



3. 非線形解析

ここでは、外ケーブル構造の幾何学的非線形性およびコンクリートとP C鋼材などの材料の非線形性を考慮した解析 (図-5) を行い、試験桁における外ケーブルの鋼材応力度の増加量、桁の曲げ破壊耐力、変形量を予測し、あわせて試験桁に荷重可能な最大荷重を算出した。解析は、初期状態 (ここでは、プレロード荷重を作用させた時点をいう) を基準として、両側径間に荷重荷重を漸増させた場合と、初期状態を基準として片側径間のみで荷重荷重を漸増させた場合について行った。

(\*)プレロード荷重:

相対率の関係から1/3模型では模型重量だけでは実橋と同じ主桁死荷重心力度を生じさせることが出来ない。加力装置により実橋と同等の死荷重心力度を発生させるための荷重をここでは、初期荷重として載荷する。

(1) 本解析上の前提条件 (図-6)

- ①材料非線形性を考慮する断面解析モデルとしてファイバーモデルを採用した。ただし、要素の各断面での歪み分布は直線と仮定した。各ファイバーの応力-歪み関係は、道路橋示方書に従ったモデルとする。ただし、この非線形解析では、コンクリートの最大圧縮歪みを5,000 $\mu$ と仮定した。
- ②外ケーブルはトラス部材と考え、連続ケーブル、単径間ケーブルの2種類とした。デビエータ部分で、外ケーブルを拘束しないスライドモデルと拘束する固定モデルの両方で解析を行った。
- ③梁要素、ケーブル要素は、各々幾何学的非線形性を考慮する。
- ④主桁構造モデルでは、セグメント目地部は目地をはさんで $\pm 50$ mm区間を無筋コンクリート部材、その他をR C部材とする。ただし、内ケーブルは各部材内部に別途考慮する。

(2) 解析結果

解析結果 (表-1) は、デビエータ部全スライドモデルでの片径間載荷の結果のみ示すこととする。これは、径間中央に着目した場合であり、荷重は想定桁クリープ終了時を基準としてP1~P2径間ではa : b = 1 : 1.331の比率で荷重を漸増させ、P2~P3径間の荷重は想定桁クリープ終了時を維持させることとした。

①モーメントの再分配に関して

支間部の広範囲において、塑性化 (ヒンジ化) が認められ、再分配により中間支点上にモーメントが集中している。中間支点上の再分配率は42%と弾性計算値を大きく上回り、中間支点横のセグメント継ぎ目 (荷重を増加させない径間側) での破壊となる解析結果が得られた。

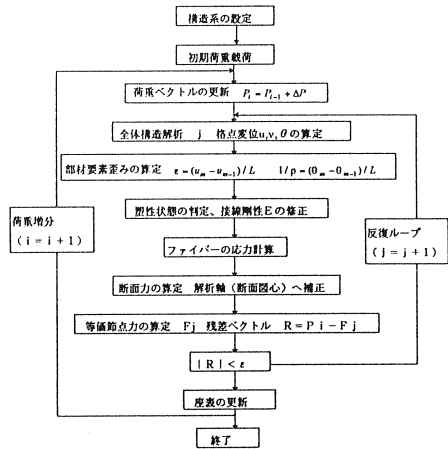


図-5 非線形解析フローチャート

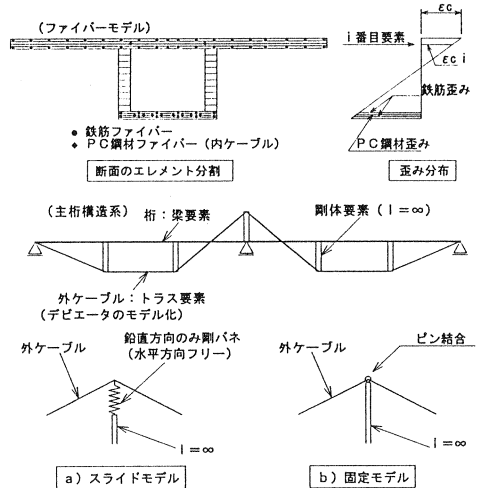


図-6 非線形解析におけるモデル化

表-1 全スライドモデル片径間載荷時の解析結果

|          | 支間部 (Sect18) |           |            |          |              |        | 中間支点 (Sect44) |           |            |          |              |        |      |
|----------|--------------|-----------|------------|----------|--------------|--------|---------------|-----------|------------|----------|--------------|--------|------|
|          | Alload (tf)  | 弾性 (tf-m) | 非線形 (tf-m) | 再分配率 (%) | 外ケーブル軸力 (tf) | 歪み (μ) | モーメント (tf-m)  | 弾性 (tf-m) | 非線形 (tf-m) | 再分配率 (%) | 外ケーブル軸力 (tf) | 歪み (μ) |      |
| 完成時      | 10.46        | 182       | 182        | 0.0      | 287          | 0.0    | 152           | 18        | 18         | 0.0      | 287          | 0.0    | 342  |
| 設計荷重時    | 15.29        | 227       | 227        | 0.0      | 289          | 0.8    | 213           | -9        | -9         | 0.0      | 286          | -0.1   | 430  |
| 終局荷重時    | 28.53        | 352       | 338        | -4.2     | 299          | 4.8    | 478           | -86       | -121       | 39.9     | 286          | -0.2   | 792  |
| 破壊時 (設計) | 29.94        | 366       | 347        | -4.9     | 301          | 5.7    | 518           | -94       | -137       | 44.5     | 287          | 0.1    | 879  |
|          | 37.34        | 435       | 408        | -6.2     | 328          | 16.3   | 2247          | -188      | -198       | 44.0     | 300          | 5.2    | 3537 |
|          | 38.04        | 442       | 416        | -5.8     | 341          | 21.7   | 2976          | -142      | -202       | 42.1     | 304          | 6.8    | 4853 |

ここに、  
 Alload : a 載荷点の載荷荷重強度 (tf)  
 モーメント (弾性) : 弾性解析で得られたモーメント (tf-m)  
 モーメント (非線形) : 非線形解析で得られたモーメント (tf-m)  
 モーメント (再分配率) : (非線形 M<sub>non</sub> - 弾性 M<sub>lin</sub>) / 弾性 M<sub>lin</sub>  
 外ケーブル軸力量 : 外ケーブル軸力 (単+連続) の合計 (tf)  
 外ケーブル応力増加量 : 完成時からの全外ケーブルの鋼材応力の増加量平均値 (kgf/cm<sup>2</sup>)  
 圧縮歪み : 着目点における圧縮線の歪み (μ)

②外ケーブルの張力増加に関して

終局荷重段階時における、外ケーブルの張力増加は本解析ケース中の最大値でも  $\Delta\sigma_p=4.8\text{kgf/mm}^2$  と非常に小さい。また、桁たわみとほぼ線形関係になると考えられる外ケーブルの張力増加量は、弾性計算による推定破壊荷重段階においても、再分配により主桁に余力が生じるために、未だ小さいままである。塑性ヒンジが回転能の限界値に達したとき、すなわち連続桁としての破壊時には、全外ケーブル (単径間、連続) の平均増加応力度は  $20\text{kgf/mm}^2$  以上生じる結果となった。

4. 試験方法

(1) 供試体および使用材料

載荷試験を実施した供試体の数は1体であり (図-7、写真-1)、プレキャストセグメント構造として製作し実橋と同様せん断キーを設け接着剤を使用して接合した。

- ①デビエータ：外ケーブルを外から取り扱えるようにボックスの外側に配置した。
- ②外ケーブル：実橋と同様の構造とするため、デビエータダクトは鋼管としPE管内に鋼線を挿入しグラウトを施した。配置ケーブルは、実橋と同様単径間ケーブルおよび連続ケーブルの2種類とした。
- ③内ケーブル：実橋と同様シースの配置およびグラウトを行うこととし定着はスラブ内に行った。
- ④模型の支持：連続桁構造であることから、各支点部には

反力測定用にフラットジャッキを設置し、その上に鋼板と丸鋼からなる支承を設置した。

⑤コンクリート強度：実橋と同じく設計基準強度  $\sigma_{ck}=500\text{kgf/cm}^2$  とした。

(2) 載荷および計測方法

載荷試験では、試験体に発生する応力度が実橋の設計荷重作用時 (死荷重作用時、活荷重作用時) の応力度に等しくなるように設定することとして、試験桁の架設完了時応力度が想定桁の設計荷重時全死荷重応力と1:1の比率になるように載荷装置による荷重調整、並びに中間支点の支点反力調整を行った (図-8)。また、終局荷重作用時については、実橋の設計荷重時の各断面力 (死荷重、活荷重) が作用したときと同じ応力度が生じるような試験体の荷重を求め、その値を荷重組み合わせ係数倍 (相似率考慮) した荷重を模型に作用させることとした。模型試験では、床版張り出し部に荷重を作用させないように加力することとし、荷重作用位置とデビエータ間隔による影響が極力でないようにデビエータ上で加力した。基本的な試験の種類を表-2に示す。荷重の載荷パターンは、上記3ケースを各々2回ずつ繰り返し、最終的には桁が破壊するまで荷重増加を行うこととした。

5. 試験結果および考察

荷重載荷ケース4の試験結果の概要を図-9~18に示す。

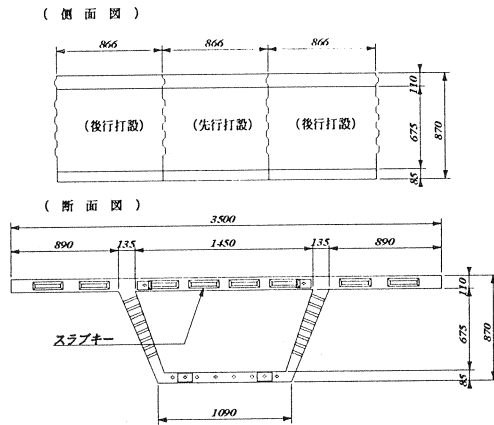


図-7 試験桁の断面図と側面図

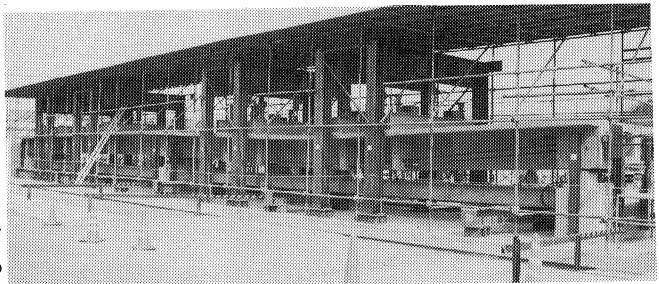


写真-1 試験桁載荷状況

表-2 試験の種類と載荷荷重

|       | 1/27レベル | ライブロード | 設計荷重   |        |        |        | 終局荷重   |        |        |  | 破壊時 |
|-------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--|-----|
|       |         |        | 設計     | 除荷     | 設計     | 除荷     | 終局     | 除荷     | 破壊時    |  |     |
| a 載荷点 | 5,230   | 10,460 | 13,140 | 10,460 | 15,280 | 10,460 | 28,530 | 10,460 | 29,940 |  |     |
| b 載荷点 | 7,090   | 14,180 | 17,740 | 14,180 | 20,600 | 14,180 | 38,240 | 14,180 | 40,100 |  |     |
| c 載荷点 | 7,090   | 14,180 | 17,740 | 14,180 | 14,180 | 14,180 | 14,180 | 14,180 | 14,180 |  |     |
| d 載荷点 | 5,230   | 10,460 | 13,140 | 10,460 | 10,460 | 10,460 | 10,460 | 10,460 | 10,460 |  |     |

表中の荷重は、弾性解析による。

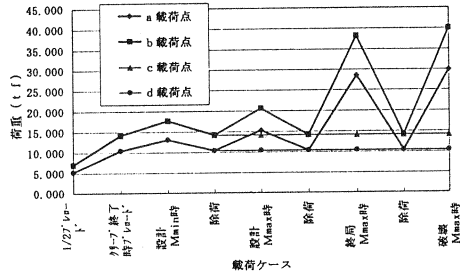


図-8 試験桁載荷パターン図

種類を表-2に示す。荷重の載荷パターンは、上記3ケースを各々2回ずつ繰り返し、最終的には桁が破壊するまで荷重増加を行うこととした。

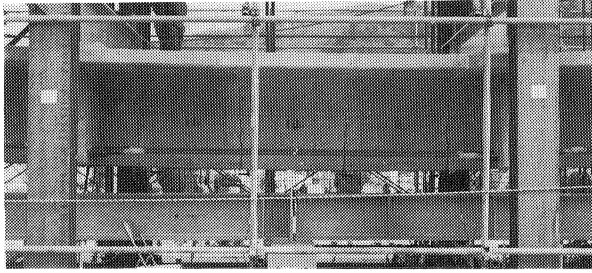


写真-2 径間部クラック発生状況

また、この図に示す非線形解析結果は試験に先立って行った前述の予備解析である。破壊時の荷重載荷は事前に行った非線形解析結果(デビエータをスライド支持としたファイバーモデル)を参考にして①支間部クラック発生まで、②中間支点部クラック発生まで、③破壊までの3サイクルとした。最終的に中間支点右側(荷重一定側)の下スラブが圧壊して載荷試験を終了した(写真-2、3)。

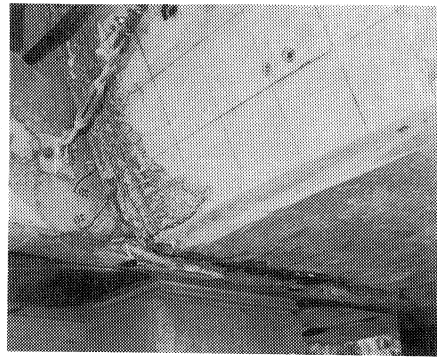


写真-3 柱頭部圧壊状況

破壊荷重は、非線形解析値 $Aload=37.5tf$ に対し試験値は $Aload=43.0tf$ であった(本報告書の載荷状態の説明においては、全てa点に作用させた載荷荷重をパラメータとして表現する)。変位の計測結果は、事前に行った非線形解析値とほぼ一致する。

(1) 変形とひび割れ性状

ひびわれ荷重

は事前に行った非線形解析による予備計算では、a荷重が22tfで支間中央に、29tfで中間支点上にクラックが入ると予想していたが、実際の試験では23.0tfで支間中央部の

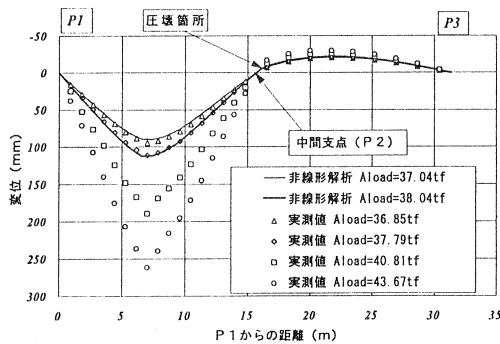


図-9 主桁変位分布

セグメント継ぎ目にクラックが発生し計算値より若干大きい結果となった。ひびわれ発生位置は当初P1~P2側径間のほぼ中央の目地部に発生し、その両隣の目地へと移行し、a荷重26tf時では径間部セグメントの中間にもひびわれが発生した。さらに荷重上昇を続けるとP2上縁(P3側)に28.5tfにてひびわれが発生した。その後ひびわれは各セグメントの目地部にひろがるものの比較的進行は遅く、P1~P2径間中央付近のひびわれ、P2支点上のひびわれが大きく進行し、試験体は中間支点下縁の終局歪み(3500 $\mu$ )を越えてもなお変位が増加し、P2下縁側の圧壊域のコンクリートの剥落が認められた後、急激にコンクリートが圧壊し大音響と共に圧縮破壊が生じた。ひび割れは、ほぼ解析通りセグメント継ぎ目に集中する傾向が見られ、各セグメントの中央にはごく微細なひび割れが観測されたのみであった。最大ひびわれ幅は中間支点部で17mm、径間部では14mmが計測された。

(2) 桁のたわみ

鉛直たわみ分布を図-9に示す。

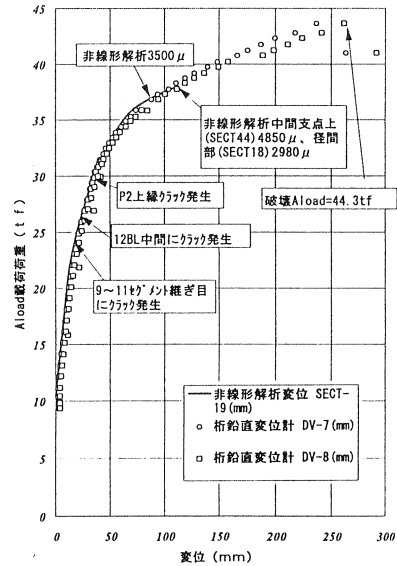


図-10 主桁径間部変位履歴

ひびわれが小さい間のたわみ曲線は放物線形状を描いているが、破壊近傍になるとたわみ曲線は直線的になり、a、b 載荷点の中央部でたわみ曲線が鋭角状になった。また、たわみの進行は結局M max 荷重を過ぎたところから急激に早くなり、破壊時には約260mmに達した(図-10)。

(3) コンクリートの圧縮歪み

径間部中央、中間支点上の各主要着目点におけるコンクリートの圧縮歪み履歴を図-11、12に示す。Aload=36tf程度までは解析値と実測値は、よく合致しているがそれを過ぎたところから解析値ほど歪みの伸びが観測されていない。支間部、中間支点部ともに同様の傾向が見られる。要因としては、鉄筋によるコンファインド効果、解析におけるコンクリートの $\sigma \cdot \epsilon$  曲線の選定方法等による影響が考えられる。

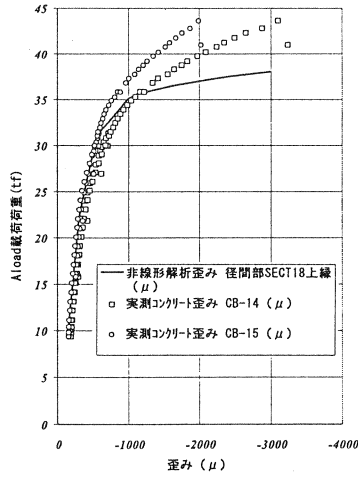


図-11 径間部コンクリート 圧縮歪み履歴

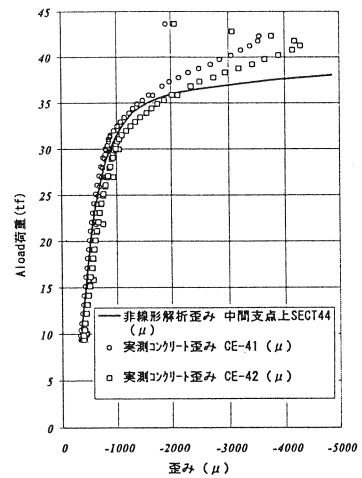


図-12 中間支点コンクリート 圧縮歪み履歴

(4) 内ケーブルの鋼材応力

図-13、14に内ケーブルの荷重-ひずみ曲線を示す。内ケーブルはグラウトされており、歪みが8,000 $\mu$ (計算上の第一降伏点)を過ぎたところから降伏し始めている。これもコンクリートの圧縮歪みと同様解析値ほど歪みの伸びが観測されていない。要因としては、設定したコンクリートの $\sigma \cdot \epsilon$  曲線による影響が考えられ、テンションスティフニング現象が発生していると思われる。

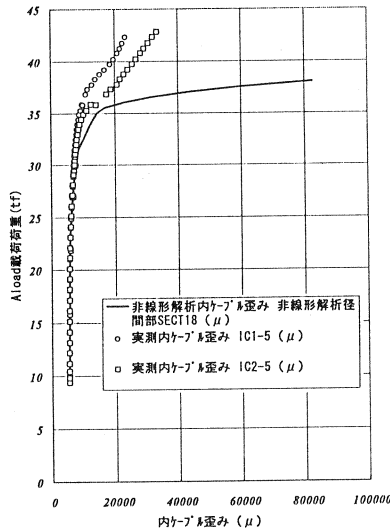


図-13 径間部内ケーブル歪み履歴

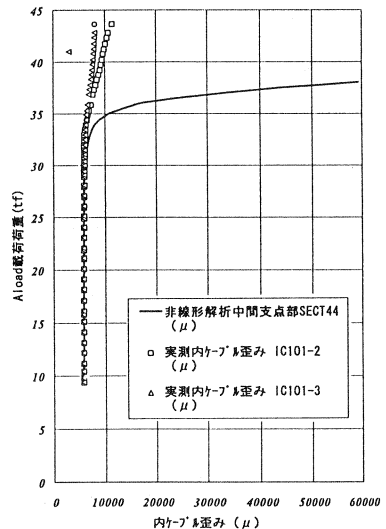


図-14 中間支点上縁内ケーブル歪み履歴

(5) 外ケーブル鋼材の鋼材応力

プレストレス導入後における外ケーブルの鋼材ひずみ分布は、ほぼ均等な状態にあるが、載荷荷重増加によって外ケーブルの支持間での鋼材応力の差が大きくなっている(図-17、18)。図-15、16にロードセルで計測した外ケーブルの増加応力度の履歴を示す。単径間ケーブルの実測増加応力度は解析値とほぼ一致しているが、連続ケーブルは中間支点部デビエータの摩擦の影響により、左右の径間で約400 $\mu$ (7~8kgf/mm<sup>2</sup>)の平均緊張力差が生じ、解析値と若干の差異が生じている。本試験の結果、外ケーブルの破壊時増加応力度は単径間ケーブルで50kgf/mm<sup>2</sup>前後、連続ケーブルで35kgf/mm<sup>2</sup>前後が確認された。

(6) 支点反力の変化

図-19に各支点の全反力の荷重履歴を示す。計測値はほぼ解析値と一致しており、反力の非線形的な変化をほぼ予測

きている。

6. あとがき

本試験の結果、外ケーブルの破壊時増加応力度は単径間ケーブルで $50\text{kgf}/\text{mm}^2$ 、連続ケーブルで $35\text{kgf}/\text{mm}^2$ が確認され、最終破壊荷重 $P_{\text{max}}$ と同様、解析値を大きく上回る結果となった。この原因としては、中間支点部の塑性ヒンジ形成に伴うモーメントの再分配や、圧縮縁コンクリートの鉄筋によるコンファインド効果の他、試験体断面の歪みの非線形性等による影響が考えられる。破壊時の厳密な挙動

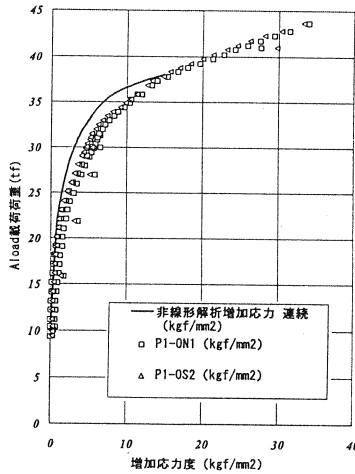


図-1 15 連続外ケーブル増加応力度履歴

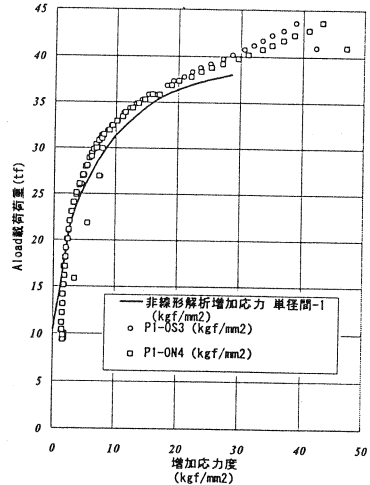


図-1 16 単径間外ケーブル増加応力度履歴

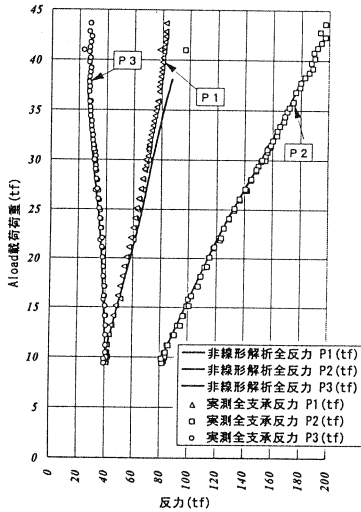


図-1 19 支点全反力の履歴

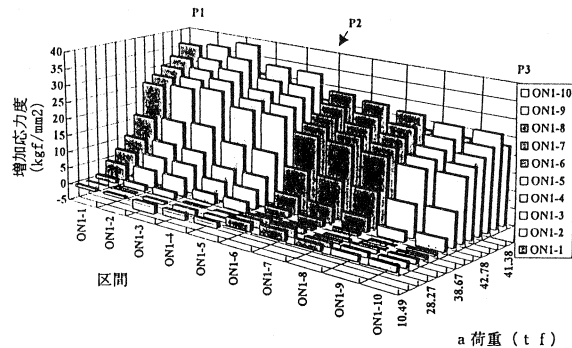


図-1 17 連続外ケーブル増加応力度の分布

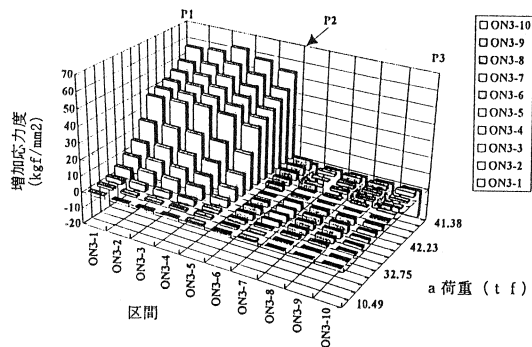


図-1 18 単径間外ケーブル増加応力度の分布

については今後の研究の余地が多分にあると考えられるものの、全体的には非線形解析と試験結果はほぼ一致しており、設計的には十分な精度であることが確認された。外ケーブルとデビエータ部分の結合方法は実際の結合条件と合致させるのが望ましいと考えられるが、今回行ったようなスライド支持でも解析的には十分な精度で得られた。また、今後この種の解析は外ケーブルの終局耐力を算出する有効な手段となるものと思われる。

プレキャスト化と外ケーブルは、今後大いに振興されるべき構造形式であると考えられ、本論文がその一助になれば幸いである。本橋の模型試験にあたりご指導およびご検討頂いた「松山自動車道PCプレキャストブロック工法に関する技術検討委員会」(委員長:池田尚治横浜国大教授)の委員並びに幹事の皆様に感謝の意を表します。