

一般 02 北海道における地震動特性を考慮した構造物の耐震性能評価に関する研究

研究予算：運営費交付金

研究期間：平 18～平 22

担当チーム：寒地構造チーム

研究担当者：西 弘明、今野久志、三田村浩、佐藤 京、
山口 悟、表 真也、澤松俊寿、宮川智史

【要旨】

北海道では釧路沖地震、南西沖地震、東方沖地震、十勝沖地震など被害地震が頻発している。現状では地域や地盤によって異なる地震動特性や構造物の動的挙動を適切に評価することが難しく、適正な安全性を確保しつつ経済的に構造物の耐震設計（耐震補強を含む）を進めるに当たっての課題となっている。

本研究課題では、北海道における地震動の地域特性や地盤特性等を考慮した構造物の耐震性能評価及び地震被害推定等に関する研究を行った。北海道各地で考慮すべき震源域を整理するとともに、合理的な耐震設計を行うための応答スペクトルの提案、凍結地盤の影響による構造物の挙動解析の簡易手法などについてまとめた。

また、積雪寒冷地域における現場施工性に配慮した耐震補強工法について検討を行った。防寒養生が必要なく、また短期間での施工が可能な材料としてアラミドロープを抽出し、アラミドロープ巻立てによる既設 RC 橋脚の変形性能向上のためのじん性補強工法を提案した。RC 橋脚供試体の正負交番載荷試験を実施し、提案工法の効果の検証および設計法を提案した。

キーワード：地震動、地震被害、地震応答解析、地盤凍結、鉄筋コンクリート橋脚、耐震補強、アラミドロープ

1. はじめに

北海道では釧路沖、東方沖、十勝沖など大規模な地震が頻発しているが、現状では地域や地盤によって異なる地震動特性や構造物の動的挙動を適切に評価することが困難であり、適正な安全性を確保しつつ経済的に構造物の耐震設計（耐震補強を含む）を進めるに当たっての課題となっている。このため、北海道における地震動特性を考慮した構造物の耐震性能評価及び地震被害推定等に関する研究を進めていく必要がある。

本研究課題では、北海道における地震動の地域特性や地盤特性等を考慮した構造物の耐震性能評価及び地震被害推定等に関する研究を行う。

具体的には、北海道で観測された地震動特性の整理を行い、震源域の抽出やその危険度評価を実施するとともに地域特性や地盤特性を加味した地域地震動による設計入力地震動の提案や、地震時挙動の簡易解析法の精度を検証し、夏期冬期における応答を考慮した耐震設計法（耐震補強を含む）の提案等を行った。

また、積雪寒冷地域の特徴に配慮した耐震補強工法の開発のために、積雪寒冷地での RC 橋脚の耐震補強工法に求められる事項を整理し、アラミド繊維製ロープ（以下、「アラミドロープ」という。）の巻付けによる既設 RC 橋脚の耐震補強工法を提案した。また、正負交番載荷試験により提案工法の補強効果について検討を行い、設計マニュアル（案）を作成した。

2. 調査研究の手法

2.1 地域・地盤特性を考慮した設計入力地震動の提案

2.1.1 北海道における地震動特性の整理

我が国周辺で発生する地震は、内陸活断層に起因する内陸型地震と、海洋プレートが大陸プレートの下にもぐりこむ際に発生するプレート境界地震に大別される。さらに、プレート境界地震は、境界部で発生するプレート間地震ともぐり込んだプレート内で発生するプレート内地震に分けることができる。地震動予測のための震源のモデル化では、既往地震による経験的關係式が用いられることが多く、その経験的關係式は地震の種類により異なることが知られている。そのため、北海道周辺で発生した地震について、地震の種類をとりまとめ、北海道における設計入力地震動を考える上で考慮すべき地震の種類を検討する。

検討手法としては、北海道で観測された地震動記録を可能な限り収集し、比較的大きな被害を与えた地震を抽出し、震源とメカニズムを調査するとともに地震の種類（内陸型地震、プレート間地震、プレート内地震）进行分类する。これらを基に、北海道における設計用地震動を検討する際に考慮すべき地震の種類を明らかにする。

2.1.2 設計入力地震動の提案

北海道の地域特性を考慮した耐震設計法の提案を目的に、北海道で観測された地震動記録を用いて設計用応答

スペクトルの検討を実施する。検討においては、各地域で防災対策上重要となる影響度の高い震源域から発生する地震動を対象とする。

加えて、2.2.3 項で検討した被害指標と本研究で設定したサイト特性を用いて北海道の地震危険度の評価を行い、耐震設計に用いる地域別補正係数の検討を行う。地震危険度の評価では、北海道に影響を及ぼすと考えられる地震発生源を対象とする。

2.2 北海道の特殊性を考慮した橋梁耐震設計法の提案

2.2.1 地盤特性が橋梁耐震性能に及ぼす影響の検討

北海道は、日本の北部に位置し、夏期は+30℃を超え、冬期には、-20℃を下回るなど、50℃程の寒暖差が生じる地域もある。社会基盤を整備する上では、この環境に対応出来るよう配慮している。例えば、道路網を構築する際には、必要な舗装構成のみで建設した場合に、路床が凍結深さよりも浅い位置にある場合には、路床が凍上の影響を受け、舗装路面の平坦性が低下したり、表層路面に横断亀裂が生じたりするなどの不具合が発生する。このため、凍上抑制層を設けるなどの配慮がなされている。

道路橋示方書による橋梁耐震設計を行う際には、入力地震動は、フーチング下面より入力しており、動的解析を行うには、フーチング上面から脚部にかけて地盤特性の季節変動がある場合には、その影響を受ける可能性がある。

そこで本研究では、解析対象橋梁とした架橋地点の凍結時土質調査を実施し、地盤物性の変化を調査するとともに、詳細解析により影響を確認した。

2.2.2 地域特性を考慮した耐震設計法の提案

前節の凍結地盤物性値を考慮した橋梁地震応答解析結果より、地盤凍結時における下部工への作用断面力は、部分的にはあるが平温時に比較して大きく変化する可能性があることがわかった。

橋梁の地震応答解析における基礎-地盤系のモデル化としては、一般的には集約バネによる場合が多い。しかしながら、橋梁の地震時応答は基礎構造や周辺地盤の影響を大きく受けることから、実挙動を適切に予測するためには、基礎-地盤系の動的相互作用を顧慮した連成解析が必要となる。解析精度の観点からは、前節で用いたようなソリッド要素やシェル要素といった高次要素を使用するのが望ましいと考えられるが、これを全てに適用することは解析コスト等の観点からも現実的に困難である。

そこで、地盤凍結時の挙動を比較的簡便に予測可能な手法として、耐震設計の実務で一般的に用いられている、はり～バネ～質点系の2次元骨組みモデル（ペンゼンモデル）について検討を行った。

2.2.3 既往地震動記録等に基づく地震被害推定に関する検討

規模の大きい地震が発生した場合、その地震による被



図-1 アラミドロープ

害の状況を簡易にかつ要求された精度において推定することは重要である。特に、WISE および K-NET 等の地震観測網の充実により、地震による各地の揺れの状況については比較的短時間に把握されることから、これらの揺れから被害の状況を推定する指標が求められている。ここでは、検討対象とする構造物を限定し、その構造物に対して最も構造物の被害と相関の高い被害指標の検討を行う。

2.3 積寒地における現場施工性等を考慮した既設 RC 橋脚の耐震補強法

2.3.1 アラミドロープ巻付け補強工法の提案

(1) 積雪寒冷地において耐震補強工法に求められる事項

冬季の低温環境や施工可能な期間が短いといった条件を有する積雪寒冷地において、耐震補強工法に求められる事項として以下の項目を設定した。

- (a)耐震補強効果
- (b)経済性
- (c)積雪寒冷条件に配慮した施工性

代表的な RC 橋脚の耐震補強工法としては、RC 巻立て、鋼板巻立て、連続繊維シート巻立て等がある。これらは、コンクリート、モルタルおよび樹脂を用いて既設部との接合を図る工法である。これらの工法を積雪寒冷地域で実施する場合、長期間に渡って低温環境下での施工を余儀なくされるため、工事の施工に伴う除排雪や防寒養生が必要となる。また、河川橋などの施工には工期的な制約があり、冬期施工が困難な場合もあるため、より施工効率の高い工法が求められる。このように、既往の耐震補強工法のみを対象として、積雪寒冷地域で工事を実施する場合には、不経済で施工性が低下するなどリスクが大きい。

このような条件を踏まえ、本研究では、防寒養生が必要なく、また短期間で施工可能な材料として図-1に示すアラミドロープを抽出し、アラミドロープ巻立てによる既設 RC 橋脚の変形性能向上のためのじん性補強工法（以下、アラミドロープ巻立て工法）を提案した。

(2) アラミドロープ巻立て工法

1) 特徴

アラミドロープ巻立て工法は、図-2 に示すようにアラミ



図-2 アラミドロープ巻立て

表-1 耐震補強工法の特徴

	補強効果	経済性	施工性		
			スペース	期間	防寒養生
RC 巻立て	曲げせん断じん性	経済的	広い	長い	必要
鋼板巻立て	曲げせん断じん性	比較的経済的	中位	中位	必要
連続繊維シート巻立て	せん断じん性	比較的経済的	狭い	短い	必要
アラミドロープ巻立て	じん性	経済的	狭い	短い	不要

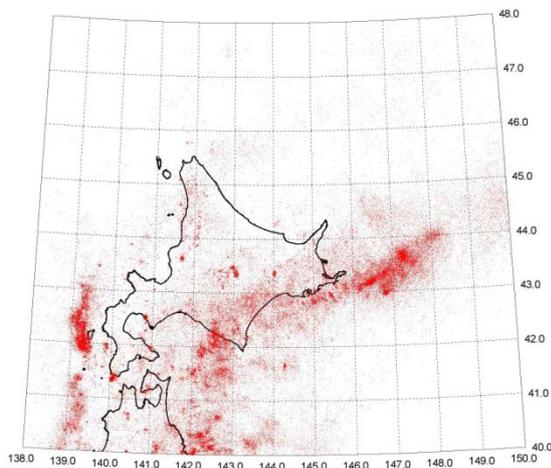


図-3(a) 北海道周辺で発生した地震の震源分布

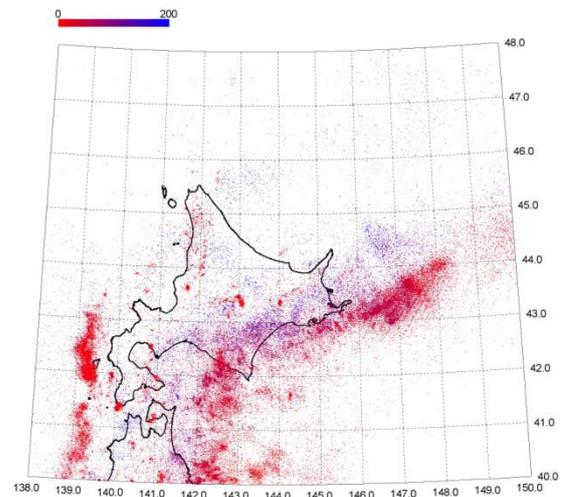


図-3(b) 北海道周辺で発生した地震の震源深さ

ドのロープを既設部材に巻付け、ロープの拘束効果によりコンクリートの剥離を抑制することで耐震性の向上を図る方法である。ロープの張力により既設部材に密着した状態を維持できるため、樹脂の含浸を伴わず、また端部を機械的に定着できるため、防寒養生も必要としない。さらに、人力による巻付け程度の張力で施工可能であるため施工効率が高い方法である。本工法は表-1に示すように、代表的な既往の耐震補強工法と比較して、施工に必要なスペース、施工期間、経済性に利点があり、積雪寒冷地域における耐震補強工法としての適用性を有している。アラミドロープは、実用化が進んでいる連続繊維シートや連続繊維棒材に変わる新しい形態の補強材として開発された材料であるものの、RC 構造物の耐震補強に使用された実績はなく、巻付けによる耐震補強効果は検証されていないのが現状である。

3. 調査研究の成果

3.1 地域・地盤特性を考慮した設計入力地震動の提案

3.1.1 北海道における地震動特性の整理

北海道に影響を与える地震発生源を歴史地震や既往地震から分類し、各発生源について地域に与える地震影響度を考慮した設計入力地震動の検討に用いる個別の活断層や震源域を設定する。

図-3(a)に2002年までに北海道周辺で発生した地震の震源分布を示す。使用した震源データは、1884年までが宇佐美カタログ¹⁾、1885年～1922年までが宇津カタログ^{2),3),4)}、それ以降は気象庁震源データ⁵⁾である。震源を示す印の大きさはマグニチュードによらず等しいため、濃く見える領域は地震が多く発生していることを示す。震源は北海道全土にかけてみられるが、基本的には限られた領域に集中していることがわかる。北海道の太平洋岸の沈み込み帯に沿った範囲、日本海東縁部がその地震が多発している領域に相当する。太平洋側の沈み込み帯でも地震が多く発生している領域とそうではない領域に区別することができ、特に根室半島の東方沖は地震が多く発生している。また、これ以外の地域においても数は少ないものの、地震が発生していることがわかる、北海道は比較的内陸の地震の記録が少ないが、部分的には地震

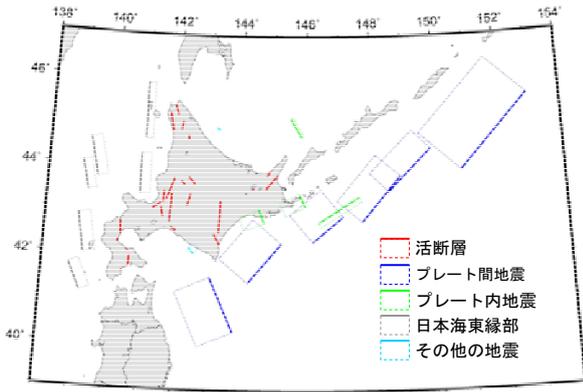


図-4 設定した地震発生源

が多く発生している地域があることがわかる。図-3(b)に震源の印を震源深さにより色分けして示す。赤色が濃いほど震源が浅く、その反対に青色が濃いほど震源が深いことを意味する。緑色の震源は震源深さが不明の地震を示す。震源深さが200kmより深い地震についてはすべて同じ青色で表示している。この図からわかるように、沈み込み帯付近で発生する地震の震源は比較的浅く、内陸部に向けて震源が深くなっている。これは、プレートの沈み込みの形状と良い対応を示していることから、内陸部に見られる震源は、活断層による浅い地震ではなく、沈み込み帯の境界部で発生するプレート境界型地震の震源であることがわかる。一方、内陸部にも濃い赤色で示される震源もいくつか見られる。また、規模別に分類して北海道に影響を与える地震の発生源を概観すると、

- ①活断層
- ②太平洋側の沈み込み帯
- ③日本海東縁部
- ④その他

の4種類に分類することができる。さらに、分類された4つの地震発生源に対して個別の地震発生源の設定を行った結果、合計41の地震発生源を設定した。具体的には以下の通りである。なお、太平洋側の沈み込み帯においては、プレート間、プレート内の特徴が見られるため、5種類に分類した。

- ・内陸活断層：21個の地震発生源（断層）を設定。21の断層のうち、9つは要注意活断層。
- ・プレート間地震：既往の地震履歴から6つの震源域を設定。
- ・プレート内地震：既往の地震履歴を参考に2つの想定震源域を含めた5つの震源域を設定。
- ・日本海東縁部の地震：2つの想定地震を含めた6震源を設定。
- ・その他の地震：比較的地震の多い浦河沖の地震と、地震が少ないオホーツク側の地震の2つを設定。

図-4に設定した地震発生源を示す。

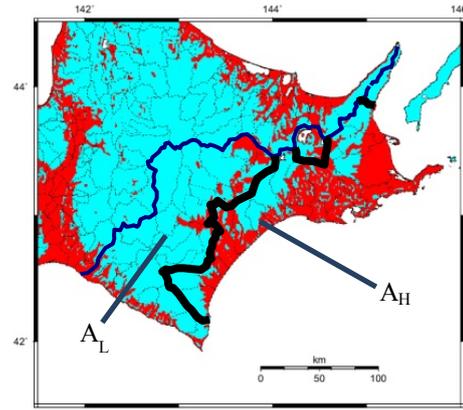


図-5 地域別補正係数区分Aとサイト特性

3.1.2 設計入力地震動の提案

北海道周辺の地震発生源は、①内陸活断層、②太平洋岸の沈み込み帯、③日本海東縁部、④その他（浦河沖等）の4つに分類される。また、②の太平洋の沈み込み帯は、プレート境界面で発生するプレート間地震と沈み込むプレート内で発生するプレート内地震の2つに分類できる。

本検討では、2003年十勝沖地震を対象とした加速度応答スペクトルの検討を実施した。

道路橋示方書（以下、道示）の地域別補正係数がAの地点を対象として、加速度応答スペクトルの振幅と形状についての検討を実施した。その結果、地域別補正係数がAの地域では、道示で設定された加速度応答スペクトルを大幅に上回る加速度応答スペクトルをもつ地震動が複数観測されており、道示の加速度応答スペクトルを用いて耐震設計を行うと過小評価になる可能性があることが指摘された。一方、地域別補正係数がAの地域を詳細に検討すると、地域によっては道示の加速度応答スペクトルを下回る記録もあることがわかった。

地域別補正係数がAの地域は、サイト特性を用いてA_HとA_Lの2地域に分類する。A_Hは既往の道示の地域区分Aであり、A_Lは地域区分がAではあるが、A_Hに比べると地震活動が低い地域である。分類の基準は、A_Hはサイト地震動増幅特性が1.6以上の地域、A_Lはその他の地域とする。

図-5に地域別補正係数がAの地域と、サイト地震増幅特性が1.6以上の範囲をあわせて示す。赤色で示した範囲が、サイト特性が1.6以上の地域である。図からわかるように、北海道の太平洋岸にサイト特性が1.6以上の地域が多いことがわかる。図-5よりA_Hの地域を設定する。このA_H地域での海溝型地震を想定した加速度応答スペクトルを示すと図-6となり、比較対象となる道示のタイプI地震動を上回り、周期帯によってはタイプII地震動のピークも越えるスペクトルとなった。

なお、地域別補正係数がBの地域における観測地震動の加速度応答スペクトルは道示の加速度応答スペクトルと同程度、もしくは若干小さいことがわかった。地域別

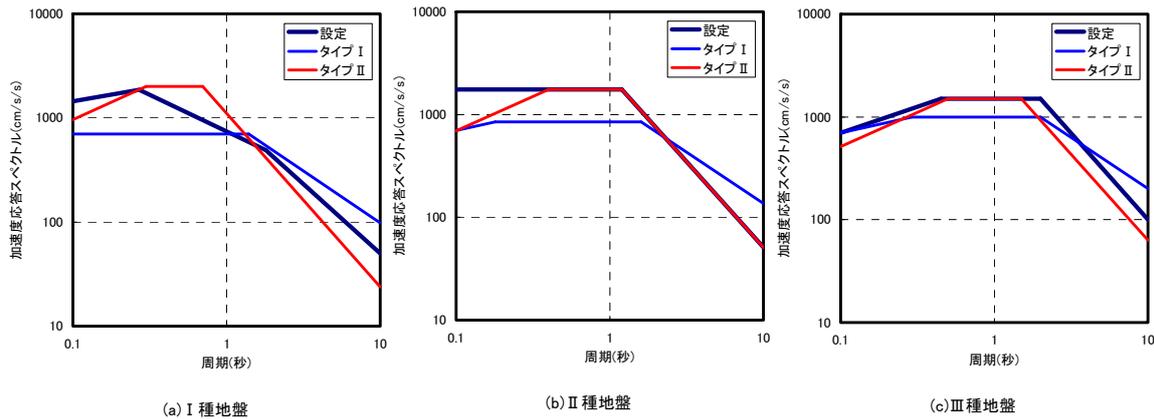


図-6 A_H 地域での加速度応答スペクトル

補正係数が C の地域では、道示の加速度応答スペクトルを大幅に下回る加速度応答スペクトルを設定することが可能となった。

3.2 北海道の特殊性を考慮した橋梁耐震設計法の提案

3.2.1 地盤特性が橋梁耐震性能に及ぼす影響の検討

(1) 凍結地盤特性調査

地盤凍結が橋梁の地震応答に与える影響の検討に際して、凍結地盤の物性値を得ることを目的に地質調査を実施した。

調査対象としたのは道東の河川橋架設位置近傍の3地点(No.1~3)である。凍結土の地層構成は、No.1 が表層の碎石 10cm を含む沖積層の砂礫、No.2、No.3 が腐食土主体の盛土(礫混じりシルト)で、調査時の気温は-17.5~-24.5°Cであった。

調査結果をまとめると以下のとおりである。

- 1) 非凍結土の地中温度-1.4~-1.9°Cに対し、凍結土では-6.0~-6.4°Cであった。また、凍結深は3地点とも60cmでほぼ程度であった。
- 2) 凍結土のN値は、No.1が非凍結土の22~41に対して換算N値で150、No.2、No.3が非凍結土の5に対してN値32、51であり、凍結によりN値は5倍以上大きくなる結果となった。
- 3) PS検層の結果、縦弾性波速度V_pは非凍結土の220~360m/sに対して凍結土が2400~2500m/sと7~11倍に、せん断弾性波速度V_sは非凍結土の120~160m/sに対して凍結土が710m/sと4~6倍に、ポアソン比νは非凍結土の0.281~0.395に対して凍結土が0.452~0.456になった。
- 4) 凍結によって3地点ともV_p、V_s、νが一定値となる傾向を示した。これは、地中温度や含水比が同程度であったことの影響と推察される。今回の調査結果からは地層構成や粒度特性が凍結時の動的物性値に与える影響は小さかったといえる。

図-7にPS検層結果総括図の一例を示す。

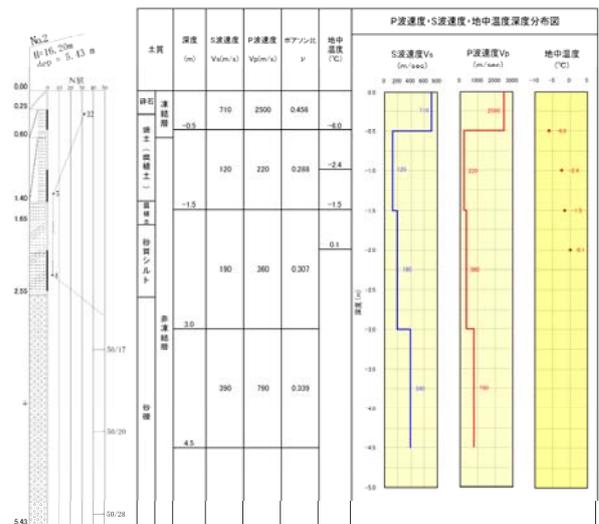


図-7 PS 検層結果総括図

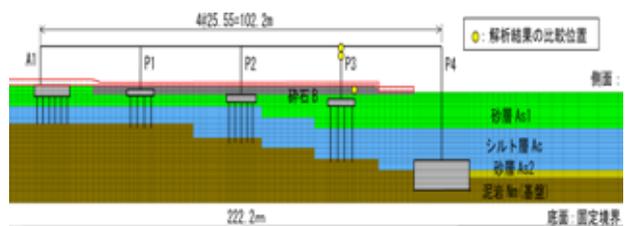


図-8 全体モデル図

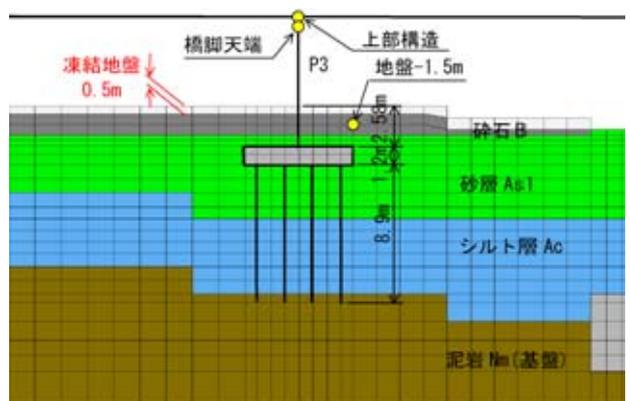


図-9 P3 近傍詳細図

表-2 凍結地盤の物性値

	平温時	凍結時	凍結/平温	備考
重量 kN/m^3	17	17		
ν	0.5	0.5		
V_s m/s	116	710	6.2	現地調査
G_s kN/m^2	2000	87000	37.7	V_s より
E_s kN/m^2	63279	2620000	37.8	V_s より
h_{eq}	0.3	0.3		

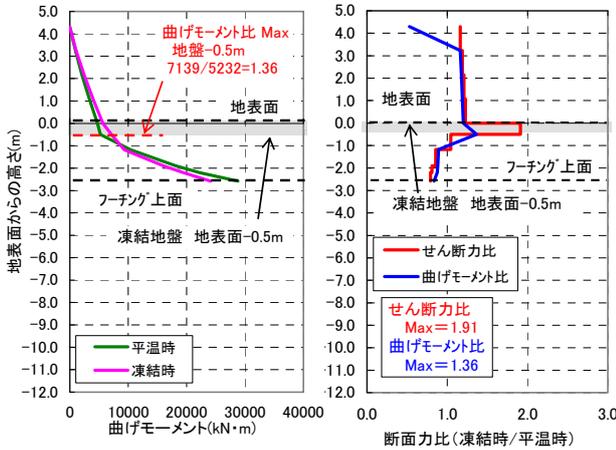


図-11 P3橋脚の最大断面力

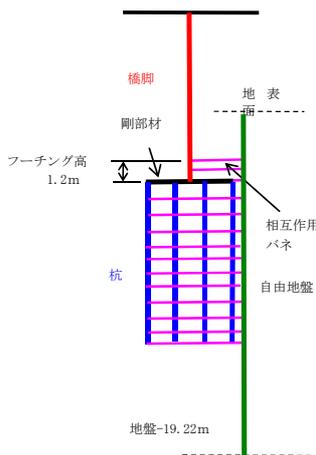


図-13 P3橋脚解析モデル図

(2) 凍結地盤物性値を考慮した橋梁地震応答解析

前節の凍結地盤調査結果より、凍結地盤の動的物性値を設定して4径間連続橋梁の地震応答解析を行い、平温時との応答値の比較を行う。解析は、図-8、-9に示すように、橋梁全体系および周辺地盤もモデル化した二次元FEMとした。

解析条件としては、以下のとおりである。

- ・ 地盤凍結の範囲は、現地調査結果より地表面から深度50cm
- ・ P4付近は海であるため地盤は凍結しない
- ・ 現地調査結果より、地盤凍結時のせん断弾性波速度は、 $V_s=710m/s$
- ・ 凍結地盤の物性値は、表-2の通り
- ・ 入力地震波は、図-10に示す平成6年北海道東方沖

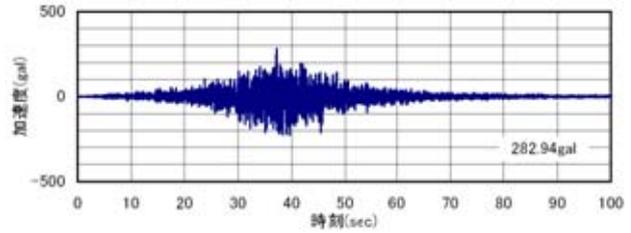


図-10 入力地震動

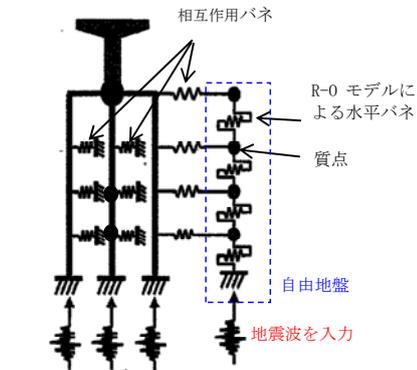


図-12 ペンゼンモデル手法概念図

表-3 部材のモデル化

要素	要素	非線形要素	備考
自由地盤	質点とせん断パネ	修正 R-O モデル	地盤の影響範囲はフーチング面積の200倍
自由地盤と構造物の接続	相互作用パネ	A1-P3の杭: バイニア A1-P3フーチング, P4: スリップ型	中央列の杭はパネ値と降伏値を1/2
杭先端と基礎の鉛直方向の接続	梁要素	弾性	
フーチング	梁要素	弾性	底面に剛な梁要素
桁	梁要素	弾性	
橋脚	梁要素	弾性	
杭	パネ要素	弾性	単重を鋼材に1.1倍
支承	免震支承 サドブロックとの衝突	パネ要素 パネ要素	バイニア バイニア

表-4 解析ケース

	自由地盤の面積	相互作用パネ
ケース1	フーチングの200倍	レベル2地震時水平方向地盤反力係数 K_{IE}
ケース2	"	$K_{IE} \times 0.1$ 、降伏値 $\times 1.0$
ケース3	"	$K_{IE} \times 0.1$ 、降伏値 $\times 0.1$

地震にて地盤-17mで得られた強震記録を用いた解析結果の一例として、P3橋脚の断面力の比較結果を図-11に示す。左図は平温時及び地盤凍結時の曲げモーメント分布を、右図は曲げモーメント及びせん断力の凍結時と平温時の断面力比の分布を示している。

図より、P3橋脚においては、地盤凍結時には地表面付近の断面力が増加する傾向が見られ、曲げモーメントで最大1.36倍、せん断力では1.91倍の断面力が作用することになる。これは全体的にみられる傾向であるが、その一方でA1橋台の曲げモーメントのように凍結地盤付近の断面力が減少する箇所も見られた。

3.2.2 地域特性を考慮した耐震設計法の提案

(1) 解析概要

図-12にペンゼンモデル手法の概要図を示す。橋脚基

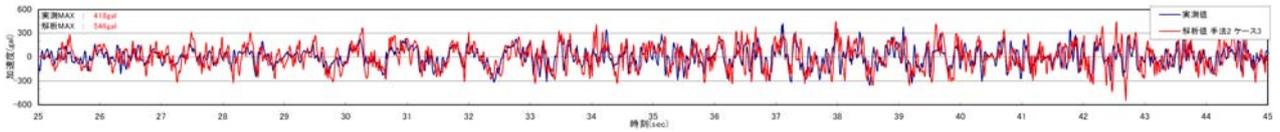


図-14 加速度波形の比較 (P3 橋脚天端, ケース 3)

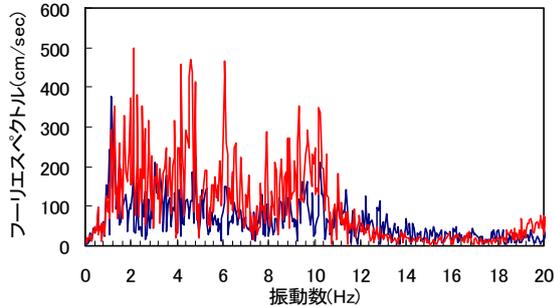


図-15 フーリエスペクトルの比較 (P3 橋脚天端, ケース 3)

礎部は、図-13 のように自由地盤を質点と復元力特性が R-O モデルのバネでモデル化し、自由地盤と構造物を相互作用バネで連結する。

解析対象とする橋梁は、前節と同一の橋梁である。部材のモデル化は、表-3 に示すとおり行った。自由地盤バネのモデル化において、修正 R-O モデルで入力する地盤のひずみ依存特性 $G_h-\gamma$ 曲線は、土木研究所資料 第 1778 号「地盤の地震時応答特性の数値解析法」を参考に設定した。また、R-O モデルを定義するせん断バネのパラメータは、 γ_f を $G/G_0=0.5$ のときのせん断ひずみ $\gamma=0.5$ として Rayleigh 減衰係数 α と β を算出した。

地震応答解析は、自由地盤底面から工学的基盤面（地盤-17m）で得られた地震波を入力し、相互作用バネを介することで地盤と構造物を連成させ、同時に上下部一体として行うこととした。なお、入力地震波は前節と同一であり、ここでは本地震で強震記録が得られている P3 橋脚を対象に検討を行うこととした。（図-9）解析ケースは、表-4 に示す 3 ケースで行った。

(2) 解析結果

解析結果の一例として、図-14 にケース 3 の P3 橋脚天端における加速度波形、図-15 に同じくフーリエスペクトルの実測値と解析結果を併せて示す。

解析結果をまとめると、

- 1) 相互作用バネを変化させた 3 ケースすべてにおいて、橋脚天端の加速度以外の照査項目は観測値と近い結果が得られた。
- 2) 橋脚天端の加速度は、ケース 1 が最も大きく、ケース 3 が最も小さい。観測値と比較するとケース 3 の結果が最も近いので、相互作用バネは初期の設定値より小さい値が妥当であるものと考えられる。

以上のことから、ペンゼンモデル手法において、相互作用バネ等の設定を適切に行うことにより、比較的簡便に周辺地盤の影響を考慮した地震等解析を行うことが可能である。

表-5 文献調査を実施する対象地震

	名称	発生日時	東経	北緯	深さ(km)	マグニチュードM
1	1982年浦河沖地震	1982年3月21日11:32:05.7	142°36'0"	42°4'0"	40	7.1
2	1993年釧路沖地震	1993年1月15日20:06:07.2	144°21'2"	42°56'2"	101	7.5
3	1993年青森沖地震	1993年7月12日22:17:11.7	139°10'8"	42°46'9"	35	7.8
4	1994年東方沖地震	1994年10月4日22:22:56.9	147°40'4"	43°22'5"	28	8.2

表-6 無被害地震として考慮する対象地震

	名称	発生日時	東経	北緯	深さ(km)	マグニチュードM
1	2004年釧路沖地震	2004年11月29日03:32:14	145°16'5"	42°56'7"	48	7.1

表-7 被害報告文献一覧

発成年	地震名称	文献名	編集機関
1982	浦河沖地震	昭和 57 年(1982 年)浦河沖地震調査報告書	東京都
		昭和 57 年浦河沖地震災害記録	北海道総務部防災消防課
1993	釧路沖地震	1992 年浦河沖地震調査報告書	酒井良男
		1993 年釧路沖地震・能登半島沖地震災害調査報告書	土木学会
		1993 年釧路沖地震調査報告書	土木学会
		平成 5 年(1993 年)釧路沖地震記録書	釧路市
		平成 5 年(1993 年)釧路沖地震調査報告書	基礎地盤コンサルタンツ
1993	南西沖地震	1993 年釧路沖地震災害調査報告書 1993 年北海道南西沖地震災害調査報告書	日本建築学会
		1993 年北海道南西沖地震災害調査(速報)	日本建築学会/地震災害委員会/耐震連絡小委員会
		1993 年北海道南西沖地震調査報告書	地盤工学会
1994	東方沖地震	1994 年北海道東方沖地震被害調査報告書	飛島建設
		平成 6 年(1994 年)北海道東方沖地震調査報告書	基礎地盤コンサルタンツ

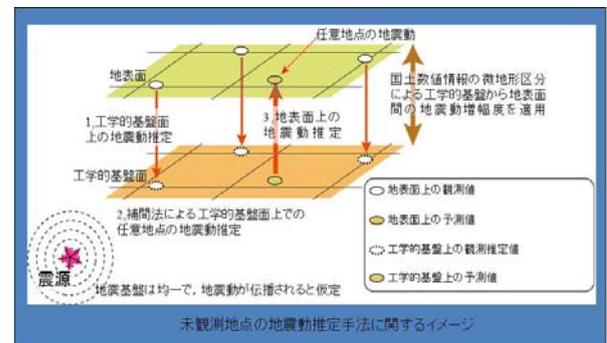


図-16 未観測地点の地震動推定手法イメージ

3. 2. 3 既往地震動記録等に基づく地震被害推定に関する検討

(1) 対象とする地震

過去の地震において被害を受けた橋梁の記録を文献から抽出する。検討対象とする地震は、地震動記録が観測されていることを考え、表-5 に示す地震を対象として被害調査を行い、検討対象とする地震記録を選定する。また、表-6 に無被害地震として考慮する対象地震を示す。文献調査の結果、被害報告として選定した文献を表-7 に示す。

(2) 被害推定のための地震動指標値

対象とした地震で記録されている被害とその地点の実測値または予測値による地震動との比較検討を実施した。比較対象とした被害は、文献による。また、地震動記録

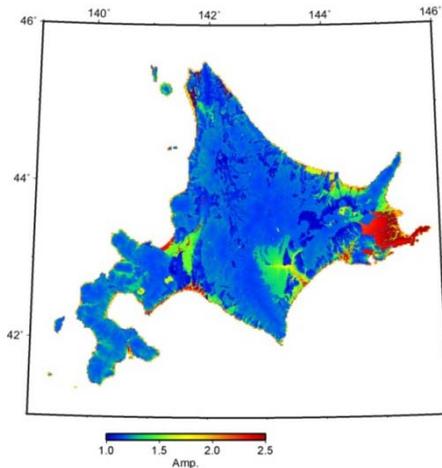


図-17 微地形区分と地震動の増幅特性の関係

表-8 被害推定に用いる各地震動指標の閾値

	軽微な被害	中規模な被害	大規模な被害
	<ul style="list-style-type: none"> ・取り付け部の段差 ・高欄の損傷 ・アスファルトの亀裂 	<ul style="list-style-type: none"> ・支承の損傷 ・桁間衝突 	<ul style="list-style-type: none"> ・桁の移動 ・橋脚の損傷 ・橋台の損傷
最大加速度	250cm/s/s	400cm/s/s	600cm/s/s
最大速度	25cm/s	60cm/s	100cm/s
計測震度	5.0	6.0	6.5
S1値	25cm/s	60cm/s	100cm/s

は、被害箇所より 10km 以内としている。

なお、地震動推定は図-16 に示す手順に従い実施しているが、地震増幅度の設定あたり現地調査を行い地域特性を加味した微地形区分に対応する地震増幅度の再設定を行った。図-17 にはその値を示す。

北海道周辺で発生した地震観測記録を有する地震から、被害地震を 1993 年釧路沖地震、無被害地震として 2004 年釧路沖地震を選定し、WISE で即時算定可能な指標である最大加速度、最大速度、計測震度について被害指標の適用性を検討した。

その結果、各々の指標に対して被害発生の下限值が設定された。その閾値は、最大加速度は 250cm/s/s、速度最大値は 25cm/s、計測震度は 5.0 を設定することが妥当であると考えられる。また、周波数を限定した場合の指標についても検討を行い、加速度 (2~3Hz) は 60cm/s/s、速度 (2~5Hz) は 25cm/s、0.3sec、0.4sec における最大加速度応答スペクトルでは 380cm/s/s とする閾値が、実態をよく反映していると考えられ、提案した被害指標において概ね発生の危険箇所が推定できることがわかった。

さらにサイト特性を利用した被害予測分布の作成を試みた結果、構造物に影響を与える周波数領域を考慮した周波数領域として 2Hz~5Hz の周波数領域に限定した速度最大値とした条件とする事で被害事例を適切に再現できることがわかった。

表-8 には、得られた結果を被害規模と各地震動指標の閾値との関係をまとめて示す。

3.3 積寒地における現場施工性等を考慮した既設 RC 橋脚の耐震補強法

3.3.1 アラミドロープ巻付け補強工法の提案

(1) 耐震補強効果の検証 (正負交番載荷試験)^{6),7)}

アラミドロープ巻立て工法の補強効果を検証するために RC 橋脚供試体の正負交番載荷試験を実施した。試験は柱の破壊形態、断面形状、ロープの巻付け間隔等をパラメータに系統的に行った。ここでは、実験結果の一例として、アラミドロープ巻立てを施した供試体 (以下、「ロープ補強」という。) と無補強供試体の結果を示す。

1) 正負交番載荷実験の方法

供試体は、市中心部の高架橋における一般的な橋脚の 1/4 程度の規模である。供試体は柱部が 600×600mm の正方形断面、高さ 1800mm で、せん断スパン比は 4.0 である。柱部には柱軸方向鉄筋として SD345 の D25 を 150mm 間隔で、帯鉄筋として SD295 の D10 を 200mm 間隔で配筋した。引張鉄筋比は 0.643%、せん断補強筋比は 0.119% である。コンクリート標準示方書³⁾に基づいて算出した無補強供試体の耐力は、曲げ降伏時の耐力が 228.9kN、曲げ終局時の耐力が 286.2kN、せん断耐力が 260.3kN であり、曲げ降伏後のせん断破壊型の破壊形態である。

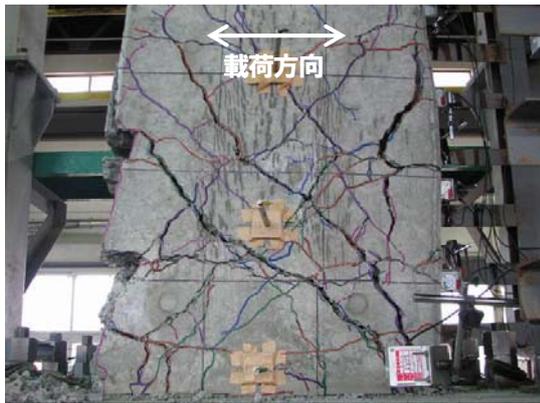
供試体のフーチング部を床に固定し、柱部天端にピン支承を設置した。上部工死荷重反力を想定して、120kN (0.33N/mm²) の鉛直荷重をピン支承を介して柱部天端に載荷し、交番載荷中において一定に保持した。水平方向の交番荷重は、フーチング天端から高さ 2105mm の位置のピン支承の中心部に、水平方向のジャッキにより載荷した。載荷は変位制御により実施した。計算上の降伏耐力の 50% の水平荷重を 1 サイクル載荷してコンクリートにひび割れを導入した後、橋脚基部の軸方向鉄筋のひずみが降伏ひずみに達する際の載荷点変位 δy の整数倍ごとに 3 サイクルの繰り返し載荷を実施した。

ロープ補強においてはアラミドロープを供試体柱部の全高に対して 25mm 間隔で螺旋状に巻付けた。コンクリートへのロープの食込みを防ぐために、柱の四隅にはロープの巻付け前に山形鋼を設置している。ロープは人力により巻付け、端部はロープワークのみで定着した。ロープへの樹脂の含浸は行っていない。

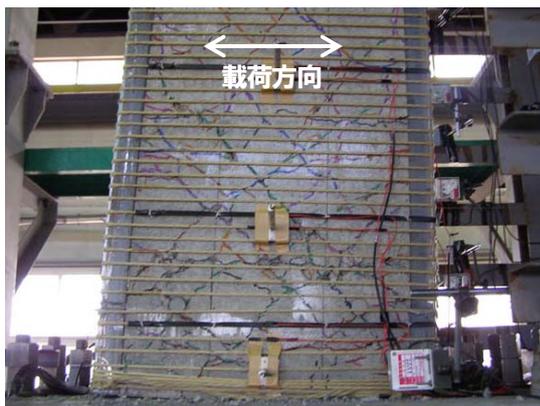
2) 正負交番載荷試験の結果

図-18 に供試体の損傷状況、図-19 に載荷点位置の荷重-変位関係を示す。無補強およびロープ補強ともに、載荷ステップ 1 δy において柱全高にわたって供試体の載荷面に水平方向の曲げひび割れが発生し、載荷ステップの進行とともに柱側面で斜め方向にひび割れが伸展した。

その後、無補強においては 4 δy において柱部軸方向鉄筋に沿った縦方向のひび割れが柱基部に生じた後、図-18 (a) のように 6 δy で柱基部周辺のかぶりコンクリートが剥落するとともに軸方向鉄筋が座屈し、図-19 (a) に示すように耐力が急激に低下した。一方、ロープ補強においては、最大耐力は無補強と同程度であるものの、軸方向鉄筋の座屈が開始した後も図-18 (a) のようにアラミドロープの拘束により、かぶりコンクリートが剥落せず、

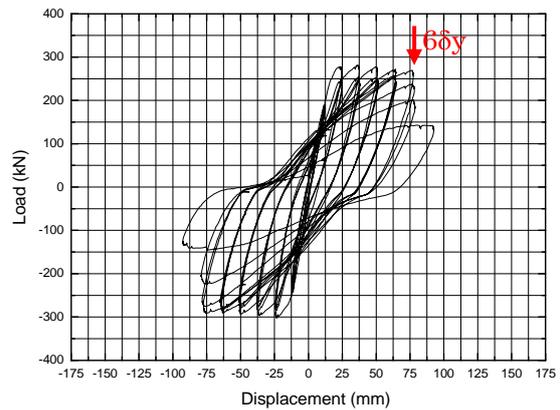


(a) 無補強 (6dy 終了後)

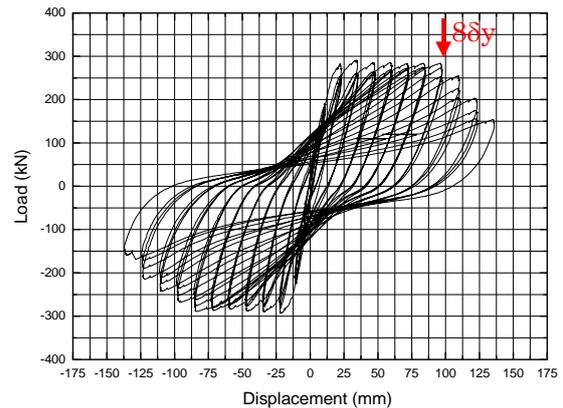


(b) アラムドロップ巻立て (8dy 終了後)

図-18 橋脚基部の損傷状況



(a) 無補強



(b) アラムドロップ巻立て

図-19 荷重点位置の荷重-変位関係

図-19(b) のように無補強に比べて変形性能が大きく向上し、耐力低下開始後も緩やかに耐力が低下する傾向を示した。

(2) アラムドロップを用いた既設 RC 橋脚の耐震補強工法の設計手法の提案⁶⁾

正負交番荷重試験結果より、アラムドロップ巻立ての補強効果の特徴を以下のように整理した。

- a) 耐力低下が開始する変位が大きくなる
- b) 耐力低下開始後の荷重-変位関係の下降勾配が緩やかになる
- c) 部材の最大曲げ耐力は増加しない。

これらを踏まえて、17 ケースの正負交番荷重試験の結果を用いてアラムドロップ巻立ての補強効果を算定する実験式を提案するとともに、アラムドロップ巻立て工法の設計法を「アラムドロップを用いた耐震補強設計マニュアル(案)」としてとりまとめた。図-20 に目次を示す。

4. まとめ

4.1 地域・地盤特性を考慮した設計入力地震動の提案

4.1.1 北海道における地震動特性の整理

これまでに北海道で観測した記録および文献より、北海道に大きな影響を及ぼす地震発生源とその諸元を整理することが出来た。また、北海道各地で危険度の高い震源を明確化することで、各地において適正な安全性を確

アラムドロップを用いた耐震補強設計マニュアル(案)

- 1 章 総則
 - 1.1 適用の範囲
 - 1.2 用語の定義
 - 1.3 記号
- 2 章 連続繊維ロープ巻付け補強設計の基本
 - 2.1 補強設計の目的
 - 2.2 補強設計の前提
 - 2.3 補強設計の流れ
- 3 章 材料および材料の設計用値
 - 3.1 一般
 - 3.2 特性値
 - 3.3 設計強度および材料係数
 - 3.4 応力ひずみの関係
 - 3.5 ヤング係数
- 4 章 補強設計
 - 4.1 一般
 - 4.2 設計曲げ耐力の算定
 - 4.3 設計せん断耐力の算定
 - 4.4 変形性能の算定
 - 4.5 残留変位の算定
- 5 章 構造細目
 - 5.1 連続繊維ロープ
 - 5.2 角部の処理
 - 5.3 連続繊維ロープの季節鉄筋コンクリート橋脚への定着
 - 5.4 連続繊維ロープの巻き付け
 - 5.5 連続繊維ロープの継ぎ手
 - 5.6 連続繊維ロープの中間拘束
 - 5.7 連続繊維ロープの保護工

図-20 アラムドロップを用いた耐震補強設計マニュアル(案)の目次

保しつつ経済的な耐震設計（耐震補強含む）を実施するための基礎的データとなると考えられる。

4.1.2 設計入力地震動の提案

ここでは、各地で危険度の高い地域地震動を基にして、合理的で適正な耐震設計のための加速度応答スペクトルの提案を行うとともに設計用波形の算出に関する手順等についてとりまとめた。

経験的地震力による耐震設計を行う場合には、道示で示されている地震動で適正である地域が多く確認されたが、より高いレベルの地震動を考慮すべき地域も示された。

4.2 北海道の特殊性を考慮した橋梁耐震設計法の提案

4.2.1 地盤特性が橋梁耐震性能に及ぼす影響の検討

北海道は積雪寒冷という特殊な気象環境下にあり、冬期凍結が想定される地盤においては、季節により構造物の挙動が大きく変動することが懸念される。このため、凍結時地盤物性を調査し、その物性値を用いて地盤凍結時の挙動変動について詳細解析を行い検討した。

その結果として、地盤凍結時における下部工への作用断面力は、平温時に比較して大きく変化する可能性が確認できた。

4.2.2 地域特性を考慮した耐震設計法の提案

凍結地盤による下部工への影響が確認でき、設計時における考慮が必要であることが示された。しかしながら、現在の設計法で多く用いられる解析手法では、その影響を考慮することが難しい。しかし、はり～バネ～質点系の2次元骨組みモデル（ペンゼンモデル）により可能なことが示され、凍結地盤の影響を受けた地震時応答に加味した耐震設計（耐震補強含む）を簡便に実施出来るものと考えられる。

4.2.3 既往地震記録等に基づく地震被害推定に関する検討

被害推定の対象を橋梁と限定して、その地震時被害推定に最適な地震動指標について、実測地震動または推定地震動と被害状況との比較による検討を行った。

その結果、被害規模と各地震動指標の閾値について示した提案をすることが出来た。

4.3 積寒地における現場施工性等を考慮した既設 RC 橋脚の耐震補強法

4.3.1 アラミドロープ巻付け補強工法の提案

我が国の道路橋において非常に適用事例が多い RC 橋脚を対象に、積雪寒冷地域の特徴に配慮した耐震補強工法について検討を行った。以下に本研究で得られた成果を示す。

1) 冬季の低温環境や施工可能期間が短いといった積雪寒冷地特有の条件に配慮した耐震補強工法について検討するために、積雪寒冷地において耐震補強工法に求められる事項を整理した。そして、防寒養生が

必要なく、また短期間での施工が可能な材料であるアラミド繊維製のロープを抽出し、既設 RC 橋脚の耐震補強工法としてアラミドロープ巻立て工法を提案した。

- 2) アラミドロープ巻立て工法の補強効果を検証するために正負交番載荷試験を実施した。試験は破壊形態、断面形状、ロープの巻付け間隔等をパラメータに系統的に行った。その結果、アラミドロープの拘束によりかぶりコンクリートの剥離が抑制され、耐力低下が開始する変位を大きくするとともに、耐力低下開始後の荷重-変位関係の下降勾配を緩やかにすることができることが明らかになった。
- 3) 正負交番載荷試験の結果より、アラミドロープ巻立て補強の補強効果の特徴を踏まえて実験式を提案した。
- 4) 上記の成果を整理し、アラミドロープ巻立て工法の設計法を「アラミドロープを用いた耐震補強設計マニュアル（案）」としてとりまとめた。

参考文献

- 1) 宇佐美龍夫：最新版 日本被害地震総覧[416-2001]、東京大学出版会
- 2) 宇津徳治：1885年～1980年の日本の地震活動、M6以上の地震および地震被害の再調査、地震研究所彙報、54、253-308、1979
- 3) 宇津徳治：日本付近のM6.0以上の地震および被害地震の表：1885年～1980年、地震研究所彙報、57、401-463、1982
- 4) 宇津徳治：同（訂正と追加）、地震研究所彙報、60、1985
- 5) 気象庁：気象庁震源カタログ
- 6) 三田村、本間、下村、丸山：アラミドロープを用いた RC 橋脚の鉄筋段落し部のじん性補強に関する検討、コンクリート工学年次論文集、Vol. 30, No. 3, pp. 1267-1272, 2008
- 7) 塩畑、三田村、渡辺、下村、丸山：アラミドロープを用いた既設鉄筋コンクリート橋脚の耐震補強に関する実験的研究、構造工学論文集、Vol. 56A, pp. 440-453, 2010
- 8) 土木学会：2007年制定 コンクリート標準示方書【設計編】、pp. 83-86, 2008. 3