

PCに関する試験および測定

入門講座

No.3

PCの模型載荷試験

講師：上田多門*

① 模型試験の必要性

PCの模型載荷試験はなぜ行われるのでしょうか。大学などの教育機関で行われるPCを理解してもらうために行われる授業中の教育の手段としての載荷試験だけでなく、実務や研究の世界でもPC技術発展のために実に様々な理由で行われています。次にその主な理由をあげてみましょう。

- 1) 設計法の確立
- 2) 実構造物の性能確認
- 3) FEM等の数値解析に必要な情報取得

従来にない設計法であったり、従来のものより合理的な設計法が必要であったりする場合、設計式の中に出てくるプレストレスやコンクリート強度のような変数を実験変数とした、模型試験を行うことは最も普通に行われてきたことです。例えば、PC梁のせん断耐力を与える設計式を確立するために、プレストレスを変数とした梁の模型試験は従来から多く行われてきました。確立したい設計法が汎用性を有したものであればあるほど、変数が多くなり、試験を必要とする模型の種類や数も増えていきます。逆に限定的であればあるほど、変数は少なくなり、模型の種類や数は少なくて済みます。その極端な場合がある特定の実構造物の性能確認試験となります。

実構造物の構造形式が新しくなったり、使用材料が新しくなったりするなどして、構造性能が従来の方法では確認できない場合、実構造物の模型を作製し、載荷試験を行うことにより実構造物が所定の構造性能を有しているかどうかを確認することはよく行われています。実構造物と寸分違わないもので確認試験ができればいいのですが、多額の費用が必要である、大きすぎてそれに合う載

荷装置ができないなどが理由で、実構造物を縮小したいわゆる模型により試験をすることが現実的な解答となるのが普通です。この場合、寸法以外は実構造物をできる限り再現した模型を作製する必要があるのは言うまでもありません。なお、寸法も許される限り実際のものに近づけるのが原則です。

今まで説明してきたことは、構造物の合理的な設計に必要な情報を得るために、構造物もしくは部材の模型を載荷試験するというものでした。最近になって進歩の著しいコンクリート構造物の数値解析、特に有限要素解析は、この模型試験の代替となりうるものです。すなわち、試験を行わなくても必要な情報が得られるわけです。とはいっても、有限要素解析を行うのに必要な材料の構成則、換言すれば、コンクリートや補強材の応力とひずみの関係と言った材料の力学モデルは、模型試験によって得なくてはなりません。この場合、構造物や部材の模型ではなく、部材の一部の模型による載荷試験となります。例えば、コンクリートや補強材だけを用いた小さな試験片による載荷試験などがあります。

② 模型載荷試験の方法

模型載荷試験は一般的には次のように行われます（図-1参照）。

2.1 対象の選定

模型載荷試験を行う目的に応じて模型とすべき対象構造物、部材、もしくは、部材の一部を選定する必要があります。実構造物の性能確認が目的の場合でも、確認したい性能によって実構造物全体の模型が必要であったり、一部で済んだりもします。また、一部といっても、

* Tamon UEDA：北海道大学 工学部 助教授

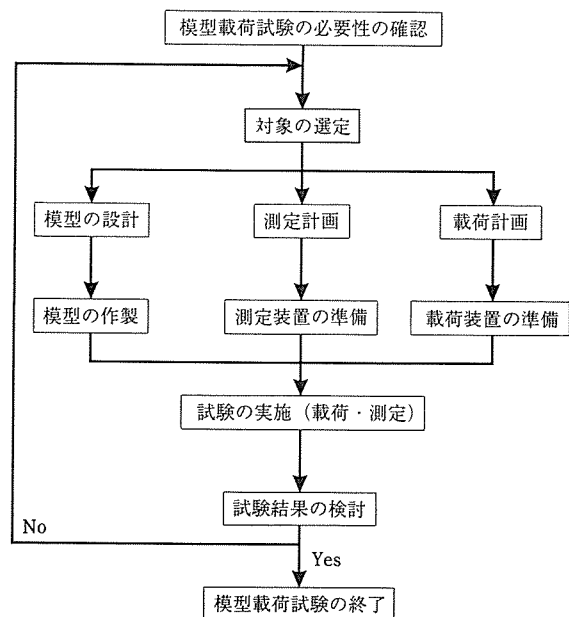


図-1 モデル荷重試験の方法

どの部分までを模型にするかは適切に検討される必要があります。

2.2 モデルの設計

荷重試験の対象を選定すると次は、モデルの設計です。まず、モデルの寸法を決める必要があります。寸法は、大きいほど一般的には測定の精度が高くなり良いのですが、費用が多くなるようになります。荷重試験装置の能力によって、最大可能な寸法が自ずと決まってしまう場合もあるでしょう。モデルの荷重試験の結果は、目的が何であれ、最終的には実際の構造物の挙動を解明することになるので、実際の構造物の寸法になるべく近くなるのが原則です。これらの要因を総合的に勘案して、最適な寸法が決定されます。

使用材料も荷重試験の目的に適したものを選定する必要があります。荷重試験で重要なのは材料の力学的性状ですので、実際の構造物に使用されている材料の力学的性状と同じもの、もしくは、できる限り近いものを使用すべきでしょう。力学的性状としては、コンクリートの圧縮強度・引張強度・剛性、補強材の降伏強度・破断強度・剛性、および、力学的性状に影響を与えるコンクリートの骨材の寸法、補強材の表面形状などがあります。なお、実際の構造物に対するモデルの縮尺に合わせ、骨材の寸法、補強材直径などを選定することが重要となる場合もあります。

寸法、材料が決まれば、補強材の量、配置、構造細目などの詳細設計を行います。実構造物の性能確認の場合、モデルの縮尺に合わせ補強材の直径を選択し、数、配置、構造細目はできる限り同じになるようにすべきでしょ

う。

2.3 モデルの作製

設計が終われば、モデルの作製です。基本的には実際の構造物と同じように作製できればよいでしょう。コンクリートの打込み方に関しては、特に打込み方向を同じにするのがよいでしょう。また、試験対象領域に打ち継ぎ目が存在する場合、モデルにも同じ位置に打ち継ぎ目があると荷重試験の結果がより信頼できるものとなります。

2.4 測定計画

「どのようなモデルを作製するのか」と同じように重要なのが「どのような測定を行うのか」ということです。荷重試験の目的に応じて、必要な情報を正確に測定しなければなりません。そのためには、何をどのように測定するのが重要な鍵となります。実構造物の耐力が知りたいときであれば、荷重荷重を正確に測定すればよいわけですが、構造物や部材の変形、コンクリートや補強材の応力もしくはひずみが必要な場合など、目的によって測定項目は様々に変わるのが普通です。使用する測定装置の性能を考えながら、測定する箇所、測定点数などを決めていきます。

2.5 測定準備

モデル作製と同時に測定準備は始まります。なぜなら、補強材のひずみ、緊張材定着具のひずみ、コンクリート内部のひずみなど、コンクリートを打ってからでは測定装置を取り付けることが難しいものは、コンクリートを打つ前から準備しなくてはならないからです。もちろん、コンクリートの表面のひずみ、部材の変形など、コンクリート硬化後、すなわち、モデル完成後、もしくは、モデルを試験位置に設置後準備しなければならないものもあります。

最近では、測定制御装置としてコンピュータもよく使われます。測定計画に適した制御プログラムを新たに作製するか、もしくは既成プログラムを用います。荷重試験中に何をモニターするか、どのようにモニターするかなども考え、準備を進めます。モニターする手段として直ちにグラフ化するのも常套手段です。測定項目の多い試験の場合、データ処理の速いプログラムが必要であることは言うまでもありません。また、荷重試験後行うデータ処理が容易になるような、データの記録方法をとる必要もあります。

2.6 荷重計画・準備

荷重試験の目的に応じて最適な能力を有する荷重装置を選択する必要があります。最大荷重荷重、最大荷重速

度、載荷方向（鉛直方向なのか水平方向なのか、一方向なのか多方向同時なのか、単調なのか正負交番なのか）、載荷の繰返し数などが載荷装置の能力を示すもので、載荷試験の目的、模型の寸法などから必要な能力が定まります。

載荷条件として、荷重を制御する荷重制御と変位を制御する変位制御があります。変位制御の場合、剛性が急変する時とか剛性が負となる時に、制御が困難になりやすいので、このような場合でも変位制御が可能な載荷装置を用いる必要があります。

載荷装置の選択とともに、載荷履歴、載荷位置なども実際の荷重条件を考えながら決める必要があります。

2.7 載荷および測定

さていよいよ準備も整い、載荷試験開始です。準備に費やした時間と比較するとかなり短い時間で試験は終了してしまいます。準備が無駄にならないよう、最大限の注意を払いながら載荷と測定を行うということを忘れがちですので、注意が必要です。

載荷中の模型の状態を肉眼やモニター画面などで注意深く観察し、状況に応じては、載荷履歴などの載荷方法、測定項目や測定方法を当初計画した内容と変える臨機応変さも要求されます。

③ 設計法の確立の場合

設計法の確立の例としては、桁構造に代表されるPC棒部材の設計耐力式の確立のための載荷試験を取り上げてみましょう。棒部材の設計耐力式としては、曲げ耐力式、せん断耐力式、ねじり耐力式などがあります。

測定の精度を上げるためにも、また、実際の構造物の寸法に近づけるためにも、模型の断面高さは大きい方がよいのですが、載荷装置の能力、試験をする模型の数が多くなるなどが理由で、寸法が大きい土木構造物の場合、

模型の寸法は実際の構造物の寸法よりは小さくなるのが一般的です。土木構造物より寸法が小さい建築構造物の梁を対象とした場合は実物大の場合もよく見られます。

3.1 曲げ試験

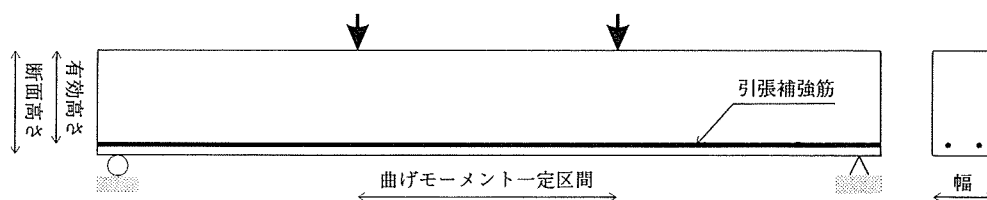
曲げ耐力に影響を与える因子は、引張補強材の量（いわゆる引張補強筋比）、引張補強材の強度（降伏強度と引張強度）、コンクリートの圧縮強度、コンクリート中および引張補強材（緊張材）中のプレストレスの大きさなどです。したがって、これらの因子を変数とした、模型を準備します。

載荷方法としては、2点を単純支持して、中央部に2点集中荷重を静的単調に作用させる方式をとるのが一般的です（図—2参照）。中央部の2つの集中荷重の間で曲げモーメントが一定となる区間で、この区間内のどこかで曲げ破壊が起こり、曲げ耐力が決まります（写真—1参照）。

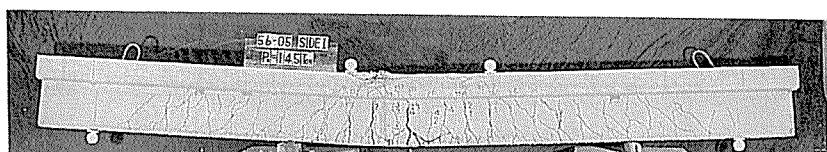
測定項目としては、載荷荷重のほかに、載荷点での変形、最大曲げモーメント区間の補強材（緊張材および非緊張材）と圧縮部コンクリートの曲げひずみなどがあります。補強材のひずみが降伏ひずみに達しているかいかで、破壊モードが曲げ引張破壊か曲げ圧縮破壊となります。曲げ耐力時の変形を知ることは、地震時の部材の変形性能（靱性）を知るうえでも重要です。

曲げ耐力およびそのときの変形は、その計算法が確立しており、曲げ耐力に影響を及ぼす前述の因子が与えられていれば、かなりよい精度で推定できます。アンボンドPCの場合や外ケーブル方式のPCの場合も、計算法は複雑になりますが、耐力や変形の算定法がほぼ確立しています。

曲げひび割れ発生強度も、その計算法は確立されていますが、コンクリートの引張強度に寸法依存性があり、これを明らかにするためにはまだ載荷試験が必要のようです。この場合、棒部材の断面の高さを変数とした試験



図—2 曲げ試験



写真—1 曲げ破壊

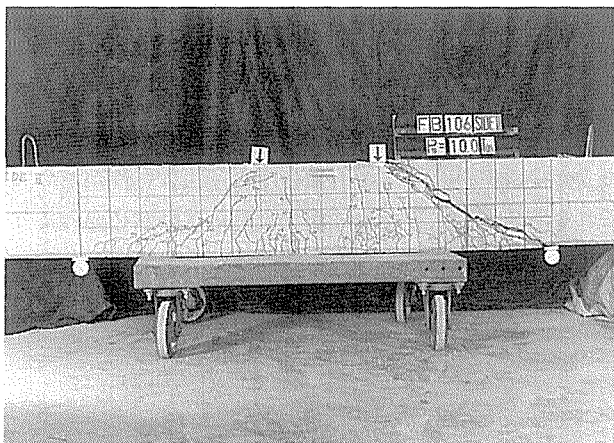
◇講座◇

が必要となります。

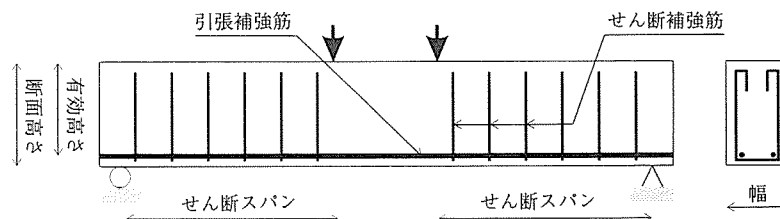
3.2 せん断試験

せん断耐力に影響を及ぼす因子はその数が多く、曲げ耐力以上に複雑です。曲げ耐力に影響を及ぼす因子のほかに、せん断スパンと有効高さとの比、せん断補強材の量（せん断補強筋比）、せん断補強材の強度（降伏強度と引張強度）、寸法（部材の断面高さ）があります。また、最近適用が多く見られるようになってきたカーボン、アラミドなどの連続繊維を用いた補強材に関する研究で明らかになったように、引張補強材やせん断補強材の剛性もせん断耐力に大きな影響を及ぼします。せん断耐力も計算法は確立されていますが、曲げ耐力の場合と異なり、実験式に基づいているのが普通で、通常と異なる条件下では、今でも模型による載荷試験を行い、設計式の確立を計るのが珍しくありません。連続繊維補強材を用いた部材の場合はその好例です。その場合、影響因子が多いので、一般的には数多くの模型試験体が必要となります。

載荷方法としては、土木では曲げ試験と同様に単純梁方式を用いることが多いのですが（図—3参照）、建築では、建物の中の梁や柱を考え、両端固定の状態ですせん断力を与える方式が多いという違いがあります。どちらの場合も、通常は静的単調載荷を行います。せん断力が作用している領域（せん断スパンとも言います）内のどこかで、コンクリートにせん断ひび割れ（斜めひび割れ）発生後、このせん断ひび割れがコンクリート断面を貫通して破壊するせん断引張破壊か、せん断ひび割れ近傍の



写真—2 せん断破壊



図—3 せん断試験

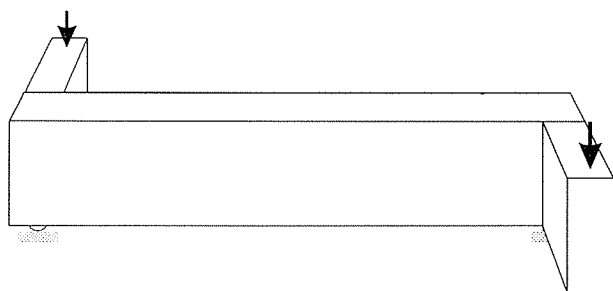
コンクリートが圧縮破壊するせん断圧縮破壊かを起こし、耐力を迎えます（写真—2参照）。

測定項目としては、載荷荷重と載荷点での変形のほかに、せん断補強材のひずみ、引張補強材のひずみ、せん断スパン内のコンクリートの主ひずみ、せん断ひび割れでの変形などがあります。せん断補強材にどの程度の引張力が作用しているかはせん断耐力に大きな影響を与えますので、せん断破壊時のせん断補強材のひずみを知る必要があります。引張補強材もしくはせん断補強材としての緊張材のひずみはプレストレスを示すものでもあります。このプレストレスもせん断耐力に大きな影響を与えますので、載荷試験中は正確に把握しておく必要があります。せん断スパン内のコンクリートの主応力、特に主圧縮応力の大きさや方向は、せん断耐力を考えたときの力学モデルにとっては重要な情報です。せん断ひび割れでの変形もせん断ひび割れでどのような力が伝達されているかを知る手がかりとなりますので（5.4参照）、せん断スパン内のコンクリートの主応力同様重要な情報です。せん断耐力時の部材の変形を知ることは、やはり地震時の変形性能を考えると大変重要なことで、一般的には、曲げ破壊時よりもかなり小さいことが知られています。

部材の変形には曲げ変形とせん断変形とがあります。主としてせん断ひび割れによって生じるせん断変形は、曲げ変形とは異なりその計算法が確立されておらず、模型による載荷試験はかかせません。この場合も、前述の因子を変数とした数多くの模型試験体が必要です。せん断変形の測定方法としては、せん断スパン内の複数の点の動きを2次的に測定することにより、せん断スパン全体の変形をとらえ、部材全体の変形から曲げ変形とせん断変形を分離する方法がとられます。

3.3 ねじり試験

ねじり耐力に影響を及ぼす因子はせん断耐力の場合と同様です。耐力や変形の計算法もある程度確立されていますが、せん断の場合と同様に実験式に基づく部分がかなりあります。せん断は2次元なのに対し、ねじりは3次元の問題なので現象がより複雑なため、せん断の場合以上に解明は遅れていて、今でも模型による載荷試験が



図—4 ねじり試験



写真—3 ねじり破壊

多く行われています。棒状の模型試験体に、ねじりモーメントが作用するような装置を取り付けて荷重します（図—4参照）。斜めひび割れがらせん状に発達し、かぶりコンクリートのはく落などを伴いながら耐力を迎えます（写真—3参照）。曲げモーメントや、せん断力も同時に作用するような荷重をすることもあります。必要な測定項目はせん断の場合と同様と考えてよいでしょう。

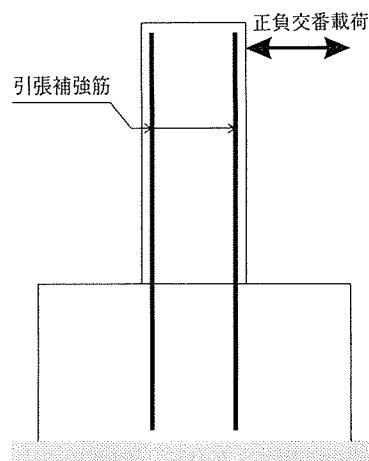
3.4 正負交番荷重試験

（地震荷重に対する変形性能試験）

ここまでは、静的単調荷重時の耐力や変形に関して説明してきましたが、地震時には荷重の方向が正負に変わる正負交番荷重を受け、最大耐力時、さらには、最大耐力到達後の荷重と変形を知ることが設計では重要となります。破壊モードとしては、やはり、曲げ、せん断、ねじりを考えなくてはならないのですが、荷重履歴が、正負交番タイプである必要があります。荷重速度の影響もおおむね明らかにされており、必ずしも実際の地震時と同じ動的な荷重である必要はないのですが、実際の地震波に対する応答を観察するときは、振動台などを用いて動的な荷重を行うことが多いようです。一般的には、静的単調荷重時の性状よりは、予測することが難しく、模型による荷重試験に依存する傾向は大きいといえます。

荷重方法の一例を図—5に示します。土木構造の場合、橋脚の地震時の変形性能が重要で、図—5に示すような模型を用いて水平力の正負交番荷重試験を行います。骨組構造中の柱の場合は、上下両端の回転を拘束した形で荷重試験を行うことが多くなります。

測定項目としては、荷重と変形の関係、引張補強材のひずみが特に重要となります。引張補強材降伏時の荷重と変形の測定は不可欠で、最大耐力到達後、この降伏時



図—5 正負交番荷重試験

荷重まで荷重が低下した時の変位を終局変位とするのが普通です。降伏時の剛性、終局変位と降伏時の変位との比（靱性率といいます）は地震時の応答性状を推定する時に使われます。

3.5 疲労試験

土木構造物では、繰返し数は少ないが大きさの大きい地震荷重とともに、交通荷重や波荷重などの大きさは小さいが繰返し数の多い疲労荷重も、設計時に検討が必要な重要な荷重です。疲労という現象はまだ理論的な予測を完全に行うことができない現象であり、疲労強度は模型荷重試験によって求めることが多いということは事実です。コンクリート構造物では、コンクリートの圧縮および引張疲労、補強材の引張疲労を、PCではさらに定着部の疲労を考慮する必要があります。その中でも、コンクリートひび割れ発生後の補強材に作用する引張応力の振動により、補強材が引張疲労破壊する場合は最も起こりやすい現象です。その意味においては、コンクリートのひび割れ発生を抑制するPCは疲労に対して有利な構造といえます。しかし、PRCの場合は通常荷重によるひび割れの発生を許容しますので、緊張材を含む補強材の引張疲労および定着部の疲労の検討が重要となります。

引張補強材の引張疲労の場合は静的単調荷重時の曲げ試験の時のように、せん断補強材の引張疲労の場合はせん断試験のように、ねじり補強筋の引張疲労の場合はねじり試験のように模型を準備し荷重しますが、繰返し荷重を動的に与える点が異なります。また、コンクリートの圧縮疲労に対する試験としては、曲げ試験と同様な試験による、模型中の曲げ圧縮部のコンクリートの圧縮疲労試験があります。一方、部材のせん断圧縮破壊もしくはせん断引張破壊によるせん断疲労の場合、現象としては、各々せん断スパン内のコンクリートの圧縮疲労と引

◇講座◇

張疲労が起こっているといっただいなのですが、せん断試験のような試験となります。定着部の疲労試験は、定着具と定着具周辺のコンクリート部のみの模型を作製し、定着された緊張材に応力振幅が作用するように载荷し、緊張材、定着具、その周囲のコンクリートの疲労破壊が生じるかどうかを検討します。疲労試験における载荷の繰返しのスピードは、試験機の能力にもよりますが、通常、0.5～5 Hz 程度です。また、必要な測定項目は静的単調载荷時とおおむね同様です。通常繰返し回数の対数が等間隔となるような間隔で動的载荷を一時止め、静的に载荷し、測定を行います。なお、補強材の引張疲労による破断が生じてコンクリート内部のことですので外からは見えませんが、破断した補強材のひずみが急激に小さくなりますので、破断していることを確認できます。

疲労試験としては、これ以外に材料の疲労試験があります。円柱供試体によるコンクリートの疲労試験、補強材の引張疲労試験などがあります。補強材の場合、曲がっている箇所の疲労破壊は生じやすく、緊張材のデビエータ部、せん断補強材の曲げ加工部などは、まっすぐな箇所より疲労強度は半分程度に低下しうることが知られています。材料の疲労試験結果より得られる疲労強度曲線はS-N曲線とも呼ばれ、応力範囲（最大応力と最小応力との差）もしくは最大応力Sと繰返し数Nとの関係で表します。前述の部材の模型による疲労試験中の補強材の応力、コンクリートの応力と材料の疲労強度曲線とを比較し、部材の中で補強材やコンクリートが疲労破壊を起こすかどうか検討することができます。

4 実構造物の性能確認の場合

ここでは、PC斜張橋のケーブルの定着部の耐力を確認する例を取り上げ¹⁾（図-6、写真-4参照）、载荷試験の手順を考えてみます。

4.1 模型試験の必要性

定着部の耐力を決める破壊として考えられているの

が、定着部周辺のコンクリート上床版の押抜き（もしくは引抜き）せん断破壊ですが、押し抜くもしくは引き抜く方向が床版と直交せず、また、床版が腹部に相当する側壁や隔壁に複雑に支持されていることなどが理由で、これまでの方法では耐力を推定できません。したがって、実構造物の模型による確認試験が必要なのです。

4.2 対象の選定

まず、試験対象の選定はどうなるでしょうか。定着部の耐力を確認したい場合、斜張橋全体の模型は必要なく、斜張橋の一部、すなわち、定着部周辺の模型で十分だと考えられます。しかし、どの部分までを载荷試験の対象とするかは、定着部の耐力を決める破壊機構と密接な関係があり、実際の破壊機構を確実に再現できるよう対象領域を十分大きく取る必要があります。押抜き（もしくは引抜き）せん断破壊面が上床版、腹部、隔壁（横桁）のどこを通るかをある程度予測し、実際の破壊面が対象領域内に入るようにしなければなりません。対象箇所を小さく絞ると耐力を過小評価する危険性があるのです。

4.3 模型の設計・作製

模型の寸法は、実際の構造物の寸法に近いほどよいの

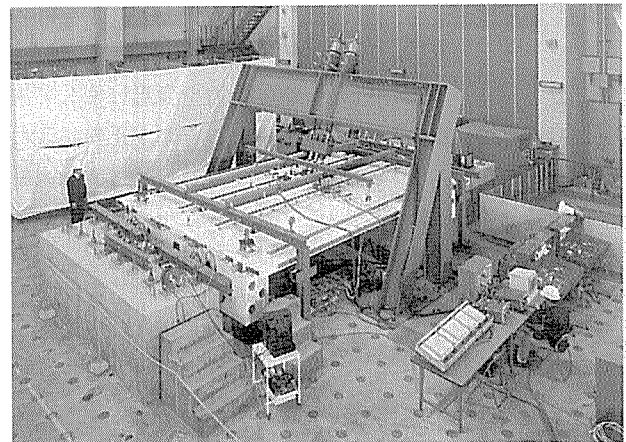


写真-4 PC斜張橋ケーブル定着部模型载荷試験

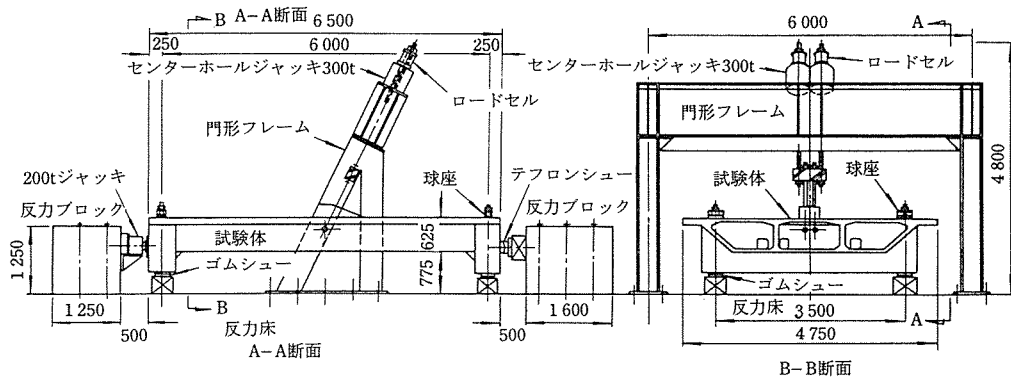


図-6 PC斜張橋ケーブル定着部模型载荷試験¹⁾

は自明ですが、費用、載荷装置の能力、必要な測定精度などを合わせ考え、最適な寸法を決めます。破壊モードとして予想されるコンクリートの押抜きせん断破壊は、骨材の最大寸法、補強材の直径にも何らかの影響を受けると考えられます。したがって、模型の縮尺に合わせた骨材の最大寸法、補強材の直径を選ぶことが望まれます。直径を縮尺に合わせれば、配置する補強材の数は実構造物と同じとなり、配置の仕方にも全く同じとすることができます。定着具も縮尺に合わせた寸法のものを用いるのがよいとは言ってもありません。模型の作製に際しては、実際の施工を想定し、コンクリートの打込み方向、打ち継ぎ目位置等は、実際の構造物と同じにする方がよいでしょう。

4.4 測定計画・準備

定着部の耐力および耐力を決定する破壊機構を詳細にとらえることが、測定の目的となります。載荷荷重の測定のほか、破壊面を横切る補強材のひずみ、コンクリート中のプレストレス、載荷荷重に対応する変形（例えば、載荷ジャッキの動き）などを測定する必要があります。補強材のひずみの測定点は、破壊面と横切る箇所に近いほど有用なデータが取れます。コンクリートのプレストレスの測定は緊張材のひずみを測定することにより間接的に測定するのが普通でしょう。破壊面において、荷重をどのように分担しているかは、破壊面を横切る補強材に作用している力を測定した補強材のひずみから推定することにより、知ることができます。補強材が負担している力以外がコンクリートが負担している力となります。最終的にはコンクリートが破壊することによって最大耐力が決まりますが、破壊時にコンクリートが負担している力はそこに存在するプレストレスの影響を受けます。プレストレスを測定する理由はここにあります。載荷点の変形（ここでは載荷ジャッキの動き）を測定しておく、試験中に破壊をとらえるのが容易になります。破壊が近くなると荷重の増加に対して変形の増加が著しくなるからです。

4.5 載荷計画と試験の実施

載荷試験の目的は定着部の耐力を確認することです。破壊を起こすような荷重が衝撃荷重でもなく、数多く繰返し作用する疲労荷重でもない、静的単調載荷で問題はないと考えられます。一般的に、破壊を起こすような地震時に作用する荷重の速度は、載荷試験時の荷重速度よりかなり速くなりますが、破壊荷重にそれほど大きな影響は及ぼさないことは過去の経験から明らかです。たとえ影響があったとしても荷重速度が遅い方が破壊荷重は小さくなることから知られていますので、試験の

結果は安全側になります。耐力以外に設計荷重作用時の剛性を知りたいような場合は、設計荷重レベルに到達してから除荷をし、除荷時や再載荷時に変形を測定すればよいでしょう。載荷試験中は、荷重と変形曲線であるとか、荷重と破壊面を横切る補強材のひずみ曲線をコンピュータのディスプレイ上でモニターしていきます。

5 FEM等の数値解析に必要な情報取得

有限要素法（FEM）などに代表される数値解析に必要な情報としてはどのようなものがあるのでしょうか。一言でいえば、材料に作用する力とその変形との関係となります。一般的には、応力とひずみとの関係ですが、補強されたコンクリートの場合、ひび割れとか、補強材とコンクリートとの界面では、力と変形との関係で与える場合もあります。これらの必要な情報は、通常は、模型の載荷試験により得ることができます。それらは部材の挙動というよりは、材料の挙動ですので、部材の模型というよりは、部材の一部を取り出したような模型を作製します。以下に試験の種別ごとに説明をしましょう。

5.1 コンクリートの応力—ひずみ関係

まずコンクリートの応力とひずみとの関係を見てみましょう。解析する対象により、1次元、2次元もしくは3次元応力下の応力とひずみとの関係が必要となります。もちろん、3次元の応力とひずみとの関係が与えられれば、どのような場合でも適用できるのですが、その関係を得るのに大変な労力を要しますし、3次元の解析も大変です。したがって、2次元、さらには1次元の解析で済むのでしたらそれに越したことはありませんので、それに対応する応力—ひずみ関係が必要になります。ご存じのようにコンクリートは弾性体とはいえませんので、コンクリートの破壊まで正確に追おうとすると複雑な材料非線形モデルが必要です。コンクリートの1次元の応力—ひずみ関係には円柱供試体を、2次元の応力—ひずみ関係には正方形の平板模型を、3次元の応力—ひずみ関係には立方体模型を用いた載荷試験を行います。もちろん、載荷方向は、各々1方向、2方向、3方向で、載荷荷重とその方向のひずみもしくは変形を測定します。

5.2 補強材の応力—ひずみ関係

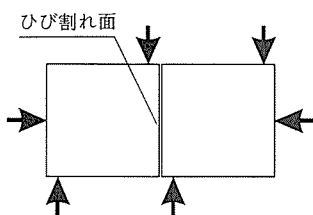
補強材の場合は普通細長い線状ですので、1次元応力下の応力とひずみとの関係が与えられれば通常は十分です。さらに緊張材の場合は、部材の破壊直前まではほぼ線形弾性的な挙動をしますので、必要な応力とひずみとの関係は非常に簡単になります。しかし、地震時の弾性域

◇講座◇

を越えた非線形な部材の応答を追おうとすれば、補強材の降伏後の正負交番荷重下の複雑な応力—ひずみ関係を知る必要があります。載荷試験としては、線状の補強材を適当な長さで切り出したものに引張荷重を与え、荷重とひずみもしくは変形を測定します。ただし、正負交番荷重下の応力—ひずみ関係を求める場合は、圧縮荷重を与えるときに座屈が起こらないような工夫が必要です。

5.3 ひび割れでの伝達力—変形関係

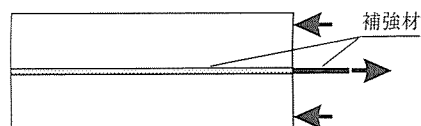
力と変形の関係としては、ひび割れで伝達される力とひび割れでの変形との関係があります。このひび割れでの力と変形の関係としては大きく分けると二つの種類があります。一つ目は、ひび割れがはじめ完全に開くまでの時期で、ひび割れ面に直交方向の引張力とひび割れの開きとの関係です。もう一つは、ひび割れが完全に開いた後、ひび割れにずれ変位が生じたときで、ひび割れ面直交方向の圧縮力とひび割れ面方向のせん断力という二つの力と、ひび割れの開きとずれ変位という二つの変形との関係です。後者はいわゆる骨材のかみ合わせによる力の伝達です。前者に対する試験では、ひび割れが入りやすいように小さな切欠きなどを入れた無筋コンクリートの試験体を用い、与えた引張荷重とひび割れの開きを測定します。ひび割れが開き始めると荷重が下がり始めますので、変位制御の載荷装置が必要です。後者に対する試験では、あらかじめ入れておいたひび割れを含むコンクリート試験片を用い、ひび割れ面直交方向に圧縮力が、ひび割れ面方向にせん断力がひび割れ面に作用するように載荷します(図—7 参照)。この2方向の載荷荷重と、その方向の変形を測定します。



図—7 ひび割れでの伝達力—変形関係を求めるための試験

5.4 補強材とコンクリートとの界面での伝達力—変形関係

補強材とコンクリートとの界面で伝達されるせん断力と相対変位との関係(いわゆる付着力とすべりとの関係)を調べるにはどのような載荷試験が必要なのでしょうか。付着力とすべりとの関係を見るためには、補強材を埋め込んだコンクリート試験片を準備します。この補強材をコンクリートから引き抜くように載荷し、この引張荷重と補強材とコンクリートとの間のすべりを測定しま

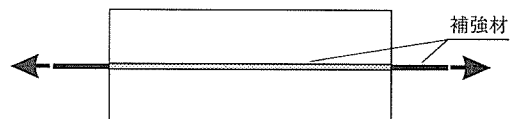


図—8 補強材とコンクリートとの界面での伝達力—変形関係を求めるための試験

す(図—8 参照)。補強材のまわりのコンクリートは補強材が引き抜かれるとき補強材にくっついてせん断変形しますので、どこでコンクリートの動きを測定するかによって、測定されるすべりの値が大きく変わってしまいます。つまり、補強材のそばで測定すればするほど、すべりは小さくなるのです。このような不確定さをさけるために、補強材のひずみを補強材の軸方向に細かい間隔で測定しひずみ分布を求め、ひずみを積分することにより補強材の伸びを求め、これをすべりと定義する方法もあります。この場合、周囲のコンクリートの変形は無視していることになります。このようにひずみ分布を求めると、局部付着力も求めることが可能で、付着力の分布も得られるという利点もあります。

5.5 コンクリートの引張剛性

補強材を埋め込んだコンクリート試験片による載荷試験には、コンクリートの引張剛性を調べる試験があります。コンクリートだけではひび割れが完全に開いた後、引張力は伝達しませんが、補強材で補強されていると、補強材とコンクリートとの間の界面での付着により、補強材からコンクリートに引張力が伝達されますので、ひび割れとひび割れの間ではコンクリートも引張力を負担します。したがって、補強されたコンクリート試験片全体の剛性が、補強材の引張剛性より大きくなるのです。この大きくなった分をコンクリートの引張剛性と呼んでいます。試験方法としては、埋め込まれた補強材を両側から引き抜くような荷重をかけ、荷重と変形を測定します(図—9 参照)。また、補強材のひずみを補強材の軸方向に細かい間隔で測定し、補強材の引張力の分布を求め、それを載荷している引張荷重から差し引くことによりコンクリートが負担している引張力の分布も求めることができます。

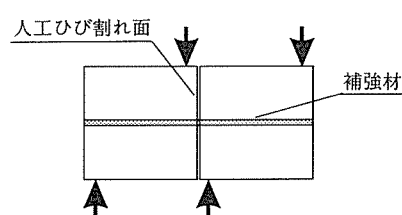


図—9 コンクリートの引張剛性を求めるための試験

5.6 補強材のダウエル作用

最後に、補強材のダウエル作用を調べる試験を見てみましょう。ダウエル作用とは、ひび割れでのずれ変形に

に対する補強材の抵抗作用です。試験体としては、ひび割れを含むコンクリート試験片に補強材をひび割れと交差するように埋め込んだものを使います。ひび割れとしては、二つのコンクリートブロック間の隙間というような人工的なものを用いることが多いようです(図—10参照)。このひび割れ面において、ずれを生じさせるように载荷し、交差する補強材にせん断力を作用させます。このせん断力とずれ変形をダウエル力とダウエル変形と呼びますが、これらを測定します。そのほかには、補強材の曲げ変形(曲率半径)を補強材のひずみを測定することにより測定したり、ダウエル力による補強材周辺のコンクリートの割裂ひび割れを測定したりもします。



図—10 補強材のダウエル作用を求めるための試験

5.7 载荷方法

以上の模型試験では静的载荷を通常は行いますが、载荷速度の影響を知りたいのであれば、载荷速度自体を適切に設定する必要がありますし、载荷の繰返しの影響を知りたいのであれば、繰返し载荷が必要です。

6 模型载荷試験結果の検討方法

6.1 試験結果の利用法

载荷試験を行うに際し、「何を測定するか」とか「どのように測定するか」とかが決まっているということは、実は測定結果をどのように検討するかが決まっているということでもあります。実構造物の性能確認なら、性能を示すある変数を測定しているわけですから、測定された結果を見て即座に検討を行えるわけです。また、汎用性のある設計法の確立としての、耐力式や剛性式の確立では、耐力や剛性に影響を与える因子を変数とした試験を行っているわけですから、測定結果に基づいて、因子を変数とした実験式を構築すればよいわけです。この場合、実験式の関数形がある程度予想される場合もあります。そのときは、予想される関数形のなかから適切なものを選択するということになるでしょう。数値解析

に必要な情報を得る場合も同様で、力と変形の関係、もしくは応力とひずみの関係が求めたい情報で、それらを測定しているわけですから、測定結果から関係式の構築をはかるわけです。もちろん、この関係式がいくつかの因子に影響されることが予想されるときは、それらを変数とした試験を行い、それらを変数とした関数形を関係式としてさがしだすことになりましょう。変数の種類が多いときは、関数形を求めるのも難しくなります。したがって、どのような関数形になるかあらかじめ検討し、適切な予想が立っていることは重要になります。十分な予想が立っているときは、その予想が正しいかを確認するという目的で、変数やその数値を絞って载荷試験を行うこともあります。その結果に応じて、予想の方法、具体的には、耐力式であったり、応力—ひずみ関係であったりするわけですが、これらを適切に修正することも行われます。

6.2 試験結果の信頼性の検討法

载荷試験の結果が妥当かどうかの検討も大切です。測定結果の信頼性を高めるには、同じ試験を複数回行うことが最も簡単な方法です。また、あらかじめ結果の予想を立て、それと比較し結果の信頼性を確認する方法もよく行われます。予想との比較は载荷試験中にも行えますので、不適切な測定や载荷を早く発見し、試験の無駄を防ぐことにも役立ちます。不適切な箇所を発見した場合、直ちに試験を中断し、測定結果を十分に検討しながら、不適切な箇所を直さなければなりません。試験をすでに終了した後の場合は、信頼性のない結果があるかもしれないという目で、試験結果を検討することも必要です。検討のうえ、信頼性のない結果と判断されたデータは、新たに試験を行うか、そのデータを除いて検討することが必要です。

おわりに

資料に関する情報を提供してくださった鹿島建設(株)技術研究所一部竹田哲夫氏、写真を提供してくださった日本道路公団高松建設局技術部湯川保之氏および北海道大学工学部土木工学科志村和紀氏、古内仁氏、佐藤靖彦博士に謝意を表します。

参考文献

- 1) 佐々木芳文, 飯東義夫, 城戸正行, 竹田哲夫: 碓氷橋(PC斜張橋)上部工の設計(下)—斜材定着部の模型実験—, 橋梁と基礎, Vol.26, No.5, 1992年5月, pp.33-38.