車両の重量は極度に大きい、交通量は小さい。

3) 橋梁 C¹⁾ (非合成プレートガーダー橋, Fig.3)

橋梁 C は、昭和 39 年に架設され、供用開始後約 25 年経過した、2 径間連続非合成 I 桁橋 (8 主桁、上下線一体) である。橋長 40.59 m、支間割 2@20 m、幅員 11.5 m + 1.0 m + 11.5 m (6 車線、上下線分離)、主桁間隔 3.2 m からなり、一等橋として設計されている。床版は厚さ 19 cm の RC 床版である。主要幹線道路にあるため、現在の交通量は 1 日当たり約 10 万台にものほり、さらに、大型車混入率は約 50 % で、かなり過酷な交通条件下にあるといえる。

本橋では、昭和 57 年に横桁および対傾構が取り付けられている主桁の垂直補剛材 (コネクションプレート) と、主桁上フランジとの溶接部に疲労亀裂が発見されており、部分的に補修補強が行われている。

4) 橋梁 D (3 径間連続鋼床版箱桁橋, Fig.4)

橋梁 D は昭和 39 年に架設され、供用開始後約 25 年

経過した、3 径間連続鋼床版箱桁橋 (2 箱桁構造) である。橋長 251 m、支間割 77 m + 96 m + 77 m、幅員 25 m (6 車線、両側歩道付) からなる。橋梁 C と同じ路線に位置する橋梁であり、かなり過酷な交通条件下にあるといえる。昭和 62 年度に鋼箱桁のダイアフラムのコーナー部や鋼床版のリップの溶接部に亀裂の存在が認められ、補修・補強工事が行われた。

5) 橋梁 E (鋼 2 ヒンジ鋼桁アーチ橋, Fig.5)

橋梁 E は、昭和 39 年に架設されて約 25 年経過した鋼 2 ヒンジ鋼桁アーチ上路橋である。アーチ径間 54.0 m、幅員 9.9 m からなり、約 62 度の斜角をもつ斜橋である。本橋は、現在の交通量が 1 日当たり約 8 万台で、大型車混入率は約 26 % である。橋梁 C、D ほどではないが、かなり過酷な交通条件下にあるといえる。この橋梁では床版コンクリートの損傷や垂直材の上下端、さらに床組に疲労亀裂が発見されている。床版は鋼板接着、縦桁補強が行われ、床組部材の疲労亀裂は補修されているが、さらに大規模な改修・補強工事が行われて、損傷

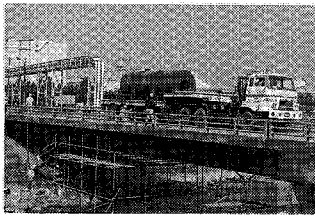


Photo 1 Model truck running on bridge B.



Photo 2 Measuring station.

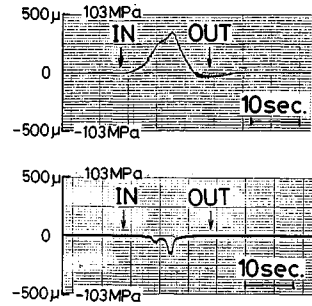


Fig.9 Outputs of strain recording.

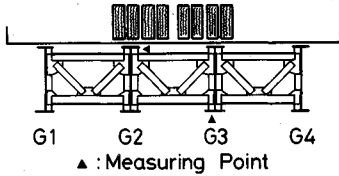


Fig.8 Loading position of model truck on bridge B.

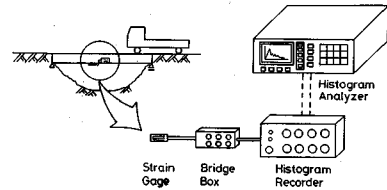


Fig.10 Block diagram of measuring stress range histogram.

部位はすべて撤去されることになっている。

(2) 荷重車による載荷試験

① 荷重車による載荷試験の概要

荷重車による載荷試験は、重量が既知の車両を橋梁上に静的、あるいは動的に載荷したときの、着目点におけるひずみ（応力）を測定する。一般に行われる荷重車による動的載荷試験の測定装置の構成を Fig.6 に示す。ひずみゲージの出力はブリッジボックス、動ひずみ測定器を通して、データレコーダにより磁気テープに記録される。マーカーは、荷重車の通過状況がわかるように、荷重車が測定対象支間に入出入りする瞬間などを記録しておくために用いられる。測定を行う間は、データレコーダの出力をシンクロスコープまたはペンレコーダに接続して、ひずみ波形をモニターする。

一般的な荷重車は、重量を設計荷重に等しくしたものであり、通常総重量約 20t のトラックを 1 台または複数台用いることが多い。

荷重車が単独に載荷されたときの発生応力を求めるという必要性から、供用中の橋梁では交通規制を行う。交通量の多い主要幹線道路では、一般交通に及ぼす影響が大きいため交通規制が難しく、この種の試験の問題点となっている。荷重車による載荷試験結果は、設計計算活荷重応力度や部材の許容応力度との比較を行うことにより、活荷重に対する橋梁の耐久性評価の一指標となる⁴⁾。

② 荷重車による載荷試験結果の一例

荷重車による動的載荷試験の一例について述べる。橋梁 B は、工場内にあるため特殊車両を用いている。荷重車としては、その中で最も重量の大きい Fig.7 に示す

総重量 116t のものを用いた。これは、中軸、後軸がタンデム軸からなる 5 軸のトレーラーで、荷重満載状態で前輪 6t、中輪 32t、後輪 78t であった。後輪は、一軸当たりタイヤ 8 輪を有し、車幅全体にわたってタイヤが配置されている。

荷重車が測定対象支間上を通過する様子を Photo 1 に、測定状況を Photo 2 に示す。特殊車両は、Fig.8 に示すように、幅員中央をまたいで時速約 10 km で走行することになっている。このときの主桁および垂直補剛材上端で測定されたひずみ波形の一例を Fig.9 に示す。この波形から、荷重車 1 台が通過したときに主桁支間中央の下フランジで発生する最大応力範囲（最大応力度と最小応力度の差）を求めると、82 MPa となる。

垂直補剛材上端のひずみは、圧縮側に大きさの異なる 2 つの山を示し、これらは、それぞれ中輪、後輪が着目した垂直補剛材上を通過したときに発生した。この波形から、荷重車 1 台が通過したときに垂直補剛材上端で発生する最大応力範囲を求めると、29 MPa となった。この値は、橋梁 C で計測された同位置のものよりかなり小さいものであり、床版が 35 cm と厚いことの効果がよく現われている。

(3) 一般交通による実働応力頻度測定

① 実働応力頻度測定の概要

前述の荷重車による載荷試験では、決められた載荷条件下での着目点の発生応力に注目しているのに対して、一般交通による実働応力頻度測定では、橋梁の交通量や種々の通過車両の重量等を反映した発生応力を求めることができる。また、実働応力頻度測定では、一般の交通

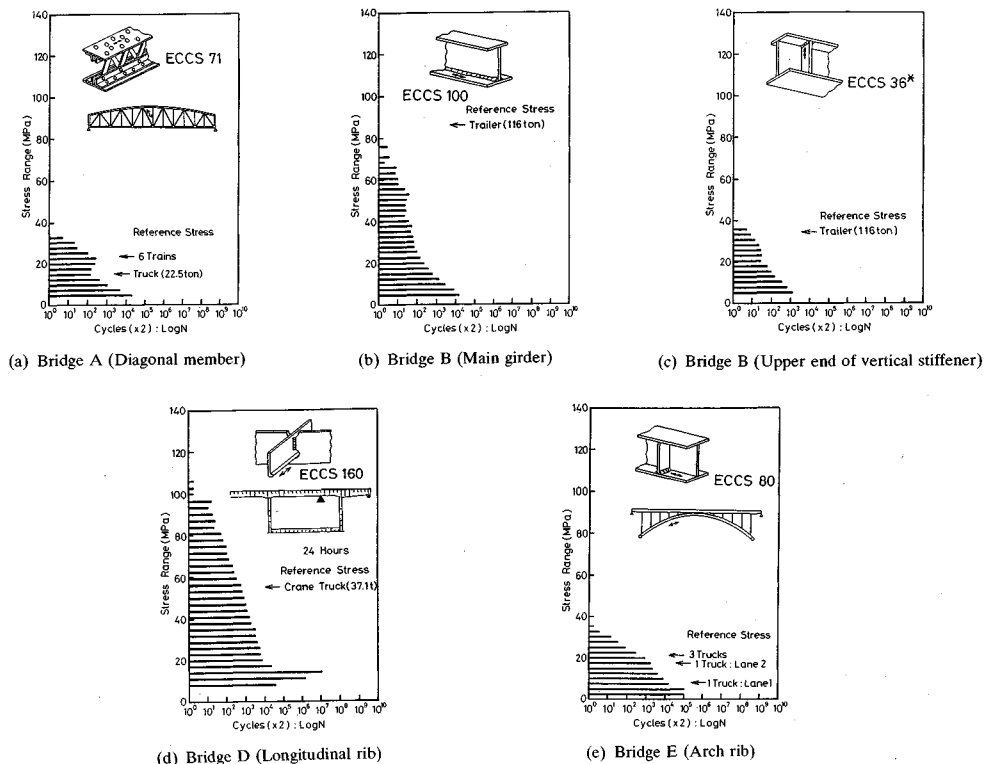


Fig.11 Examples of stress histogram records.

を荷重対象としているために、交通規制の必要がない。しかしながら、実働応力頻度測定では、応力と荷重条件との対応がつかない。そのため前述の荷重車による載荷試験を行って、その結果を参考値として示すことが望ましい。

実働応力の頻度測定には、ヒストグラムレコーダを用いるのが便利である。ヒストグラムレコーダでは、リアルタイムで動的なひずみ波形の変換を行い、頻度分析をした結果が記録される。頻度分析のための解析プログラムとしては、レインフロー法、極大値・極小値法、レベルクロッシング法など各種のものが用意されている。本研究の場合は、疲労の観点から、応力範囲とその発生頻度（繰り返し数）に着目するため、すべてレインフロー法を用いて頻度分析を行った。このシステムを Fig.10 に示す。

このヒストグラムレコーダは、無人測定が可能である。測定期間は、単位の間隔、たとえば1時間や24時間とすることが多い。実際の交通状態により近いデータを望む場合には、長期間にわたる測定が行われる。たとえばA橋では7日間、E橋では5日間連続の実働応力頻度測定が行われている。長時間の計測を行うと、より大きな応力範囲の最大値が計測される可能性があるが、その上限については不明である。また、A橋の計測では

外的にスタート・ストップを繰り返すことで、一定時間間隔のデータをとり込む工夫をしたが、ヒストグラムレコーダにその機能を組み込むことも可能である。

② 実働応力頻度測定結果の一例

応力頻度分布の測定結果の例を Fig.11 に示す。ここで、縦軸は応力範囲、横軸は発生頻度を対数目盛上で表している。発生頻度は、半波を1回としているので一般に言われる応力繰り返し数の2倍の数字となっている。図中には、荷重車による載荷試験の結果得られた応力範囲を参考値として示す。計測時間は、すべて24時間である。

1) リベットトラス橋の斜材の例

Fig.11 (a) は橋梁Aの斜材で測定されたものである。荷重車は22.5tの3軸ダンプトラックおよび6両編成の電車である。実働応力範囲の頻度分布は、6両編成の電車による応力範囲のあたりで、1つピークを生じている。そして、トラックによる応力範囲より下では、発生頻度は増加している。6両編成の電車による応力範囲を越える応力範囲は、過積載のトラックが列車と大型車が同時に通行したときに発生していると考えられる。

2) プレートガーダー橋の例

Fig.11 (b) は橋梁Bの主桁下フランジ、Fig.11 (c) は、垂直補剛材上端で測定されたものである。橋梁B

では、前述の116tの5軸トレーラーによる最大応力範囲が一般交通により発生する応力範囲の上限値にほぼ等しい。すなわち、用いた荷重車が本橋を通過する車両の最大重量クラスに属することがわかる。また、橋梁Bの主桁に発生する応力範囲の最大値は約80MPaで、これは、80t以上の工場内特殊車両の通行によるものである。また、一般のプレートガーダー道路橋の主桁下フランジでは、50MPaを超える応力範囲の最大値が得られることはまれであり、橋梁Bは、それに比べて約2倍程度の応力範囲が発生している。ただし、応力範囲の発生頻度は比較的小さい。

3) 鋼床版床組の例

Fig.11 (d) は、橋梁Dの鋼床版縦リブ(バルブプレート)下面で測定された。荷重車として車両重量37.1tの45t吊トラッククレーン(4軸)を用いたが、橋梁Dでは、一般交通のもとでは荷重車によるものよりも大きい応力範囲がかなり頻繁に発生していた。一般交通のもとで得られた最大応力範囲は約105MPaであり、これは参考値の約2倍に相当する。この橋梁では37tを超す重量の車両がかなりの頻度で通行しているか、重量車が近接して走行し、それが大きな応力範囲を発生させているように見受けられる。

また頻度分布の特徴としては、応力範囲の小さい領域で、発生頻度は桁違いに大きくなっている。この鋼床版では微小な応力範囲または微小振動が常時生じているものと考えられる。

4) アーチ橋の主構の例

Fig.11 (e) は橋梁Eの走行車線側のアーチリブで測定された。参考値としては、荷重車(総重量20.8tの3軸散水車)3台が並行連行走行した場合、荷重車1台が走行車線を走行した場合、および追越車線を走行した場合の最大応力範囲が示されている。

一般交通のもとで得られる最大応力範囲は、荷重車3台並行連行走行時の2倍近い値となっている。この橋梁でも、20tを大きく上回る車両の通行があると考えられる。

これらを比較すると、橋梁A, Bと橋梁D, Eでは、全体的な発生頻度に差のあることがわかる。これは、これらの橋梁間の交通量の差を反映したものであると考えられる。ちなみに橋梁Aでは交通量は1日当たり列車250本および自動車1万台程度であったのに対し、橋梁Dでは約10万台、橋梁Eでは約8万台であった。

3. 実働応力測定に基づく疲労寿命の評価方法

(1) 疲労寿命を評価する継手の分類

本研究では、継手の分類および基準疲労強度(設計S-N線図)に、ECCS疲労設計指針^{*)}を用いた。ECCS疲労設計指針では、傾き $m=3$ の設計S-N線図

上で、応力繰返し数 2×10^6 回に対する疲労強度(MPa)を継手分類番号としている。設計S-N線図を用いた疲労寿命評価では、(平均値 $-2 \times$ 標準偏差)で与えられる設計S-N線図を用いているため、得られる結果は短寿命側の評価をしている。以下に、本研究で注目した橋梁A-Eにおいて、疲労寿命の評価を行う継手分類について述べる。

1) 橋梁A

橋梁Aは、トラスの主構すなわち斜材、垂直材、下弦材はリベット構造が用いられている。リベット継手の疲労試験に関する文献⁷⁾を参考に継手分類71と仮定した。

2) 橋梁B, C

橋梁BとCは、プレートガーダー形式の橋梁である。着目点のうち、主桁下フランジは、主桁ウェブと下フランジの長手方向連続すみ肉溶接継手に注目して、継手分類100を仮定した。また、対傾構または横桁が取り付けられた主桁の垂直補剛材上端は、荷重伝達型すみ肉溶接継手となり、溶接ルートと止端からの亀裂の発生がみられる。ここでは、ルート部からの亀裂の発生を仮定して、継手分類36とした。

3) 橋梁D

橋梁Dでは、鋼床版縦リブ下面で測定された応力頻度分布について疲労寿命評価を行う。この縦リブは、バルブプレートを用いており、圧延部材と考えて、継手分類160を用いた。鋼床版の縦リブと横リブの交差部は複雑な挙動を示すことが多く、この部分の局所的な実測応力度から疲労寿命を評価することも考えられる。ここでは、縦リブそのものの軸方向の応力について検討した。なお、これらは、輪荷重が多く通るリブで、合計8か所について、24時間2回計測を行ったものである。

4) 橋梁E

橋梁Eのアーチの垂直材の上端および下端とアーチリブについて疲労寿命評価を行う。垂直材の上下端では、アーチ部材および床組との間に添接板が配置されており、垂直材と添接板は荷重伝達型すみ肉溶接継手により接合されている。この継手では、溶接止端部から亀裂が発生した。これは継手分類71に相当する。アーチリブでは、ウェブとフランジの長手方向すみ肉溶接継手のほかに、補剛材のすみ肉溶接継手が存在する。ここでは、補剛材のすみ肉溶接継手に着目し、その継手を荷重非伝達型すみ肉溶接継手と仮定した。これは、継手分類80に相当する。

* 1) 1989年11月に鋼構造協会から疲労設計指針が出された。ECCS疲労設計指針とは、設計S-N線図や継手分類が異なるが、基本的な考え方は、よく似ている。本研究を進めているときには、鋼構造協会疲労設計指針は公表されていなかった。

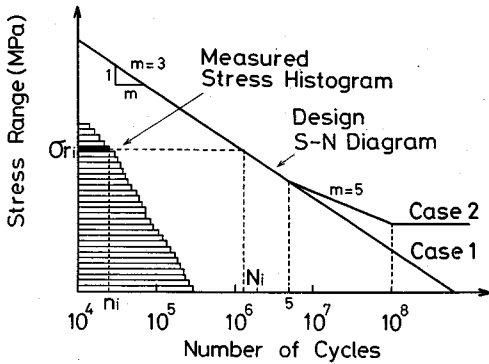


Fig.12 Design S-N diagrams specified in ECCS.

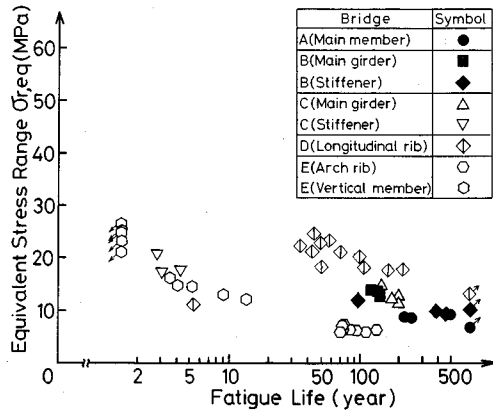


Fig.13 Relationship between fatigue life and equivalent stress range for bridges A and B.

(2) 実働荷重による疲労寿命評価

実測された実働応力頻度分布に対して、Fig.12に示すECCS疲労設計指針に規定されている2種類の設計S-N線図を用いて疲労損傷度Dを計算した。

- 1) Case 1: (修正マイナー則) 傾きが $m=3$ で一定な設計S-N線図を用いる。この方法では疲労寿命を最も短く予想する。
- 2) Case 2: (3直線法) 定振幅疲れ限度(500万回疲労強度)以上の応力範囲に対しては、Case 1と同じく $m=3$ の直線を用いる。定振幅疲れ限度とカットオフ限度(1億回疲労強度)との間では、S-N線図の傾きを5に変化させ、さらに、カットオフ限度以下の応力範囲の影響は無視する。この方法では、定振幅疲れ限度とカットオフ限度との間の応力範囲の影響がCase 1に比べて小さく評価される。

計算では、まず実測で得られた測定点ごとの応力頻度分布のヒストグラムを、発生応力範囲 σ_{r_i} とその発生頻度(繰返し数) n_i との組合せとしてとらえる。次に、対象とする継手の設計S-N線図より応力範囲 σ_{r_i} が作用したときの破壊に至る応力繰返し数 N_i を求める。マイナー則では、設計S-N線図上で対象とするすべての応力範囲に対して (n_i/N_i) の総和を求めることにより疲労損傷度Dを定義する。すなわち、

$$D = \sum \frac{n_i}{N_i} \dots \dots \dots (1)$$

疲労損傷度Dは、 $D=1$ となったときに対象とする継手に疲労損傷が生じることを意味している。

本研究において測定された応力頻度分布は、24時間(1日)当たりのものであるから、測定当日の車両の通行状況が対象橋梁における代表的(平均的)なものであり、さらに、今後もこの交通状況が続くと仮定すれば、1年間の累積疲労損傷は、 $365 \times D$ となる。したがって、疲労寿命をL(年)とすれば、

$$L = 1 / (365 \times D) \dots \dots \dots (2)$$

として疲労寿命を計算することができる。

式(1)により疲労損傷度Dを求める代わりに、 $D=1$ の状態を等価応力範囲 $\sigma_{r,eq}$ を用いて表わすことが可能である。設計S-N線図として、前述のCase 1の $m=3$ を用いた場合、 $\sigma_{r,eq}$ は次式で与えられる。

$$\sigma_{r,eq} = \left\{ \frac{\sum (n_i \cdot \sigma_{r_i}^3)}{\sum n_i} \right\}^{1/3} \dots \dots \dots (3)$$

この場合、設計S-N線図上で $\sigma_{r,eq}$ に対応する繰返し数が疲労寿命に等しい。すなわち、等価応力範囲 $\sigma_{r,eq}$ は、応力範囲 σ_{r_i} と発生頻度 n_i の組合せからなる実働応力頻度分布を1つの等価な応力範囲に置き換えたものである。設計S-N線図としてCase 2の3直線法を用いた場合には、等価応力範囲は次式で与えられる。

$$\sigma_{r,eq} = \left\{ \frac{\sum \sigma_{r_i}^3 \cdot n_i + \sum \sigma_{r_j}^5 \cdot n_j / \sigma_{r_D}^2}{\sum n_i + \sum n_j} \right\}^{1/3} \dots \dots \dots (4)$$

ここに、 σ_{r_i} : 定振幅疲れ限度以上の応力範囲

n_i : σ_{r_i} の発生頻度

σ_{r_j} : 定振幅疲れ限度からカットオフ限度までの応力範囲

n_j : σ_{r_j} の発生頻度

σ_{r_D} : 定振幅疲れ限度 (5×10^6 回疲労強度)

4. 疲労寿命の計算結果と考察

(1) 橋梁の構造特性と通過交通の影響

まず、橋梁の構造特性と通過交通の影響をみるために、実測された実働応力範囲データからCase 1(修正マイナー則)によって疲労寿命の計算を行った。通過交通状況の比較的厳しくない橋梁A、Bの継手の疲労寿命をFig.13に黒塗のシンボルで示す。以下、Fig.13~17では、すべて、24時間の計測結果を用いており、計測点ごと

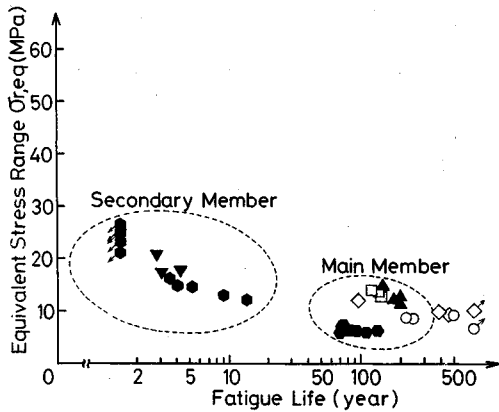


Fig.14 Relationship between fatigue life and equivalent stress range for bridge C, D, and E.

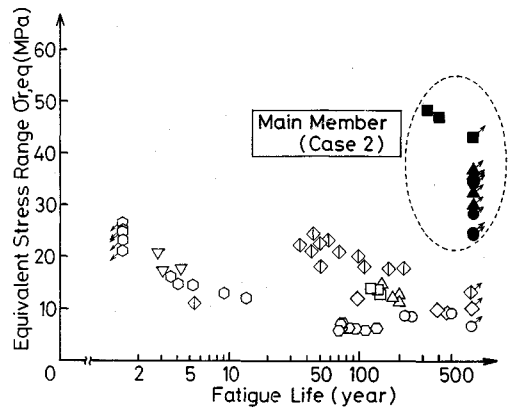


Fig.16 Relationship between fatigue damage and equivalent stress ranges for main members (Design S-N diagram : Case 2).

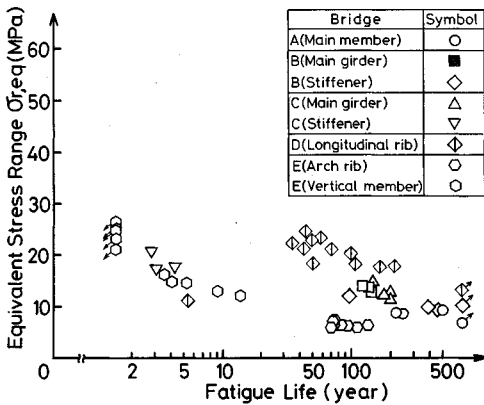


Fig.15 Relationship between fatigue damage and equivalent stress ranges for bridges B and C (Plate girder bridge).

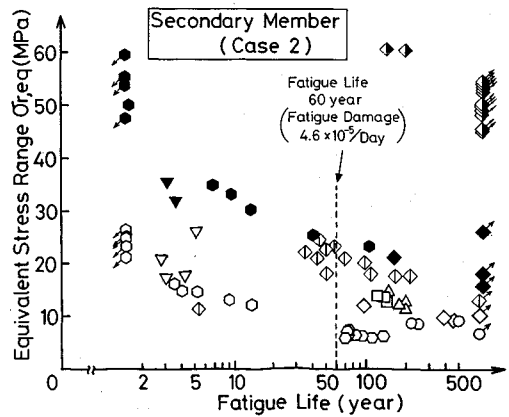


Fig.17 Relationship between fatigue damage and equivalent stress range for main members (Design S-N diagram : Case 2).

に寿命を計算している。ただし、計測点数が多い場合や、何日も計測が繰り返された場合には、その代表的な点を選んでプロットした。橋梁 A では、1日およそ電車 250 本と車両 1 万台、橋梁 B では 80 t を超える重車両が約 20 台通るほかは交通量が小さく、橋梁 C, D, E に比べて、交通量が小さい。橋梁 A のリベットトラスの主構では、約 220 年以上、橋梁 B の主桁では 120 年から 140 年、垂直補剛材上端では最も短いもので約 90 年で、その他では 380 年以上という疲労寿命が得られた。設計 S-N 線図から計算される疲労寿命は短寿命側になることを考慮すると、将来にわたって交通状況に大きな変化がなく、腐食による影響がないと仮定すれば、橋梁 A, B で対象とした継手では、供用期間中における疲労亀裂の発生の可能性は非常に小さいと思われる。

通過交通状況が厳しいと考えられる橋梁 C, D, E の継手の疲労寿命を Fig.14 に黒塗で示す。橋梁 C, D の交通状況は日交通量約 10 万台、大型車混入率約 50 %、

橋梁 E では日交通量約 8 万台、大型車混入率約 26 % である。橋梁 C のプレートガーダー主桁下フランジでは 100 年以上、橋梁 E の主構（アーチリブ）では 70 年から 130 年の間の疲労寿命が得られた。これに比べて、橋梁 C の補強前の垂直補剛材では 3 年から 4 年、橋梁 D の縦リブでは 5 年程度のもの 1 か所を除いても 30 ~ 70 年程度、橋梁 E の垂直材上下端では 15 年以内の疲労寿命となり、比較的短い疲労寿命が得られた。

交通量の多い橋梁 C, D, E では、主桁・主構の疲労寿命とアーチの垂直材、垂直補剛材の疲労寿命には、大きな差があることがわかる。特にここに示した垂直補剛材上端、アーチの垂直材上下端では、過去に実際に疲労亀裂が発生した例がある。実働応力の測定の結果得られた疲労寿命は、主桁・主構に比較してこれらの部材の方が疲労亀裂が発生しやすいという指標となり得ると考えられる。

橋梁 B と C は、交通状況が異なる。Fig.15 は、橋梁

B, Cの主桁および垂直補剛材上端の疲労寿命を黒塗りで示す。橋梁Cは日交通量が約10万台、大型車混入率が約50%と、かなり過酷な交通条件であるが、主桁の疲労寿命は、交通量の小さい橋梁Bとそれほど差はない。むしろ橋梁Bの方が橋梁Cよりも短い疲労寿命となっている。橋梁Bは特殊な重量車を通すため、主桁の疲労寿命は短くなったと思われる。ところが、垂直補剛材上端に関しては、橋梁BとCとで得られた疲労寿命に大きな差がある。この理由としては、交通量が小さいことに加え、橋梁Bでは、厚さ23cmのRC床版上に、厚さ12cmのスチールファイバーコンクリート舗装がされている。床版が厚いことと主桁間隔が2.0mと比較的狭いことが、発生応力範囲を小さくしていると思われる。それに対して、橋梁Cでは床版は厚さ19cmのRC床版で、主桁間隔は3.2mである。垂直補剛材上端では、床版のたわみおよび主桁間の荷重分配作用に起因して応力が発生することを考えると、床版厚と主桁間隔の与える影響が大きいと思われる。

(2) 異なる設計S-N線図に関する検討

ここでは実測された実働応力範囲データから、設計S-N線図Case2(3直線法)を用いて疲労寿命を計算し、Case1の場合と比較する。まず、主桁下フランジとアーチリブについて求めた結果をFig.16に示す。

設計S-N線図としてCase2を用いた場合は、カットオフ限度以上の応力範囲のみを取り扱うため、式(4)で計算される等価応力範囲はCase1の場合よりも大きくなる。Fig.16をみると、主桁下フランジおよびアーチリブでは、Case2により求めた疲労寿命はほとんどの点で500年以上となった。たとえば、橋梁Aの斜材では、Case1によって求めた疲労寿命が220年であったのに対して、Case2では9700年となった。これは、ほとんどの応力範囲がカットオフ限度以下になることに起因する。また、橋梁Eのアーチリブでは、発生応力範囲の最大値がカットオフ限度を下回ったために $D=0$ となり、無限大の疲労寿命が得られたところもあった。

同様な計算をして垂直補剛材上端、鋼床版縦リブ、アーチの垂直材について行った結果をFig.17に示す。この結果、垂直補剛材上端とアーチの垂直材では、設計S-N線図としてCase1とCase2を用いた場合の疲労寿命にそれほど大きな差はないことがわかった。このことは過去に実際に疲労亀裂の発生したことのある継手や亀裂の発生する可能性の高い継手では、設計S-N線図の考え方にかかわらず、主部材に比較して短い疲労寿命が得られることを示している。ただし、橋梁Eの垂直材上下端では、Case1と2のどちらの設計S-N線図を用いても、2年以内という非常に短い疲労寿命が得られた。用いた設計S-N線図は、疲労強度の下限であること、他の垂直材に実際に疲労亀裂が発生していることを考え

ても短い寿命となっている。長寿命域の設計S-N線図の考え方が不明瞭なことも考え合わせると、計算の結果得られる疲労寿命は必ずしも十分に精度よく求められているとはいいがたい。すなわち、ここで得られた寿命は、相対的な疲労に対する危険度と考えた方が妥当であろう。これまでに、長寿命域における変動荷重による疲労試験データは余り得られていないため、長寿命域での設計S-N線図の取り扱いも不明瞭な点が多い。このことに関しては、今後の研究課題として挙げられる。

(3) 疲労損傷度の目安

実構造物での応力範囲の頻度分布の計測結果を評価する場合、対象の継手の疲労損傷の可能性、すなわち残存寿命が問題になることが多い。前節では、相対的な寿命の評価でありながら、Case1とCase2の設計S-N線図により計算される寿命の差の小さいものに、疲労損傷の発生しているケースが多いことを示した。ここではさらに一步踏みこんで、疲労損傷の生じる可能性の境界を与えることを試みた。

Fig.17に示す破線は、疲労寿命60年を示す線であるが、過去に疲労損傷を生じた経験のある部材(ここでは便宜上2次部材とよんでいる)は、この線より短寿命側にある。疲労損傷は、発生する応力範囲の大きさとその繰り返し数の多さをその要因として発生する。過去の経験から推測して、本研究で示したような手法でヒストグラムを整理した場合には、疲労損傷の有無の判定には疲労寿命60年が1つの目安となるであろう。これは1日あたりの疲労損傷度に換算すると約 4.6×10^{-5} に相当する。すなわち、24時間における疲労損傷度 4.6×10^{-5} 当たりが、疲労損傷を生じる可能性の大きい継手とそうでない継手の境界の一応の目安と考えられる。今後さらに多くの種々の橋梁における測定データを集めてこの損傷度の妥当性を評価する必要があると考えられる。

5. まとめ

橋梁およびそれに準ずる鋼構造物に作用する実働応力の測定は、疲労の観点からみた構造物の耐久性の評価に重要な指針を与えるものと思われる。そこで、重量が既知の荷重車による応力の測定結果および一般交通により発生する応力範囲の頻度分布の結果を収集した。実働応力測定が行われた箇所については、ECCSで提案されている2種類の設計S-N線図を用いて、測定された応力範囲の頻度分布から、マイナー則により疲労損傷度ならびに疲労寿命の計算を行った。本研究で得られた結果をまとめると以下ようになる。

(1) 文献5)などに示されるように、ヒストグラムレコーダを用いることにより、一般交通により発生する応力範囲の頻度分布を容易に求めることが可能である。

(2) 実際の交通状態のもとでは、設計荷重(T-20)

単独により発生する応力範囲よりもかなり大きな応力範囲が発生する。

(3) 橋梁の主桁および主構では、実測により得られた応力範囲の頻度分布から求められる疲労寿命は、数百年から数千年と、かなり長い値となる。

(4) 過去に実際に疲労損傷が発生している橋梁部材の継手では、実測により得られた応力範囲の頻度分布から求めた疲労寿命は主桁や主構について求められる疲労寿命よりもかなり短い値となる。

(5) 応力範囲の頻度分布の状況および変動荷重を受ける継手の設計 $S-N$ 線図の考え方により、計算の結果得られる疲労寿命に大きな差が生じる。これは特に、カットオフ限度以下の応力範囲による影響が大きい。このため、疲労寿命の予測を精度良く行うには長寿命域(応力繰返し数 5×10^6 回から 1×10^7 回以上)を含めた合理的な設計 $S-N$ 線図が必要となり、今後の研究が待たれる。

(6) (5) で述べたように、疲労寿命は必ずしも精度よく求められるとはいいがたい。しかしながら、ここで示した疲労寿命は相対的にみた場合、疲労に対する相対的な評価基準となり得ると考えられる。

(7) 本研究で取り扱った橋梁では、疲労損傷の可能性の有無が、疲労損傷度 $D=4.6 \times 10^{-5}$ で区別できた。今後さらに多くの橋梁における測定データおよび解析例を積み重ねることにより、疲労の観点からみた橋梁の耐久性評価が可能になると考えられる。

謝 辞：本研究で取り扱った橋梁 A~E のうち、A, B は著者らの研究室で計測し、D, E は当該橋梁の補修・補強委員会を通じて計測に参画した。また、橋梁 C は、橋梁 B と D の対比のため、文献 3) より引用した。橋梁の疲労損傷を取り扱う性質上、本報告の構成に必要

と思われるデータ以外は削除したため、読者に不透明感を抱かせることになるとと思われるが、お許しいただきたい。また、損傷を生じた橋梁 C, D, E は、補修・補強工事が完了しているか、進行中である。いずれも今後のこの種の実務上、大変有意義な情報を提供しているのので、報告書等が公表されるとよいと思われる。なお、本論文の一部は、土木学会論文集に投稿後、国際構造工学会 (IABSE) ワークショップ (1990 年 4 月 4 日~6 日、スイスローザンヌで開催) にて発表されたことを申し添える。

本研究に際しては、名古屋大学土木工学科大学院の土橋 勝氏、研究生の田中信治氏、東京測器研究所の小沢信之氏、愛測エンジニアリングの樽谷省三氏に協力を得た。ここに記して、感謝の意を表します。本研究は文部省科学研究費(一般 C, 代表者: 山田健太郎)の補助を得たことを付記する。

参 考 文 献

- 1) 西川和廣：道路橋における疲労問題と補修・補強、橋梁と基礎、第 17 巻、第 8 号、pp. 19~23, 1983.
- 2) 岩崎雅紀・名取 暢・深沢 誠・寺田博昌：鋼橋の疲労損傷事例と補修・補強対策、横河橋梁技報、No. 18, pp. 36~52, 1989.
- 3) 建設省土木研究所：共和高架橋載荷試験報告書、土木研究所資料、第 2123 号、1984.
- 4) 建設省土木研究所：疲労損傷を受けた合成 H 形鋼橋の応力頻度測定、土木研究所資料、第 2344 号、1986.
- 5) 建設省土木研究所：既設橋梁の耐久性評価・向上技術に関する調査研究、土木研究所資料、第 2420 号、1986.
- 6) 山田健太郎・加藤雅史・古川正勝・加藤正浩：既設トラス橋の実働応力測定と疲労寿命評価、土木学会第 43 回年次学術講演会講演概要集、I-213, pp. 480~481, 1988.
- 7) ORE : Statistical Analysis of Fatigue Tests on Steel Riveted Connections, 1986.

(1989. 7. 19・受付)

FIELD MEASUREMENT OF SERVICE STRESS AND FATIGUE LIFE EVALUATION OF BRIDGES

Kentaro YAMADA, Yukifumi ISHIGURO and Masafumi KATO

In order to assess durability of steel bridges against fatigue, service stress measurements were carried out on several types of bridges. Under the service condition, histogram recorder was used to measure stress ranges and their frequencies in service. Fatigue life was evaluated by using the Miner's cumulative damage rule. Classification of joint details and design $S-N$ diagrams were quoted from ECCS recommendations for the fatigue design of steel structures. It was found that evaluated fatigue life was longer than a few hundred years in the main members. However, some secondary members showed much shorter fatigue life than the main members. Actually some of the secondary members had experienced fatigue cracking. Therefore, the fatigue life computed from the measured stress range histogram was good indication of severity against fatigue.

内容紹介

土木学会論文集 内容紹介

No. 422/ I -14, 1990. 10

河川橋梁形式選定のための実用的なエキスパートシステムに関する研究

西土隆幸・前田研一・野村国勝

土木学会論文集 第422号/I-14, pp. 121~132, 1990. 10.

本論文は、河川橋梁の上下部工形式選定に対し、熟練設計者以外の設計者でも十分満足できる結果が得られる実用的なエキスパートシステムを示すものである。このシステムは、①河川構造令を完全に満足する径間割が行える。②あいまいな土質条件にファジィ理論を用いることにより最適な杭形式を選定できる。③大型電算機とワークステーションとをオンラインすることにより高精度の杭工費が算定できる、という特長を有するものである。

個別要素法による岩屑流解析

内田吉彦・伯野元彦

土木学会論文集 第422号/I-14, pp. 85~96, 1990. 10

個々の粒子の運動方程式をたて、その動きを追跡して行くという個別要素法を用いて、山地で地震が起った場合に屢々発生する斜面崩壊が生長して起る岩なだれ(岩屑流)のシミュレーションを行った。その結果、大きい岩塊ほど流れ表面に浮上し易いこと、また、表面の流速が早いと大きい岩塊ほど、流れ先端部に集まり、他と衝突した場合破壊能力が大きくなることがわかった。さらに、流れ先端部は、巻き込み運動をしていることも知られた。

大型ソケットの静的強度特性とその設計法に関する研究

小村 敏・和田克哉・高野晴夫・坂本良文

土木学会論文集 第422号/I-14, pp. 133~144, 1990. 10.

ケーブル定着材として一般的な亜鉛鋼合金を用いた大型ソケットについて、太径ケーブルを用いてその静的強度特性と新しい設計法を研究した。太径ケーブル用大型ソケットに従来設計法を適用すると、ソケット肉厚が薄くなりケーブル破断荷重下においてソケット塑性変形が大きくなるため、今までの細径ケーブル用ソケットと異なる力学性状を示すなどの問題点が明らかになった。そこで、ケーブル終局強度に対するソケットの新しい設計法として剛性の照査を行う方法を提案した。

選点法による液体に接する円筒殻の自由振動解析

三上 隆・芳村 仁

土木学会論文集 第422号/I-14, pp. 97~107, 1990. 10.

本研究は、直交多項式の零点を選点とする選点法を用いて、微積分方程式で表される内部または外部に液体を有する円筒殻の自由振動問題を解析したものである。まず、既往の解との比較により本手法の妥当性を検討し、これを用いて内部・外部問題の固有振動数の基本的特性を明らかにする。最後に、本手法とDunkerley近似の応用により、円周方向波数 $n=1$ に対する基本固有周期略算式を提案する。略算式は十分な精度を有するもので、他の近似解法の精度検証にも有効である。

モデル誤差および測定ノイズが構造物の剛性および減衰係数の推定に及ぼす影響

松井邦人・栗田哲史

土木学会論文集 第422号/I-14, pp. 145~154, 1990. 10.

本論文は、構造同定に用いるモデルや測定データに含まれる誤差、ノイズが同定結果に及ぼす影響の評価方法として、同定パラメーターの誤差に対する感度を求める方法を誘導している。この感度より、既知として与える定数に要求される精度、測定データに要求される精度、および測定位置の良否を判断することができる。

数値シミュレーションにより理論検証を行った結果、本手法の有効性が確認された。

鉄筋コンクリートで部分的に合成された鋼矢板の曲げ挙動

清宮 理・横田 弘・野口孝俊

土木学会論文集 第422号/I-14, pp. 109~119, 1990. 10.

腐食が著しく、補修を施す必要性に迫られている鋼矢板岸壁では、腐食している箇所を鉄筋コンクリートで被覆して失われた耐力を回復する対策がある。地震力、上載荷重などの外力を受ける際の合成部材としての力学特性の把握と設計法の整備を目的とし、鋼矢板の曲げ載荷試験を実施し、合成部材の破壊に至るまでの過程を調べ、外力に対する補修工の抵抗機構を把握した。鋼矢板と補修材の合成が満足されるならば、今回提案した設計式で補修工の耐力を確保できる。

有限要素法による浅水長波方程式の改良型周期的時間ガレルキン解法

金子典由・川原陸人

土木学会論文集 第422号/I-14, pp. 155~164, 1990. 10.

有限要素法により、移流項を考慮した非線形浅水長波方程式を周期的ガレルキン法を用いて周期解析を行った。この手法では時間に関する関数として、共役複素数の一対の指数関数を用いた。周期成分によって生成される定常成分を、連成解析により求めた。一次元の波動問題について解析解と照合して検証を行った。水理模型モデルの潮汐残差流実験、および東京湾残差流の観測結果との比較を行った結果、良好な一致を得た。

鋼桁ディテールの道路橋シミュレーション荷重疲労

三木千寿・豊田幸宏・森 猛・榎土尚宏

土木学会論文集 第422号/I-14, pp.165~173, 1990.10.

道路橋部材での変動応力をパーソナルコンピュータでシミュレートし、それを荷重波形として、フランジガセットやウェブガセット、垂直スティフナ、カパープレートを含む大型溶接桁の疲労試験を行い、その結果をいくつかの疲労設計規準類での疲労設計曲線と比較している。さらに、桁に生じた疲労亀裂に対してストップホールを中心としたいくつかの方法で補修を行い、その効果についても検討している。

集成材桁橋の現場実験とその理論的検討

薄木征三・Richard M. GUTKOWSKI

土木学会論文集 第422号/I-14, pp.175~186, 1990.10.

鶴養橋は、秋田営林局管内にある鶴養林道に、洪水で流出した橋に換って1988年8月に架設された。この橋はスパンは13.6mしかないが、主桁に集成材を、床版には集成材パネルを用いている。対傾構として鋼トラスを3本使用し、荷重分配効果を向上させている。本報告は、格子桁理論に基づいてT-14荷重に対する力学的挙動を解析し、実橋の現場実験の結果と比較検討し、この形式の橋梁に関する基礎資料を提示している。さらにAASHTOの設計規準(荷重分配係数)を採用した場合の主桁のたわみを示し、実験結果と比較検討している。

強震動中の地表面ひずみ

V. W. Lee

土木学会論文集 第422号/I-14, pp.187~194, 1990.10.

強震時に地盤内を伝播する地震波によって発生する地表面ひずみの計算を可能にするために、Lee & Trifunac (1985, 1987)のねじりと動揺加速度の合成法を一般化した。ひずみの時刻歴は対応する速度成分の時刻歴と良く似ている。ひずみのフリースペクトル振幅は対応する速度成分のスペクトル振幅を代表的な位相速度で除したものに比例する。

応答特性の空間的変動がフィルダムの地震時安定性に及ぼす影響

平田和太・篠塚正宣

土木学会論文集 第422号/I-14, pp.195~204, 1990.10.

本論文は堤軸方向の応答特性のランダム性がフィルダムの地震時安定性に及ぼす影響について検討を行ったものである。解析では確率論的な手法を用いて、応答特性および入力ランダム性を考慮している。ダムが急峻な谷に位置する場合には、従来の2次元解析では考慮されない堤軸方向の地震時相対変位に起因するせん断ひずみがダムの地震時安定性に無視できない影響を及ぼす等の結論が得られている。

簡便化された三次元有限要素法による振動モード解析

年縄 巧・大町達夫

土木学会論文集 第422号/I-14, pp.205~212, 1990.10.

表面波の固有関数を補間関数として用いた有限要素法を提案した。この手法を用いてポアソン比0.25および0.40の2次元面内、面外ひずみモデルの固有値解析を行った。固有モードから求められる表面波の分散特性や振幅特性は特定の周期帯域をのぞいて理論値とよく一致した。また、簡単な3次元地盤の固有値解析を従来の有限要素法と比較して行ったところ、自由度で1/6、演算時間で約1/170もの計算労力の軽減が実現されることがわかった。

強震動スペクトルの統計解析と震源スペクトル予測への応用

神山 真・松川忠司

土木学会論文集 第422号/I-14, pp.213~224, 1990.10.

強震動スペクトルに関する重回帰モデルがダミー変数の概念を利用して導かれる。ダミー変数は観測点地盤の局所性による増幅特性を求めるためにも、スペクトル振幅のマグニチュード、震源距離依存性の非線形性を求めるためにも利用される。重回帰分析結果は断層理論、波動伝播の観点から論ぜられるとともに、震源スペクトルの相似則が統計的に導かれる。統計的震源スペクトルは代表的な震源断層理論による理論震源スペクトルと比較され、パイアーモデルの優位性が述べられる。

正負交番軸方向荷重を受けるシールドトンネル模型の変形および破壊特性

川島一彦・杉田秀樹・加納尚史

土木学会論文集 第422号/I-14, pp.225~233, 1990.10.

都市域においてライフライン施設用に建設されることが多いシールドトンネルの耐震設計法を開発する上で重要な、トンネル覆工の変形および破壊特性を、リングを組んだシールドトンネル模型の正負交番軸荷重実験を行うことにより検討した。本検討により、軸方向荷重を受けるシールドトンネルの損傷は、二次覆工のあるなしに係わらずリング接合面においてのみ生じやすいこと、また、トンネル長手方向の変形性能を向上させるための方法等が明らかにされた。

結晶塑性モデルによる亀裂先端近傍の弾塑性解析

小畑 誠・奥田純三・後藤芳顕・松浦 聖

土木学会論文集 第422号/I-14, pp.235~243, 1990.10.

亀裂先端部での延性的な破壊現象を解明する一つの試みとして、鈍化した先端近傍に空隙のある典型的な問題を物理的な長さの考察からふさわしいと考えられる結晶塑性モデルを用いた大変形弾塑性解析を行った。境界値問題は境界層近似により設定し、数値解法としては有限要素法を用いた。解析結果は従来の巨視的な塑性モデルによるものとは異なり、変形がより集中しやすくなることが明らかにされ、この種の問題に微視構造を考慮することが重要であることが示された。

コンクリート構造の部分安全係数の決定に関する研究

小出英夫・尾坂芳夫

土木学会論文集 第422号/I-14, pp.245~254, 1990.10.

対象とする設計問題の範囲, およびその範囲で用いられる共通の部分安全係数値の決定に, 安全性と経済性の両面を考慮する方法を提案した. この中で, すべての設計問題において安全性を満たし, かつ異なる設計問題において導かれる部分安全係数値の変動が小さい部分安全係数の与え方を示した. さらに, Fuzzy 理論を用いて, 共通の部分安全係数値を広い範囲の設計問題に適用することによって生じる経済性の“むだ”の評価方法を示した.

斜張橋の遊動円木振動数特性とその実用算定法に関する研究

米田昌弘

土木学会論文集 第422号/I-14, pp.285~294, 1990.10.

本論文では, まず, 中央支間長 400 m のファン型とハープ型の斜張橋モデルをそれぞれ対象として, 斜張橋の遊動円木振動数特性に及ぼす各種構造設計要因の影響を検討している. そして, この結果を踏まえ, 初期の設計段階では実用上十分な精度で, 斜張橋の遊動円木振動数を推定できる実用算定式を提案するとともに, いくつかの数値計算例から, 実橋への適用性についても検討している.

多角形断面鋼柱の局部座屈に関する実験的研究

右田泰弘・青木徹彦・福本晴士

土木学会論文集 第422号/I-14, pp.255~263, 1990.10.

箱形断面と円形断面の中間に位置する多角形断面鋼柱の局部座屈強度を実験的に検討した. 柱長 1500 mm で, 幅厚比パラメーター $R=0.59\sim 1.19$ の範囲の正四 (3本), 五 (2本), 六 (3本), 七 (1本), 八 (5本) 角形断面の供試体計 14 本を板厚 4.5 mm の SS41 材で製作し, 圧縮試験を行い, 変形特性を述べ, 角数と最大応力の関係を示し, 基準耐力式を求めた. また, 全供試体の初期変形, 残留応力を測定し, その結果を示した.

落橋防止装置連結板の静的耐荷特性の解析

小畑 誠・鈴木五月・後藤芳顯・松浦 聖

土木学会論文集 第422号/I-14, pp.295~302, 1990.10.

落橋防止装置は地震時における橋桁の橋脚, 橋台からの落下を防ぐもので, 主として連結板によって荷重に抵抗するようになっている. 本研究ではその連結板の耐力特性を弾塑性解析によって明らかにした. 数値解析結果と既報の実験結果の一致は優れており, 形状や表面状態の最大耐力, 変形能に及ぼす影響が詳細に示された. これらの結果は連結板の設計を塑性変形を含めた最大耐力をもとに行ううえで有益な情報を与えるものである.

Transfer Matrix 法による移動荷重を受けた連続ばりの動的応答解析

岩瀬敏昭・平島健一

土木学会論文集 第422号/I-14, pp.265~274, 1990.10.

本論文では, 主として多径間の連続ばりを対象として古典的なはり理論, Timoshenko 理論および Leinson 理論の 3 理論を取り上げて, 均一および不均一な断面を有するはりに対する固有振動数とモード形を transfer matrix 法で求め, 動的応答解析を試みたものである. また, 古典的なはり理論で求められた解析結果と本法によるそれらの値とを比較することにより transfer matrix 法の多径間問題への適用性について, 多くの数値例を通して検討したものである.

層構造を有する硬質岩盤における剛体基礎の逸散減衰特性

平田和太・松田泰治・塩見 哲・上島照幸

土木学会論文集 第422号/I-14, pp.303~312, 1990.10.

層構造を有する硬質岩盤上で実施された一連の剛体基礎の起振実験から得られた地盤の剛性および逸散減衰特性を成層地盤に対する理論解と比較・検討した結果, 弾性波探査に基づく地盤物性値を用いた成層理論解から地盤剛性, 減衰の評価が可能であることを明らかにした. また, 3層以上の多層地盤に対しても比較的簡易な 2層地盤の理論解を用いた逸散減衰特性の評価が可能であることを示した.

集中衝撃荷重を受ける軸対称 Voigt 型粘弾性層体の過渡応力波伝播

石川清志・夏目正太郎

土木学会論文集 第422号/I-14, pp.275~284, 1990.10.

連立偏微分方程式で表わされた三次元軸対称 Voigt 型粘弾性体の運動方程式が境界条件, 初期条件のもので直接的に解かれる一解析法を半無限体上 1層問題に適用した. 数値計算によって, ステップ型集中衝撃荷重が層体表面, あるいは内部面に負荷された過渡応力波伝播を明らかにした. この結果, 層体と半無限体の剛性率比が, 応力波の伝播形態, 層体境界面での反射, 半無限体への透過屈折現象に顕著な相違を与える.

滑動量を指標とした有効地震加速度の一評価手法について

栃木 均・平田和太

土木学会論文集 第422号/I-14, pp.313~322, 1990.10.

本研究は, 斜面および防波堤・護岸の耐震安定性の検討に用いる地震力の合理的な評価を行うことを目的とし, 地震加速度の有効値を震度として評価するという観点から, すべり土塊の滑動量を指標とした有効値の評価を試みたものである. ここで試みた方法によれば, ごくわずかの滑動量を許容することによって地震加速度の有効値は急激な減少を示し, 地震加速度の最大値を大幅に低減した値を震度として評価し得ることが示されている.

地盤剛性急変部の線状地中構造物の地震時応力評価法

竹内幹雄・高橋 忠・元山 宏・渡辺啓行

土木学会論文集 第422号/I-14, pp. 323-332, 1990.10.

本文では、水平方向に地盤剛性が急変する場所を通過する線状地中構造物を対象に、耐震設計における入力地震動の見かけの伝播速度の影響を検討し、この結果に立って、実用的な地震時応力算定手法を提案した。この手法は、水平方向に不均質な地盤の連成効果を考慮した地盤変位を解析的に求め、これに応答変位法を適用している。この解析結果と模型振動実験結果および3次元FEM解析結果との比較により本手法の有効性を検証した。

高密度三次元アレーによる地震動観測と記録のデータベース化

片山恒雄・山崎文雄・永田 茂・佐藤暢彦

土木学会論文集 第422号/I-14, pp. 361-369, 1990.10.

本論文では東京大学生産技術研究所千葉実験所で1982年より継続している高密度アレー観測について概要を紹介した。またこの観測で得られた地震記録のうち主要な27地震を選択して、各種の補正を行った後、加速度と速度・ひずみに分けた地震動データベースを構築した。このデータベースの例題として、1985年茨城県南部地震の記録を用いて地震動の空間変動特性について検討を行った。

液状化地盤の沈下を受ける地中管路の挙動に関する研究

高田至郎・片桐 信・孫 建生・山下淳志

土木学会論文集 第422号/I-14, pp. 333-341, 1990.10.

本文ではまず地中管路の引上げ実験によって液状化地盤沈下を受ける管路に作用している地盤抵抗力および地盤ばね定数を求めた。次に、二重砂槽を使用した管路沈下実験と伝達マトリクス法による非線形解析によってこれらの地盤ばね定数の適用性を検討した。さらに、液状化地盤沈下を受ける地中管路の設計式および等価地盤ばね定数を提案した。設計式は弾性地盤上のはり理論によって誘導し、等価地盤ばね定数は設計式と非線形解析結果の対照によって求めた。

加速度・速度・変位地震計の同時観測に基づく記録精度の検討

永田 茂・片山恒雄・山崎文雄・佐藤暢彦

土木学会論文集 第422号/I-14, pp. 371-380, 1990.10.

本論文では、東京大学生産技術研究所千葉実験所内の同一場所以で行なわれている52C型1倍強震計、村松式速度計、圧電型加速度計による同時観測の概要を紹介するとともに、そこで得られた記録を比較検討し、以下の結果を得た。52C型1倍強震記録で信頼できる範囲は約3~20秒程度であった。また、最大加速度が約20 cm/s²以上の圧電型加速度計記録では10秒程度の長周期成分まで信頼できることがわかった。

基本構造系をオールフリーとした長周期斜張橋（東神戸大橋）の地震応答特性と耐震設計

北沢正彦・石崎 浩・江見 晋・西森孝三

土木学会論文集 第422号/I-14, pp. 343-352, 1990.10.

本稿は主桁の支承をすべて可能とした長斜張橋・東神戸大橋の地震応答特性と耐震設計について報告するものである。この方式の採用は橋梁の橋軸方向の固有周期を適度に長周期化し、地震力の低減を目指したものである。その結果、塔や基礎を小さくできて合理的で経済的な設計が行えた。このような構造とすることによる耐震設計上の問題は設計地震力の評価と大変位の抑制であるが、これらを入念に検討し克服している。

時間領域FE-BE法を用いたダム—基礎—貯水系の振動解析手法

東平光生・大町達夫

土木学会論文集 第422号/I-14, pp. 381-390, 1990.10.

本論文は、時間領域FE-BE法を用いたダム—基礎—貯水系の振動解析手法を展開したものである。ここでは、固体の波動方程式と流体の波動方程式を重み付き残差法で結合し、Newmarkの β 法に類似した解析アルゴリズムを得ている。このアルゴリズムの最大の特徴は、波動の放射条件を厳密に考慮できるだけでなく、①ダムと基礎の相互作用、②ダムと貯水の相互作用、③貯水と基礎の相互作用、のすべてを考慮し得る点にある。

実務者の経験法則を用いた震災時上水道機能の復旧予測システム

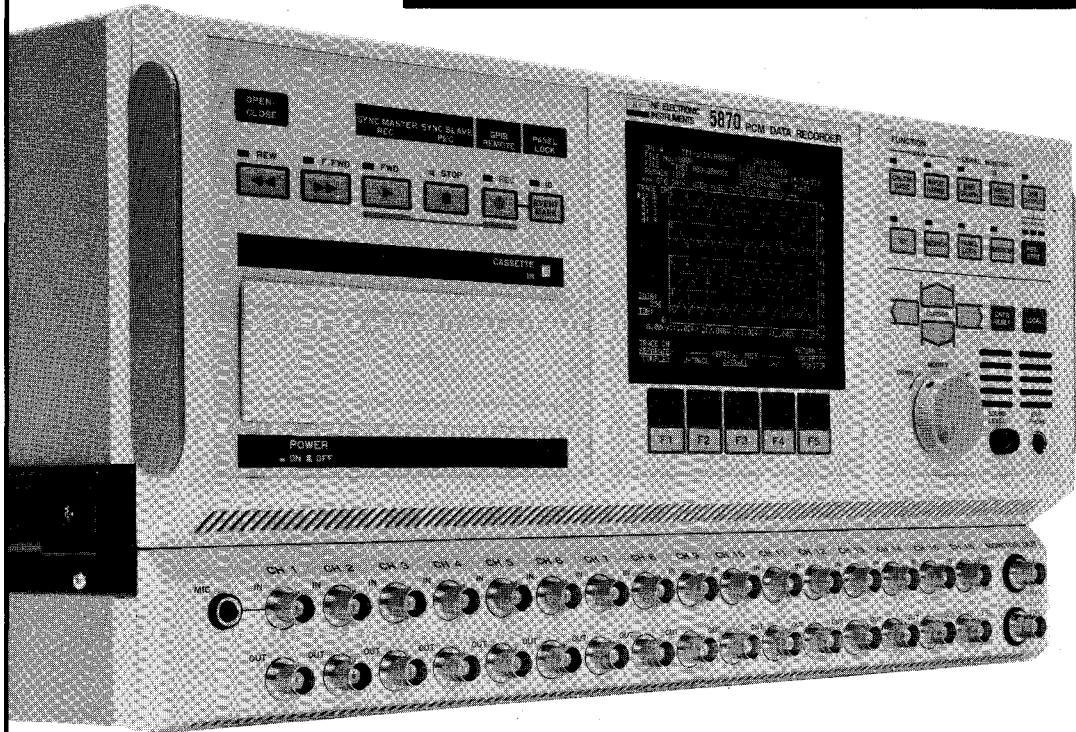
大野春雄・星谷 勝

土木学会論文集 第422号/I-14, pp. 353-360, 1990.10.

ライフラインの震災後の復旧対策や被害軽減対策などの防災計画を策定するためには、その供給機能の支障状況を予測しておくことが不可欠である。本論文では、上水道システムに関する既往の機能評価モデルにおける物理的被害と機能支障の関係を求める解析過程を水道事業実務者の経験的判断に基づく経験法則に置き換え、簡略化した実用的な上水道機能の復旧予測システムの構築をし、本予測システムを用いた神奈川県水道局藤沢事務所管内における事例解析の検討結果について示す。


ユニーク&
オリジナル

データレコーダ異変。



最長記録時間は120日。しかも、そのデータを、
わずか2時間53分で高速再生！
「5870PCMデータレコーダ」は、
データレコーダを、突然、変えました。

5870PCMデータレコーダ

●DAT技術を応用した16ビットPCM方式データレコーダです。●S/N(信号対雑音比)は70dB(約3000倍)以上と、データの信頼性は抜群。●新開発の時間軸変換回路で、最高1/1000~1000倍の時間軸変換が可能。その結果、最長記録時間は2880時間。このデータを1000倍のスピードで高速再生することができます(2時間用のDATテープの全長を録・再独立に2時間53分から2880時間の間で使用可)。●サンプリングは16チャンネル同時。サンプリング周波数は最高48kHz。●総容量64kワードのウェーブメモリを内蔵。●見やすい大型のディスプレイ。●GP-IB標準装備でコンピュータ解析も容易。●コンパクトなDAT用テープの採用により、データの保存に場所をとりません。



●お問い合わせはお気軽に。
045-545-8111

エヌエフ

株式会社エヌエフ回路設計ブロック

横浜市港北区綱島東6-3-20 〒223 TEL.045(545)8111(営業直通)
札幌011(281)4120 長野0262(27)7591 水戸0292(52)4411 北関東048(652)5391
千葉0472(43)3161 西東京0425(29)2151 名古屋052(777)3571
大阪0726(23)5341 広島082(263)8431 福岡092(411)4301

データ解析に、新しい手がかりを提供するが、エヌエフの「5870PCMデータレコーダ」。

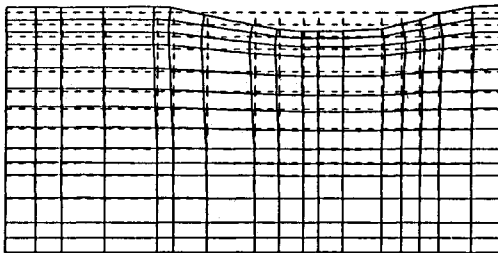
地盤の非定常圧密解析プログラム

Mr. 圧密

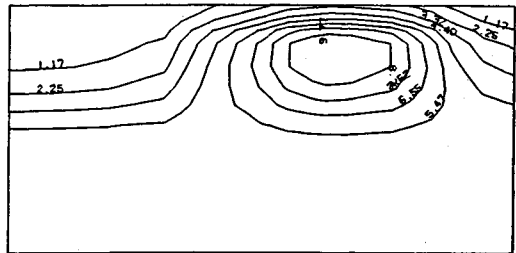
(特長)

- 非定常FEMによる線形弾性解析(christian系の解法)。
- 二次元平面歪解析。
- 要素として三角形・任意四角形が扱える。
- スケーリングをしているので安定して解が求まる。
- リスタート機能の完備。
- 入力はわかりやすいコマンド形式を採用(フリーフォーマット)。
- 図化処理(プロッタ、画像出力)等、豊富な機能を持つポストプログラムを完備。
- ジェネレート機能(長方形要素)により簡単にモデル作成が可能。
- 大モデルはそのままCRCネットワークでも(ホスト処理)可能。

販売価格：60万円 機種：NEC PC9800シリーズ 他



変形図



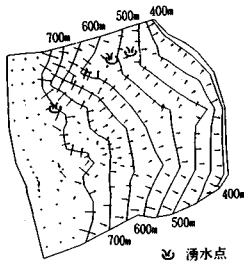
過剰間隙水圧コンター図

※EWS、汎用機用の圧密解析プログラム(逆解析も可能)として"UNICON"も用意しております。

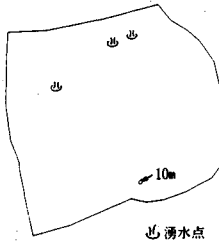
あの地下水解析ソフトがさらに機能充実!

UNISSE_{ユニセフ}(V-2)

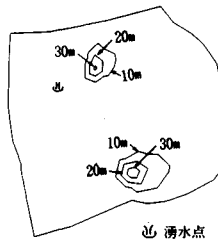
スピーディな同定・安価な解析



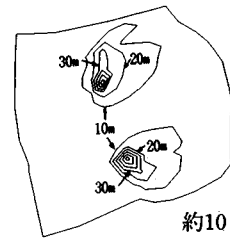
初期状態の地下水流



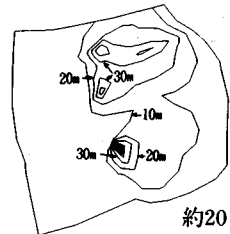
トンネル掘削開始直後



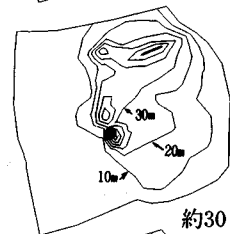
約4日後



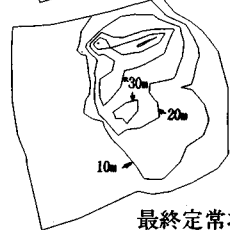
約10日後



約20日後



約30日後



最終定常状態

特長 ○有限要素法による準3次元解析を中心とした地下水の流れのトータルシステムです。

○観測水位と計算水位より、非線形最小二乗法を用いて帯水層定数の同定が可能です。(逆解析手法)

○建設・土木工事(掘削・ディープウェルその他)の解析に対応する多くの機能を備えています。

○メッシュ・ジュネレータにより、モデル(要素分割)作成の手間を軽減できます。

○図化処理プログラムにより、結果の確認が容易に行えます。

適応機種: SUN, NEWS, HP,
IBM 30XX, FACOM-Mシリーズ 他

このシステムは、情報処理振興事業協会の委託を受けて開発したものです。

IPA 情報処理振興事業協会

CRC 未来設計企業
センチュリリサーチセンター株式会社

大阪市中央区久太郎町4丁目1-3
(06-241-4121) 営業担当: 岩崎・吉川

UNICOUP

応力解析と浸透解析がドッキングした!

軟弱地盤の解析に!

海洋開発・埋立

盛土・掘削

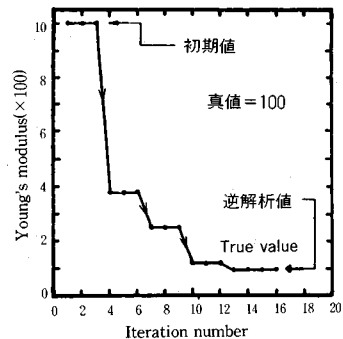
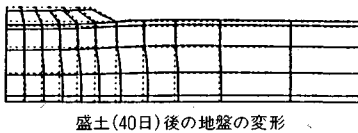
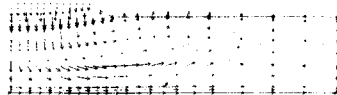
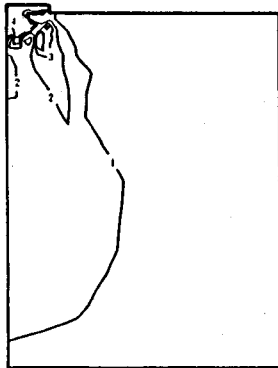
出力項目

- 各節点での変位、各要素での応力
- 各節点での全水頭・圧力水頭他
- 豊富な図化処理
変位図、変位ベクトル図、応力ベクトル図、応力コンター図、安全率コンター図、水頭コンター図、圧力水頭コンター図

プログラムの特長

- 応力と地下水の流れをカップルさせた問題が解析可能です。(圧密含む)
- 地下水の流れは飽和・不飽和域を対象としています。
- 多段掘削・盛土や降雨等が扱えます。
- 梁や連結要素も扱え実用的です。
- 経時観測記録(変位・水位)があれば、非線形最小乗法に基づき変形係数や透水係数が逆解析できます。(順解析、逆解析がスイッチにて選択可能です。)
- 弾性・非線形弾性・弾塑性・弾粘塑性を示す地盤が扱えます。
非線形弾性(電中研式、ダンカン・チャンの双曲線モデル)
弾塑性(ドラッカー・ブラガー、モール・クーロン、カムクレイモデル、ハードニング、ソフトニング)
弾粘塑性(関口・太田モデル)

(荷重)



ヤング率と繰り返し回数
の関係
逆解析によるパラメータの推定

このシステムは、情報処理振興事業協会の委託を受けて開発したものです。

IPA 情報処理振興事業協会
CRC センチュリリサーチセンタ 株式会社

問合せ先
大阪市中央区久太郎町4丁目1-3
(06-241-4121) 営業担当: 岩崎・吉川

CRC meets Dr. Cundall



米国ITASCA社(ITASCA CONSULTING GROUP, INC.)と業務提携!!

CRCは、皆様方の信頼を得て、多くの地盤、地下水解析ソフトウェアを提供してまいりましたが、このたび、米国ITASCA社(ミネソタ大学 教授 Dr. Peter Cundall)と業務提携を行ない、先進の個別要素法プログラムをご紹介させて頂けることとなりました。今後とも、常に優れたソフトウェアの提供に全力を傾けてまいりますので御期待下さい。

カントールモデル個別要素法(DEM)プログラム

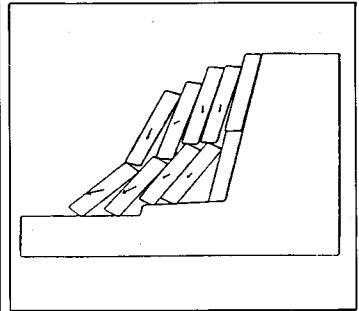
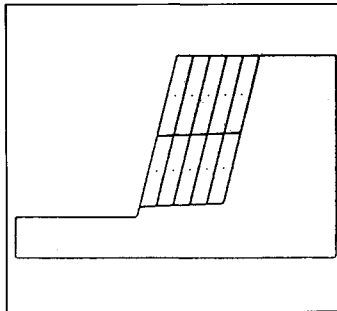
二次元個別要素法プログラム(ソースコード)

UDEC

三次元個別要素法プログラム(ロードモジュール)

3DEC

- 岩盤の転倒・滑落解析
- 岩盤の掘削解析
- 不連続性岩盤の安定解析
- 地震応答解析
- 浸透解析(UDEC)
- 熱解析(UDEC)
- 充実した三次元グラフィック表示
- 大型汎用プログラム

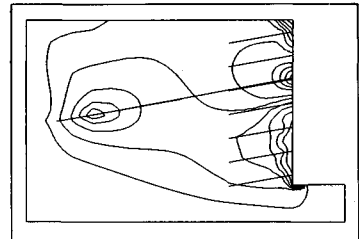


有限差分法 地盤解析プログラム

FLAC

(ロードモジュール)

- パソコン用地盤の汎用解析コード
- 最大2000要素まで解析可能
- 弾性及び弾塑性解析
- 不連続面の取り扱いが可能
- メッシュジェネレート機能
- 図化出力機能



■ 販売条件

UDEC・3DEC

- ◆ 各種メインフレーム、各種EWS、IBM-PC/AT及び互換機
- ◆ UDECはソースコードで提供いたします。
- ◆ 3DECはロードモジュールで提供いたします。

FLAC

- ◆ IBM-PC、PC-AT、PS/2及び互換機
- ◆ IBMカラーカード、EGA、VGA
- ◆ 8087、80287、80387数値演算プロセッサ
- ◆ HPコマンド対応プロッタ、ポストスクリプト言語 対応プリンター

CRC センチュリリサーチ センタ 株式会社

大阪市中央区久太郎町4丁目1-3
(06-241-4121) 営業担当: 岩崎・吉川

ジオフロントに挑戦!



3次元地質解析システム

GEORAMA

ジオラマ

概要

地質調査で得られたデータを基に、利用者の判断を加味して3次元地質モデルを作成します。この3次元モデルより地質・岩級区分・地下水位等をグラフィック表示並びに作画します。また、今後この3次元モデルを利用して解析用メッシュ作成等への応用が考えられます。

特徴

- ・走向・傾斜データも考慮できる高度な推定法
- ・複雑な地質体モデルの表現が可能
- ・ビジュアルで豊富な出力機能
- ・図面間での整合性がとれる
- ・操作性の高いシステム

入力データ

- ・地形図
- ・地表踏査データ
- ・ボーリングデータ
- ・横坑データ

出力図面

- ・等高線図
- ・地質平面図
- ・鉛直断面図
- ・水平断面図
- ・ブロック図他
(岩級区分・地下水位を含む)

適応機種

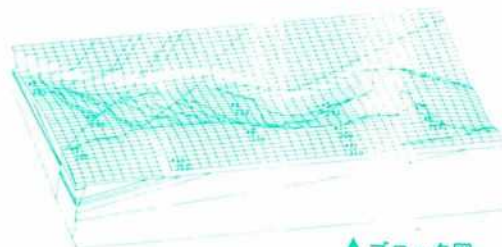
- ・SONY NEWS
- ・SUN-3, SUN-4, SPARC
(互換機を含む)
- ・HP9000シリーズ
- ・その他機種は別途御相談

90年1月より順次リリース

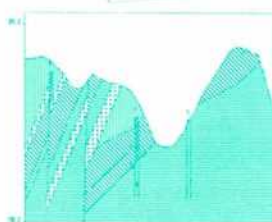
導入予約受付中

(株)アイ・エス・エー アイサウ工業(株) アイドルエンジニアリング(株) アサヒ地水探査(株) 株式会社コンサルタント 応用地質(株) 大阪ガス(株) 大手開発(株) (株)大林組 (株)奥村組 川崎地質(株) 基礎地盤コンサルタント(株) (株)熊谷組 (株)建設技術研究所 建設省 土木研究所 五洋建設(株) 佐藤工業(株) サンコーコンサルタント(株) (株)西尾総合研究所 西電電機技術コンサルタント 清水建設(株)	(株)澤藤建設研究所 (株)新日本技術コンサルタント 住友建設(株) 住友建設(株) 石油資源開発(株) 全日本コンサルタント(株) 大成建設(株) 大豊建設(株) (株)ダイソク (株)ダイヤコンサルタント (株)竹中工務店 中央開発(株) (株)地球科学総合研究所 中電技術コンサルタント(株) 通産省 地質調査所 電源開発(株) (株)電力中央研究所 東急建設(株) 東建地質調査(株) 東京電力(株)	東電設計(株) 東電ソフトウェア(株) 東洋地質調査(株) 動力炉・核燃料開発事業団 (株)中層ソイルコーナー 西松建設(株) 日本工営(株) 日本国土開発(株) (株)日本パブリック (株)開組 (株)阪神コンサルタント ヒロセ(株) フジタ工業(株) (株)富士和ボーリング 北光ジオリサーチ(株) 北海道開発コンサルタント(株) 三井建設(株) 三菱金属(株) 村本建設(株) 明治コンサルタント(株)
---	---	---

3次元地質解析システム研究会 参加メンバー



↑ ブロック図



← 鉛直断面図

これらの図は、カラーディスプレイやハードコピーの使用により一層鮮明な表現ができます。

CRC センチュリリサーチセンター 株式会社

大阪市中央区久太郎町4丁目1-3
(06-241-4121) 営業担当: 岩崎・吉川